

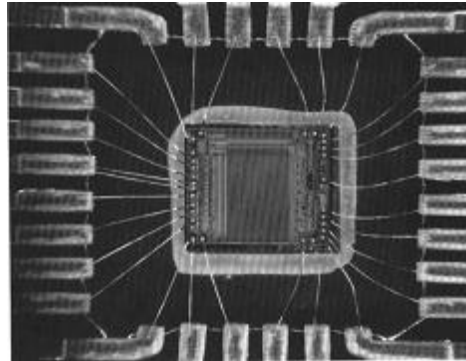
Bölüm 8: Hasar

- Çatlaklar hasara nasıl yol açar?
- Kırılma dayanıklılığı nasıl nicelenir?
- Kırılmaya sebep olan gerilmeyi nasıl hesap ederiz?
- Malzemenin hasar davranışını çevrimsel gerilme hızı, gerilmenin tarihçesi ve sıcaklık altında davranışı, nasıl etkiler?



Gemi-dalgaların yol açtığı çevrimsel yük.

Adapted from chapter-opening photograph, Chapter 8, *Callister & Rethwisch 8e.* (by Neil Boenzi, *The New York Times.*)



Bilgisayar çipi-çevrimsel ısı yükü

Adapted from Fig. 22.30(b), *Callister 7e.* (Fig. 22.30(b) is courtesy of National Semiconductor Corporation.)



Kalça implantı-yürümeden kaynaklanan çevrimsel gerilim

Adapted from Fig. 22.26(b), *Callister 7e.*



Kırılma Mekanizmaları

- Sünek kırılma
 - Önemli bir plastik deformasyon sonucu gerçekleşir.
- Gevrek kırılma
 - Çok az yada hiç plastik deformasyon oluşmaz
 - Yıkıcı



Sünek Kırılma ↔ Gevrek Kırılma

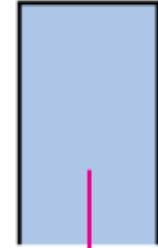
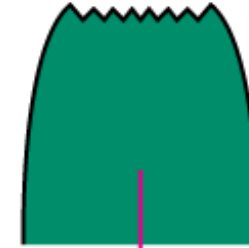
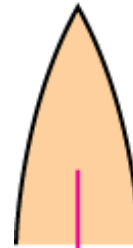
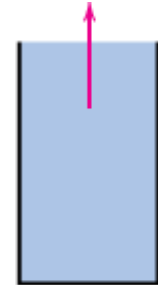
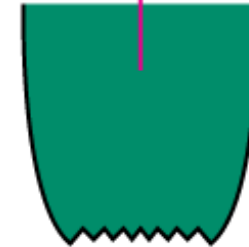
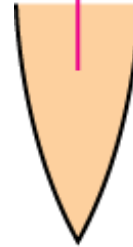
- Sınıflandırma:

Kırılma
davranışı:

çok
sünek

normal
sünek

gevrek



Adapted from Fig. 8.1,
Callister & Rethwisch 8e.

%KD or %UZ:

Büyük

Ortalama

Küçük

- Sünek kırılma genelde gevrek kırılmaya tercih edilir!

Sünek:
Kırılmadan önce uyarır

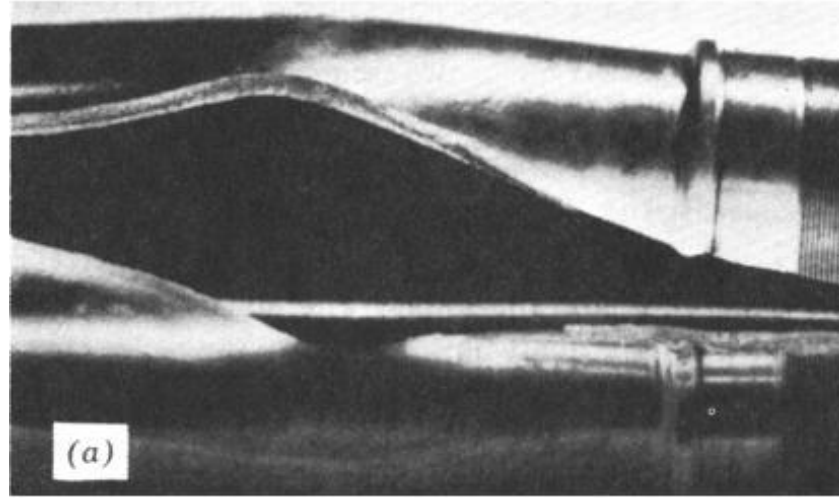
Gevrek:
Uyarmadan



Örnek: Boru Kırılması

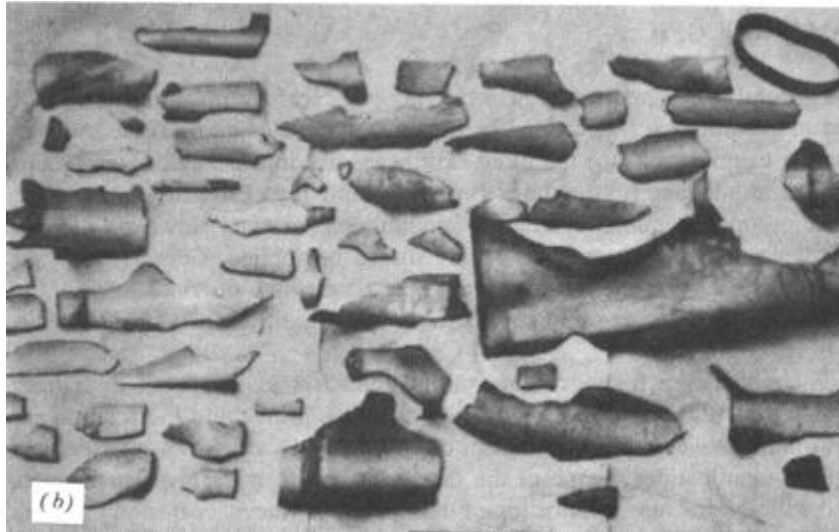
- **Sünek kırılma :**

- tek parça
- büyük deformasyon



- **Gevrek kırılma :**

- çok parçalı
- küçük deformasyon

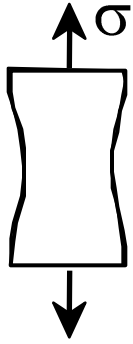


Figures from V.J. Colangelo and F.A. Heiser, *Analysis of Metallurgical Failures* (2nd ed.), Fig. 4.1(a) and (b), p. 66 John Wiley and Sons, Inc., 1987. Used with permission.

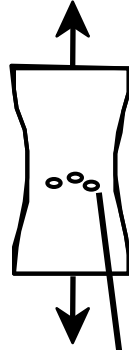
Kısmi Sünek Kırılma

- Kırılma basamakları:

boyun
verme



küçük boşluklar
oluşumu



bileşen boşluklar
çatlak oluşturur



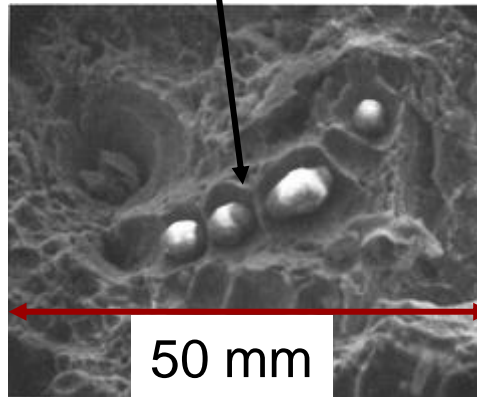
çatlak
ilerler



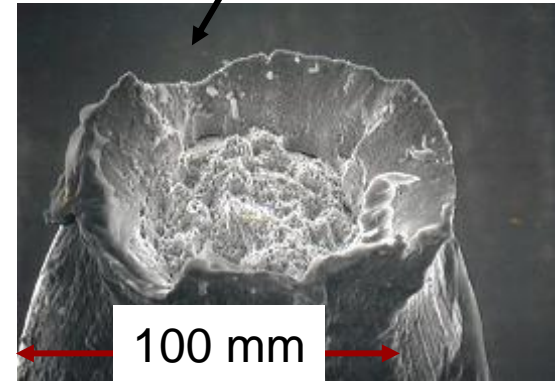
kırılma



- Kırılmayla sonuçlanan yüzey (çelik)



From V.J. Colangelo and F.A. Heiser, *Analysis of Metallurgical Failures* (2nd ed.), Fig. 11.28, p. 294, John Wiley and Sons, Inc., 1987. (Orig. source: P. Thornton, *J. Mater. Sci.*, Vol. 6, 1971, pp. 347-56.)



