



Kırılma

Kırılma

Kırılma türleri nedir?

Çekme testi

Çentik darbe testi

Kırılma analizi

Kırılma görüntüleri



The Royal Mail Ship *Titanic*: Did a Metallurgical Failure Cause a Night to Remember?

Katherine Felkins, H.P. Leighty, Jr., and A. Jankovic

The bow of the ship as it appeared during a 1986 expedition. (Photo courtesy of Woods Hole Oceanographic Institution.)

Another view of the Titanic during a 1986 expedition. (Photo courtesy of Woods Hole Oceanographic Institution.)

The ship during a 1986 expedition. (Photo courtesy of Woods Hole Oceanographic Institution.)

and Falk, met with J. Bruce Beatty, managing director of the Oceanic



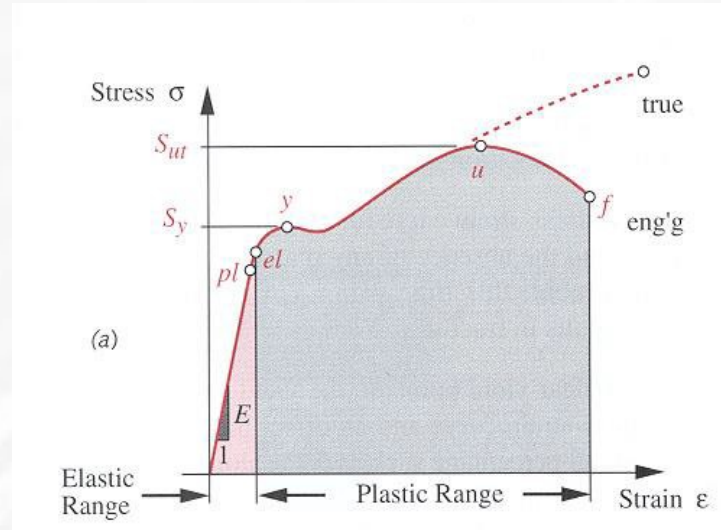
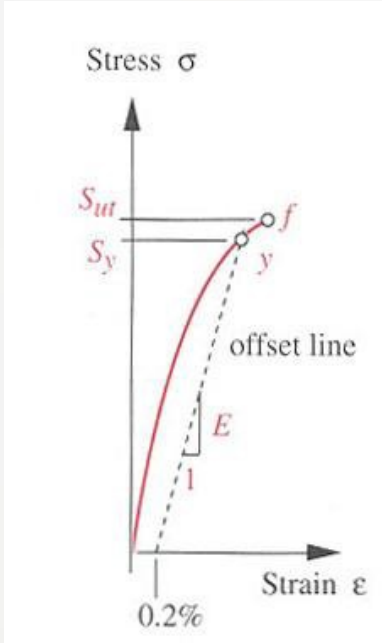
Kırılma nedir?

Bir makine veya yapı elemanının kendinden beklenen fonksiyonları yerine getiremez hale gelmesine hasar adı verilir. Metallerde hasar en genel anlamda üç şekilde oluşur.

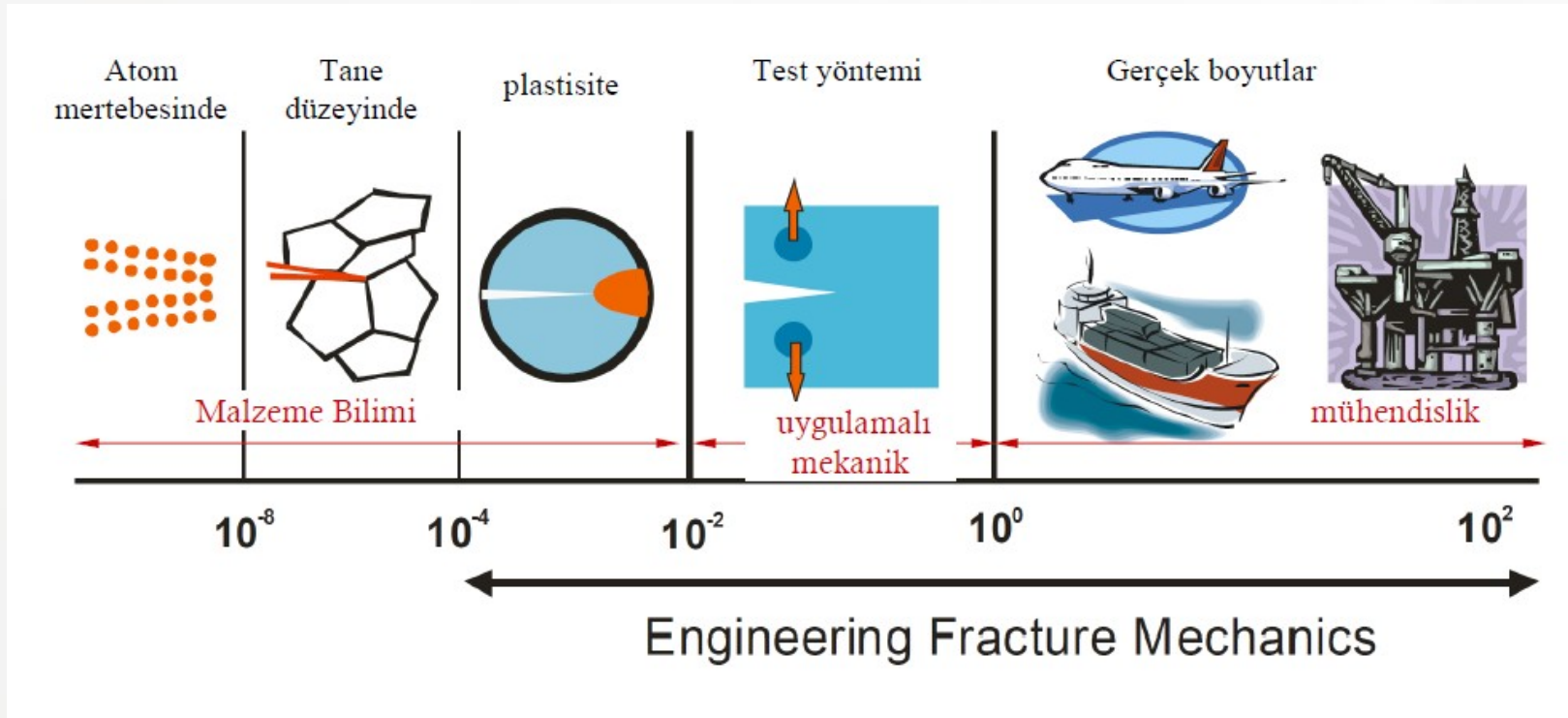
1. Aşırı elastik şekil değişimi neticesinde (E). Örnek bir kirişin kararlı bir şekilde aşırı sehim yapması
2. Aşırı plastik şekil değişimi neticesinde (σ_a). Örnek malzemeye akma dayanımının üzerinde yük uygulanması sonucunda yüksek sıcaklıklarda şekil kaybı, sünme ve / veya sünme kopması.
3. Kırılma neticesinde (K_{1c}). Örnek bir parçanın en az iki parçaya ayrılması ile sürekliliğinin tamamen bozulmasını içerir - statik yük altında: gevrek veya sünek, dalgalı / döngüsel yük altında: yorulma, çoğu makine parçasının kullanımda hasara uğradığı mod.



Katı bir cismin üzerine etkiyen gerilmeler altında iki veya daha çok parçaya ayrılmasına **kırılma** denir.



Kırılma nedir?



- Makroskobik yaklaşım: Bir kırılma kriterinin kurulup, kırılma yüklerinin önceden belirlenmesi
- Mikroskobik yaklaşım : Çatlak ucunda ayrılmayı yöneten mikroskobik mekanizmaların etüdü



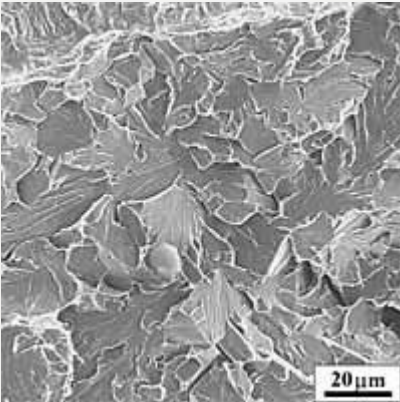
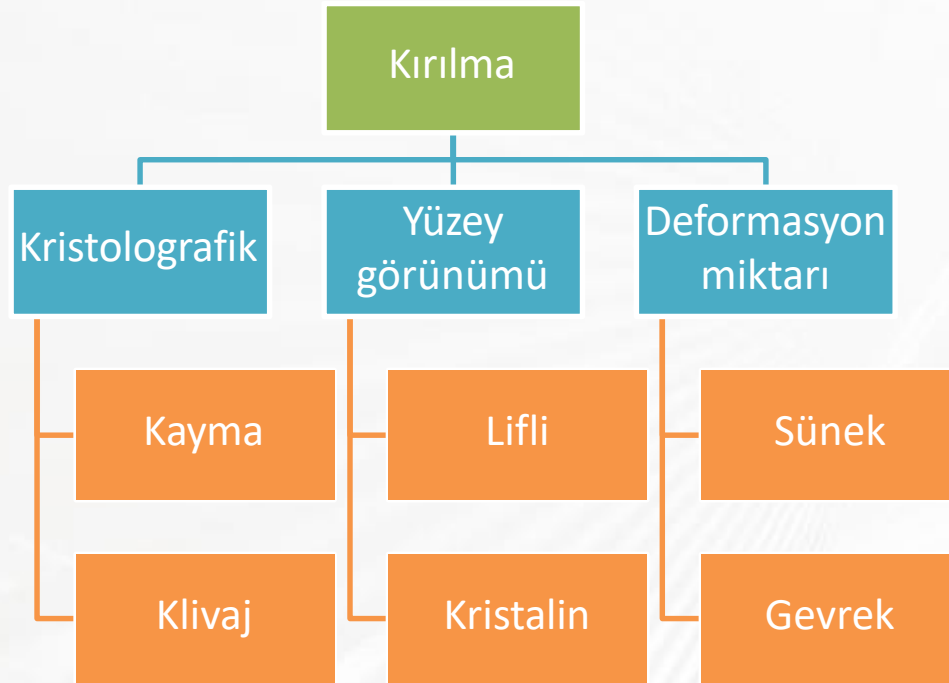
Kırılma



Kırılma çeşitli karakteristik özelliklere göre sınıflandırılır:

<i>Karakteristik</i>	<i>Kullanılan Deyimler</i>	
Kırılmaya neden olan birim şekil değiştirme	<i>Sünek</i>	<i>Gevrek</i>
Kristallografik mod	Kayma	Klivaj
Görünüş	Mat ve lifli	Parlak ve kristalin
Çatlak İlerlemesi	Tane sınırlarından	Taneler içinden





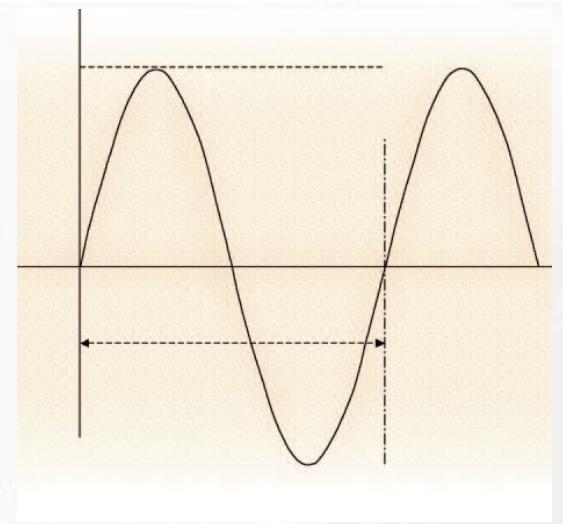
Kırılma: amaçlar

- Kırılma modu
 - Yorulma
 - Gerilmeli korozyon kırılması
 - Hidrojen gevrekliği vb,
- Çatlak başlangıcı nedeni
 - Gerilme konsantrasyonu
 - Malzeme kusurları
 - Korozyon etc
- Çatlak ilerleme hızı çalışmaları
-



Metallerde Kırılma

- ❑ Statik gerilmeler
- ❑ Değişken gerilmeler



Metallerde Kırılma

□ **Statik gerilmeler**

- Mekanik veya aşırı: çekme, basma, eğilme, burulma, kayma
- Kimyasal: gerilmeli korozyon, hidrojen gevrekliği, sıvı metal gevrekliği, pul pul dökülme
- Isıl: sürünme

□ **Değişken gerilmeler**

- Mekanik veya aşırı: yorulma (HCF, LCF), Sürtünme, Sürtünmeli-yorgunluk, aşınma
- Kimyasal: korozyon yorgunluğu... ..
- Termal: yorgunluk



Metallerde Kırılma....mühendislikçe önemi

□ Mekanik ←

- Sünek, gevrek, yorulma

□ Çevresel

- Korozyon, korozyon-aşınma

□ Mekanik-çevresel ←

- Gerilmeli korozyon kırılması, hidrojen gevrekleşmesi, korozyonlu yorulma

□ Statik aşırı yük kırılması(ani)

- Sünek, gevrek

□ İlerleyici kırılma

- Yorulma, gerilmeli korozyonu çatlaması, hidrojen gevrekleşmesi, sünme kırılması



Metallerde Kırılma.....istatistik

Hasar modu	Hasarların %	
	Makina parçaları	Uçak parçaları
Korozyon	29	16
Yorulma	25	55
Gevrek kırılma	16	-
Aşırı zorlanma(sünek)	11	14
Yüksek sic. korozyonu	07	02
SCC / Korozyonlu yorulma/ HE	06	07
Sünme	03	-
Aşınma/abrazyon/erozyon	03	06



Metallerde Kırılma

❑ Sünek kırılma

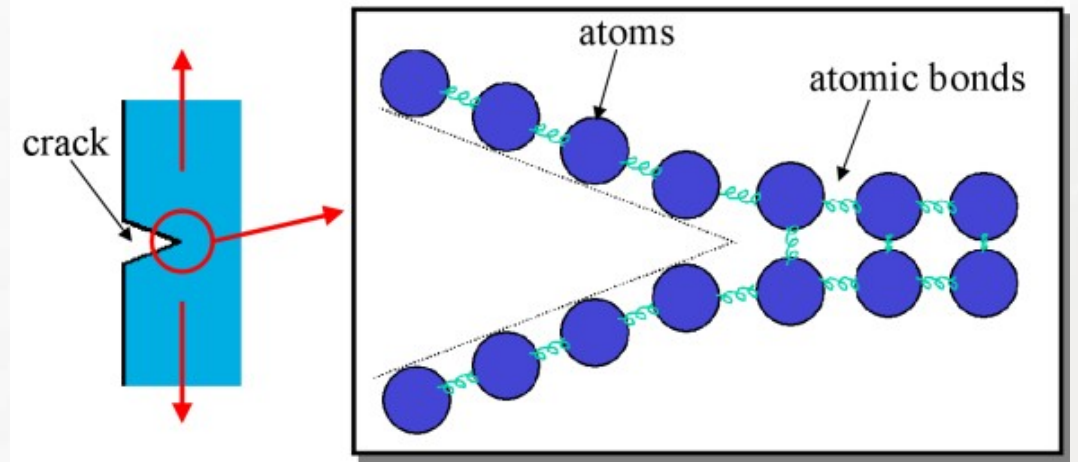
- ❑ Sünek kırılma büyük miktarda plastik deformasyon ve daha az katastrofiktir/hayati tehlike yaratır.
- ❑ Önemli miktar enerji, mikro boşlukların birleşmesi tarafından emilir. (yüksek enerjili kırılma modu)

