



Biyoteknoloji

Nanoteknoloji

Tasarım

**BİYONANOTASARIM
LABORATUVARI**

BMM 205

Malzeme Biliminin Temelleri

Metallerin

Kırılması, Yorulması ve Sürünmesi

Bölüm - 2

Dr. Ersin Emre Ören

Biyomedikal Mühendisliği Bölümü

Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Ankara - TÜRKİYE

eeoren@etu.edu.tr

<http://eeoren.etu.edu.tr>

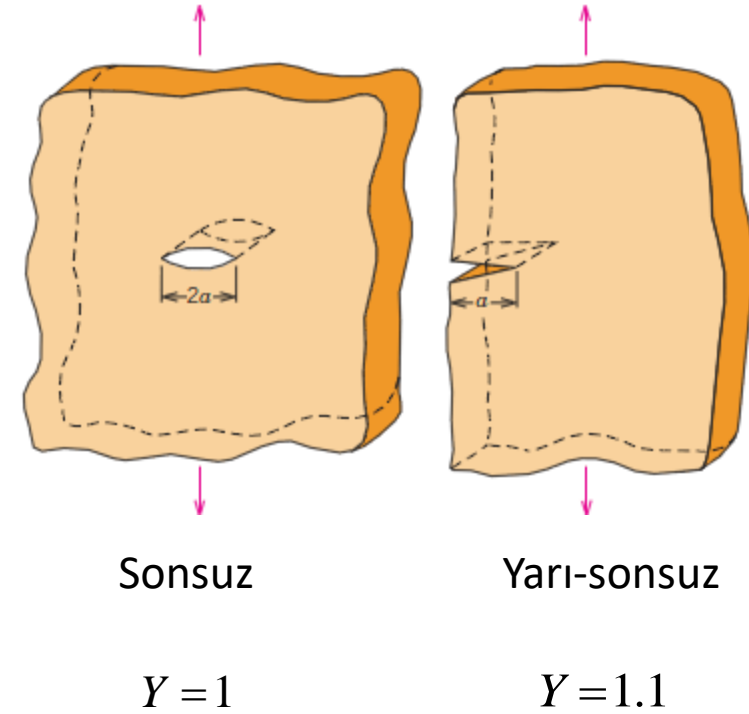
Kırılma Tokluğu (Fracture Toughness)

Malzemenin çatlak bulunması durumunda gevrek kırılmaya karşı gösterdiği direncin ölçüsüdür.

Gevrek malzemelerde çatlak ilerlemesi için gereken gerilim miktarı (Critical stress for crack propagation) :

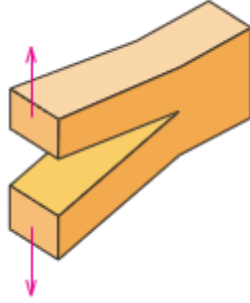
Kırılma Tokluğu (Fracture Toughness) $K_C = Y\sigma_c\sqrt{\pi a}$

$$K_C = \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$$

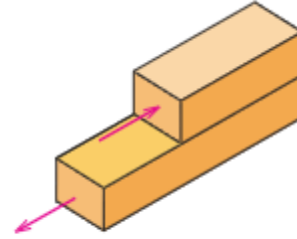


Kırılma Modları

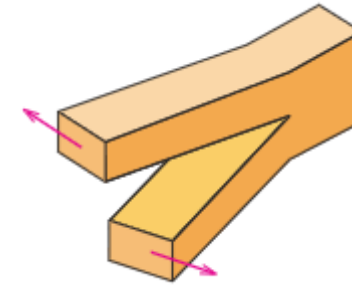
Yüzey çatlakları çeşitli yükler altında üç farklı şekilde kırılmaya neden olabilir:



I. Mod
Açılma (çekme modu)



II. Mod
Kayma modu



III. Mod
Yırtılma modu

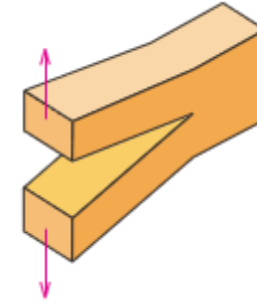
Görece ince malzemelerde **Kırılma Tokluğu K_c** değerleri malzemenin kalınlığına bağlıdır.

Ama malzeme kalınlığı malzeme içerisindeki çatlak boyutundan çok daha büyükse **Kırılma Tokluğu K_c** değerleri malzemenin kalınlığından bağımsız hale gelir.

Düzlem Gerinme Kırılma Tokluğu (Plane Strain Fracture Toughness)

Gerinmelerin tek boyutta sadece bir düzlem üzerinde olduğu duruma **düzlem gerinme (plane strain)** durumu denir.

$$K_{Ic} = Y\sigma_c\sqrt{\pi a}$$



I. Mod
Açılma (çekme modu)

Düzlem Gerinme Kırılma Tokluğu malzemelerin temel özelliklerinden birisidir ve sıcaklık gerinim hızı ve mikroyapıya bağlıdır.

Gevrek Malzemeler: Düşük K_{Ic}

Sünek Malzemeler: Görece yüksek K_{Ic}

Düzlem Gerinme Kırılma Tokluğu (Plane Strain Fracture Toughness)

| <i>Material</i> | <i>Yield Strength</i> | | <i>K_{Ic}</i> | |
|---|-----------------------|------------|-----------------------|----------------|
| | <i>MPa</i> | <i>ksi</i> | <i>MPa√m</i> | <i>ksi√in.</i> |
| Metals | | | | |
| Aluminum Alloy ^a (7075-T651) | 495 | 72 | 24 | 22 |
| Aluminum Alloy ^a (2024-T3) | 345 | 50 | 44 | 40 |
| Titanium Alloy ^a (Ti-6Al-4V) | 910 | 132 | 55 | 50 |
| Alloy Steel ^a (4340 tempered @ 260°C) | 1640 | 238 | 50.0 | 45.8 |
| Alloy Steel ^a (4340 tempered @ 425°C) | 1420 | 206 | 87.4 | 80.0 |
| Ceramics | | | | |
| Concrete | — | — | 0.2–1.4 | 0.18–1.27 |
| Soda-Lime Glass | — | — | 0.7–0.8 | 0.64–0.73 |
| Aluminum Oxide | — | — | 2.7–5.0 | 2.5–4.6 |
| Polymers | | | | |
| Polystyrene (PS) | — | — | 0.7–1.1 | 0.64–1.0 |
| Poly(methyl methacrylate) (PMMA) | 53.8–73.1 | 7.8–10.6 | 0.7–1.6 | 0.64–1.5 |
| Polycarbonate (PC) | 62.1 | 9.0 | 2.2 | 2.0 |

^a **Source:** Reprinted with permission, *Advanced Materials and Processes*, ASM International, © 1990.

Düzlem Gerinme Kırılma Tokluğu Kullanımı ile Tasarım

$$K_{Ic} = Y\sigma_c\sqrt{\pi a}$$

Tasarım Parametreleri

| | | |
|-----------------|-------------------|------------------|
| K_{Ic} | σ | a |
| Kırılma tokluğu | Uygulanan gerilim | Çatlak boyutları |