Fracture surface of tire cord wire loaded in tension. Courtesy of F. Roehrig, CC Technologies, Dublin, OH. Used with permission.



Sünek Kırılma \longleftrightarrow Gevrek Kırılma



Çanak-koni kırılması

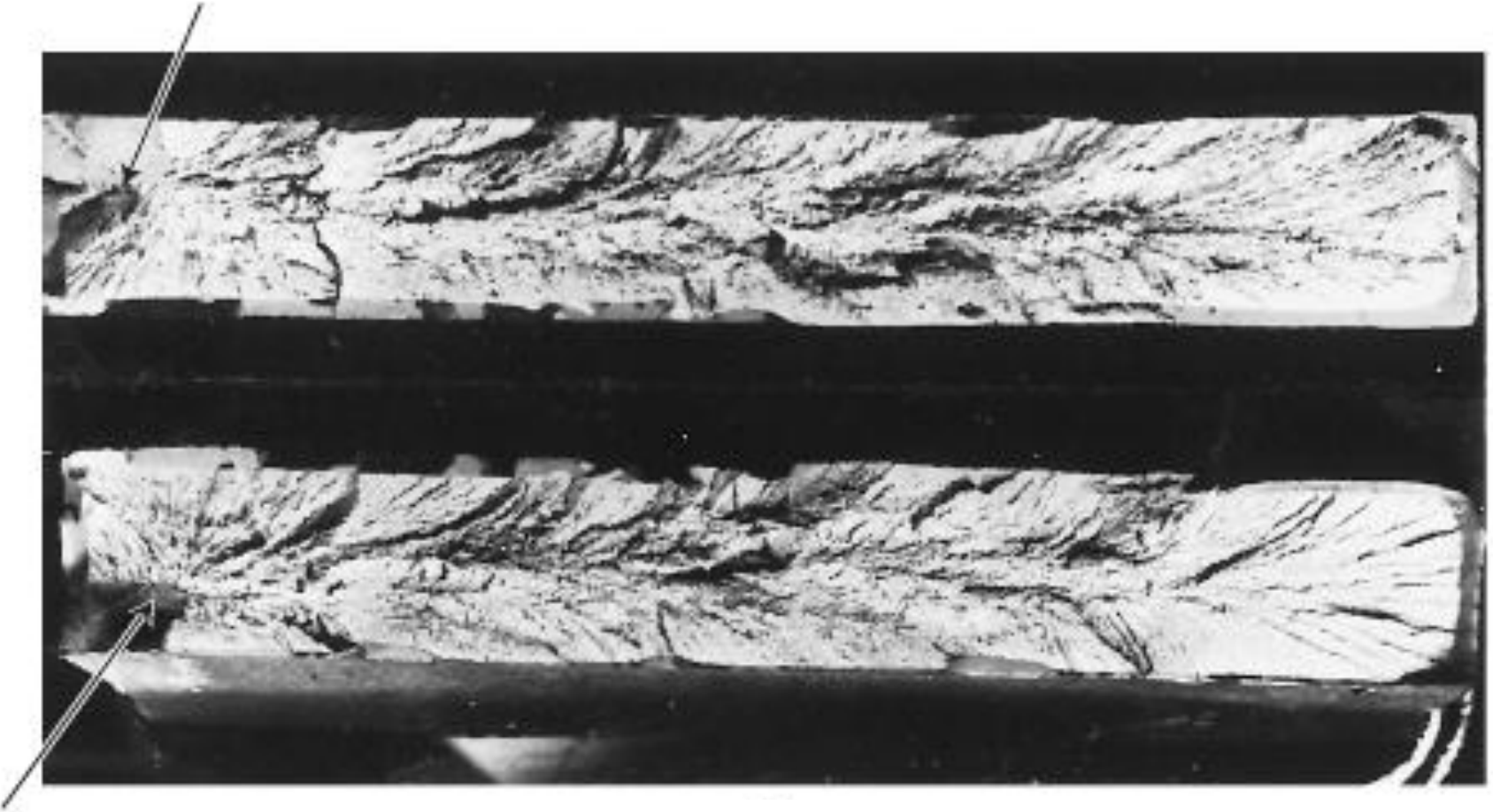


Gevrek kırılma

Adapted from Fig. 8.3, *Callister & Rethwisch 8e*.

Gevrek Kırılma

Oklar kırılmanın başladığı noktaları işaret eder.

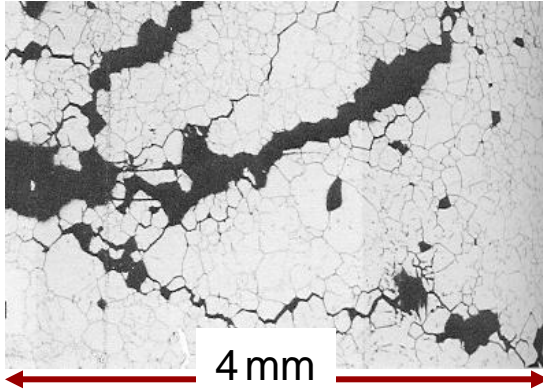


Adapted from Fig. 8.5(a), *Callister & Rethwisch 8e.*



Gevrek Kırılma Yüzeyleri

- Tanelerarası kırılma



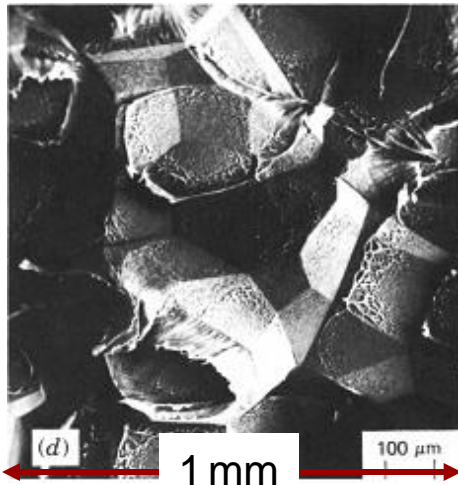
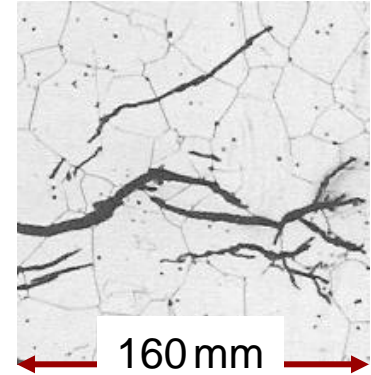
304 S. Çelik (metal)

Reprinted w/permission from "Metals Handbook", 9th ed, Fig. 633, p. 650. Copyright 1985, ASM International, Materials Park, OH. (Micrograph by J.R. Keiser and A.R. Olsen, Oak Ridge National Lab.)

- Tane içi kırılma

316 S. Çelik (metal)

Reprinted w/ permission from "Metals Handbook", 9th ed, Fig. 650, p. 357. Copyright 1985, ASM International, Materials Park, OH. (Micrograph by D.R. Diercks, Argonne National Lab.)

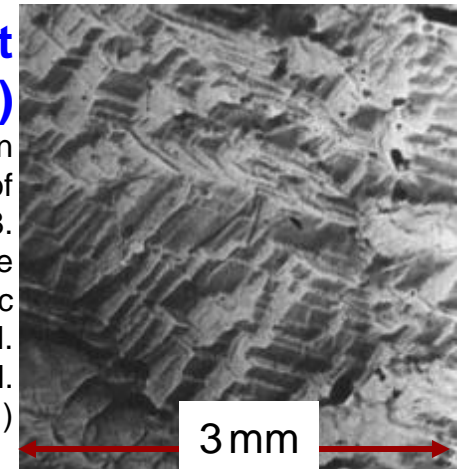


Polipropilen (polimer)

Reprinted w/ permission from R.W. Hertzberg, "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials", (4th ed.) Fig. 7.35(d), p. 303, John Wiley and Sons, Inc., 1996.