❑ Gevrek kırılma

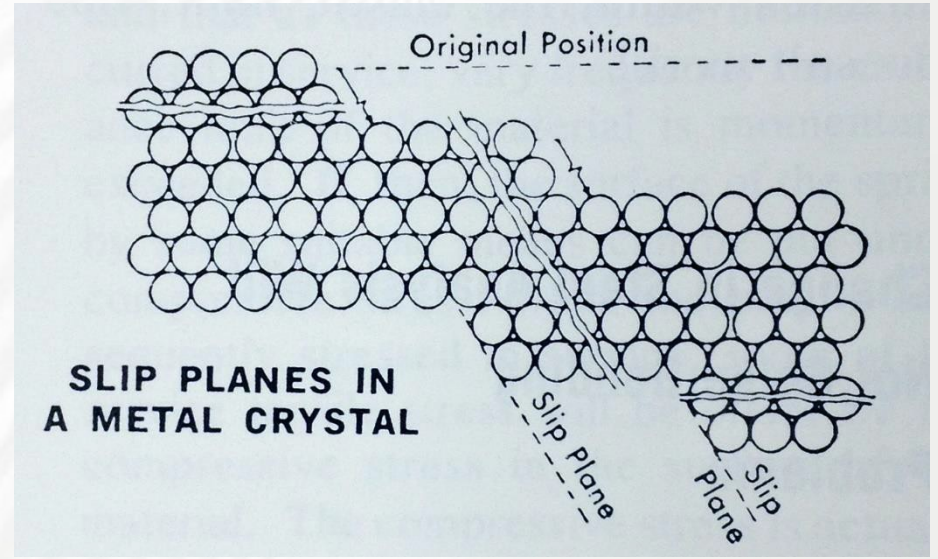
- ❑ Gevrek kırılma, büyük plastik deformasyon ve felaket içermez
- ❑ Kırılma sırasında düşük enerji emilir (düşük enerjili kırılma modu)



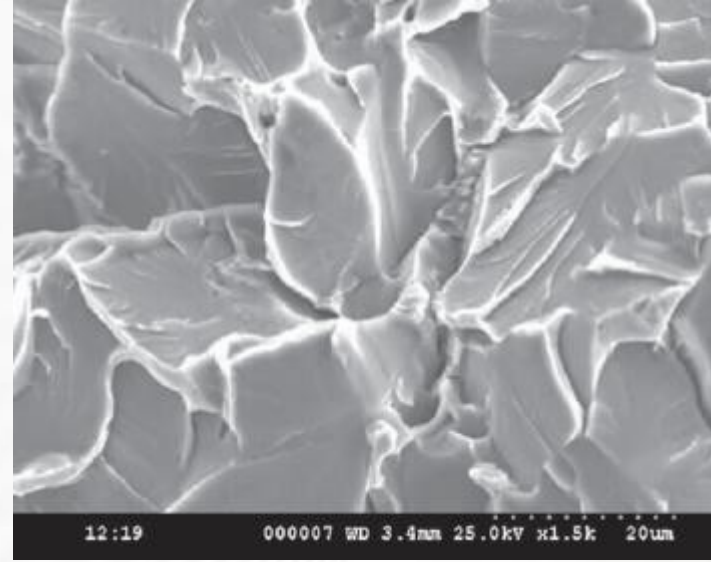
Klivaj kırılma, kırılma düzlemine dik bağların kopması sonucu oluşan kırılma türüdür.



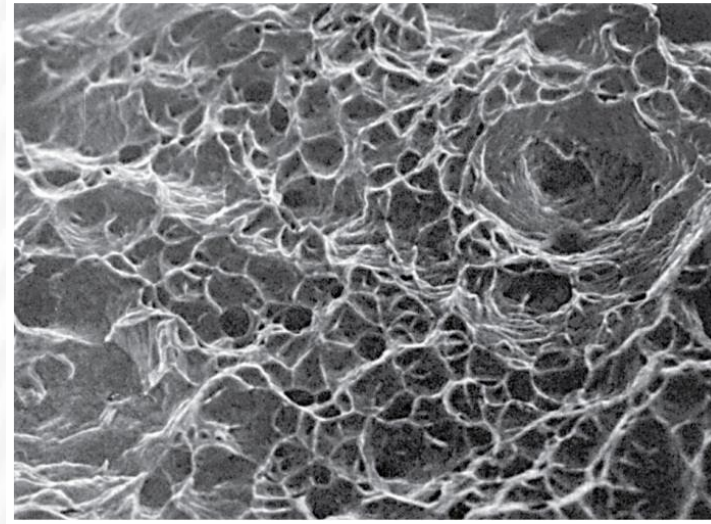
Kayma kırılması, atom düzlemlerinin kayması sonucu oluşan kırılma türüdür.



Klivaj kırılma tane içerisindeki bir düzlemde meydana gelirse **kristalin** kırılma oluşur



Kayma kırılması sonucu oluşan kırılma **lifli** kırılmayı oluşturur.



Plastik deformasyon etkisi oluşan kırılmalar **sünek** özellik taşırlar.



Gevrek Kırılma plastik deformasyon oluşmadan meydana gelen kırılma türüdür.



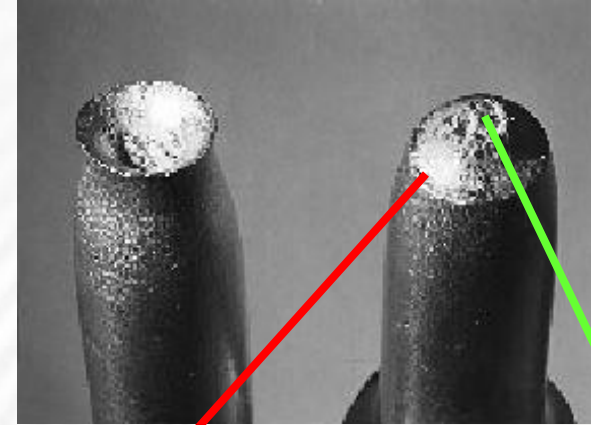
Uygulanan gerilme

Çatlak başlangıcı

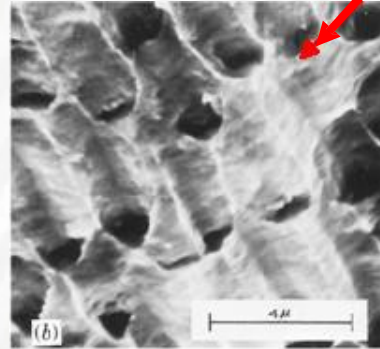
Çatlak ilerlemesi



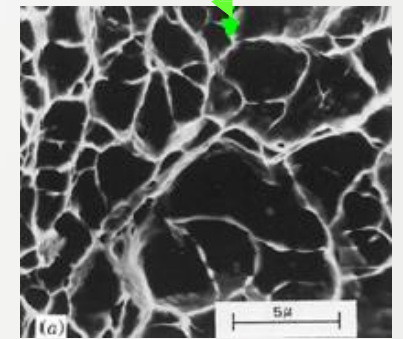
Gevrek



Sünek

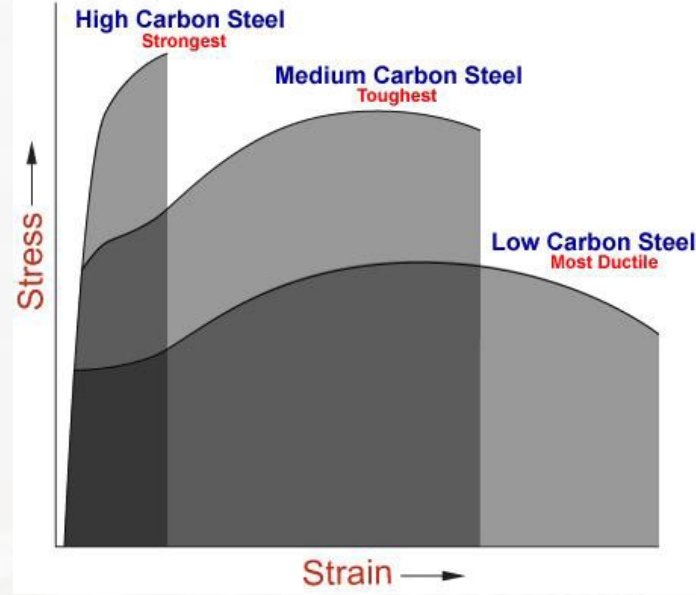


Kesme nedeniyle uzama



Eş eksenli oyuklar (dimples)

Sünek ve gevrek kırılma



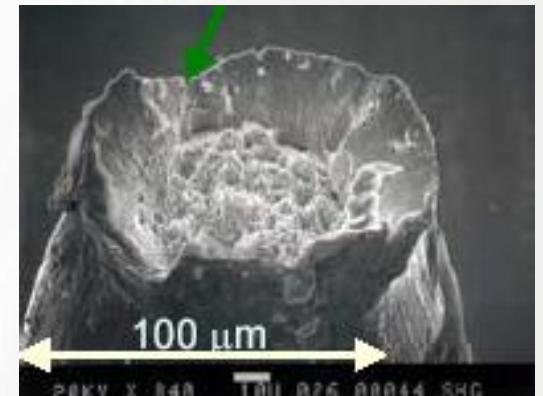
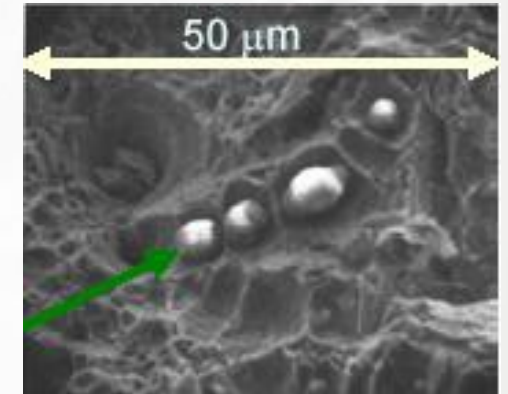
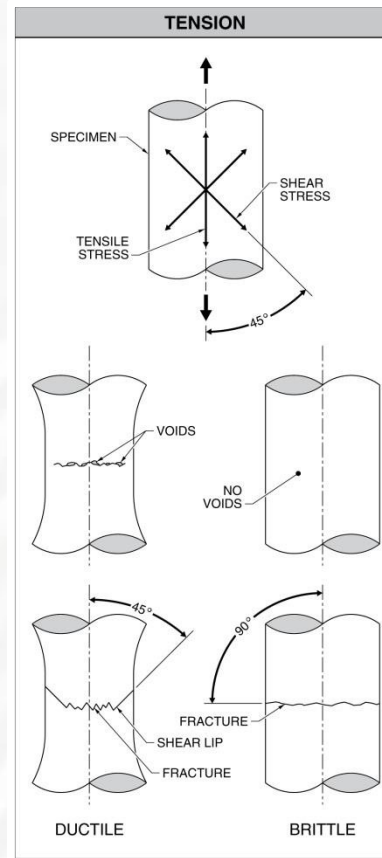
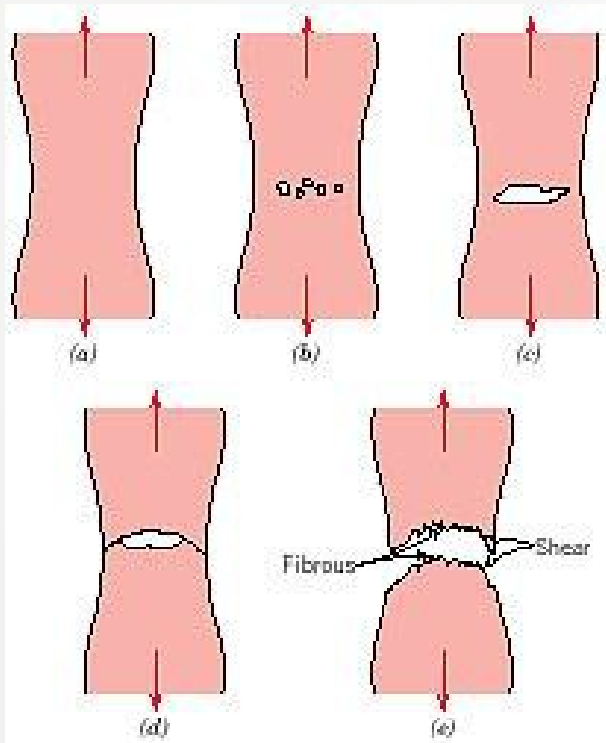
Sünek Kırılma

- Çatlak ucunda aşırı plastik deformasyon
- Yavaş çatlak ilerlemesi
- Kırılma yüzeyinde belirgin deformasyon
- Çatlağın ilerleyebilmesi için gerilme artırılmalı
- Tek parçalı kırılma

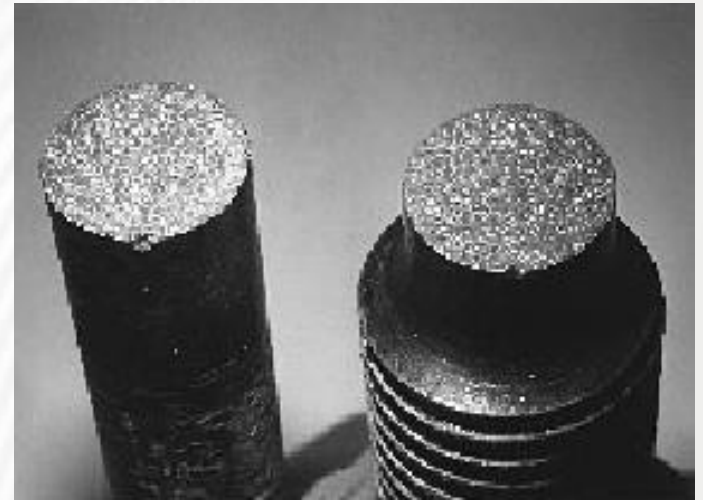
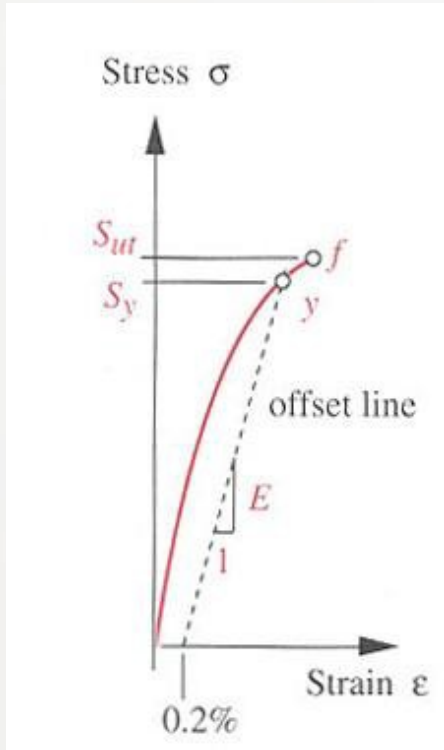
Gevrek Kırılma

- Çok az plastik deformasyon
- Aşırı hızlı çatlak ilerlemesi
- Çatlağı ilerletmek için gerilmeyi artırmaya gerek yok
- Çok parçalı kırılma

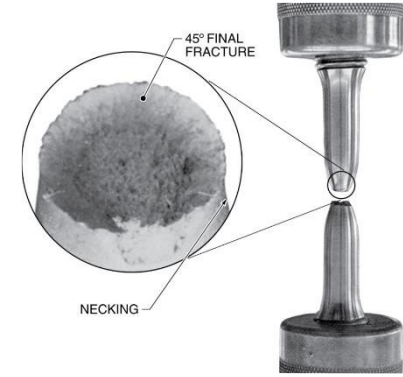
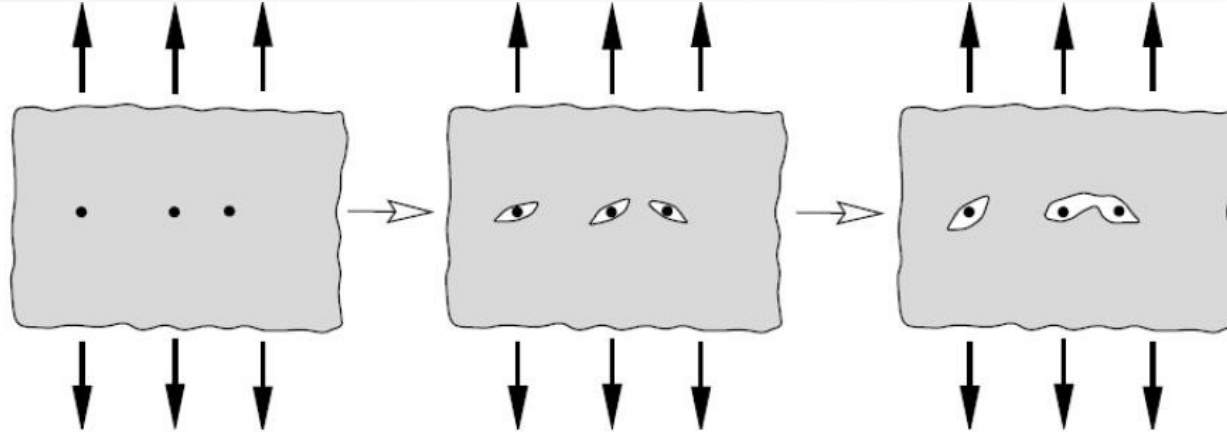
Sünek kırılma çatlağın oluşması ve büyümesinde önemli ölçüde kalıcı şekil değişiminin görüldüğü kırılma türüdür. Çatlak boşlukların oluşması ve birleşmesi ile meydana gelir ve yavaş ilerler. Kırılma yüzeyi mat ve lifli görünümündedir.