Tahribatsız Muayene (Nondestructive Testing): Çatlak boyutlarının belirlenmesi

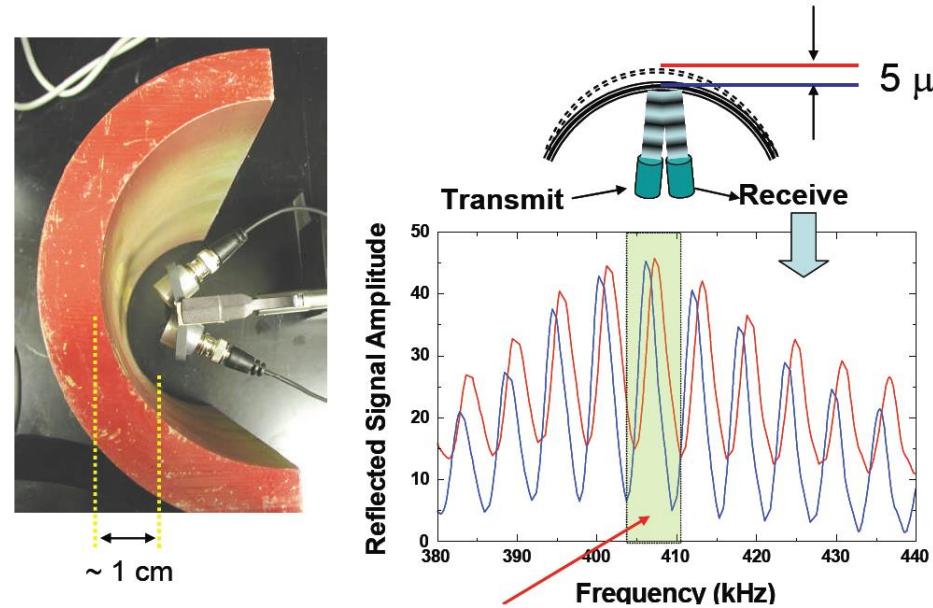
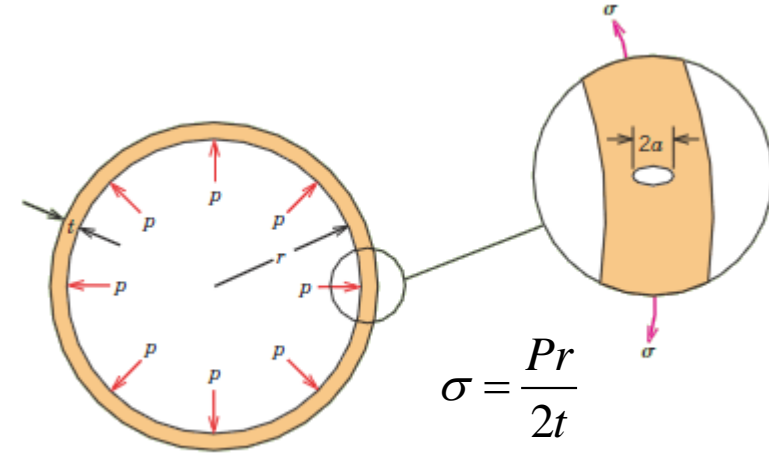


Figure 6. Variation in pipe cross-section and its determination

Soru

Yüksek basınç altında çalışacak ince duvarlı silindir şeklinde (yarıçapı r , duvar kalınlığı t olan) bir basınç-borusu dizayn edilecektir. Kitabınızdaki Tablo B.5'i kullanarak malzeme seçimi yapınız.



$$K_{Ic} = Y\sigma_c\sqrt{\pi a}$$

1. Tasarım: Çatlak ilerlemesinden önce plastik deformasyon olsun

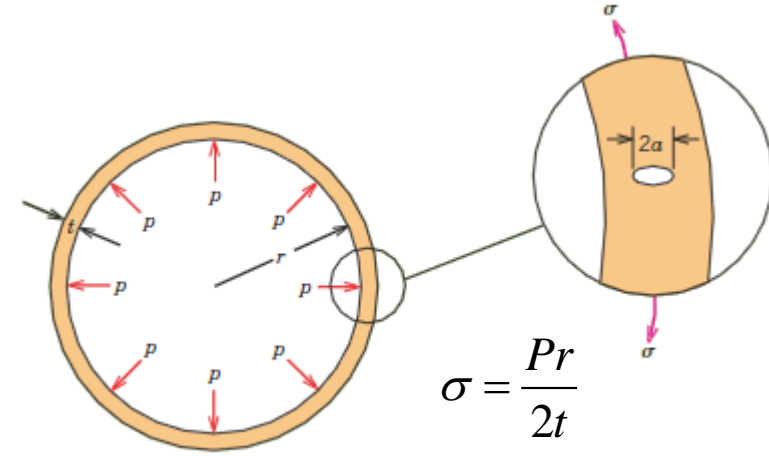
$$\Rightarrow K_{Ic} = Y\left(\frac{\sigma_y}{N}\right)\sqrt{\pi a}$$

$$\Rightarrow a_{kritik} = \frac{N^2}{Y^2\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_y}\right)^2$$

| Material | $\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_y}\right)^2 (mm)$ |
|----------------------------|---|
| Medium carbon (1040) steel | 43.1 |
| AZ31B magnesium | 19.6 |
| 2024 aluminum (T3) | 16.3 |
| Ti-5Al-2.5Sn titanium | 6.6 |
| 4140 steel | 5.3 |
| (tempered @ 482°C) | |
| 4340 steel | 3.8 |
| (tempered @ 425°C) | |
| Ti-6Al-4V titanium | 3.7 |
| 17-7PH steel | 3.4 |
| 7075 aluminum (T651) | 2.4 |
| 4140 steel | 1.6 |
| (tempered @ 370°C) | |
| 4340 steel | 0.93 |
| (tempered @ 260°C) | |

Soru

Yüksek basınç altında çalışacak ince duvarlı silindir şeklinde (yarıçapı r , duvar kalınlığı t olan) bir basınç-borusu dizayn edilecektir. Kitabınızdaki Tablo B.5'i kullanarak malzeme seçimi yapınız.



$$K_{Ic} = Y\sigma_c\sqrt{\pi a}$$

2. Tasarım: Kırılmadan önce sızıntı yapsın (leak before break) plastik deformasyon olmasın

$$\Rightarrow a_{kritik} = \frac{t}{2} \quad \Rightarrow a_{kritik} = t \quad \text{Güvenlik için}$$

$$\sigma = \frac{Pr}{2t} \Rightarrow t = \frac{Pr}{2\sigma} \Rightarrow t = \frac{Pr}{2\sigma_y}$$

$$K_{Ic} = Y\sigma_c\sqrt{\pi a} \Rightarrow K_{Ic} = Y\sigma_y\sqrt{\pi \frac{Pr}{2\sigma_y}}$$

$$\Rightarrow P = \frac{2}{Y^2\pi r} \left(\frac{K_{Ic}^2}{\sigma_y} \right)$$

| Material | $\frac{K_{Ic}^2}{\sigma_y}$ (MPa-m) |
|----------------------------------|-------------------------------------|
| Medium carbon (1040) steel | 11.2 |
| 4140 steel (tempered @ 482°C) | 6.1 |
| Ti-5Al-2.5Sn titanium | 5.8 |
| 2024 aluminum (T3) | 5.6 |
| 4340 steel (tempered @ 425°C) | 5.4 |
| 17-7PH steel | 4.4 |
| AZ31B magnesium | 3.9 |
| Ti-6Al-4V titanium | 3.3 |
| 4140 steel (tempered @ 370°C) | 2.4 |
| 4340 steel (tempered @ 260°C) | 1.5 |
| 7075 aluminum (T651) | 1.2 |

Yorulma (Fatigue) Malzemelerde, dinamik ve değişken (dalgalanan) gerilimler altında oluşan bir bozulma mekanizmasıdır.

Köprüler, uçaklar ve makine parçalarında gözlenir.

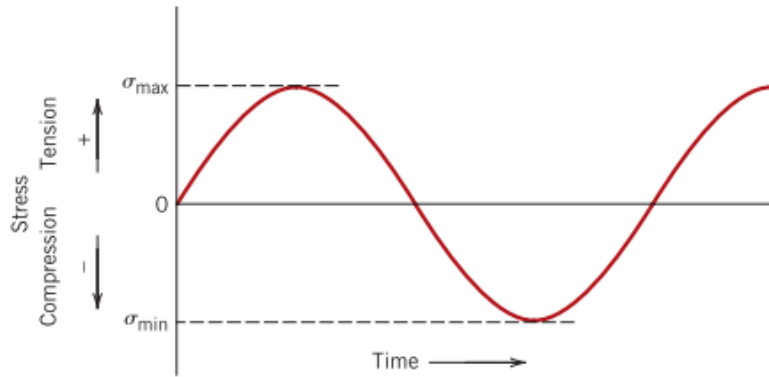
Dinamik yük altında malzemeler durağan yük altındaki akma ve çekme dayanımlarının çok altındaki yük değerlerinde kırılabilirler.

Yorulma (fatigue) günümüzde metallerde meydana gelen bozulmaların neredeyse % 90'ının ana nedenidir. Değişken yük altında malzemeler durağan yük altındaki akma ve çekme dayanımlarının çok altındaki yük değerlerinde kırılabilirler.