Al Oksit (seramik)

Reprinted w/ permission from "Failure Analysis of Brittle Materials", p. 78. Copyright 1990, The American Ceramic Society, Westerville, OH. (Micrograph by R.M. Gruver and H. Kirchner.)

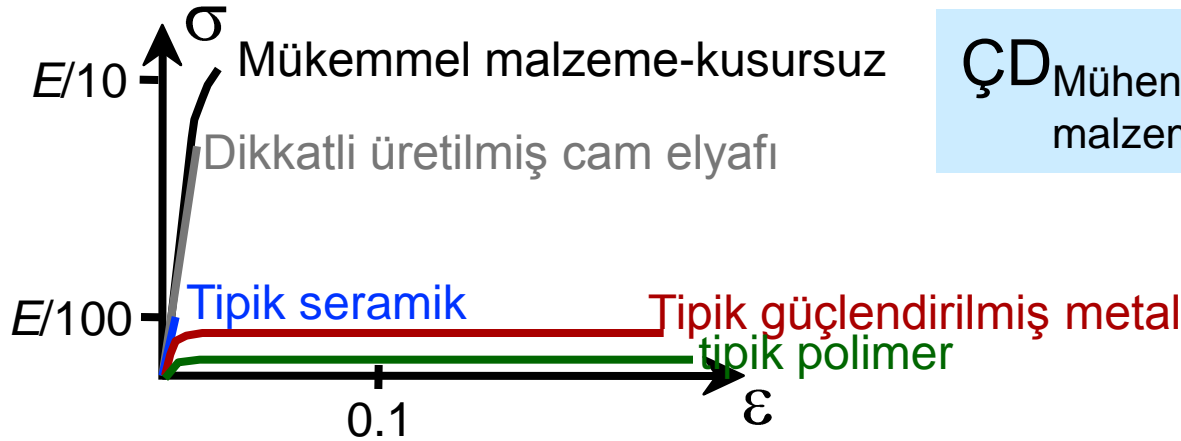


(Orig. source: K. Friedrich, *Fracture* 1977, Vol. 3, ICF4, Waterloo, CA, 1977, p. 1119.)



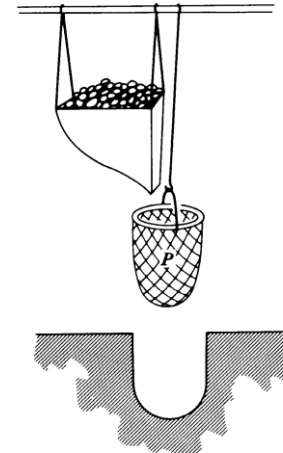
İdeal Malzeme ↔ Gerçek Malzeme

- Gerinim- şekil değişimi davranışı (Oda T):



$\zeta D_{\text{Mühendislik malzemesi}} \ll \zeta D_{\text{Mükemmel Malzeme}}$

- DaVinci (500 yıl önce!) gözlemledi...
 - tel ne kadar uzunsa, kopmayı sağlayan yük o kadar azdır.
- Sebepler:
 - çatlaklar prametür kırılmaya yol açar.
 - örnek ne kadar büyükse, çatlaklar o kadar büyük olur!



Reprinted w/
permission from R.W.
Hertzberg,
"Deformation and
Fracture Mechanics
of Engineering
Materials", (4th ed.)
Fig. 7.4. John Wiley
and Sons, Inc., 1996.

Gerilme Yığılması

- Griffith Çatlağı

$$\sigma_m = 2\sigma_o \left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2} = K_t \sigma_o$$

burada

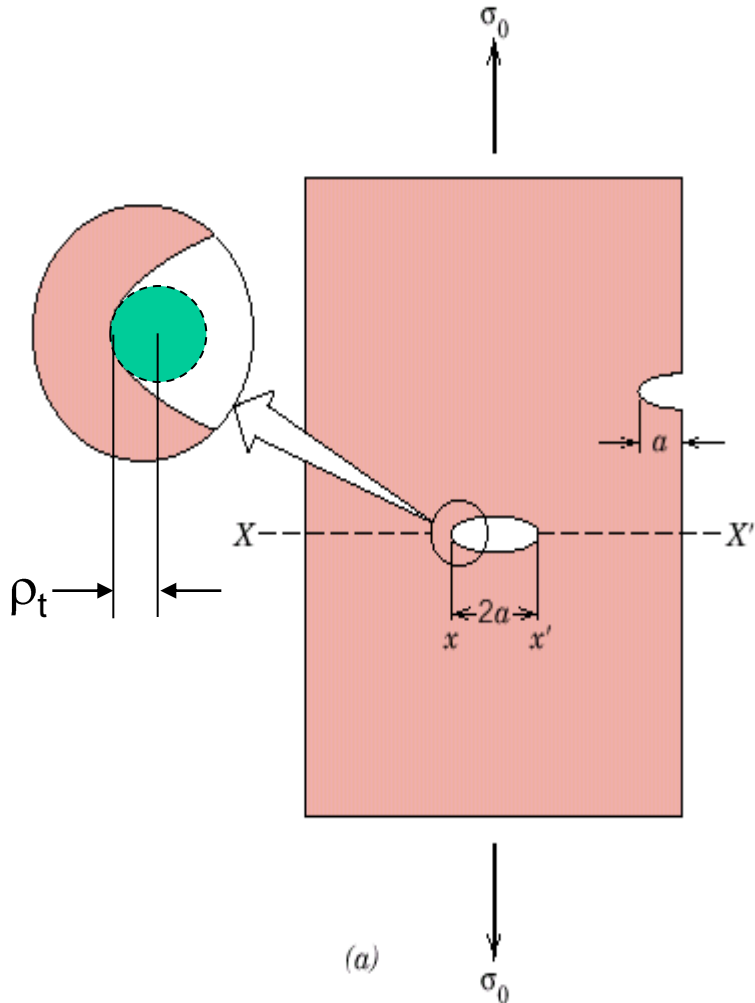
ρ_t = çatlak ucu eğrilik yarıçapı

σ_o = uygulanan gerinim

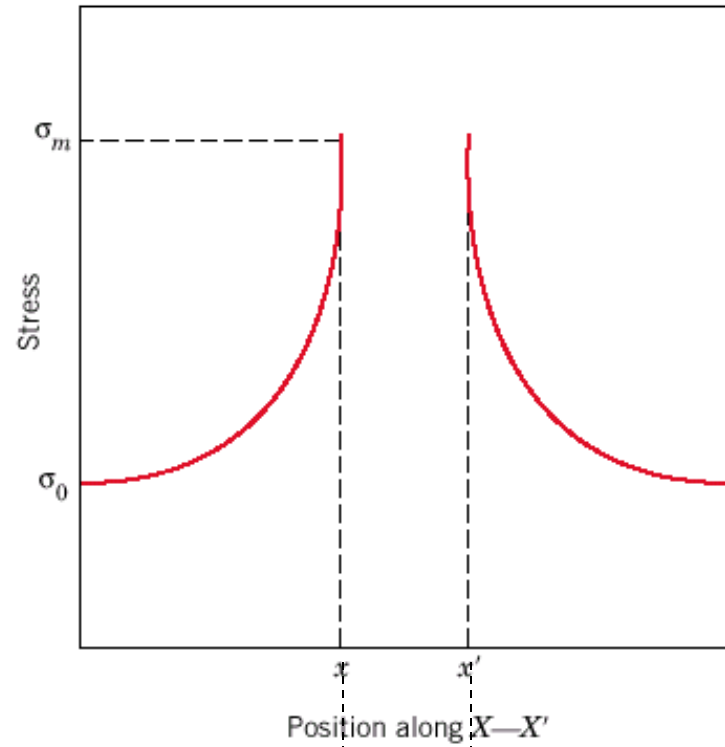
σ_m = çatlak ucunda oluşan maksimum gerilme

a = çatlak boyu

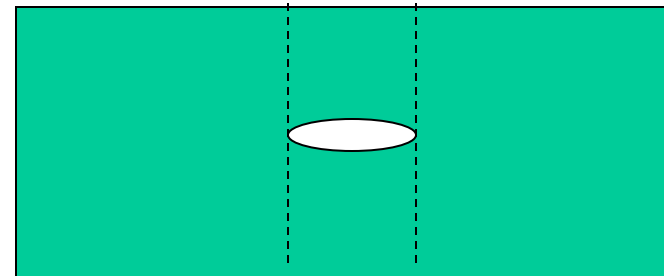
K_t = Çentik konsantrasyon faktörü
(σ_m / σ_o)