Gevrek kırılmada çatlağın başlaması zor ilerlemesi ise çok kolaydır. Kırılma yüzeyi parlak ve kristalin görünümdedir. Gevrek kırılmayı çok eksenli gerilme, ani zorlama ve düşük sıcaklıklar oluşturur.



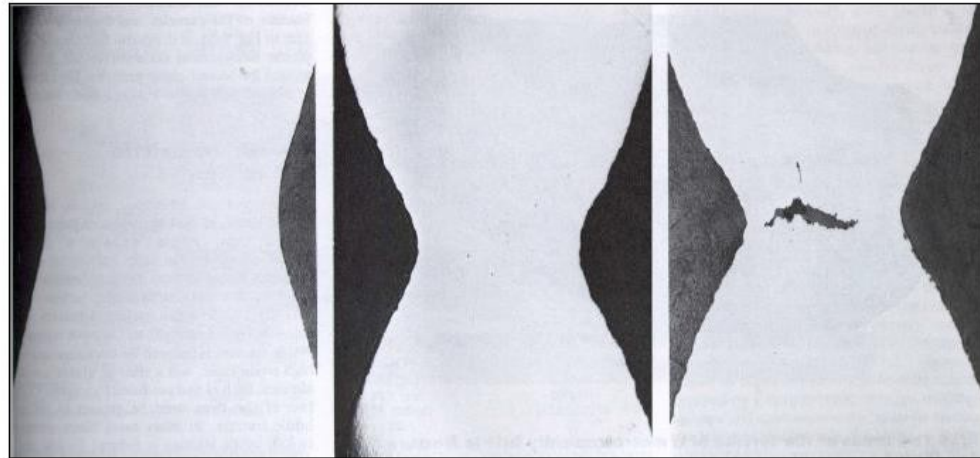
Mikro boşluk oluşumu ile çatlak ilerlemesi



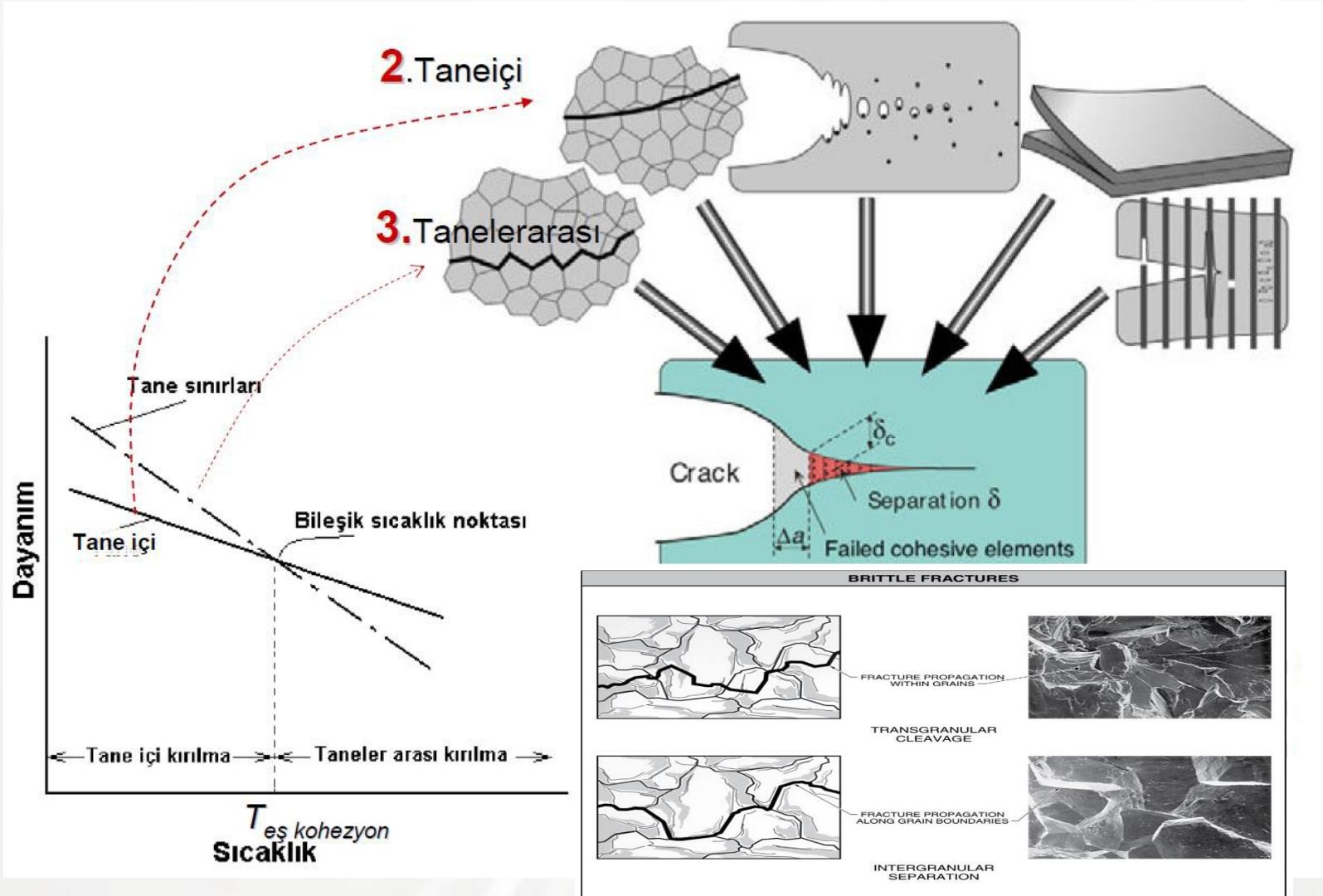
Plastic Strain Mismatch
or Adhesion Failure

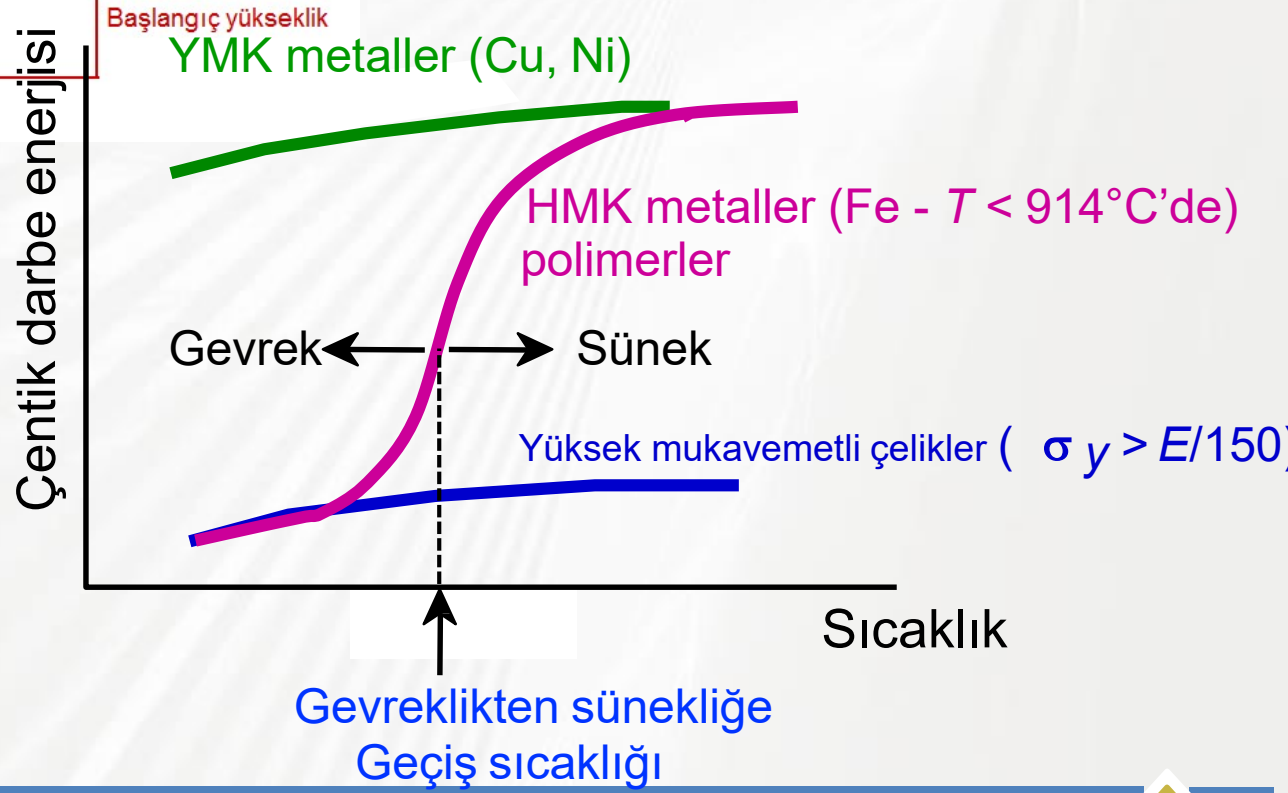
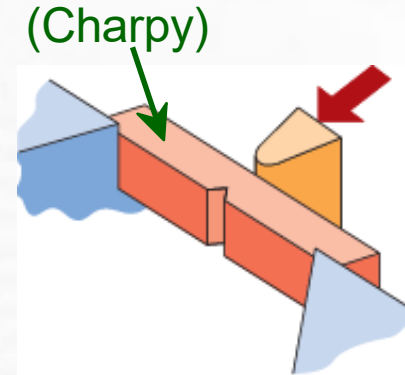
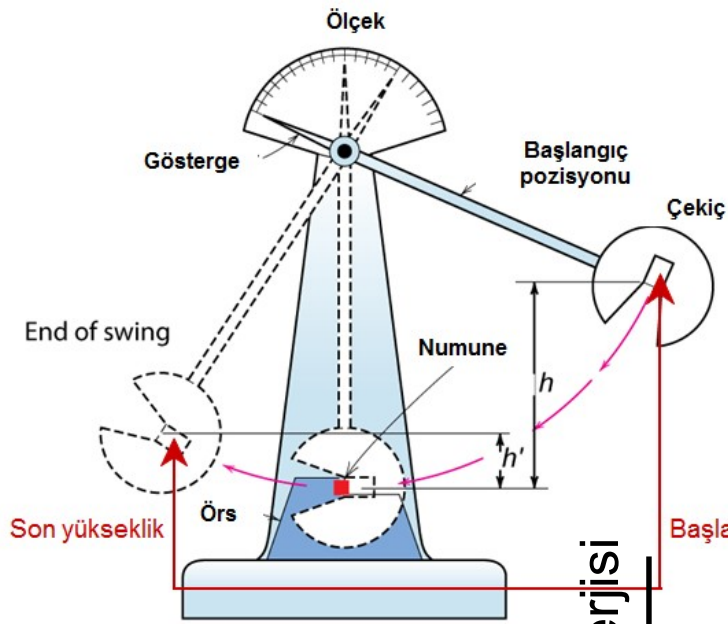


Inclusion
Failure



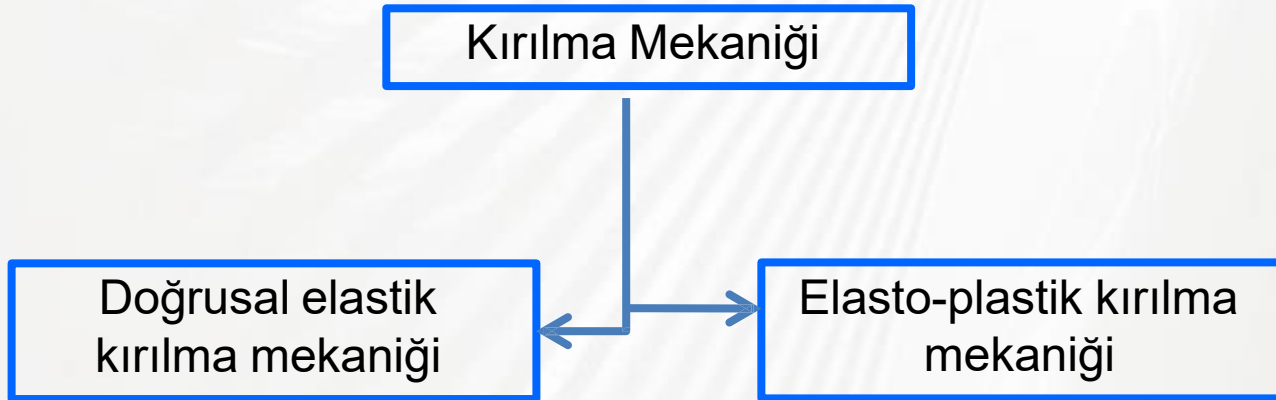
Tane içi ve tanesınırı kırılma ile çatlak ilerlemesi





Çentik darbe testi

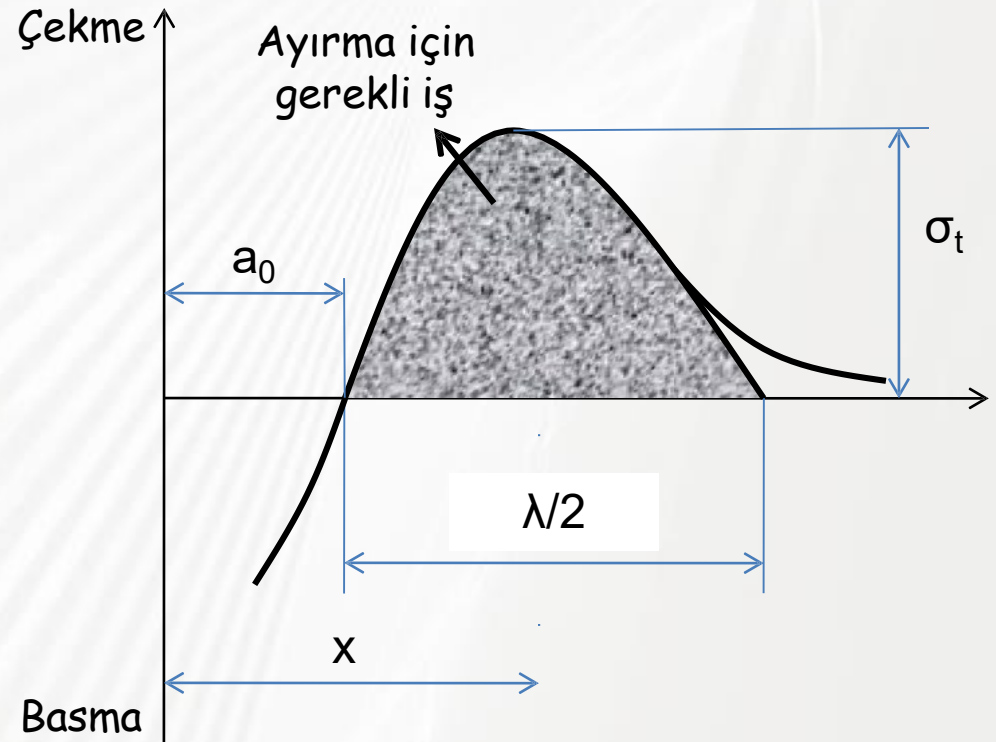
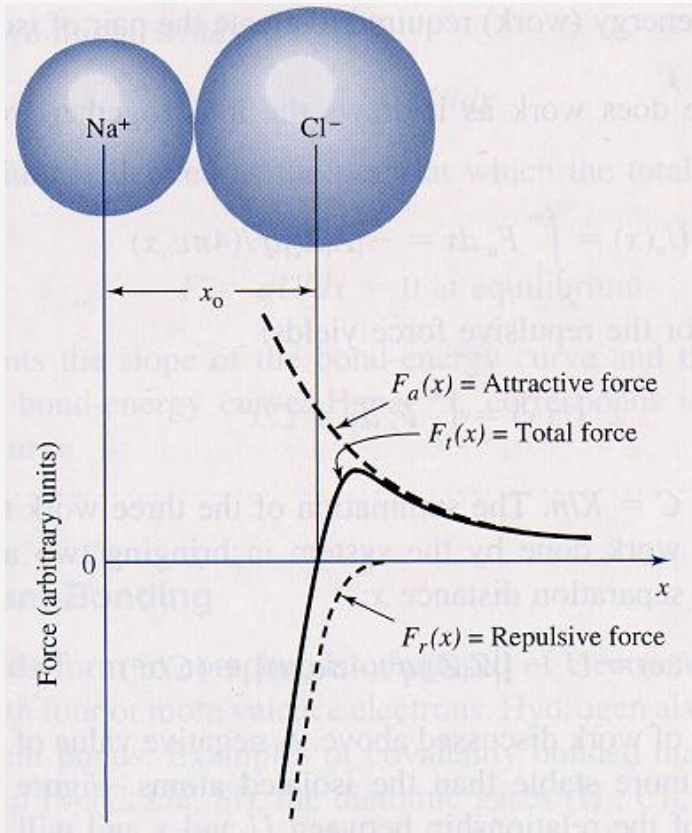
Metalsel malzemelerin kullanılmayacak hale gelmeleri, (hasar) çatlak oluşumu, bu çatlağın veya çatlakların yayılması ve sonuçta kırılma nedeniyledir. **Çatlak oluşumu, yayılması ve kırılma birbirini tamamlayan kavramlardır.** 2.Dünya savaşına kadar geleneksel tasarım yöntemlerinin amacı metalsel malzemeye etkiyen statik yükü, ya akma dayanımının altında tutarak aşırı sehinden korumak yada maksimum çekme dayanımının altında tutarak burkulma ve boyun teşekkülünden korumaktı. Bu yöntemlerden malzemenin kırılma direnci akma mukavemetinden büyük, çekme mukavemetinden küçüktür . Halbuki 2.dünya savaşı yıllarında bu yöntemlerle yapılmış pek çok gemi, köprü, basınçlı kap, büyük maddi kayıplar doğuran hasarlar meydana getirmişlerdir. **Bu hasarların sebebi ne olabilir?**