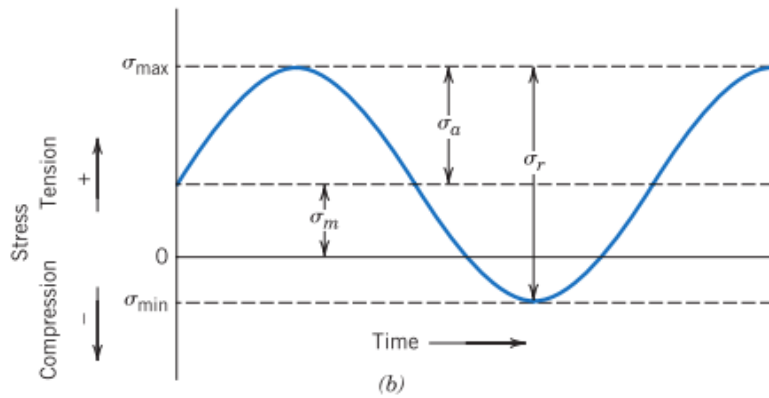
Ayrıca, yorgunluk hiçbir uyarı olmadan aniden ortaya çıkar ve çok yıkıcı etkileri olabilir.

Yorulma süreci çatlakların oluşumu ve ilerlemesi ile işler ve genellikle kırılma yüzeyi uygulanan gerilme yönüne diktir.

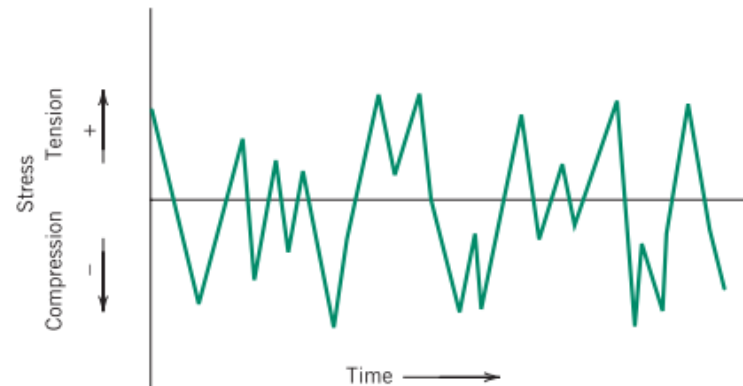
Döngüsel Gerilimler (Cyclic Stresses)



**Ters Gerilim Döngüsü
(Reversed Stress Cycle)**



**Tekrarlanan Gerilim Döngüsü
(Repeated Stress Cycle)**



**Rasgele Gerilim Döngüsü
(Random Stress Cycle)**

Ortalama gerilim (mean)

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\min} + \sigma_{\max}}{2}$$

Gerilim aralığı (range)

$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

Gerilim genliği (amplitude)

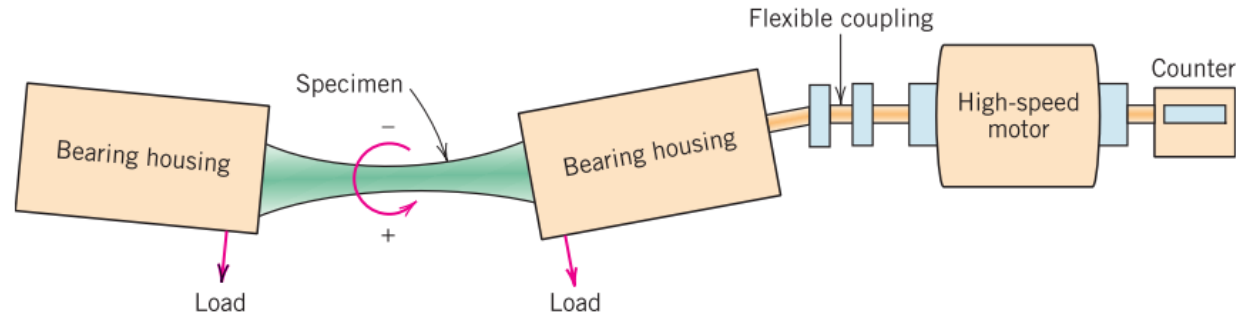
$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

Gerilim oranı (ratio)

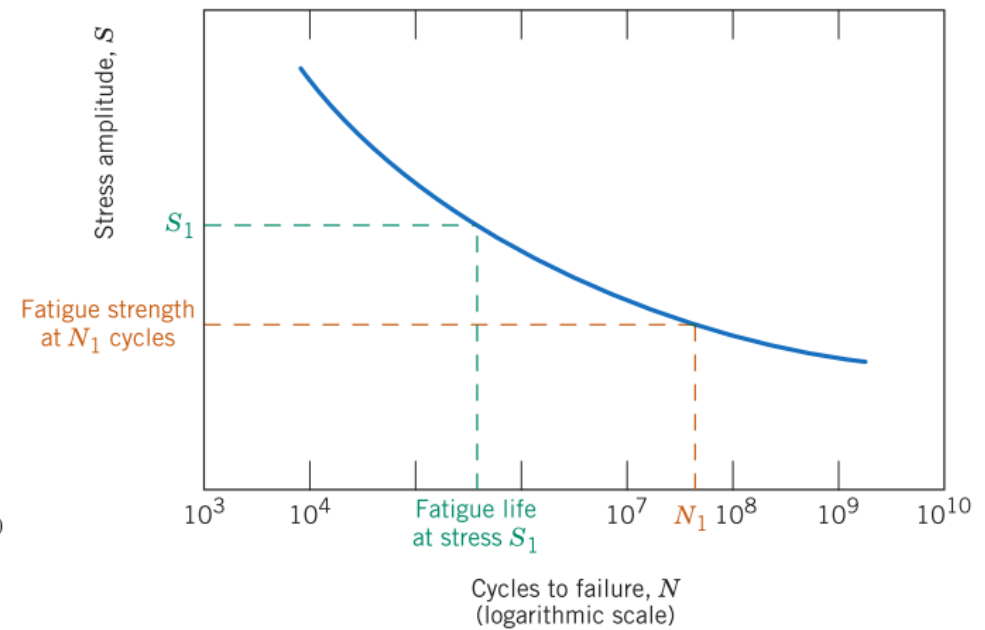
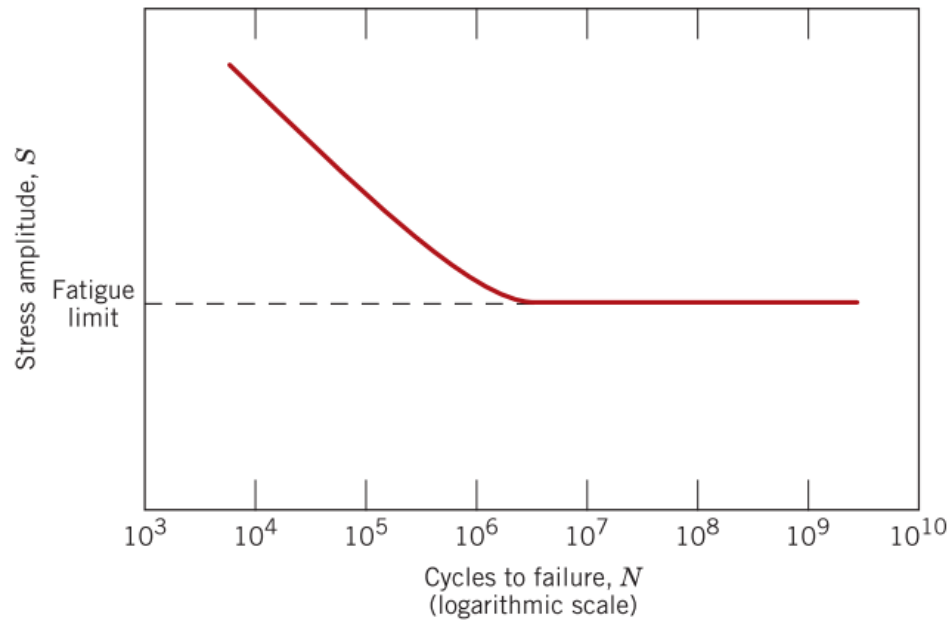
$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

Stress Döngü Sayısı Eğrileri (The S – N Curve)