Çatlak Ucundaki Gerilim Yığılması



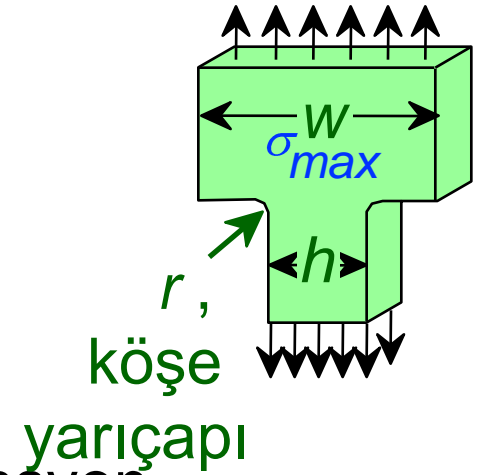
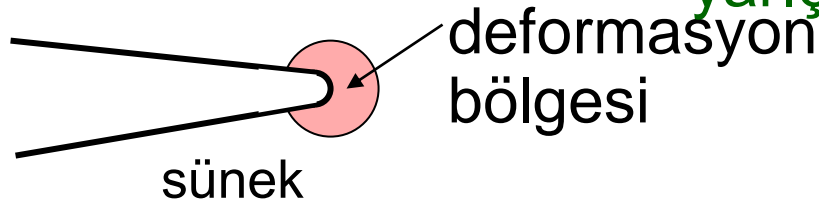
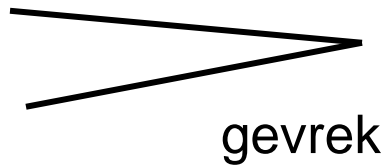
Adapted from Fig. 8.8(b),
Callister & Rethwisch 8e.



Çatlak Oluşması ve İlerlemesi

- Keskin köşelerden kaçınılmalıdır!

Keskin çatlaklar körleşmiş çatlaklardan daha kolay ilerler



Çatlakta enerji dengelenir

- Elastik birim şekil değiştirme enerjisi-
 - Elastik deformasyon sırasında malzeme enerji depolar
 - Çatlak ilerlediğinde bu enerji açığa çıkar
 - Yeni yüzey oluşumları enerjiye ihtiyaç duyar.

Çatlak İlerlemesinin Kriterleri

Çatlak ucu gerilimi (σ_m) kritik gerilmeyi (σ_{kri}) aşarsa çatlak ilerler

$$\sigma_m > \sigma_{kri} \quad \sigma_{kri} = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{1/2}$$

where

- E = elastic modülü
- γ_s = özgül yüzey enerjisi
- a = iç çatlak boyunun yarısı

Sünek malzeme için $\Rightarrow \gamma_s$ in miktarı $\gamma_s + \gamma_p$ olur
 γ_p plastik deformasyon enerjisi



Çatlak Büyümesine Karşı Tasarım

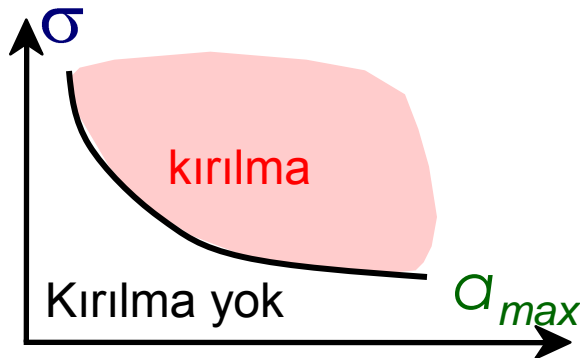
- Çatlak Büyüme şartı:

$$K_{Ic} = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad K_c = \text{Kırılma tokluğu}$$

- En Büyük, en fazla gerilimli çatlak en önce gelişir!

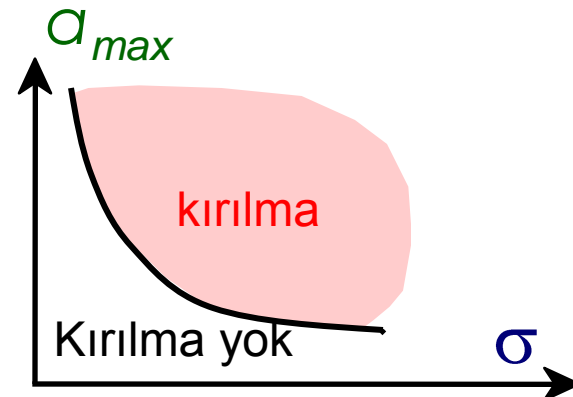
--Senaryo 1: tasarım gerilimini mak. çentik boyu belirler

$$\sigma_{tasarim} < \frac{K_{Ic}}{Y\sqrt{\pi a_{max}}}$$



--Senaryo 2: mak. çentik boyunu tasarım gerilimi belirler

$$a_{max} < \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{Y\sigma_{tasarim}} \right)^2$$



Tasarım Örneği: Uçak Kanadı

- Malzemenin $K_{Ic} = 26 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$
- İki tasarım göz önüne alınır...

Tasarım A

- en büyük çentik 9 mm
- hasar gerilimi = 112 MPa

Tasarım B

- aynı malzeme kullanılır
- en büyük çentik 4 mm
- hasar gerilimi = ?

- Uygulama...

$$\sigma_{kri} = \frac{K_{Ic}}{Y \sqrt{\pi a_{\max}}}$$

- Anahtar nokta: Y ve K_{Ic} her iki tasarımda aynı.

$$\frac{K_{Ic}}{Y \sqrt{\pi}} = \sigma \sqrt{a} = \text{sabit}$$

--Sonuç:

$$\sigma_c \sqrt{a_{\max}} \bigg|_A = \sigma_c \sqrt{a_{\max}} \bigg|_B$$

112 MPa **9 mm** **4 mm**

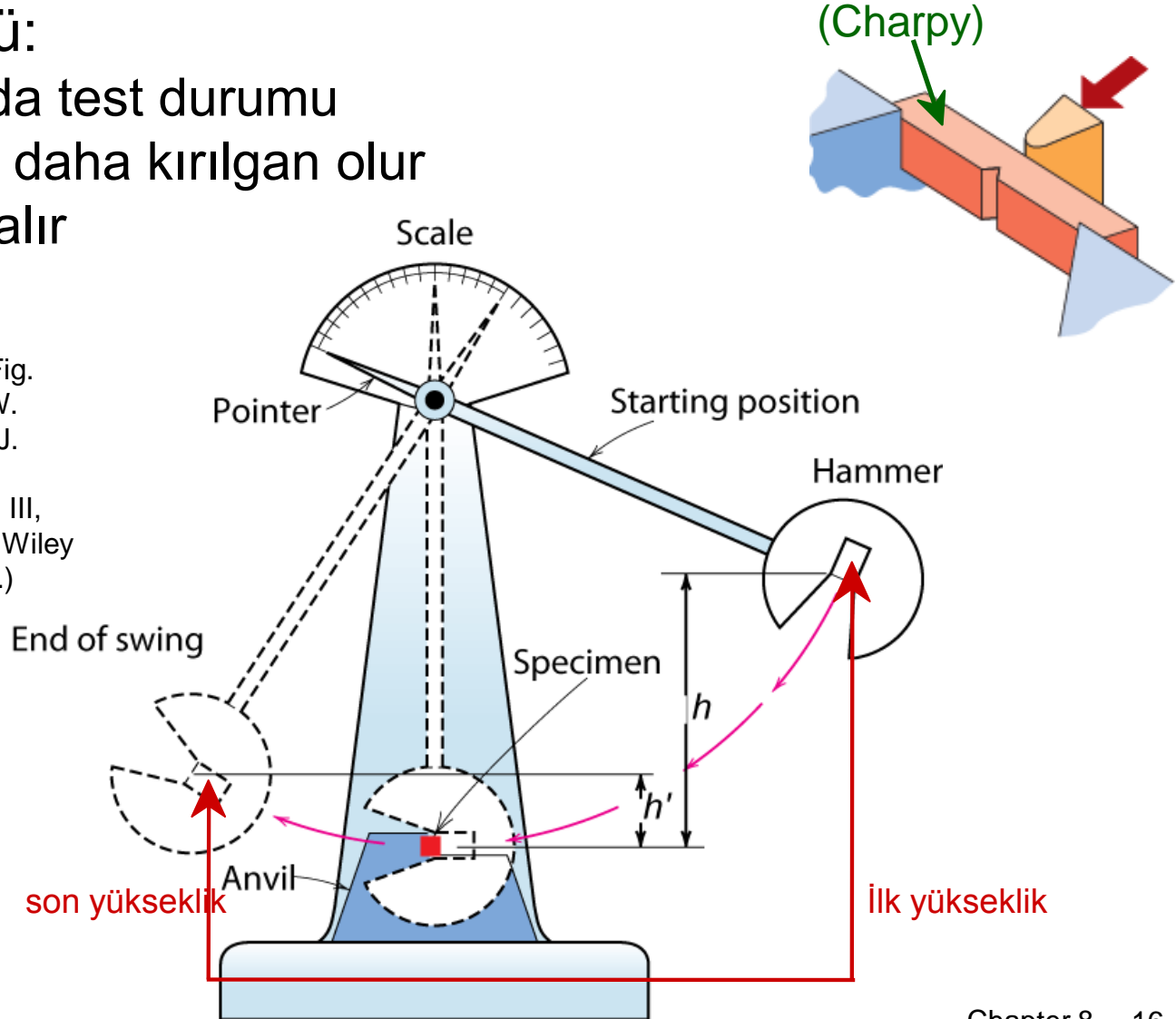
$$\text{Cevap: } (\sigma_c)_B = 168 \text{ MPa}$$



Darbe Deneyi

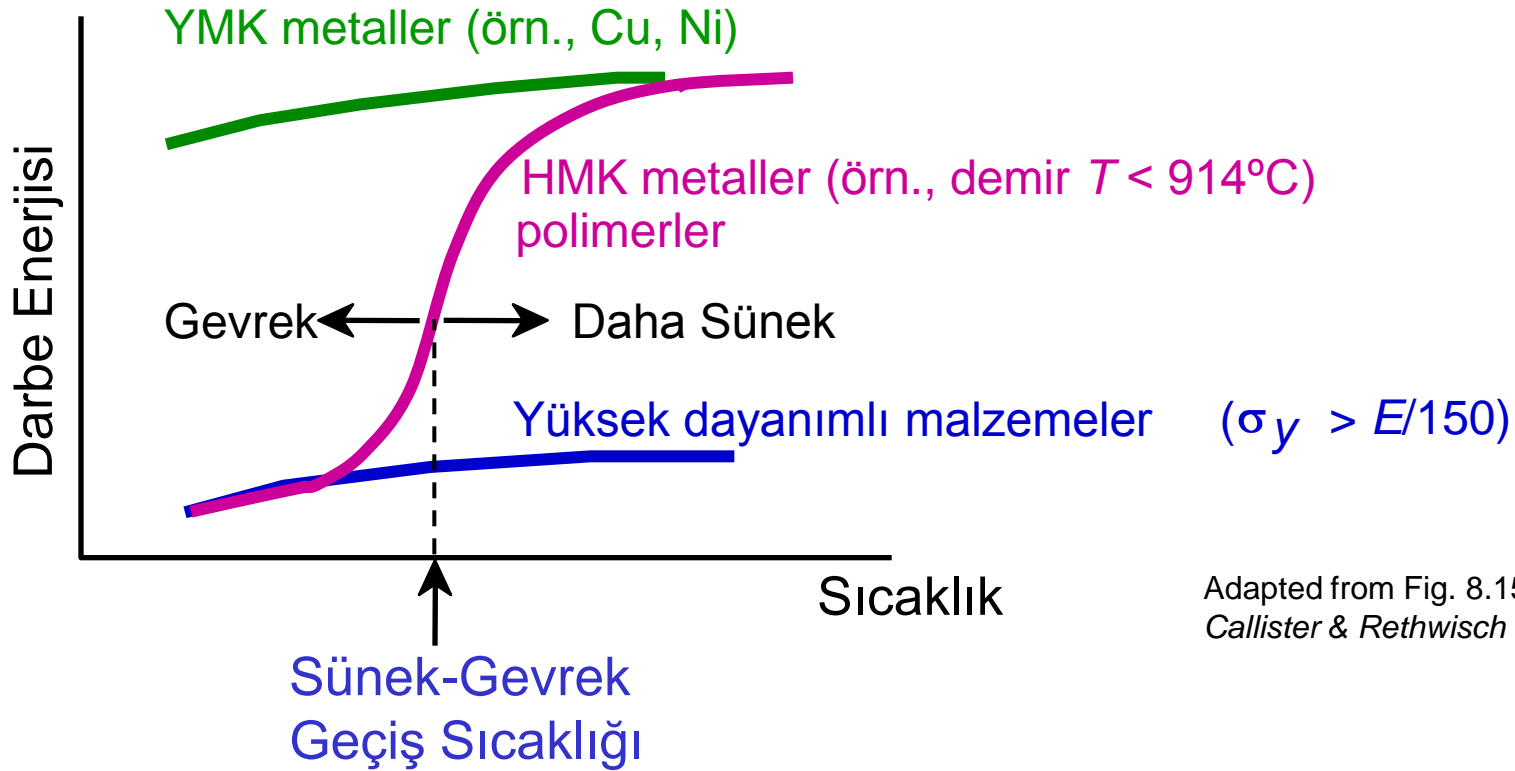
- Darbe yükü:
 - uç noktada test durumu
 - malzeme daha kırılğan olur
 - tokluk azalır

Adapted from Fig. 8.12(b),
Callister & Rethwisch 8e. (Fig. 8.12(b) is adapted from H.W. Hayden, W.G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, *Mechanical Behavior*, John Wiley and Sons, Inc. (1965) p. 13.)



Sıcaklığın Darbe Enerjisine Etkisi

- **Sünek-Gevrek Geçiş Sıcaklığı (SGGS)...**



Adapted from Fig. 8.15,
Callister & Rethwisch 8e.



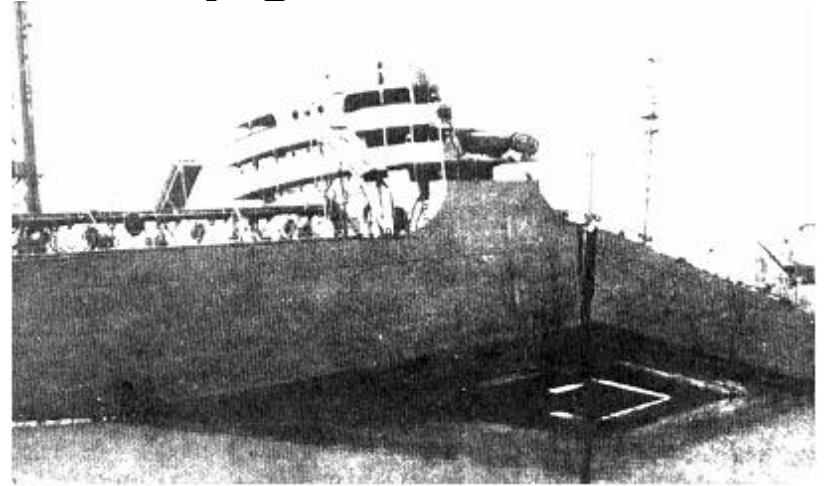
Tasarım Stratejisi: SGGS üstünde kal!