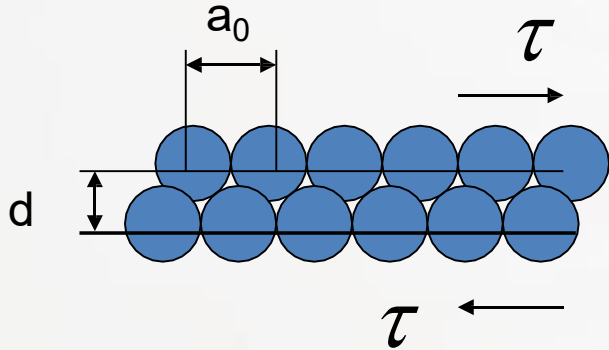


KLASİK TASARIM İLE KIRILMA MEKANİĞİ TASARIMININ KARŞILAŞTIRILMASI

1. Klasik tasarım, malzemenin elastik bölgede hiç kırılmadan güvenle kullanılabileceğini esas alır. Oysa malzeme σ_{ak} 'nın altındaki gerilmelerde kırılabilir.
 - Yön değiştiren yüklerde elastik bölgede kırılır.
 - Sürünme sırasında σ_{ak} 'nın altında kırılır.
 - Darbeli yükler altında σ_{ak} 'nın altında kırılır.
 - Çok büyük çatlak içerirse σ_{ak} 'nın altında kırılır.
2. Klasik yöntem, malzemenin sünek - gevrek davranış sergileyeceğini dikkate almaz.
 - Oda sıcaklığında sünek olan malzeme, düşük sıcaklıklarda gevrek davranış gösterir.
 - Statik yüklemde sünek olan malzeme darbeli yüklemelerde gevrek davranış gösterir.
 - Çentiksiz malzeme sünek davranış gösterirken, çentikli malzeme gevrek davranış gösterir.
3. Klasik tasarım malzeme içindeki çatlağın varlığını dikkate almaz. Sadece emniyet katsayısını büyük almak suretiyle kırılmayı önleyebileceğini kabul eder.
4. Klasik yöntemde 'KIRILMA TOKLUĞU' diye bir terim yoktur. Oysa kırılma mekaniğine göre kırılma; önce atom düzeyinde başlar, tane ile ilerler ve neticede kırılma ile son bulur.

Şekildeki atom arasındaki kohezif kuvvetin atomlar arası uzaklıkla değişimi görülmektedir. Denge konumunda iki atom arasındaki uzaklık a_0 olup, çekme gerilmesi uygulandığı zaman uzaklık artmaktadır. Teorik kohezif dayanım olarak adlandırılan bir σ_t değerine ulaşıldığında ayrılma için gerekli en büyük gerilme değerine ulaşılmış olur. Bu eğrinin üst kısmı büyük bir yaklaşımla bir sinüs eğrisi olarak alınabilir.





Atomlar arası ayrılma x , dalga boyu λ ise

$$x = a - a_0$$

$$\sigma = \sigma_t \cdot \underbrace{\sin \frac{2\pi x}{\lambda}}_{\text{Çok küçük}} \quad \sigma = \sigma_t \frac{2\pi x}{\lambda}$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (\text{Hook kanunu})$$

$$\varepsilon = \frac{x}{a_0} \implies E \cdot \frac{x}{a_0} = \sigma_t \cdot \frac{2\pi x}{\lambda}$$

$$\sigma_t = \frac{\lambda \cdot E}{2\pi a_0}$$

$$U_0 = \int_0^{\lambda/2} \sigma_t \sin \frac{2\pi x}{\lambda} dx = \frac{\lambda \sigma_t}{\pi}$$

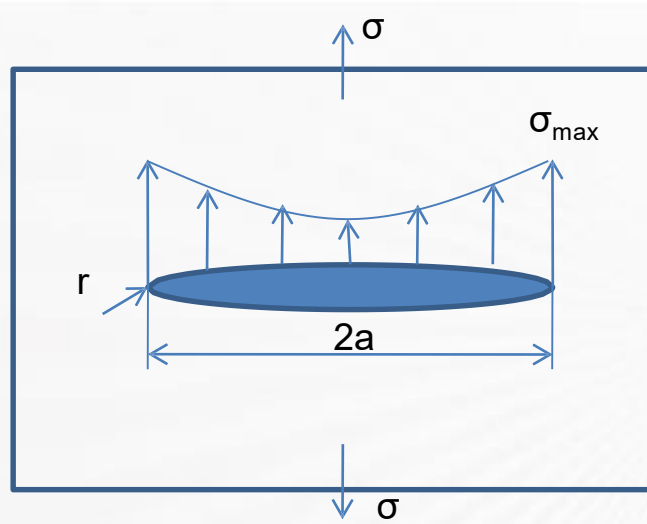
Eğrinin altında kalan alan düzlemleri ayırmak için harcanan işi vermektedir.

Sarfedilen enerji çatlağı oluşturmak için gereken iki yüzey için harcandığı düşünülürse;

$$\frac{\lambda \cdot \sigma_t}{\pi} = 2\gamma_y \quad \lambda = \frac{2\pi\gamma_y}{\sigma_t}$$

$$\sigma_t = \left(\frac{E \cdot \gamma_y}{a_o} \right)^{1/2}$$

Bu denklem kohezif dayanımın malzemenin elastisite modülü, yüzey enerjisi ve düzlemler arası uzaklığa bağlı olduğunu gösterir. Bu bağıntı ile saptanan dayanımlar E/10 mertebesinde olup, gerçek değerinden 10-1000 kat daha büyüktür. Sadece çok ince kılcal kristallerde (whisker) kristallerde deneysel olarak belirlenen değerler teoriğe yakındır.



Yapıda bir çatlak bulunması halinde çatlak dibindeki gerilme miktarı; çatlak dibindeki yarıçapın r , gerilmeye dik yarı çatlak boyunun a olması durumunda;

$$\sigma_{\max} = \sigma \left(1 + 2 \left(\frac{a}{r} \right)^{1/2} \right)$$

$r \ll a$

$$\sigma_{\max} = 2\sigma \left(\frac{a}{r} \right)^{1/2}$$

σ_{\max} değerinin σ_t ye eşit olduğu anda çatlak büyüyeceği kabul edilirse kırılmayı sağlayan gerilme

$$\sigma_K = \left(\frac{E \cdot \gamma_y}{4a} \right)^{1/2}$$

Bu bağıntı 2-3 μ m uzunluğundaki çatlak için yaklaşık $E/1000$ oranında olup gerçek değerlere çok yakındır.

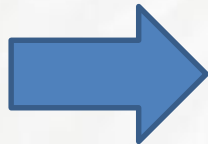
1920 yılında ideal gevrek cisim için bu kriter Griffith tarafından ortaya konulmuştur. Griffith cisimlerin küçük çatlaklar içerdiğini ve bir çatlağın ancak büyüme esnasında serbest kalan elastik enerjisinin yeni yüzeyler oluşturmak için gerekli yüzey enerjisine eşit veya daha fazla olması halinde çatlağın ilerleyeceğini savunmuştur. Yani;

$$\frac{\partial(\Delta U_E)}{\partial(2a)} \geq \frac{\partial(\Delta U_y)}{\partial(2a)}$$

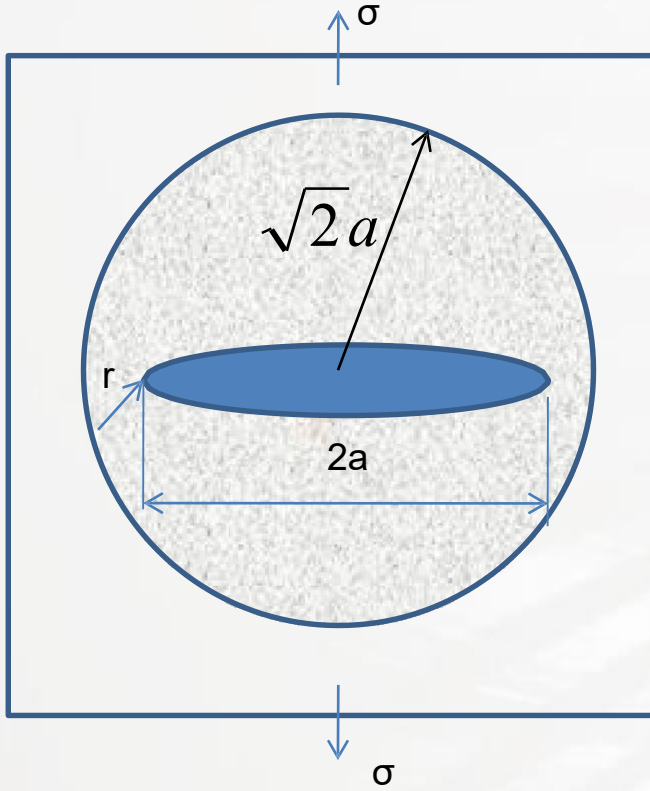
Elastik enerji

Birim kalınlık için $2a$ boyundaki bir çatlak nedeniyle elastik enerjideki azalma

$$U_E = \frac{\sigma^2}{2E}$$



$$U_E = \frac{\pi a^2 \sigma^2}{E}$$



Enerjideki azalma çatlak çevresindeki $\sqrt{2}a$ yarıçapındaki bir bölgenin elastik enerjisinin serbest kalması şeklindedir.

2a boyunda bir çatlak oluşturmak için gerekli yüzey enerjisi artışı;

$$U_y = 2 \cdot 2a \cdot \lambda_y = 4a\gamma_y$$

$$\frac{\partial(\Delta U_E)}{\partial(2a)} \geq \frac{\partial(\Delta U_y)}{\partial(2a)} \Rightarrow \frac{2\pi a \sigma^2}{E} \geq 4 \cdot \gamma_y$$

$$\Rightarrow \sigma \geq \left(\frac{2 \cdot E \cdot \gamma_y}{\pi a} \right)^{1/2} = \sigma_K$$

Kırılma
gerilmesi
 \approx

$$\sigma_K \approx \left(\frac{E \cdot \gamma_y}{4a} \right)^{1/2}$$

Griffith bağıntısı cam ve gevrek cisme yakın malzemelerde gerçeğe yakın değerler vermektedir. Ancak metalik malzemelerde kalıcı şekil değişimi olmaktadır. Dolayısıyla Griffith'in ortaya koyduğu kriterde **serbest kalan enerji, yeni yüzeyler oluştururken kalıcı şekil değişimi içinde harcanmaktadır**. Kalıcı şekil değişimi her malzeme için farklılık gösterir. Bu nedenle Griffith'in enerji yaklaşımı metalsel malzemelere doğrudan uygulanmaz. Bu konuda önce Orowan daha sonrada Irwin , Griffith'in yaklaşımına eklemeler yapmışlardır.

Orowan

$$\sigma_K = \left(\frac{E(\gamma_P + \gamma_Y)}{a} \right)^{1/2} \quad \gamma_P \geq \gamma_Y \quad \Rightarrow \quad \sigma_K = \left(\frac{E\gamma_P}{a} \right)^{1/2}$$

Irwin

Plastik yüzey enerjisini tespit etmek zor olduğu için formülde çatlak büyüme kuvvetini hesaba katmıştır.

$$\sigma_K = \left(\frac{E \cdot \zeta_c}{\pi a} \right)^{1/2}$$

Deformasyon enerjisi boşalma hızı

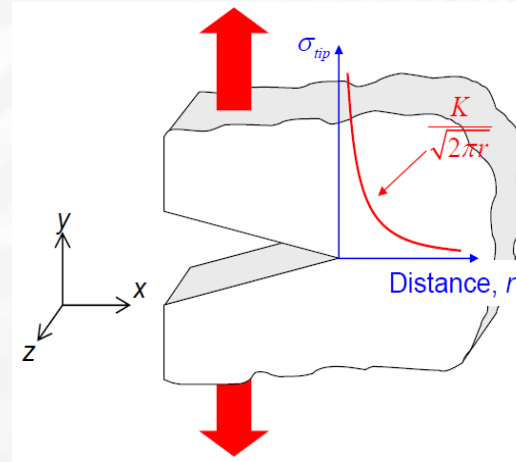
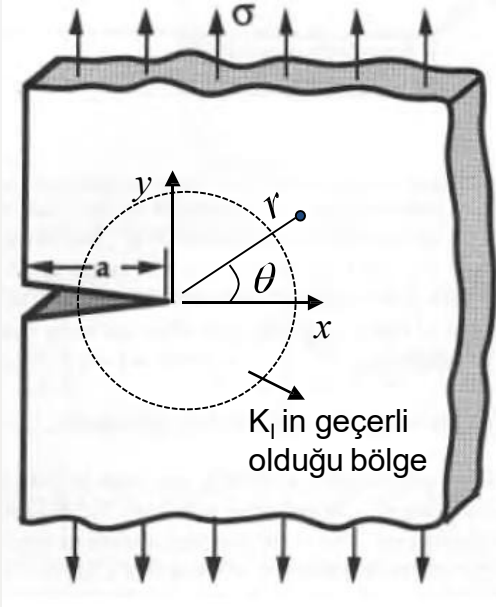
$$\zeta_{Kri} = \frac{\pi a \sigma^2}{E}$$

Enerji yaklaşımındaki pratik güçlükler nedeniyle, IRWIN lineer elastisite teorisini kullanarak Mod-I tipi yükleme altındaki sonsuz genişlikteki çatlaklı bir cisimde düzlem gerilme halinde çatlak ucu civarındaki gerilme alanının aşağıdaki formda olduğunu göstermiştir.