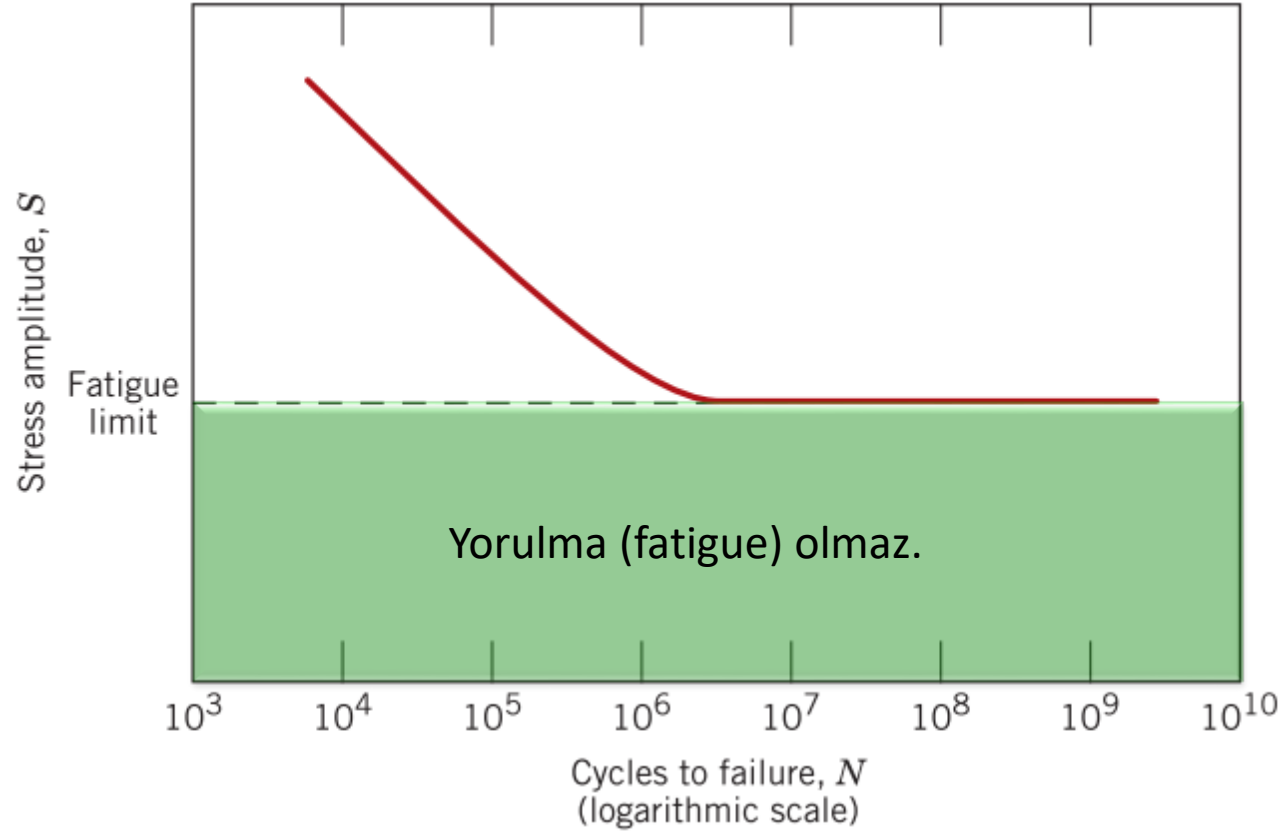
Yorulma test cihazı:



Malzemelerde iki farklı S–N davranışı gözlenmektedir.



Bazı demir bazlı ve titanyum alaşımlarında S–N eğrileri N değeri arttıkça x eksenine paralel hale gelirler.

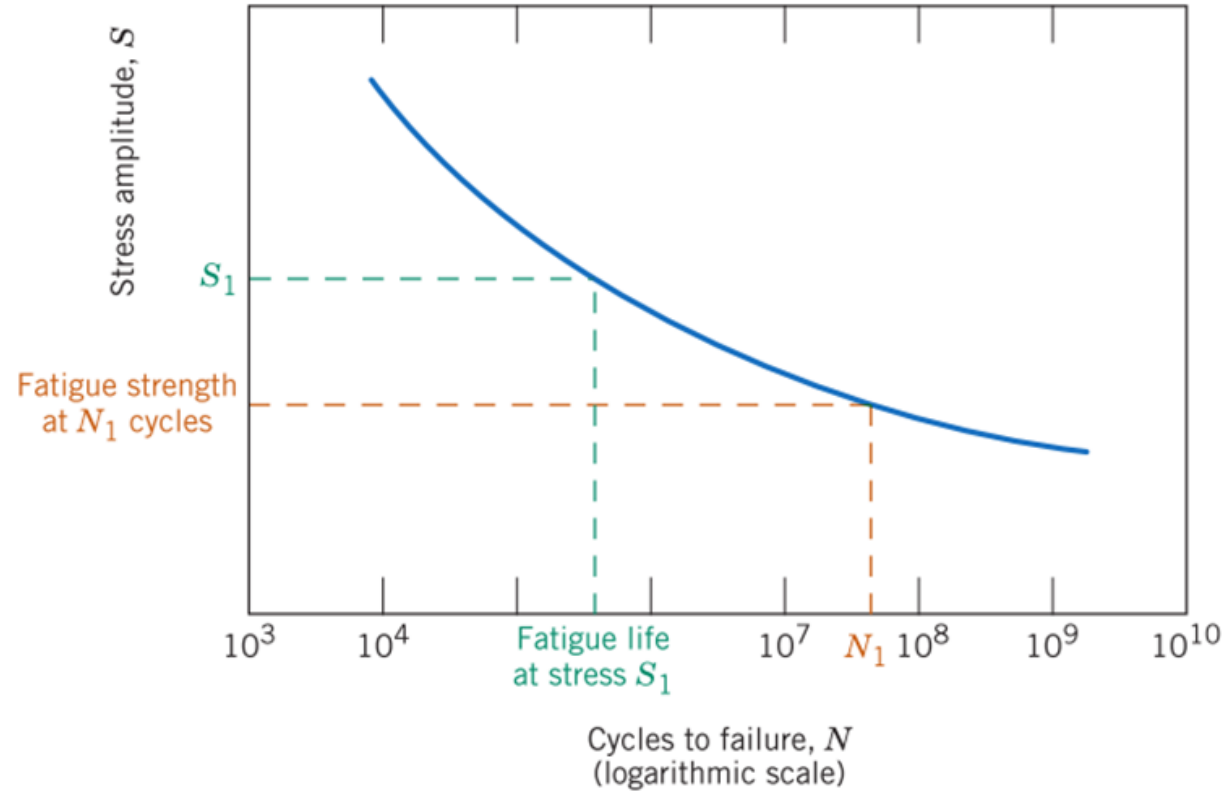


Yorulma Limiti (fatigue limit veya endurance limit): Bazı malzemeler belirli bir gerilim değerinin altında yorulma olmaz.

Birçok çelik için yorulma limiti değeri çekme dayanımının % 35'i ile % 60'ı arasında değişmektedir.

METALLERDE KIRILMA, YORULMA VE SÜRÜNME

Al, Cu, Mg, gibi birçok demir dışı alaşımlarda ise yorulma limiti yoktur.