- 2. Dünya Savaşı öncesi:
Titanik



Reprinted w/ permission from R.W. Hertzberg, "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials", (4th ed.) Fig. 7.1(a), p. 262, John Wiley and Sons, Inc., 1996. (Orig. source: Dr. Robert D. Ballard, *The Discovery of the Titanic.*)

- 2. Dünya Savaşı :
Liberty gemisi

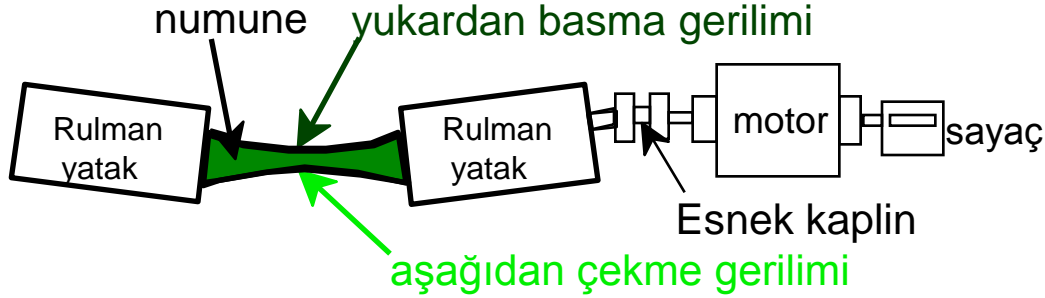


Reprinted w/ permission from R.W. Hertzberg, "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials", (4th ed.) Fig. 7.1(b), p. 262, John Wiley and Sons, Inc., 1996. (Orig. source: Earl R. Parker, "Behavior of Engineering Structures", Nat. Acad. Sci., Nat. Res. Council, John Wiley and Sons, Inc., NY, 1957.)

- Problem: Kullanılan çeliğin SGGS'si oda sıcaklığının hemen altında.

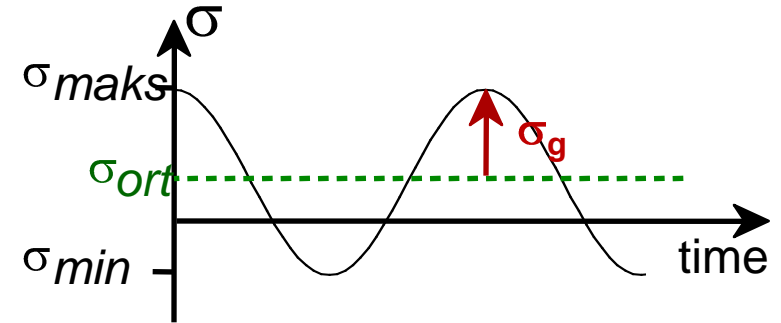
Yorulma

- **Yorulma** = tekrarlanan gerilme neticesindeki hasar.



Adapted from Fig. 8.18,
Callister & Rethwisch 8e.
(Fig. 8.18 is from *Materials
Science in Engineering*, 4/E
by Carl. A. Keyser, Pearson
Education, Inc., Upper
Saddle River, NJ.)

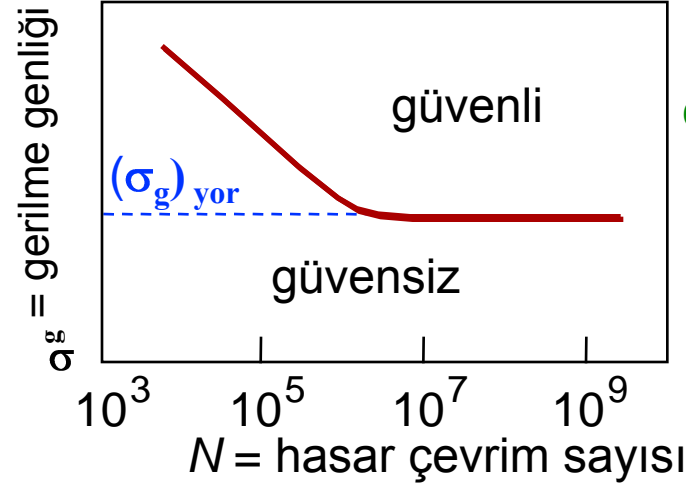
- Gerilme zamanla değişir.
-- anahtar parameterler σ_g , σ_{ort} ,
ve çevrim frekansıdır.



- Anahtar noktalar: Yorulma...
-- $\sigma_{maks} < \sigma_{akma}$ olsa bile, hasara sebep olabilir..
-- makine mühendisliği hasarlarınının ~ 90% sorumludur.

Yorulma Davranışı Tipleri

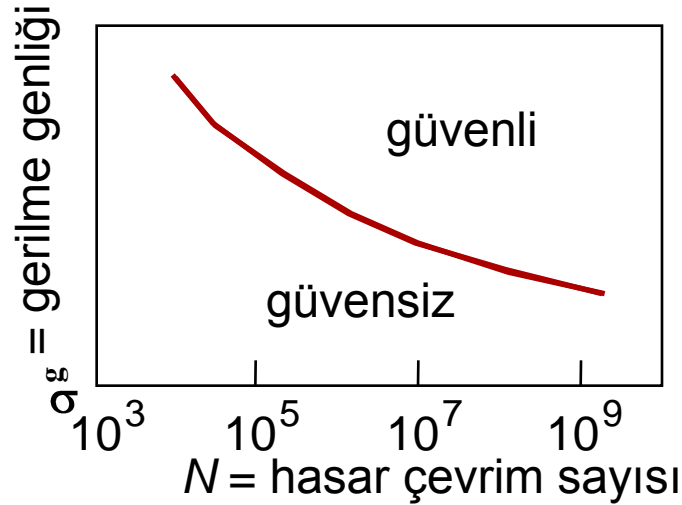
- Yorulma sınırı, $(\sigma_g)_{yor}$:
--eğer $\sigma_g < (\sigma_g)_{yor}$



çelik (tipik) için

Adapted from Fig. 8.19(a), Callister & Rethwisch 8e.

- Bazı malzemelerin, yorulma limitleri yoktur!



Al (tipik) için

Adapted from Fig. 8.19(b), Callister & Rethwisch 8e.



Yorulma Çatlağının İlerlemesi

- Çatlak aşamalı ilerler

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

Tipik olarak 1 den 6 ya

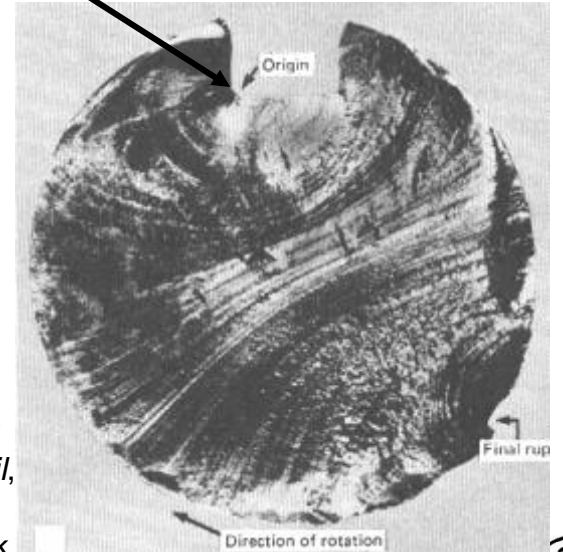
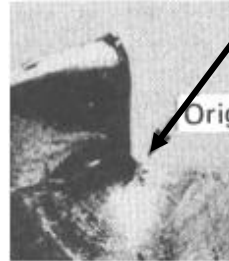
$$\sim (\Delta\sigma) \sqrt{a}$$

Çatlak boyutu her yük çevriminde artar

- yorulma sonucu kırılmış dönen mil

- çatlak; $K_{maks} < K_{kri}$ olmasına rağmen ilerler
- çatlak daha hızlı ilerler, eğer
 - $\Delta\sigma$ artarsa
 - çatlak uzarsa
 - yük frekansı artarsa.