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

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

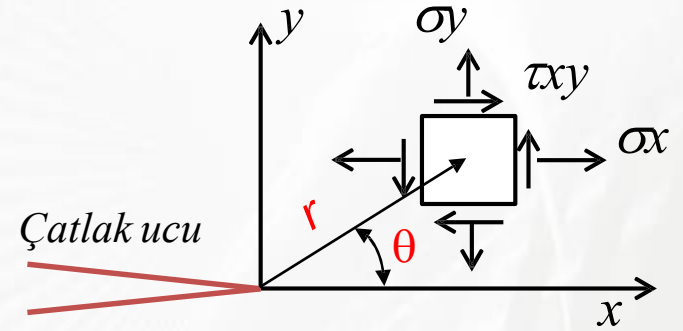
$$\sigma_{xy}(r, \theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) + O(\sqrt{r})$$



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

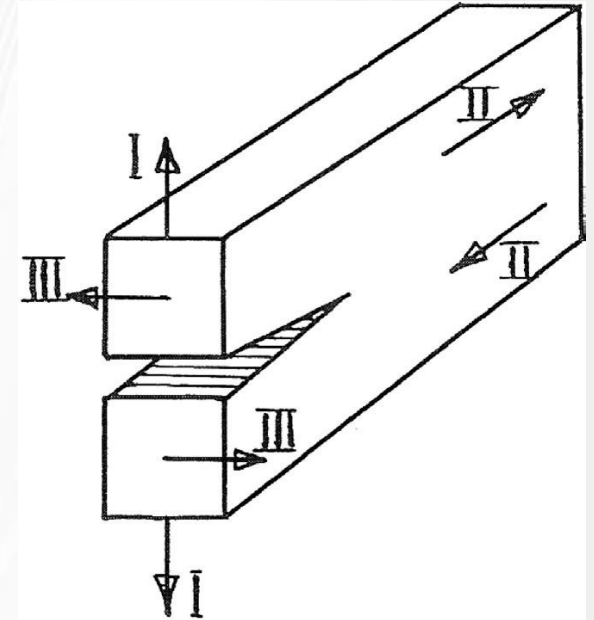
Özel olarak $\theta=0$ düzlemindeki gerilmeler ;

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}$$
$$\tau_{xy} = 0$$



olarak elde edilir. Görüldüğü gibi gerilmeler aynı zamanda K_I 'e de bağlıdır. K_I , K_I ve θ dan bağımsız olup yükleme, geometri ve çatlak uzunluğu na bağlı bir parametredir.

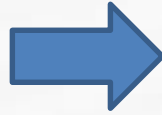
Farklı geometriler, çatlak uzunlukları ve yüklemeler için K_I farklı değerler alır.



Sonsuz büyüklükte ve birim kalınlıkta bir levha ele alındığında levhada mevcut $2a$ uzunluğunda bir çatlağın ilerlemesi için zorlayıcı faktör elastik enerjidir.

$$\zeta = -\frac{\partial(\Delta U_E)}{\partial(2a)}$$

Düzlem gerilme
için



$$\zeta = \frac{\pi}{E} a \sigma^2$$

İrwin

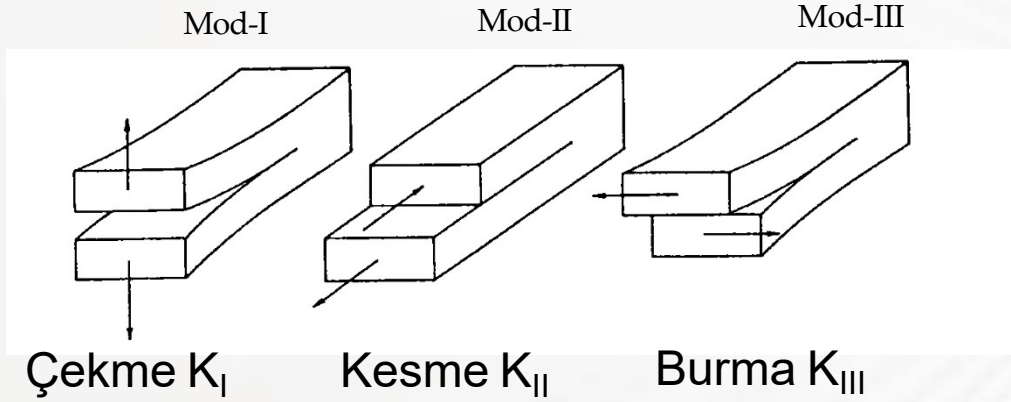
Çatlak bölgesinde yerel gerilmelerin çatlak boyunun yarısının karekökü değeri ile normal gerilmenin çarpımından elde edilen değer ile değiştiğini iddia etmiştir. Buna **gerilme şiddet faktörü** denir.

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

En genel hal

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

Kırılma mekaniğinde 3 türlü zorlama şekli vardır.

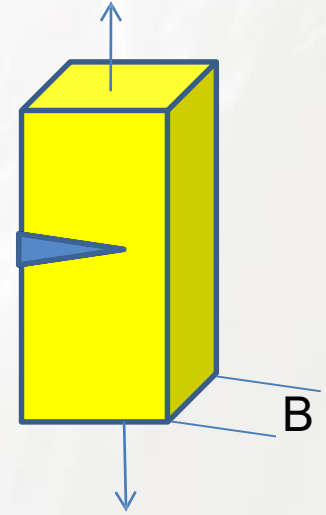
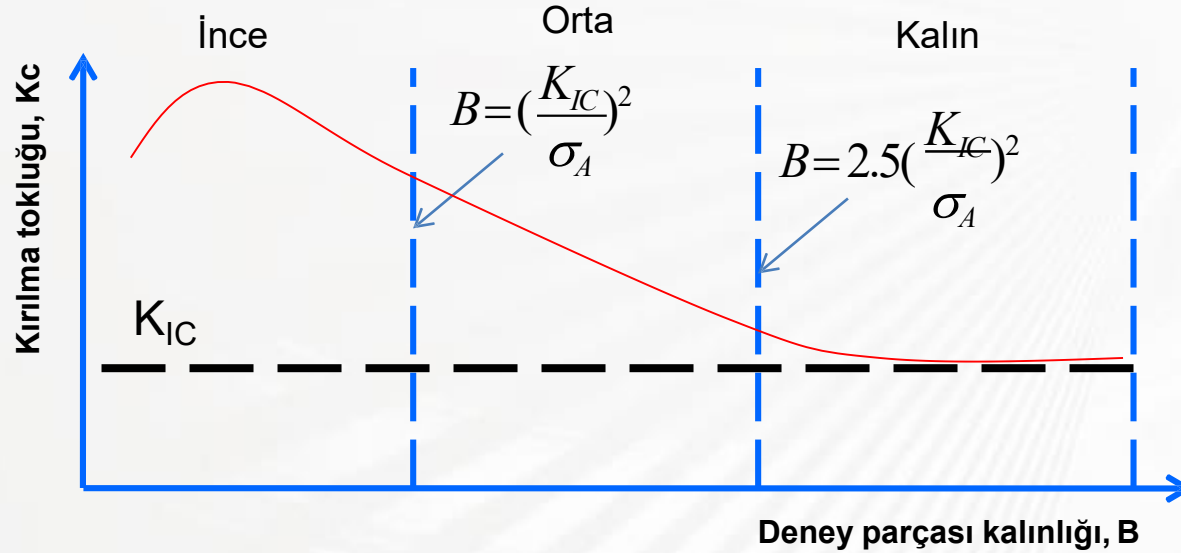


Zorlama türlerinin en önemlisi ve tehlikelisi **çekme yönü** ile oluşan durumdur.

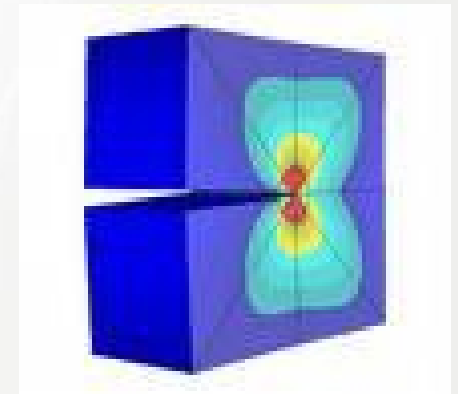
Gerilme şiddet faktörü K_c değerini aştığı zaman çatlak ani olarak ilerlemekte ve gevrek kırılma oluşmaktadır. Bu kritik değere **kırılma tokluğu** denir. Kırılma tokluğu bir malzeme özelliğidir. Çünkü K_{IC} malzemenin boyutundan bağımsız ve çok az bir dağılım ile sabittir (deneysel sonuç). Ancak K_{IC} nin saptanması için yapılacak deneylerde düzlem şekil değiştirme durumu yani çatlak ucundaki plastik şekil değiştirmiş bölgenin parça boyutlarına göre küçük olması zorunludur.

Kırılma tokluğu ayrıca malzemenin önceki şekillendirme yönüne bağlıdır.

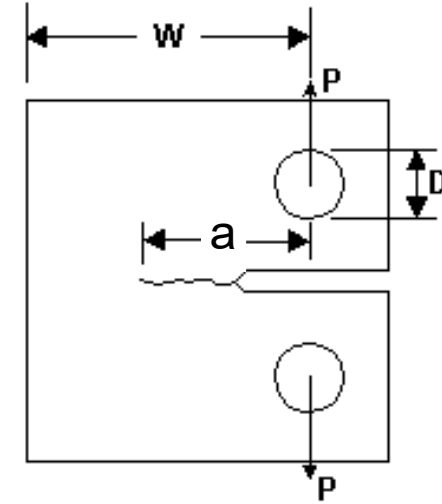
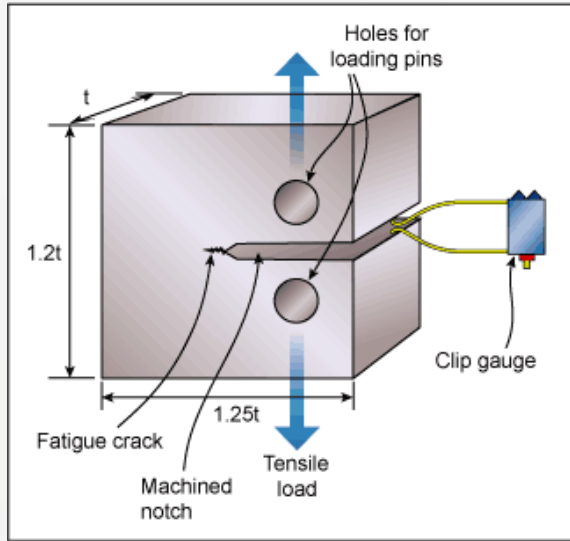
Gerilme durumunun düzlem gerilme veya düzlem şekil değiştirme halinde olması kırılma tokluğunun değişmesine neden olur.



Plastik şekil değiştirerek kırılma daha büyük iş gerektirdiğinden ve ince kesitlerde bu deformasyon sonrası kırılma oranı fazla olduğundan tokluk artar. Ancak deformasyonla kırılmanın yüzeydeki oranı arttıkça gevrek kırılma olur.



Kırılma tokluğu en yaygın olarak ASTM E399 a göre belirlenir. İki tür deney numunesi kullanılır.



$B = \text{thickness}$

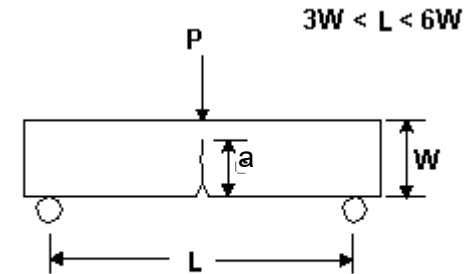
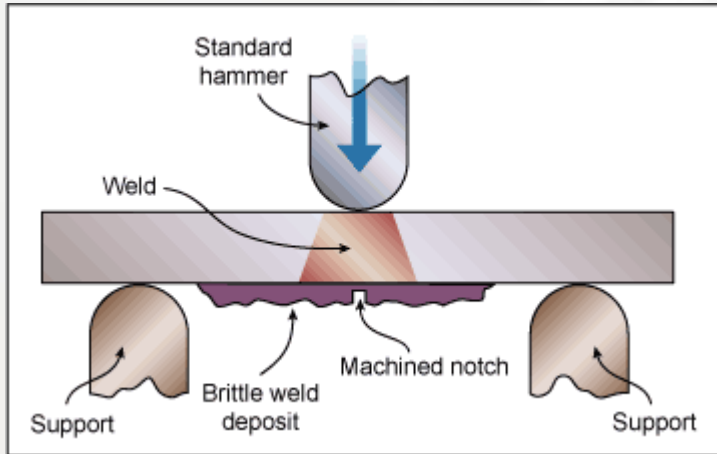


Table 8.1 Room-Temperature Yield Strength and Plane Strain Fracture Toughness Data for Selected Engineering Materials

Material	Yield Strength		K_{Ic}	
	MPa	ksi	MPa \sqrt{m}	ksi $\sqrt{in.}$
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)	25.0–69.0	3.63–10.0	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.

Kırılma tokluğu çatlaklı bir yapının kırılmaya karşı direncini gösteren malzemelerin mekanik özelliklerinden biridir. Gevrek malzemeler relatif olarak düşük kırılma tokluğuna sahiptir (kolaylıkla kırılır) buna karşın sünek malzemeler de relatif olarak yüksek tokluğa sahiptirler.

kırılma kriteri:

$K_I < K_{Ic}$ ise çatlak ilerlemez

$K_I \geq K_{Ic}$ ise çatlak hızla ilerler ve **Gevrek kırılma meydana gelir**

$$K_I = K_{Ic} = Y \sigma_k \sqrt{\pi a_{kr}} \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad \text{Düzlem şekil değiştirme kırılma tokluğu}$$

Bu ifade çatlaklı yapıların tasarımında genelde iki şekilde kullanılır;

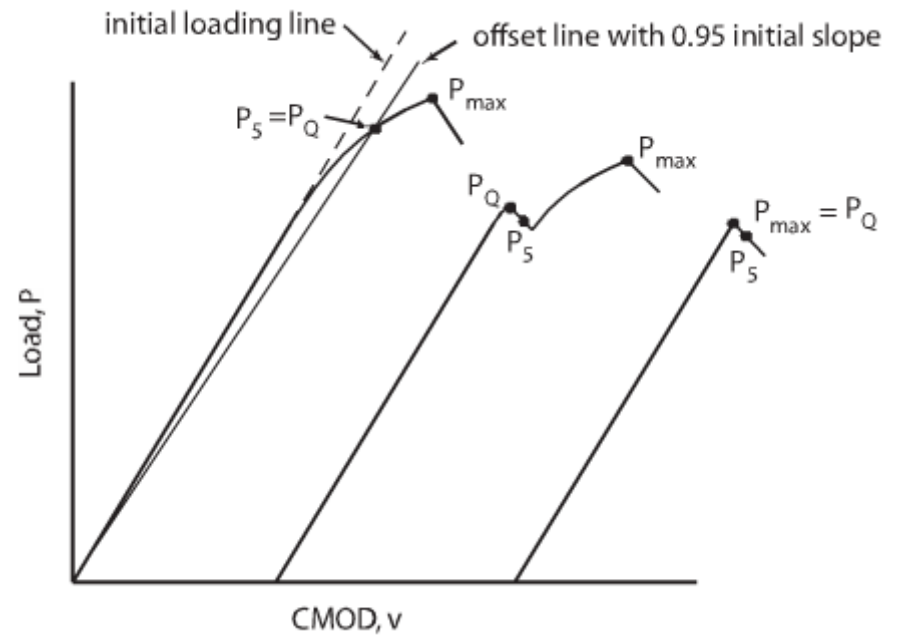
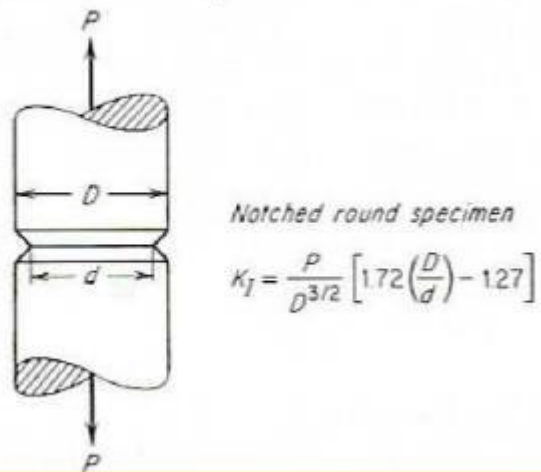
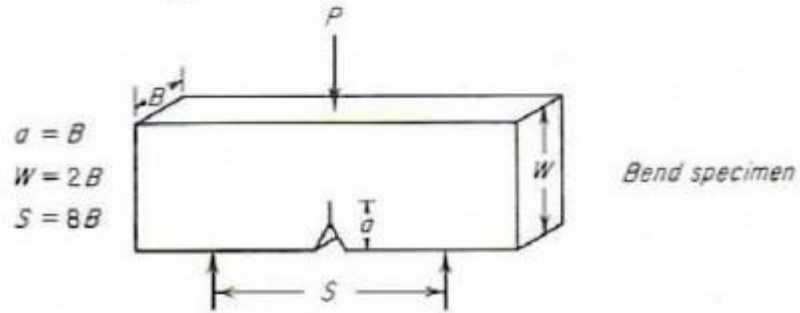
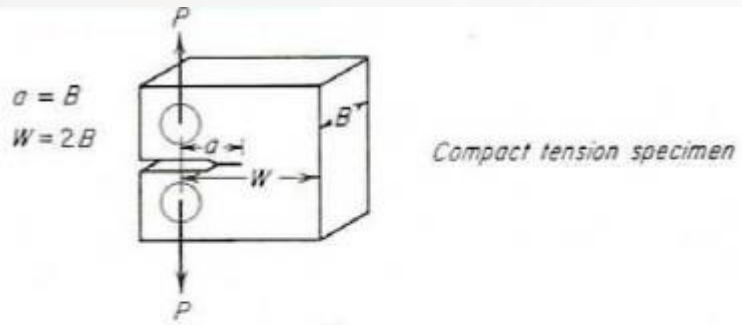
- Ya çatlama başlangıcı kontrol edilir
- Yada çatlak ilerlemesi kontrol edilir

Kırılma tokluğu deneylerinin en önemli aşaması deney parçası tasarımıdır. Deney parçası, düzlem şekil değiştirme şartlarını sağlayabilmesi için yeterli kalınlığa sahip olmalıdır. Aynı şart çatlak boyu içinde geçerlidir.