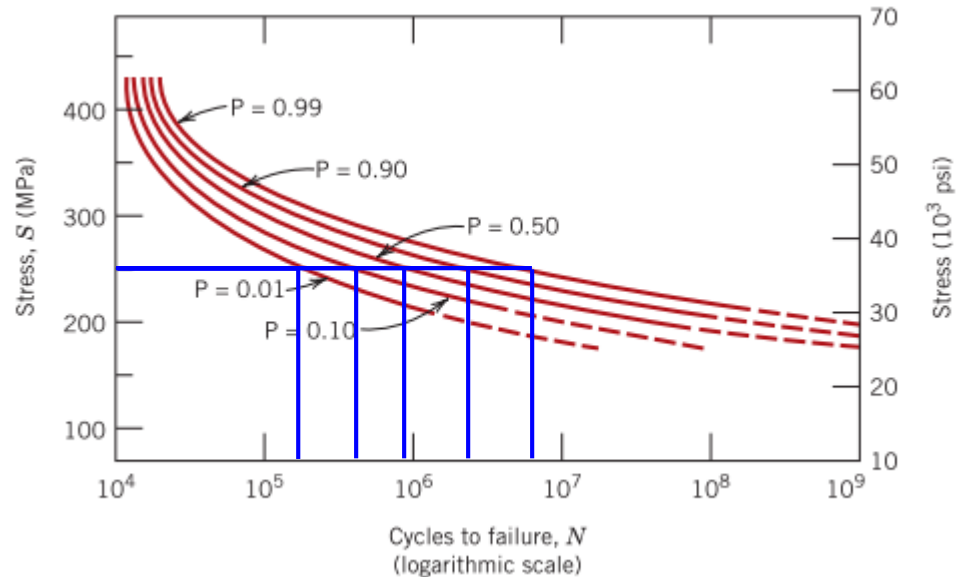
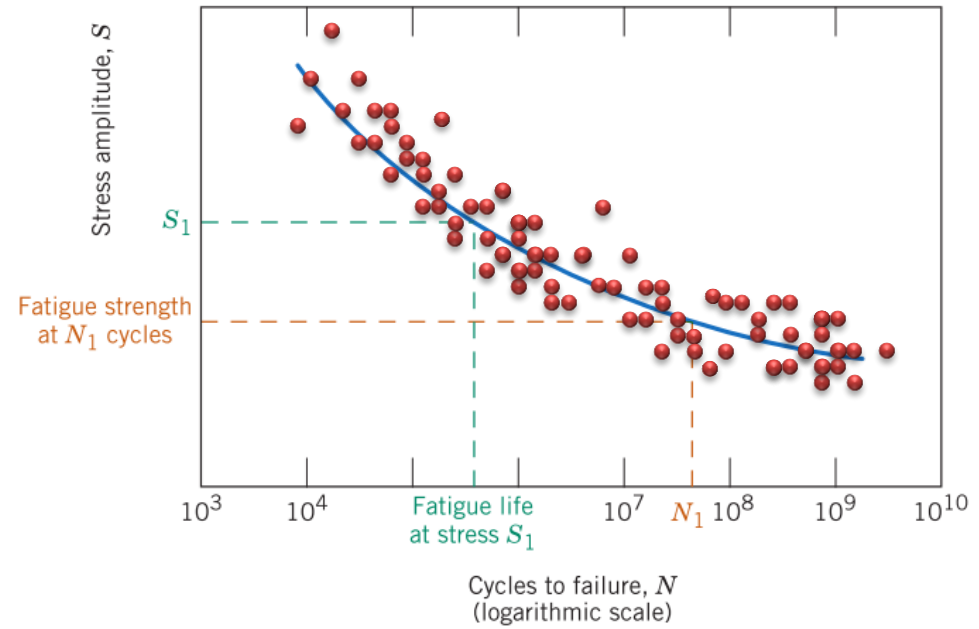
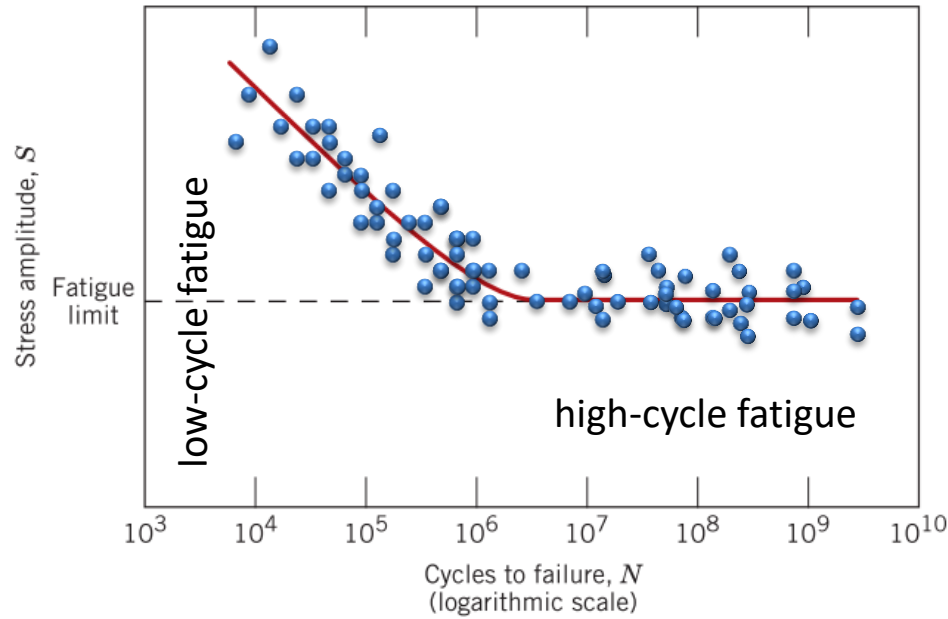


Sonuç olarak yorulma eninde sonunda uygulanan gerilim değerinden bağımsız olarak olur. Bu tip malzemeler için güvenli kullanım aralığı yorulma dayanımı ile tanımlanır.

Yorulma Dayanımı (fatigue strength): 10^7 döngü sayısına denk gelen gerilim değeridir.

Yorulma Ömrü (fatigue life): Belirli bir gerilim altında malzemenin bozunması için gereken döngü sayısıdır.

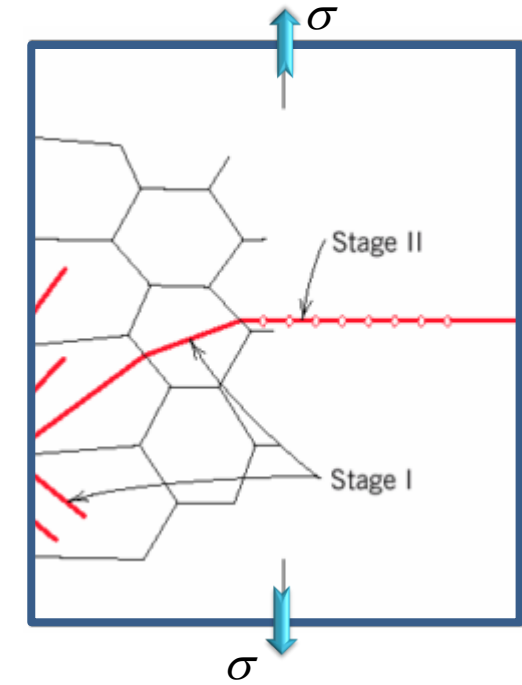
METALLERDE KIRILMA, YORULMA VE SÜRÜNME



Yorulma: Çatlak Oluşumu ve İlerlemesi

Yorulma üç ana adımda gelişir

- (1) Çatlak oluşumu: Gerilim yoğunlaştırıcılar (stress raisers) civarında küçük bir çatlak oluşur.
- (2) Çatlak her stress döngüsünde özel kristal düzlem ve yönlerde küçük ve adım adım ilerler
- (3) Kırılma, büyüyen çatlaklar belirli kritik bir değere ulaştığında çok hızlı bir şekilde aniden olur.



Çatlak oluşum bölgeleri: Yüzey çizikleri, keskin hatlar, çentikler, üretim kalıntıları ve benzerleridir. Bunlara ek olarak dögüsel yüklemeler yüzeylerde dislokasyon kayma basamakları gibi mikroskopik devamsızlıklar oluşturabilir.

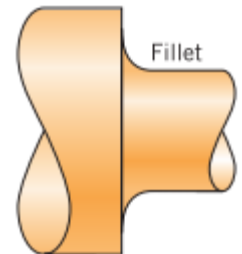
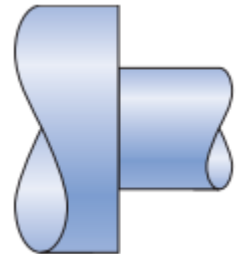
Çatlak ilerlemesi için gereken dögü sayısı