Çatlak orijini



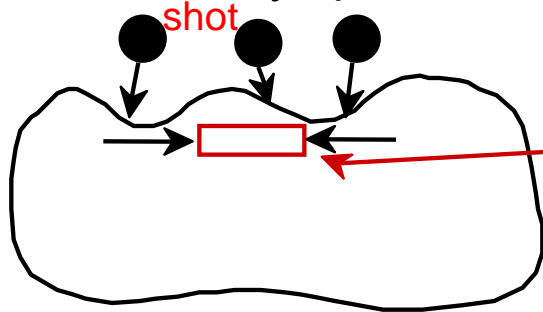
Adapted from Fig. 8.21, Callister & Rethwisch 8e. (Fig. 8.21 is from D.J. Wulpi, *Understanding How Components Fail*, American Society for Metals, Materials Park, OH, 1985.)



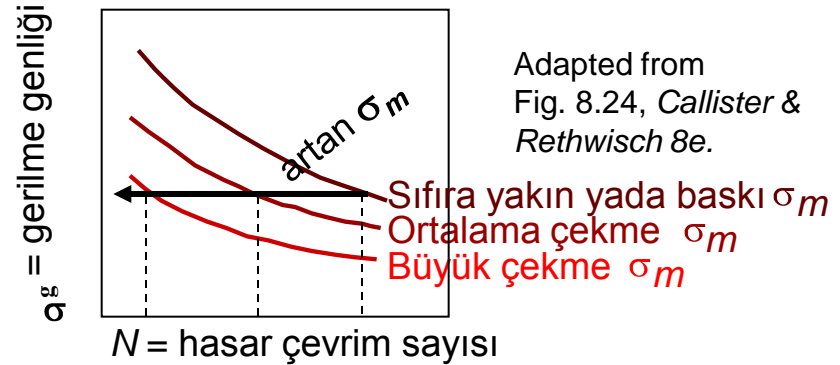
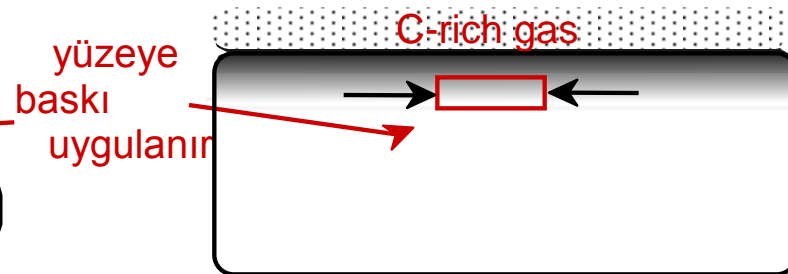
Yorulma Ömrünün Geliştirilmesi

1. Yüzey gerilimi yaratmak (yüzey çatlaklarını baskılamak)

--Methot 1: Bilya püskürtme

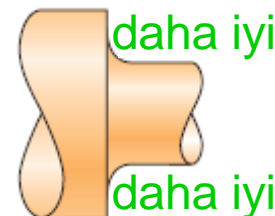
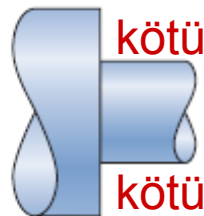


--Methot 2: Karbürleme



Adapted from
Fig. 8.24, Callister &
Rethwisch 8e.

2. Gerilme yığılması etkisinin azaltılması

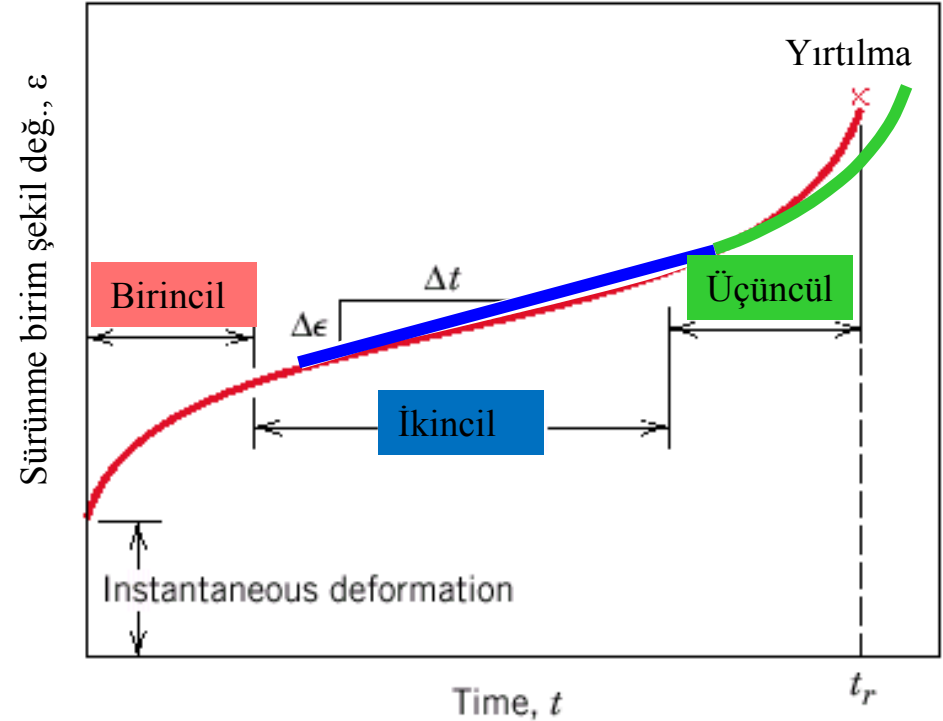
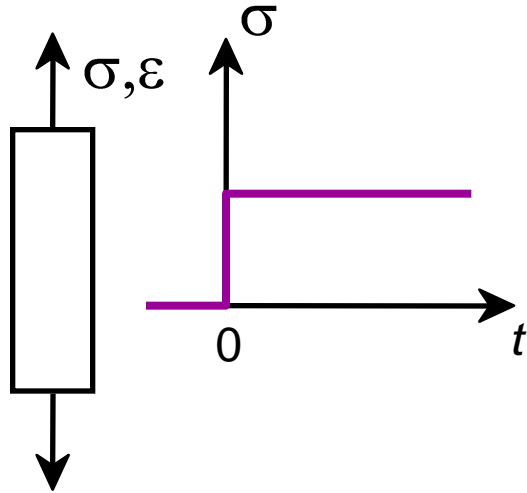


Adapted from
Fig. 8.25, Callister &
Rethwisch 8e.



Sürünme

Sabit gerilimde (σ) zamanla deformasyon.