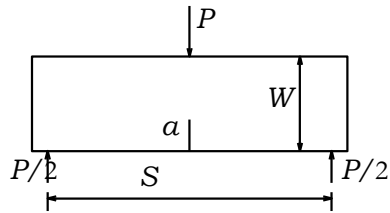
$$a, B \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_A} \right)^2$$

σ_a/E Oranı		Önerilen en az kalınlık (mm)
Alt sınır	Üst sınır	
-	0,0050	100
0,0050	0,0057	75
0,0057	0,0062	63
0,0062	0,0065	50
0,0065	0,0071	38
0,0071	0,0080	25
0,0080	0,0095	13
0,0095	-	6,5

Burada hem kırılma tokluğu hemde akma gerilmesi bilinmediği için tahmin yapılır. Bu tahmin elastisite modülünün akma dayanıma oranının 200 den küçük olması halinde geçerlidir. Eğer lineer elastik kırılma mekaniği şartları geçerli değilse gerilme şiddet faktörü çatlak açılım miktarı ve J integrale göre hesaplanır.

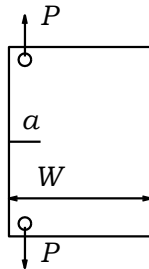


Üç noktadan Eğme deney parçası

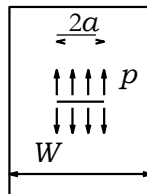


$$K_I = \frac{PS}{BW^{3/2}} \left[2.9 \left(\frac{a'}{W} \right)^{1/2} - 4.6 \left(\frac{a'}{W} \right)^{3/2} + 21.8 \left(\frac{a'}{W} \right)^{5/2} - 37.6 \left(\frac{a'}{W} \right)^{7/2} + 37.7 \left(\frac{a'}{W} \right)^{9/2} \right]$$

Kompakt Çekme Deney Parçası



$$K_I = \frac{P}{BW^{1/2}} \left[29.6 \left(\frac{a}{W} \right)^{1/2} - 185.5 \left(\frac{a}{W} \right)^{3/2} + 655.7 \left(\frac{a}{W} \right)^{5/2} - 1017 \left(\frac{a}{W} \right)^{7/2} + 638.9 \left(\frac{a}{W} \right)^{9/2} \right]$$



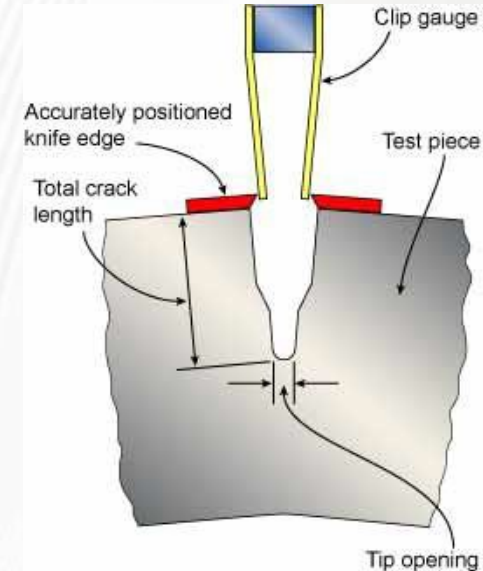
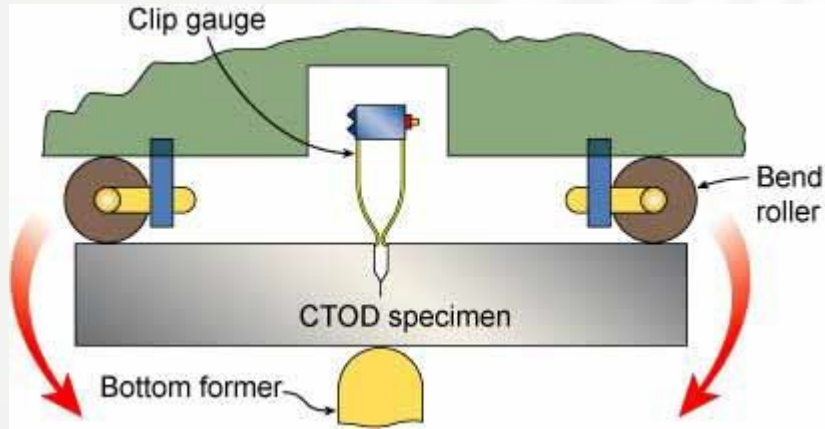
$$K_I = p \sqrt{\pi a}$$

p per unit thickness

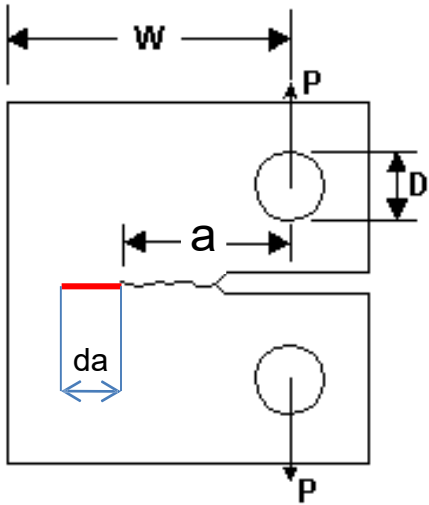
Linear elastik kırılma mekaniğinde akma dayanımında düşük gerilme değerleri ve düzlem şekil değiştirme halleri esastır. Çatlak dibinde plastik deformasyon bölgesi büyükse linear elastik kırılma şartları geçerliliğini yitirir. Bu durumda elasto-plastik kırılma şartları geçerlidir. CTOD ve J-integral olmak üzere iki yöntem kullanılır.

CTOD yönteminde yerel şekil değişiminin ölçüsü olarak çatlak ucundaki şekil değişimi alınır. Bunun için COD a ait deney parçaları kullanılır.

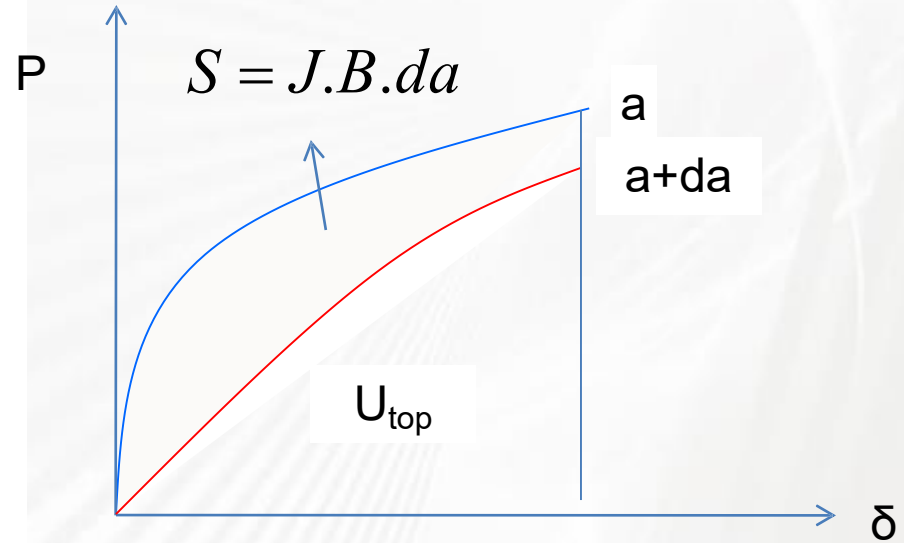
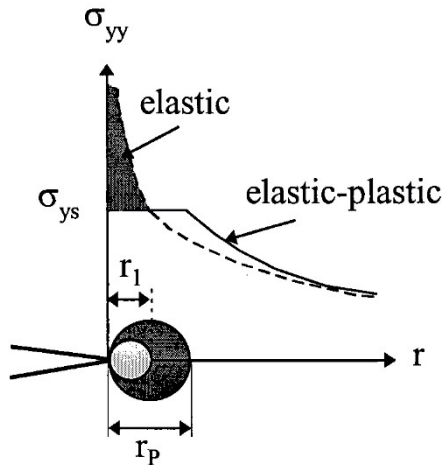
$$CTOD = COD.r. \frac{(w-a)}{(a-r(w-a))}$$



J-integralde potansiyel enerji değişimi hesaba katılır.



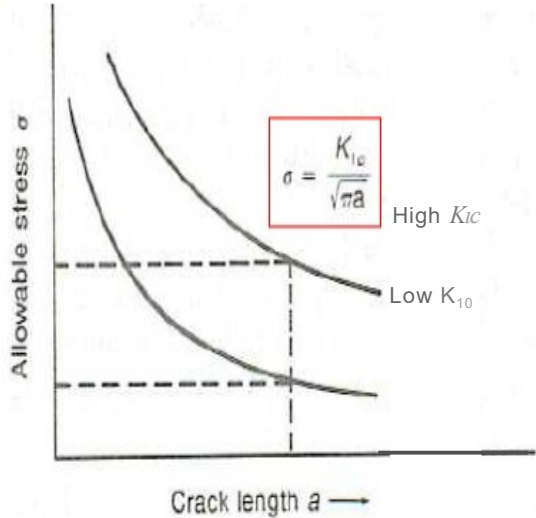
$B = \text{thickness}$



$$J = 2 \frac{U_{Top}}{(b(w-a))}$$

Kırılma tokluğu ve tasarım

- ✓ Malzemenin K_{1c} değeri biliniyorsa ve bir çatlakın varlığına izin veriliyorsa, hasar oluşmadan önce servis sırasında çatlak ilerlemesini izleyebiliriz.
- ✓ Parça içindeki çatlak (servis sırasında), Tahribatsız Testlerden biriyle (NDT), yani ultrasonik, boya penetran, X-ışını, Girdap akımı, ferromanyetik inceleme kullanılarak tespit edilebilir.



Kırılma tokluğu ile izin verilebilir gerilme ve çatlak boyu arasındaki ilişki

$$K_{IC} = \alpha \sigma_{app} \sqrt{\pi a_c} \quad \text{Eq.11}$$

Yandaki şekil ve denklemden, hasar oluşmadan verilen bir çatlak uzunluğu için izin verilebilir gerilme σ 'yı hesaplayabiliriz



Örnek: kalınlığı kısmi geçen bir çatlak için gerilme şiddet faktörü $K = \sigma \sqrt{\pi a} \sqrt{\sec \pi a / 2t}$ olarak verilmektedir, burada a çatlak derinliğini, t ise duvar kalınlığını göstermektedir. Eğer çatlak, 12 mm'lik duvar içinde 5 mm derinliğe sahipse, 7075-T6 Al alaşımından yapılmış duvar kalınlığının 172 MPa'lık gerilmeye dayanıp dayanmayacağını bulunuz.

K_{IC} of 7075-T6 **Al alloy** = 24 MPa.m^{1/2},

a = 5 x 10⁻³ m

t = 12 x 10⁻³ m

$$\sec \frac{\pi a}{2t} = \sec \frac{\pi(5 \times 10^{-3})}{2(12 \times 10^{-3})} = \sec 0.6545 = \frac{1}{\cos 0.6545} = 1.260$$

$$\sigma = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi a} \sqrt{\sec \pi a / 2t}} = \frac{24}{\sqrt{\pi(5 \times 10^{-3})} \sqrt{1.260}} = \frac{24}{\sqrt{0.01979}} = 171 \text{ MPa}$$

Ancak Uygulanan gerilme 172 MPa.m^{1/2} dir. Çatlak gevrek kırılmaya neden olacak biçimde büyüyecektir



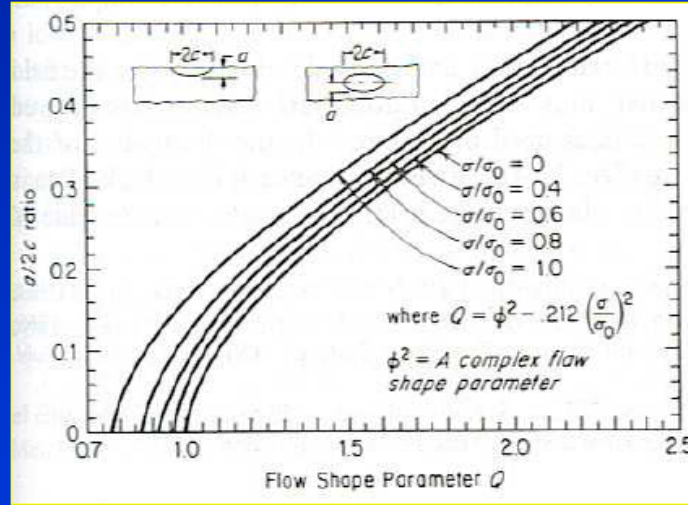
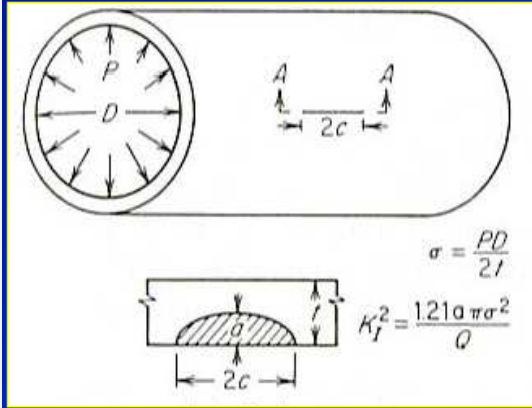
Ti-6Al-4V'den ince cidarlı basınçlı kap $K_{Ic} = 57 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ve $\sigma_0 = 900 \text{ MPa}$. İç basınç, 360 MPa çevresel çekme gerilmesi oluşturur. Bu çatlak, eşit çekme çevresel gerilmesine dik olan çatlağın ana düzlemi ile yönlendirilmiş yarı eliptik bir yüzey çatlağıdır, bkz. Bu tip yükleme ve geometri için gerilme şiddeti faktörü:

$$K_I^2 = \frac{1.21a\pi\sigma^2}{Q}$$

$$Q = \phi^2 - 0.212(\sigma/\sigma_0)^2$$

σ = uygulanan nominal gerilme

a = yüzey çatlağı,



$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{360}{900} = 0.4$$

12 mm'lik duvar kalınlığı için, kırılmaya neden olacak çatlak boyu a_c yi bulabiliriz. Eğer $2a=2c$ ise $Q=2,35$ bulunur.