↑

Kırılma için gereken dögü sayısı: $N_f = N_i + N_p$

↓

Çatlak oluşumu için gereken dögü sayısı



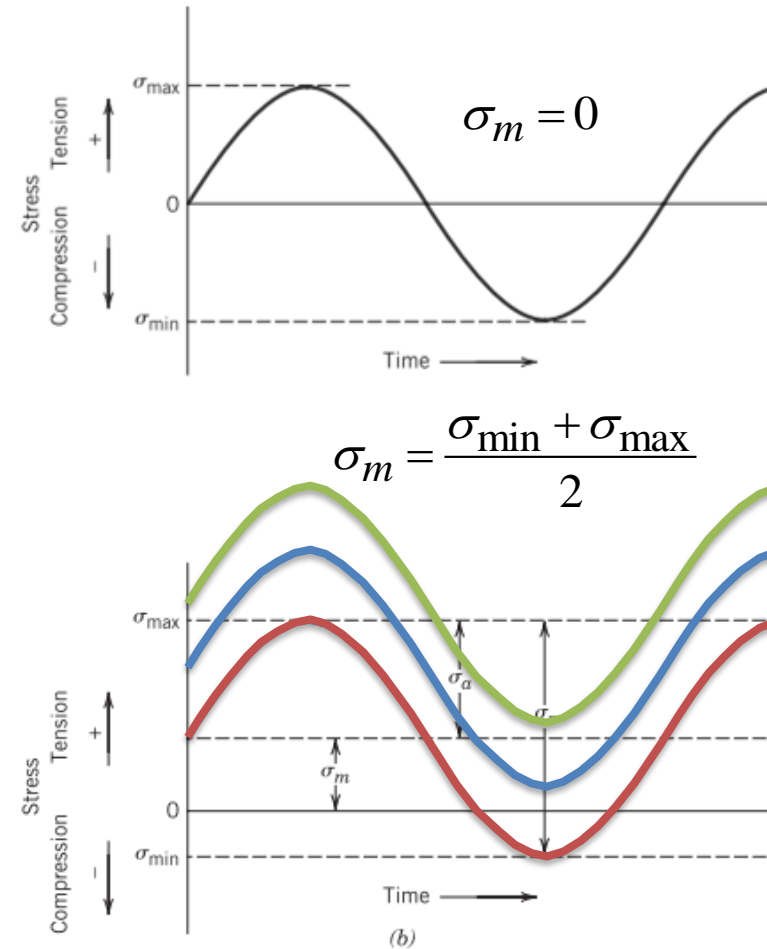
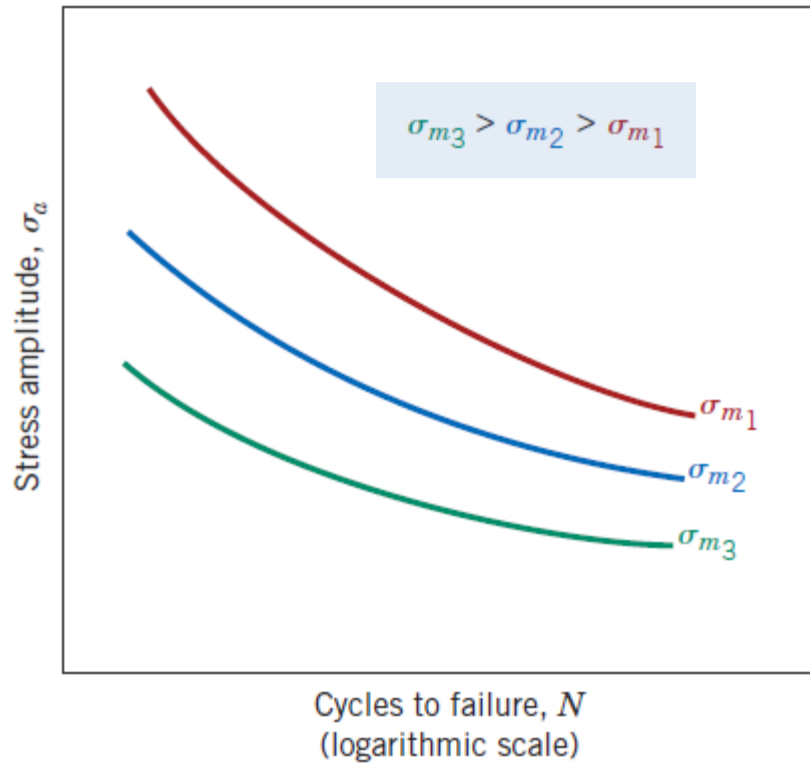
Fillet

Yorulma ömrünü etkileyen faktörler:

Yüzeylerin kalitesi (çizikler, keskin hatlar vb...)

Uygulanan gerilmelerin değeri (ortalama gerilim, gerilim genliği).

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$



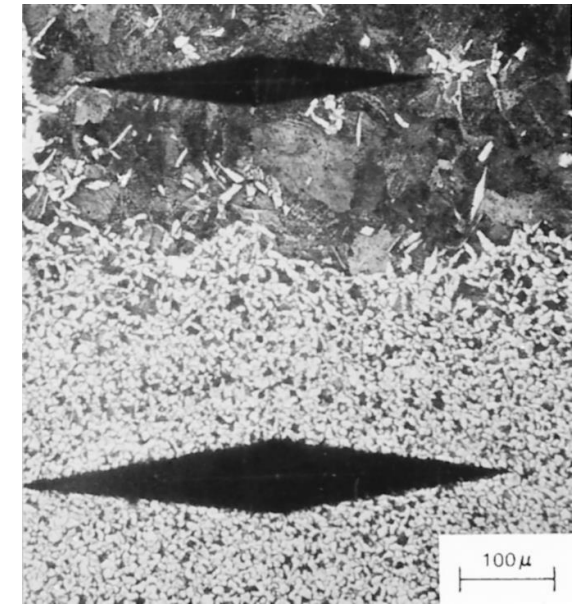
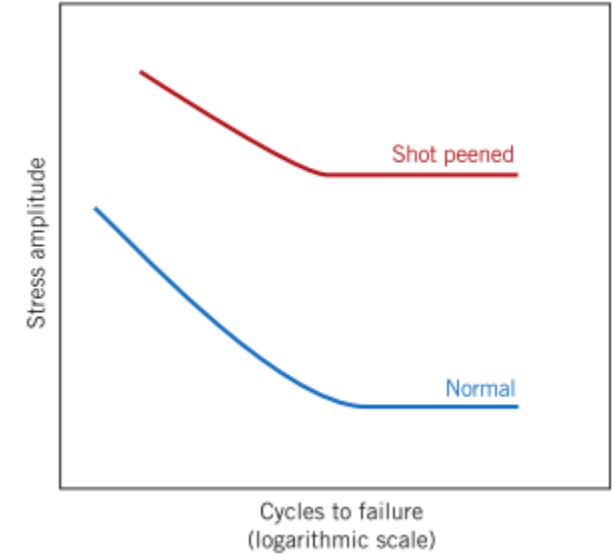
Yorulma ömrünü arttırıcı çözümler:

Parlatma (Polishing): Yüzeyde üretim sırasında ortaya çıkan kusurları ortadan kaldırır.

Yüzeyde basma stresleri oluşturma (Shot peening): Yüzeyde ince bir katman boyunca basma stresleri oluşturularak kullanım sırasında uygulanacak çekme stresleri karşılanır. (Yüzeye yüksek hızlarda küçük çelik bilyalar gibi aşındırıcılar fırlatılır).

Karbürleme / Nitrürleme: Yüzeyde ince bir katman boyunca (1 mm) C veya N yoğunluğunu difüzyon ile arttırmak.

- Dış yüzeyin sertliğini arttırır.
- Ek olarak bu bölgelerde basma stresleri oluşturur.



Çevresel Etkenler (Environmental Effects):

Isı Yorulması (Thermal Fatigue): Malzemeler ısı değişimleri ile genişirler ve büzülürler dolayısı ile ısıl gerilimler altına girerler. Bu etki malzemeler başka malzemelere sıkı bir şekilde bağlanmışsa ya da başka parçalar arasında sıkışmış ise artar.

Isıl genişleme katsayısı

$$\sigma = \alpha_l E \Delta T$$

Çözüm:

Isıl genişleme katsayısı düşük malzeme kullanımı.

Korozyon Yorulması (Corrosion Fatigue): Kimyasal etkileşmeler sonucunda malzeme yüzeylerinde küçük bozukluklar oluşabilir, bu bozukluklar gerilim arttırıcı rol oynarlar.

Korozyon çatlak ilerlemesini arttırır ve yorulma ömrünü düşürür.

Çözüm:

Eğer mümkünse çevrenin malzeme üzerindeki korozyon etkisini düşürecek önlemler alınır.