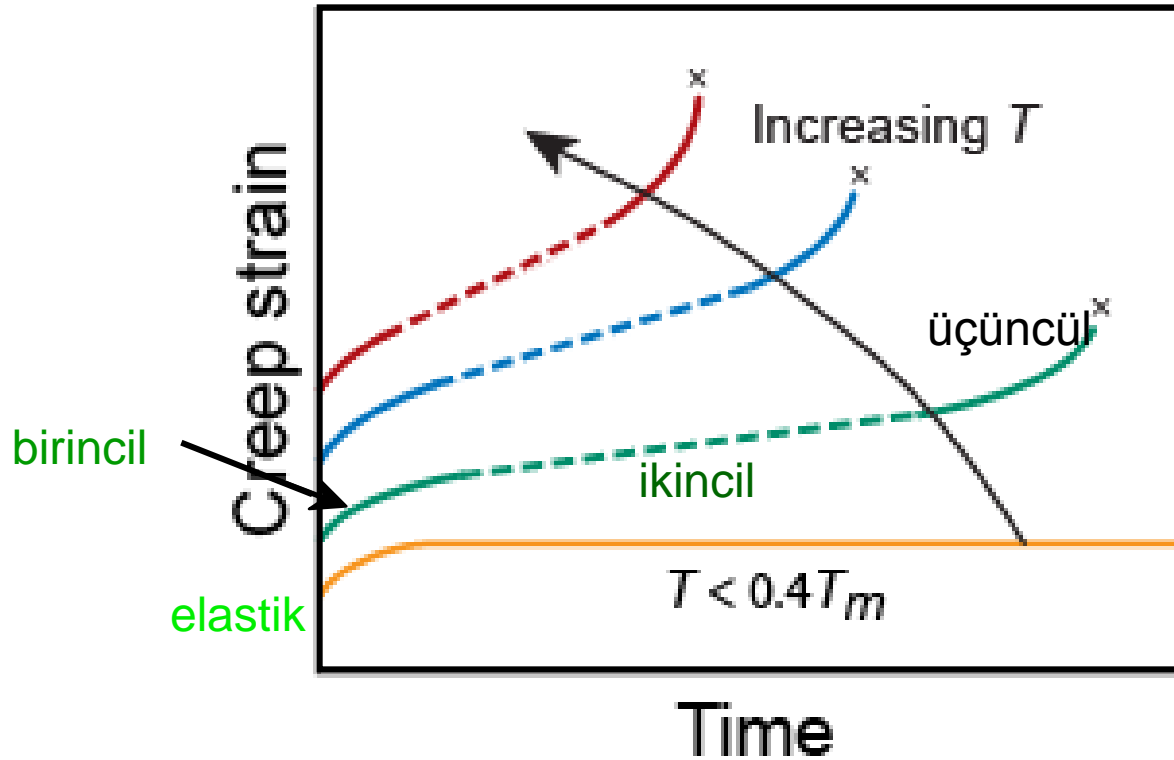
Birincil Sürünme: sürünme hızı zamanla azalır.

İkincil Sürünme: kararlı durum. Eğim sabit ($\Delta\epsilon/\Delta t$).

Üçüncül Sürünme: sürünme hızı zamanla artar.

Sürünme: Sıcaklığın Etkisi

- Yükselen sıcaklıkta gerçekleşir, $T > 0.4 T_e$ (in K)



Adapted from Fig. 8.29,
Callister & Rethwisch 8e.



İkincil (Kararlı) Sürünme

- Verilen T ve σ de biçim şekil değiştirme hızı sabittir
-- soęuk řekillendirme toparlanma ile dengelenmiřtir.

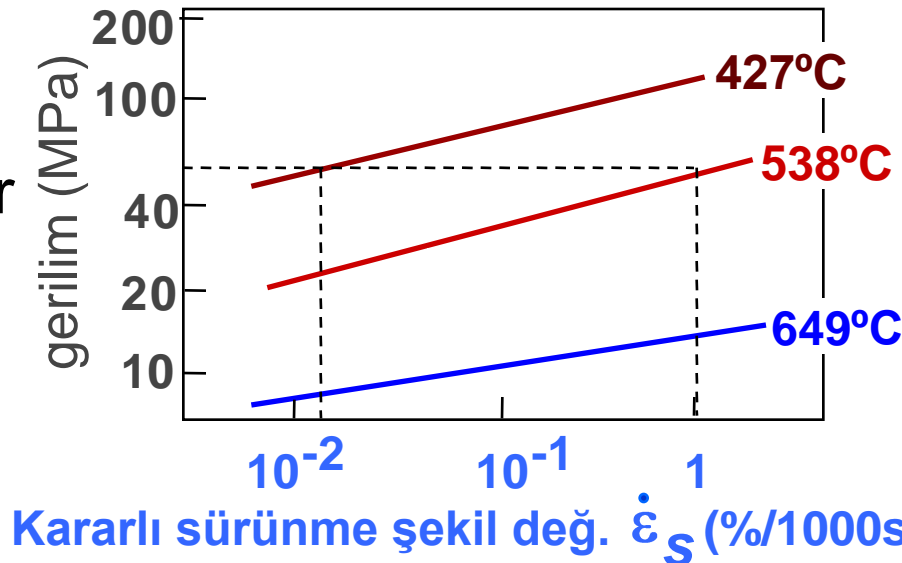
şekil değiştirme hızı

Gerilim üsteli(malzeme parametresi)

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

Malzeme sabiti. Uygulanan gerilim Sürünme için aktivasyon enerjisi (malzeme parametresi)

- Biçim şekil değiştirme hızı T ve σ arttıkça artar

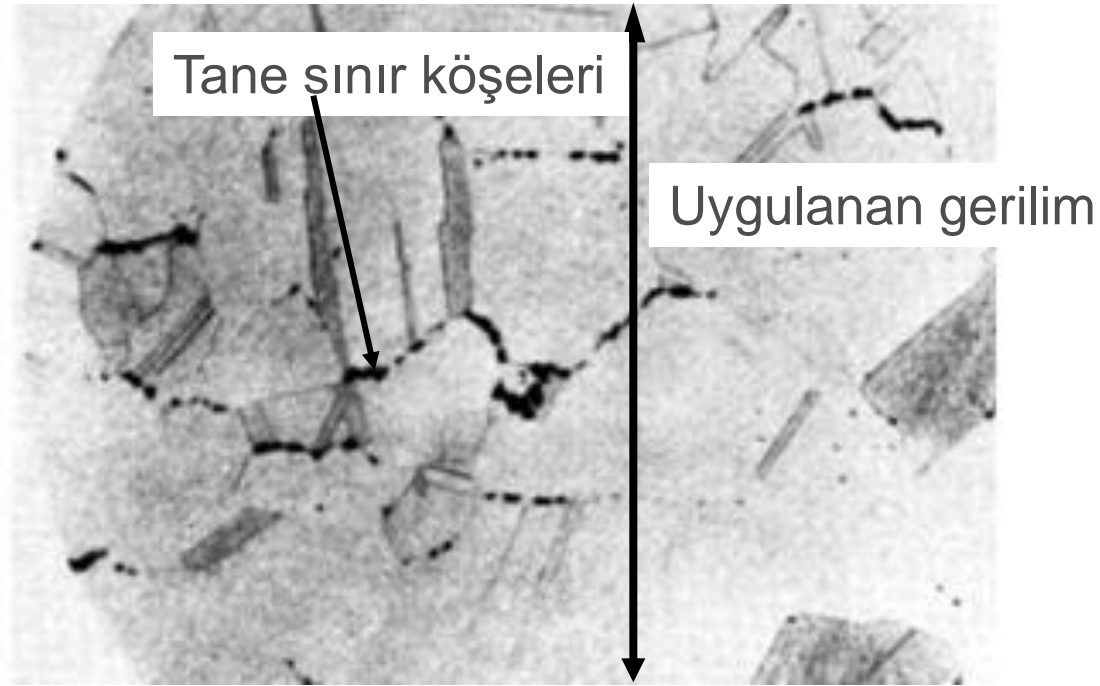


Adapted from Fig. 8.31, Callister 7e. (Fig. 8.31 is from *Metals Handbook: Properties and Selection: Stainless Steels, Tool Materials, and Special Purpose Metals*, Vol. 3, 9th ed., D. Benjamin (Senior Ed.), American Society for Metals, 1980, p. 131.)



Sürünme Hasarı

- Hasar: tane sınırları boyunca.



From V.J. Colangelo and F.A. Heiser, *Analysis of Metallurgical Failures* (2nd ed.), Fig. 4.32, p. 87, John Wiley and Sons, Inc., 1987. (Orig. source: Pergamon Press, Inc.)

ÖZET

- Mühendislik malzemeleri teorikte düşünöldüğü gibi güçlü değildir.
- **Çatlaklar** gerilim yığılmasına sebep olur, bu da teorik uygulanabilen gerilimden daha düşüğüyle hasara yol açar.
- Keskin köşeler büyük gerilim yığılmasına sebep olup, prematüre hasara yol açar.
- Hasar tipi T ve σ ye bağlıdır:
 - Basit kırılma için (döngüsel olmayan σ ve $T < 0.4 T_e$), hasar gerilimi:
 - çatlak boyutu arttığıında,
 - T azaldığıında
 - yükleme hızı arttığıında, azalır.
 - Yorulma için (döngüsel σ):
 - $\Delta\sigma$ arttıkça, dönü sayısı azalır.
 - Sürünme için ($T > 0.4 T_e$):
 - σ yada T arttıkça, yırtılma zamanı düşer.