Note:

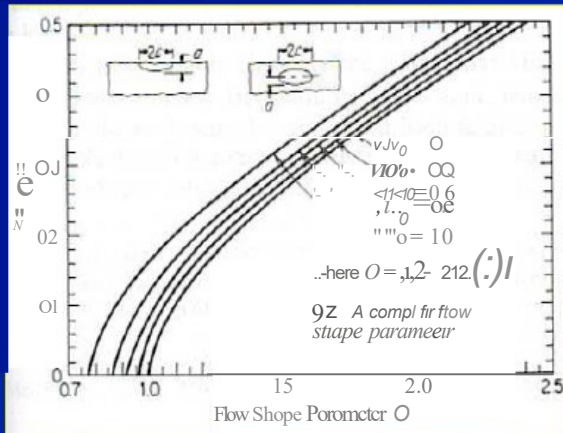
$a_c (15.5 \text{ mm}) >$ Duvar kalınlığı 12 mm ,

→ Patlamadan önce sızdır prensibi

$$a_c = \frac{K_{Ic}^2 Q}{1.21\pi\sigma^2} = \frac{(57)^2 (2.35)}{1.21\pi(360)^2} = 15.5 \text{ mm}$$

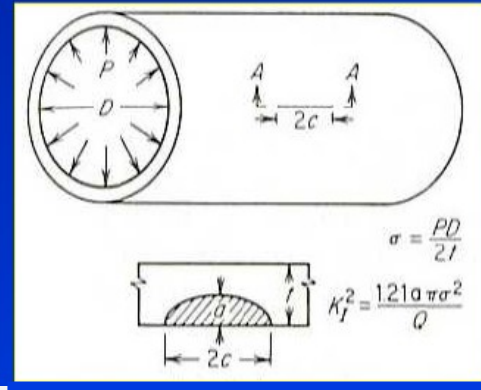


Eğer çatlak boyu çok uzunsa örn. $a/2c = 0,05$, ve $Q=1$, ve bu durumda kritik çatlak boyu a_c 6,6 mm olur.



$$a_c = \frac{K_I^2 Q}{1.21 \pi \sigma^2} = \frac{(57)^2 (1.0)}{1.21 \pi (360)^2} = 6.6 \text{ mm}$$

Bu durumda, basıçlı kap çatlağın duvar kalınlığının yarısına kadar büyümesi halinde patlayacaktır



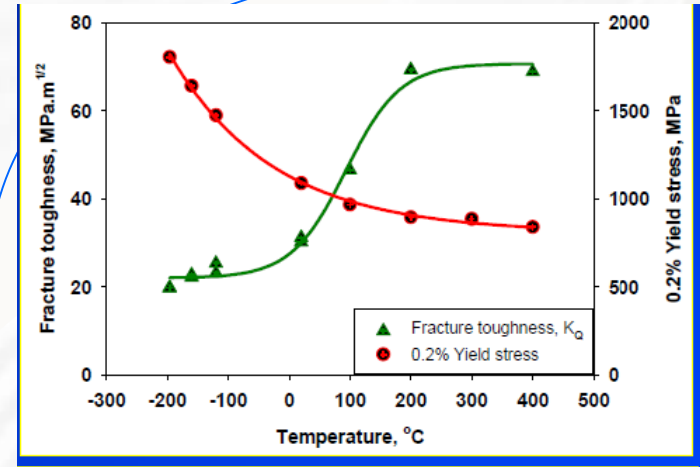
Kırılma tokluğunu etkileyen değişkenler

• Metalurjik faktörler

- Mikroyapı, inkülizyonlar, katışkılar
- Bileşim
- Isıl işlemler
- Termo-mekanik işlemler

• Test koşulları

- Sıcaklık
- Gerinme hızı
- Numune kalınlığı



Sıcaklık ↓

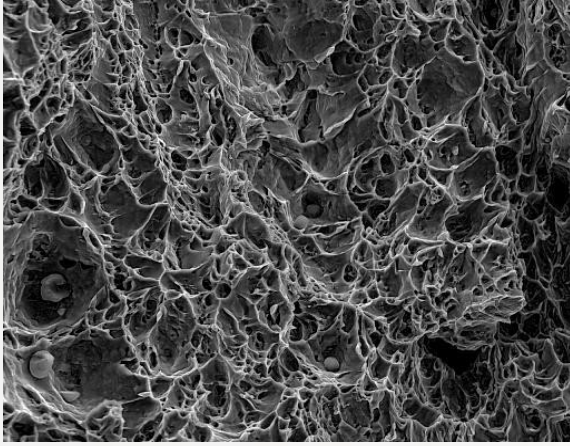
Gerinme hızı ↑

Numune kalınlığı ↑

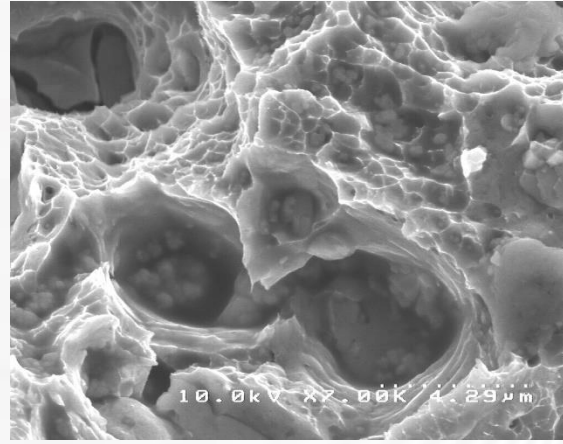
K_{Ic}



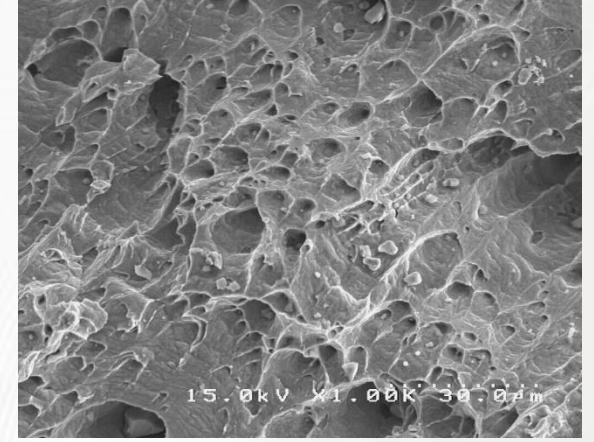
Sünek kırılmanın en büyük belirtisi mikro boşluk oluşumudur (dimples).



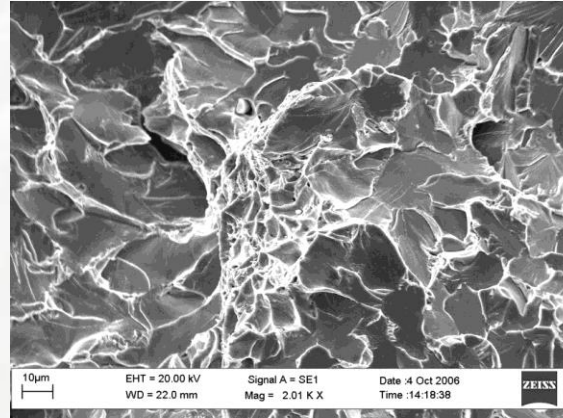
Alüminyum



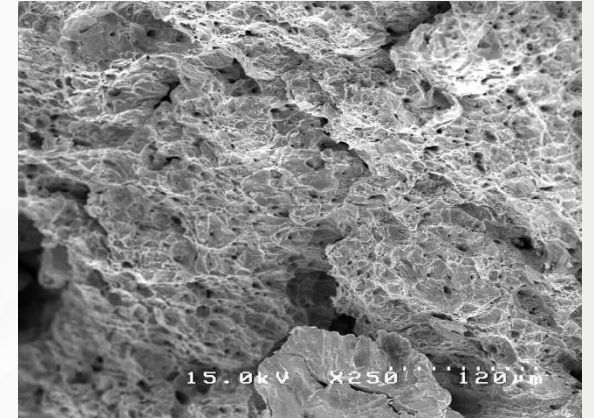
304 Paslanmaz



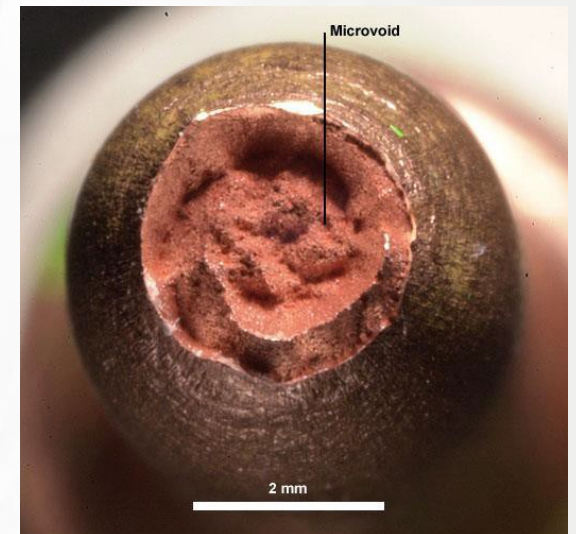
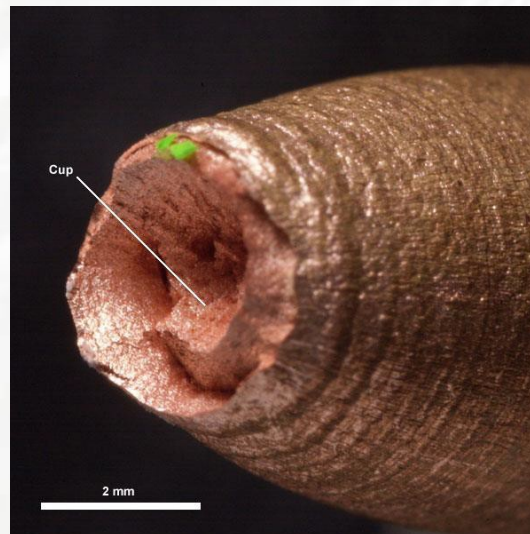
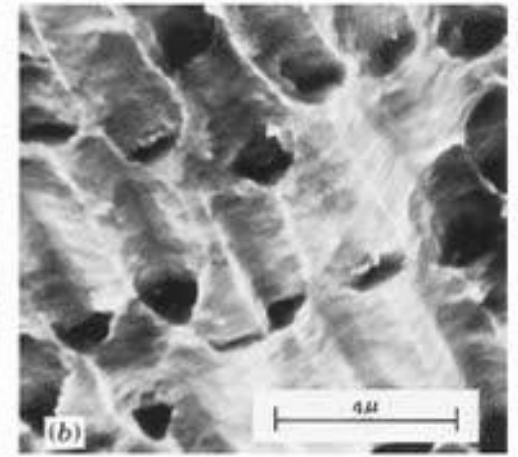
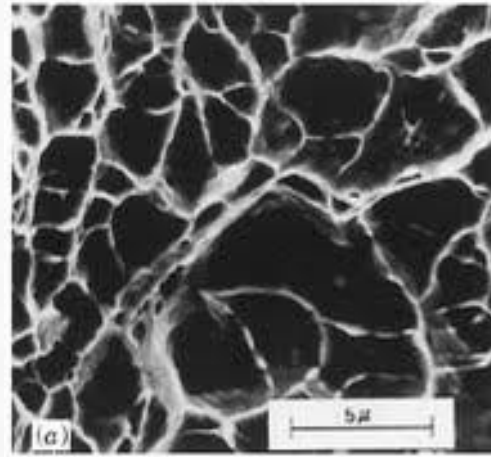
Ti6Al4V