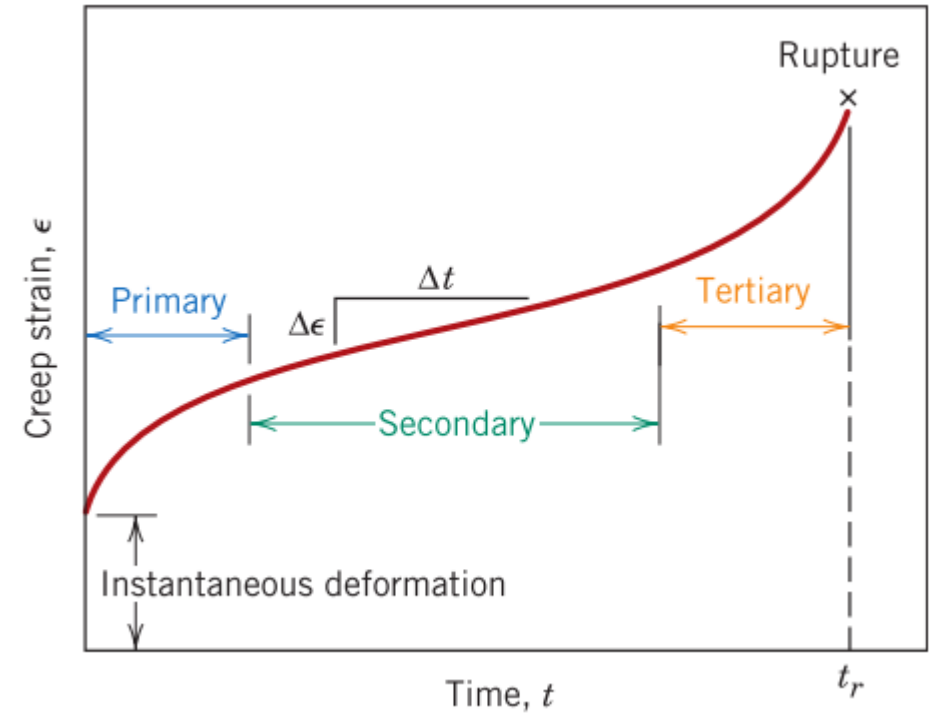
Yüzey çeşitli kaplamalar ile çevrenin korozyon etkisinden korunur.

Sürünme (Creep): Malzemelerde, sabit yük altında ve yükseltilmiş sıcaklıklarda ($>0.4 T_m$) zamana bağlı olarak oluşan kalıcı deformasyona denir.

Jet motorları, türbin kanatları, buhar jeneratörleri...



- 1. Anlık deformasyon:** büyük oranda elastiktir.
- 2. Birincil/Geçici Sürünme:** Gerilme-zaman grafiğinin eğimi giderek azalır (gerilim ile sertleşme)
- 3. İkincil/Kararlı Sürünme:** Gerilme-zaman grafiğinin eğimi sabit kalır (balance of work-hardening and recovery).
- 4. Üçüncül Sürünme:** Eğim hızla artarak *kopma (rupture)* olur. (Malzeme içerisinde çatlaklar, boşluklar, tane sınırı ayrışması olur).

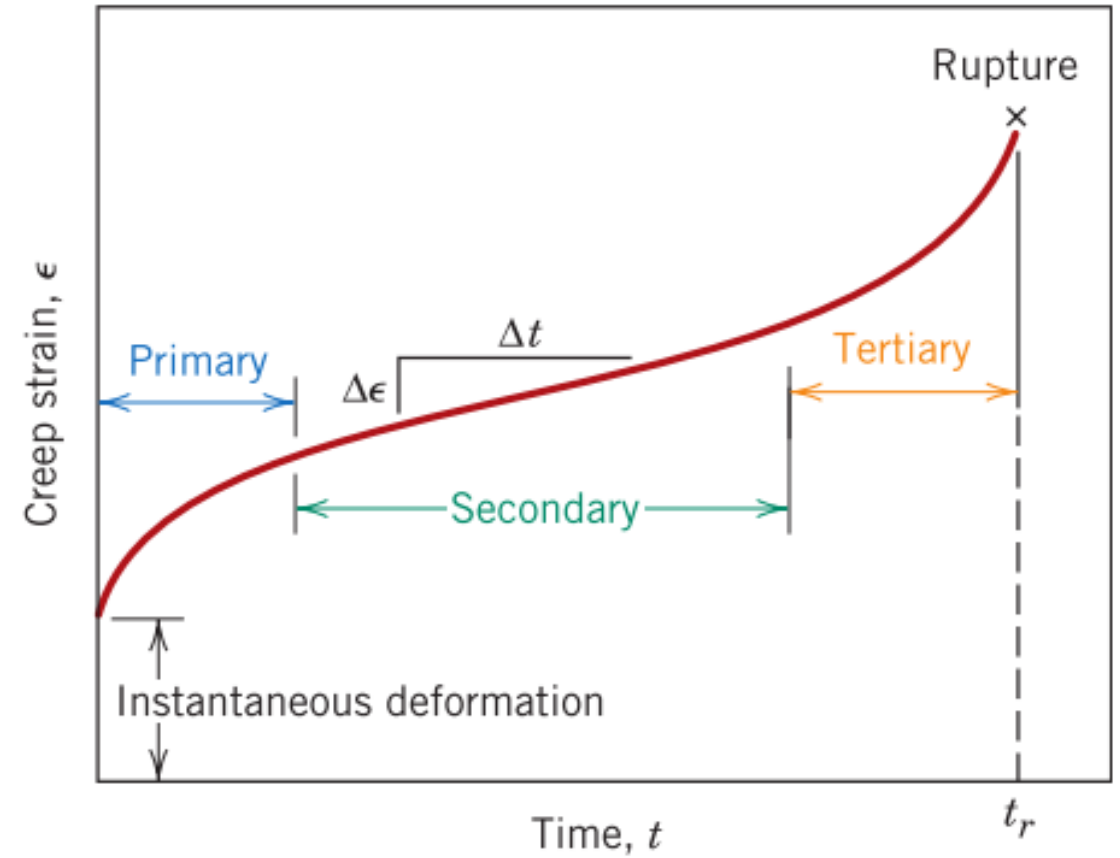




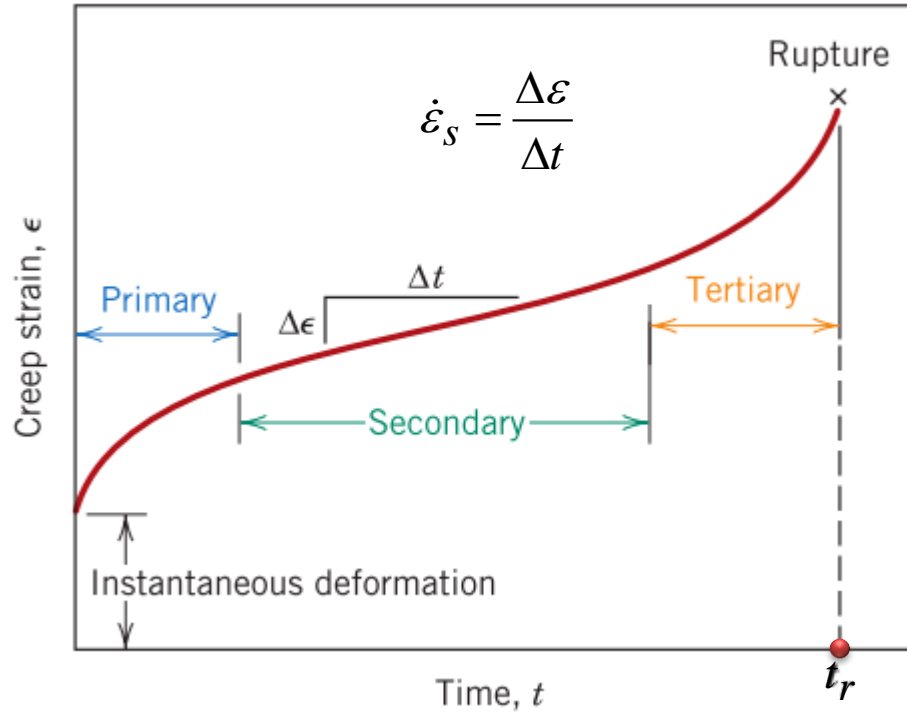
Krank mili (Crankshaft)



Sürünme Testleri (Creep Tests):



Sürünme (Creep):



Sürünme ömrü (Rupture lifetime):

 t_r

Sürünme parametreleri:

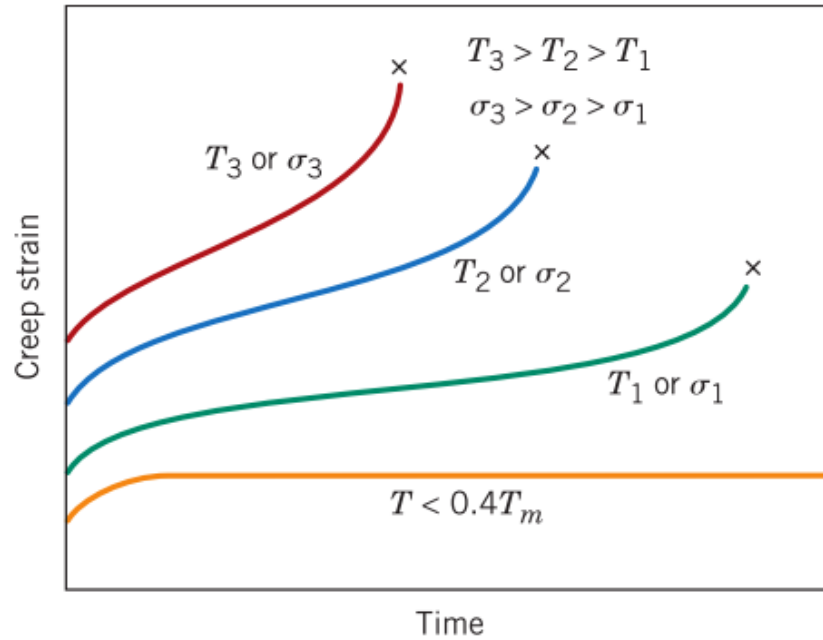
Kararlı sürünme hızı (steady-state creep rate):

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{\Delta\epsilon}{\Delta t}$$

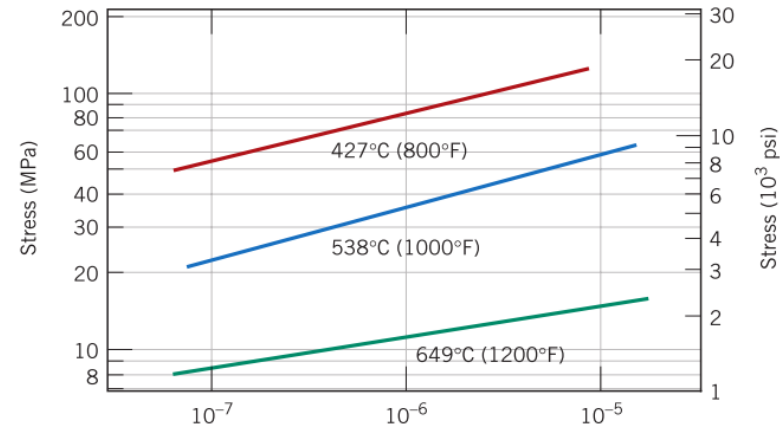
Nükleer santral parçaları gibi çok uzun süreli kullanım ömrü gerektiren ve yüksek gerinme ve yapısal bozunmanın kabul edilemeyeceği uygulama alanlarında en önemli tasarım parametresidir.

Savaş uçaklarının jet türbin kanatları ve roket motorlarının nozzleları gibi görece daha kısa ömürlü kullanım alanlarında en önemli tasarım parametresidir.

Gerilim ve Sıcaklığın Sürünme üzerindeki etkileri



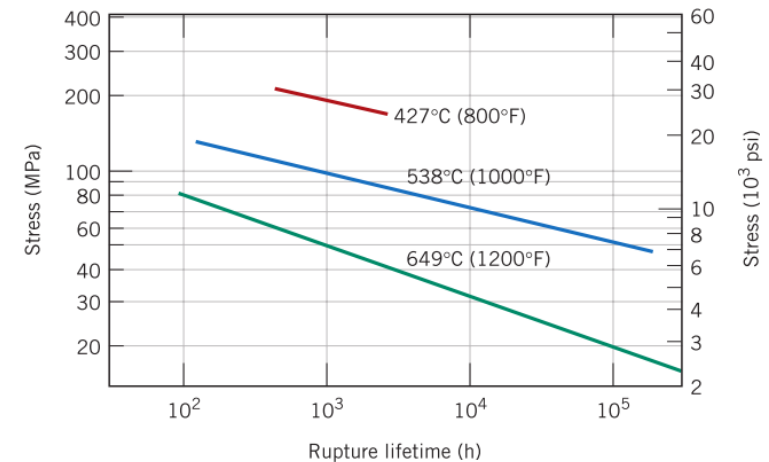
- Anlık gerilmeler artar
- Kararlı-hal sürünme hızı artar
- Kopma ömrü azalır



Gerilim Etkisi: $\dot{\epsilon}_s = K_1 \sigma^n$

Sürünme aktivasyon enerjisi

Gerilim ve Sıcaklığın Etkisi: $\dot{\epsilon}_s = K_2 \sigma^n \exp\left(-\frac{Q_c}{kT}\right)$



Sürünme Mekanizmaları

Sürünme, farklı yükleme ve sıcaklık değerleri için farklı mekanizmalar sonucu ortaya çıkar.

- Gerilim-nedenli boşluk difüzyonu
- Tane sınırı difüzyonu
- Tane sınırı kayması
- Dislokasyon hareketi

$$\dot{\epsilon}_s = K_1 \sigma^n$$

$$\dot{\epsilon}_s = K_2 \sigma^n \exp\left(-\frac{Q_c}{kT}\right)$$

Sürünme hızı için n ve Q_c değerleri mekanizmalardan hangisinin baskın olduğuna göre değişir.

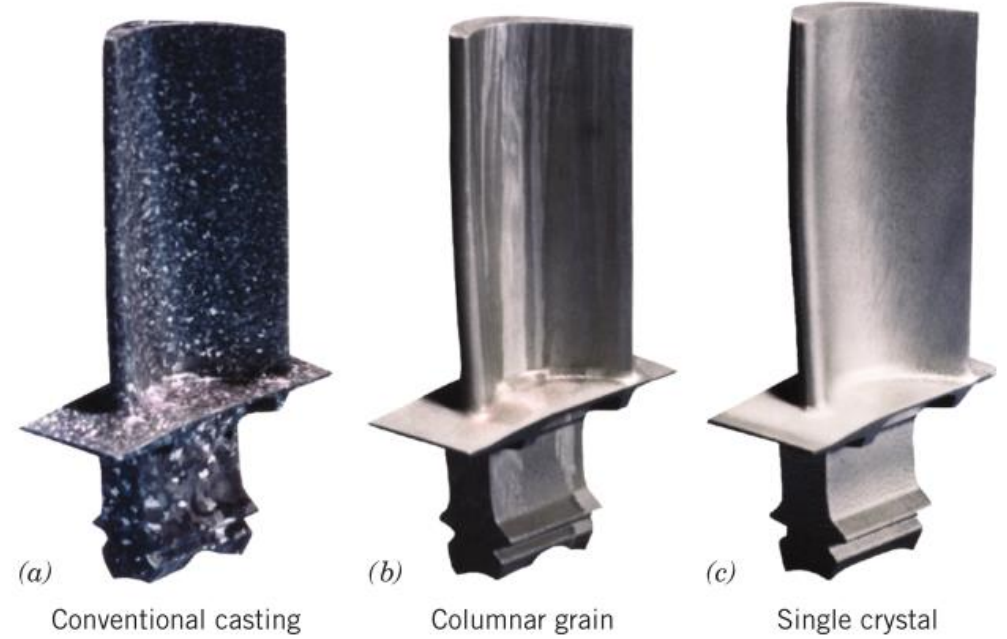
Yüksek sıcaklık kullanımları için alaşımlar

Yorulma aşağıdaki özelliklere sahip malzemelerde daha az olur:

- Yüksek erime sıcaklığı
- Yüksek elastik modül
- Büyük tane boyutları (tane sınırı kayması azalır)

Bu nedenle

- Paslanmaz çelikler
- Refrakter metalleri (Nb, Mo, W, Ta)
- “Süperalaşımlar” (Co, Ni tabanlı: katı çözelti ve ikincil fazlar ile güçlendirilmiş alaşımlar).



Önümüzdeki Ders Saatinde
Ders Kitabımızın 9. Bölümündeki

FAZ DİYAGRAMLARI

adlı konuya başlayacağız!