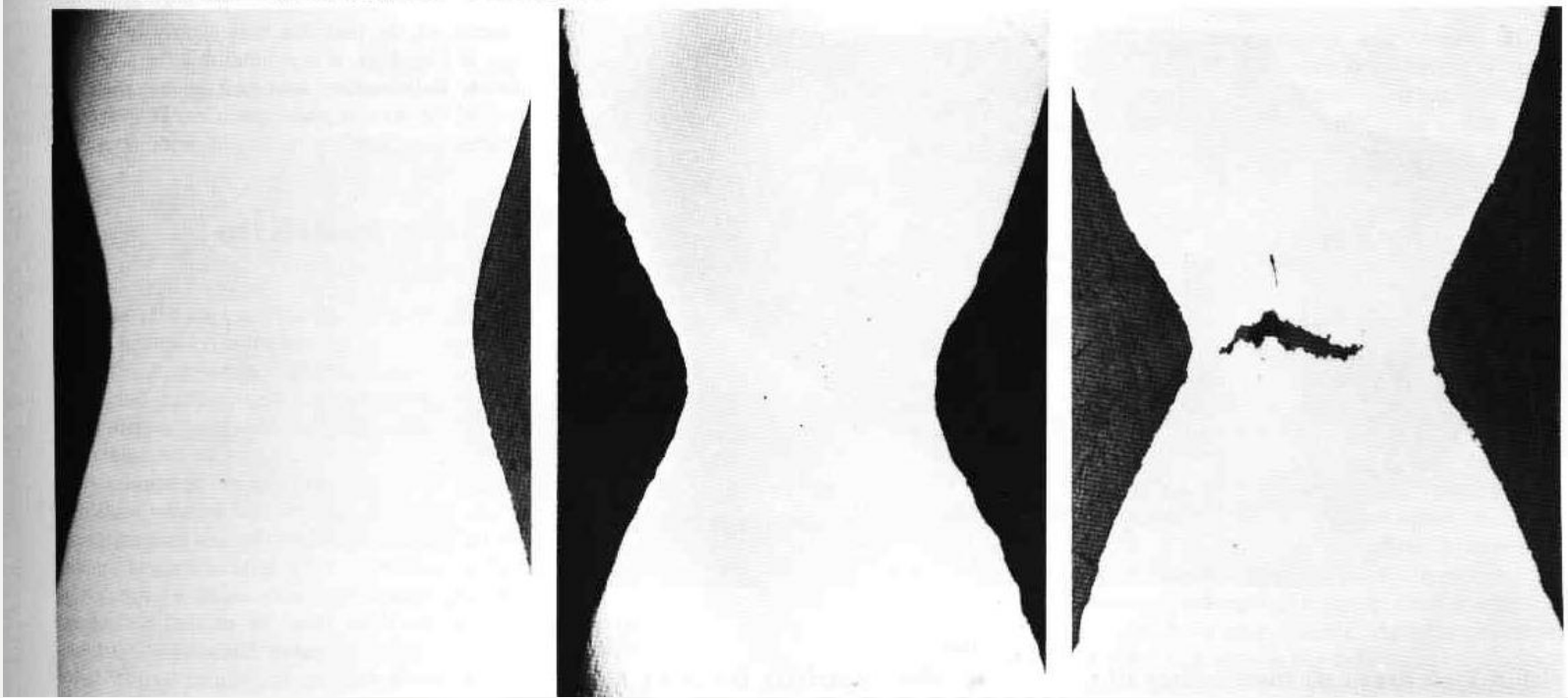


S355 çeliği

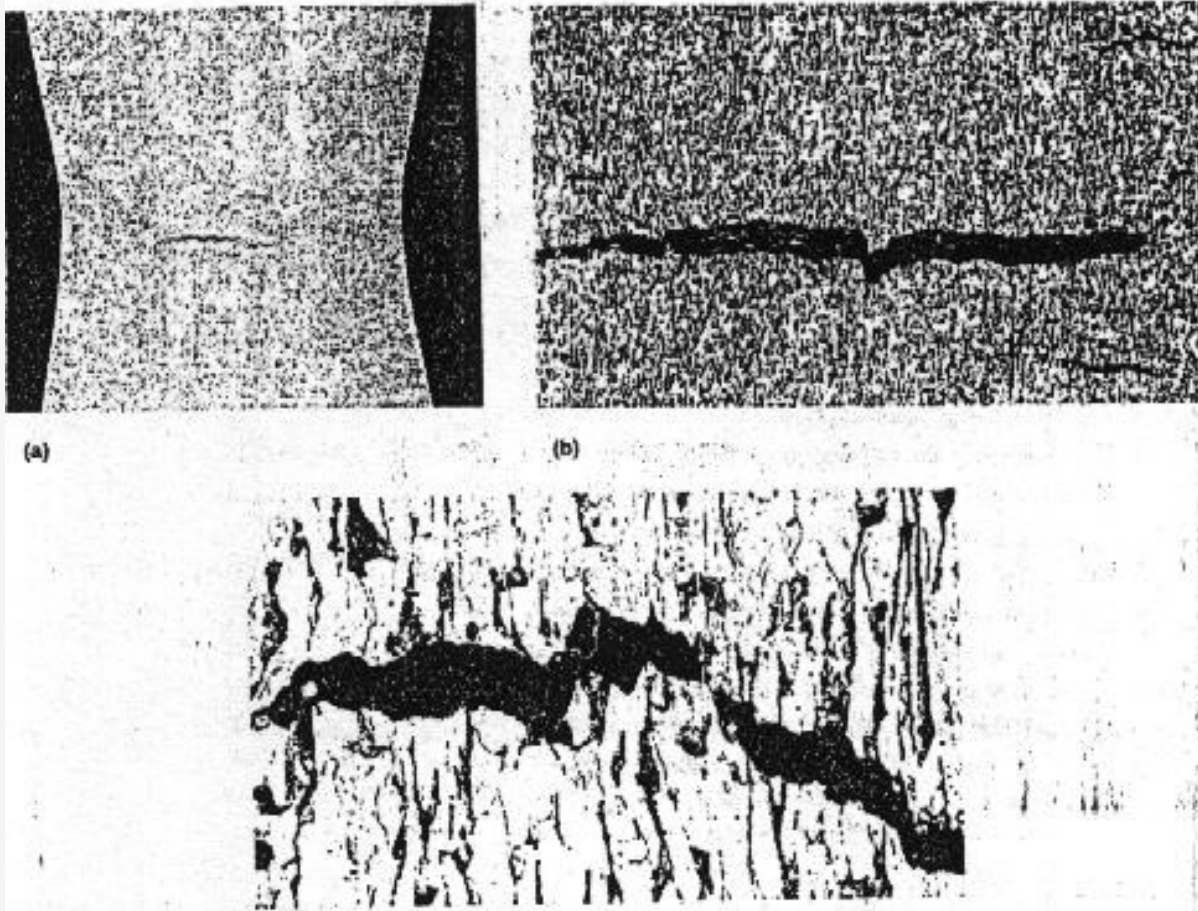


1018 çeliği

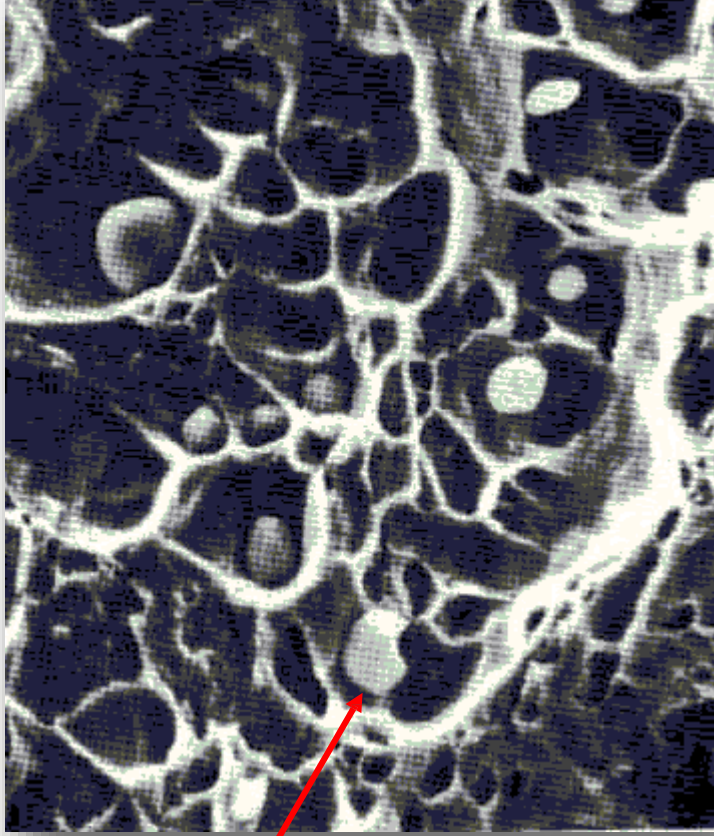




Çekme numunesinde boşluk ilerlemesi görülmektedir. Boşluklar birleşerek kırılma meydana getirir. Bu boşluklar metal olmayan kalıntılarda metaller arasındaki bağların kopması ile oluşabilir.

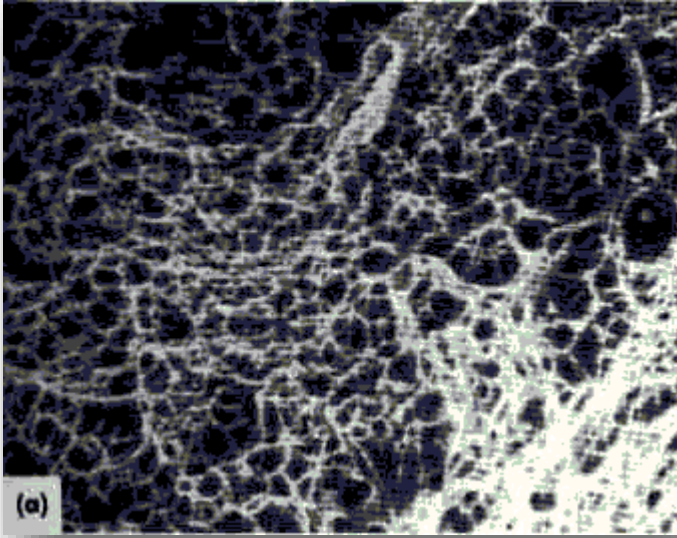


Şekilde sıcak haddelenmiş 1020 çeliğinin çekme deneyi sonucu meydana gelen boyuna çatlaklar görülmektedir. Deneyler kırılma öncesi aniden durduruldu. Şekil a'da daralan kesitin merkezinde küçük bir çatlak görülmektedir. Şekil b, bu çatlağın daha büyük büyütmedeki görüntüsüdür. Bu şekilde büyük bir çatlak ve kenarlarında küçük çatlaklar görülmektedir. Sıcak haddelenmiş çeliğin orijinal yönelmiş tanelerinde anormal bir dikeylik vardır. Bu çeşit hasarlar sünek kırılmanın işaretidir. Şekil c'de çatlağın daha büyük büyütmesi verilmiştir. Deney parça kırılmadan hemen önce durdurulmuştur. Dikkatlice çatlağın her iki kenarı incelenirse birbirlerine göre uyumsuz olduğu görülmektedir. Bu olay sünek kırılmayı işaret eder.



Sülfür kalıntısı

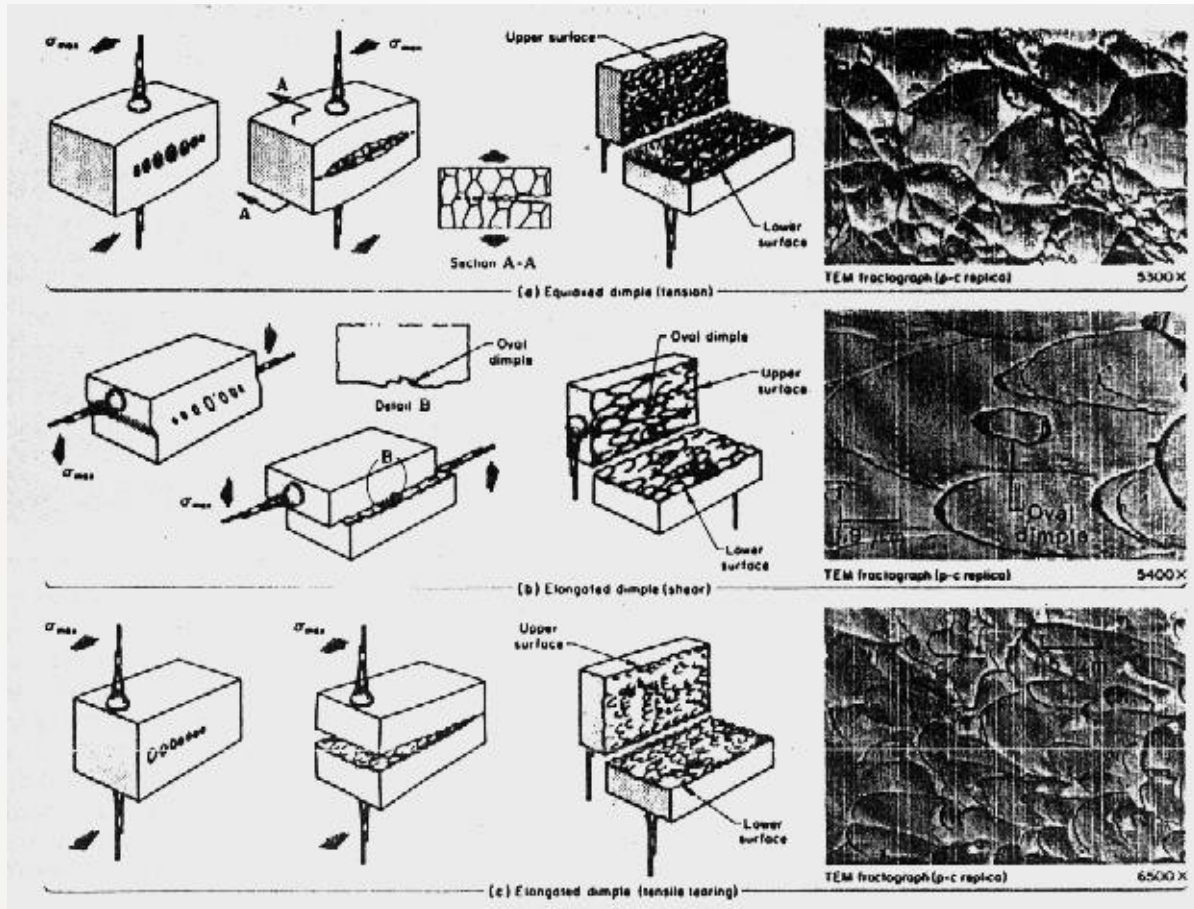
Şekil mikrokosmik seviyede bir çatlak mikroboşlukları oluşması ve birleşmesiyle meydana gelir. Bu mikroboşluklar partikülle ile matriksin ayrışması ve ikinci faz partiküllerinin çatlamaıyla meydana gelir. Şekilde bu partiküller verilmiştir. Bu bahsedilen olay lokal plastik deformasyona sebep olur. İkinci faz partikülleri matriksten daha sert ve mukavimdir. İkinci fazların varlığı mukavemete katkıda bulunur. İkinci fazın bulunduğu bölge ile matriksin kırılması farklıdır. Resimde ince boşluklar görülmektedir. Bazılarında ikinci faz partikülleri var, bazılarında ise yoktur. Partiküllerin kırılması açıkça klivajdır. Fakat ikinci faz partiküllerinin etrafında plastik deformasyon vardır. Buda karışık kırılma olduğunu gösterir.



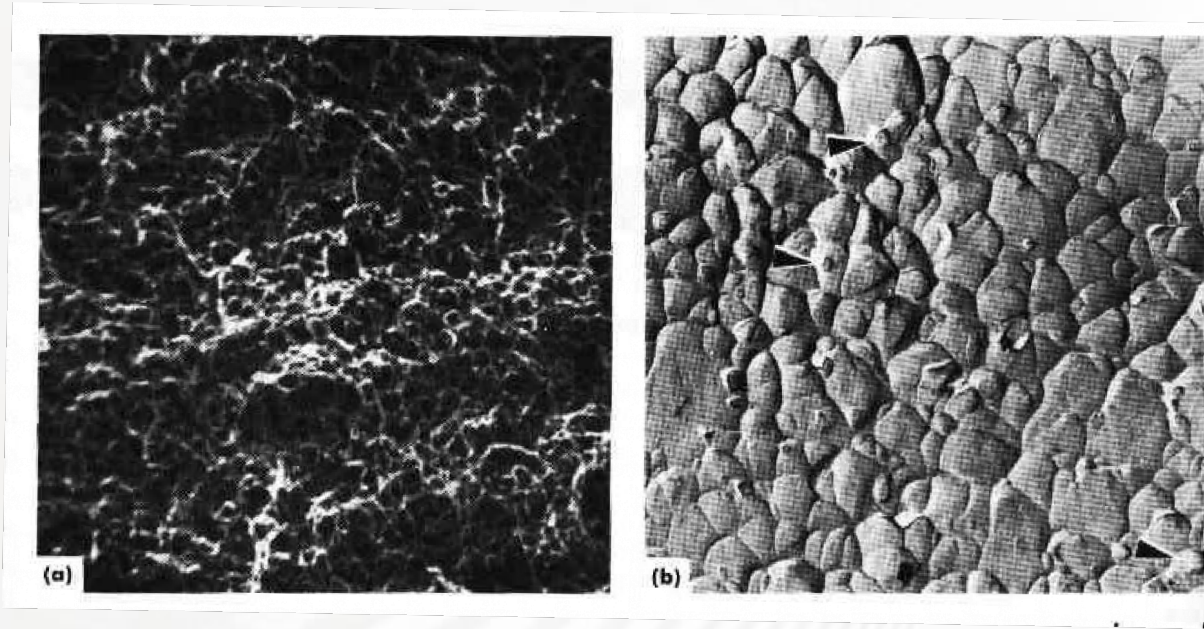
Şekilde sünek kırılma sonucu oluşan oyuklar görülmektedir. Bu oyuklar mikroboşluk ilerlemesi şeklinde meydana gelir. Malzemede kayma ile deformasyon sonucu boşluklar oluşmuş ve bu boşluklar birleşene kadar genişlemiştir. Bu boşluklara oyuk denilmektedir.



Şekilde serleştirilmiş çelikte klivaj kırılmasının SEM görüntüsü verilmiştir. Okla gösterilen kısımdaki nehir (river) benzeri işaretlere dikkat edelim. Malzeme sertleştirildiği için kırılma oluşumunu gözlemlemek zordur. Kırılma olayı şekildeki çizgilerin birleşmesi ile karakterize edilebilir. Nehir oluşturmak için küçük kılcalların derelerin birleşmesi gibi. Bu oluşum kırılmanın doğrultusunu gösterir.

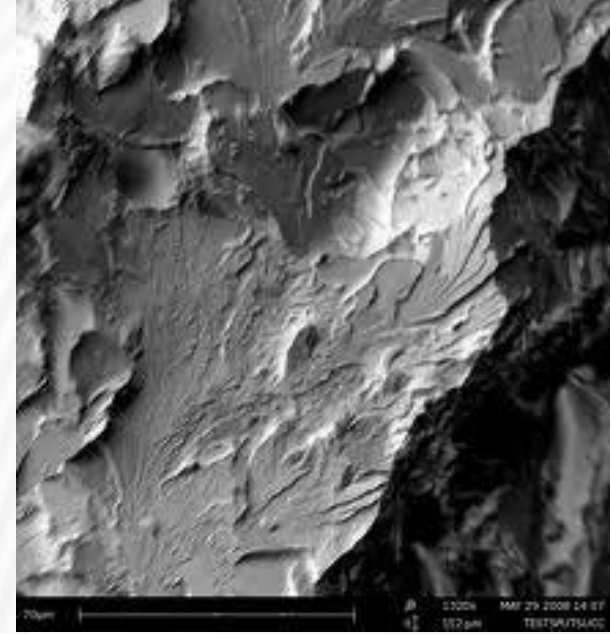
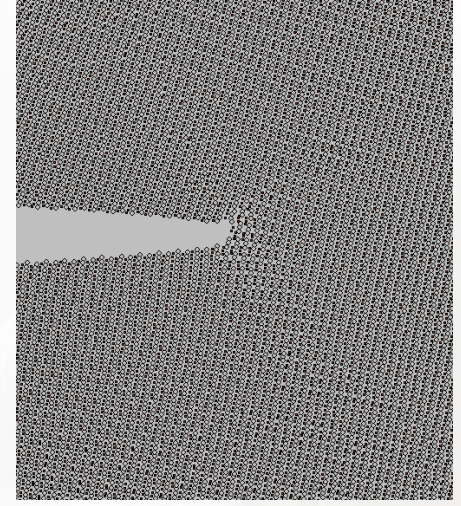


Kırılma yüzeylerinde bulunan oyukların geometrisi üzerine yükleme şartlarının etkisi. A'da çekme sonucu her iki kırılma yüzeyinde eş eksenli oyuklar oluşmuştur. B kesmede, kırılma yüzeylerinde zıt doğrultuda uzamış oyuklar. Çekme yırtılmasında, kırılma yüzeylerinde kırılma merkezine doğru uzamış oyuklar.



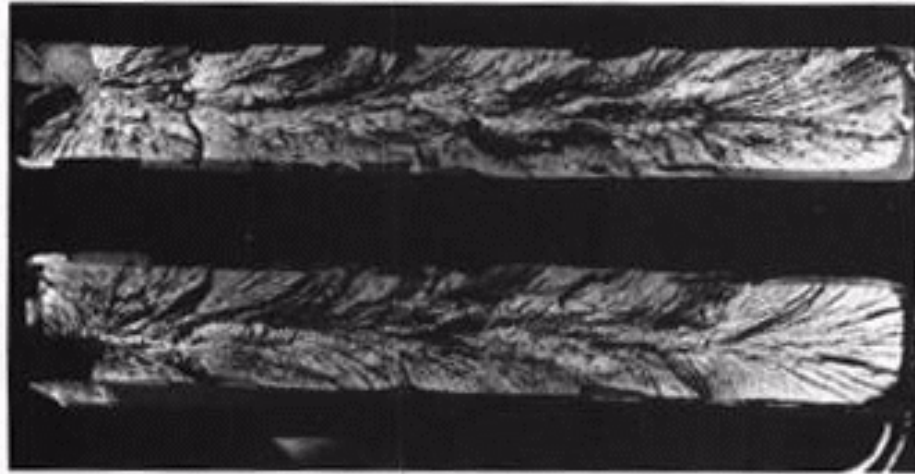
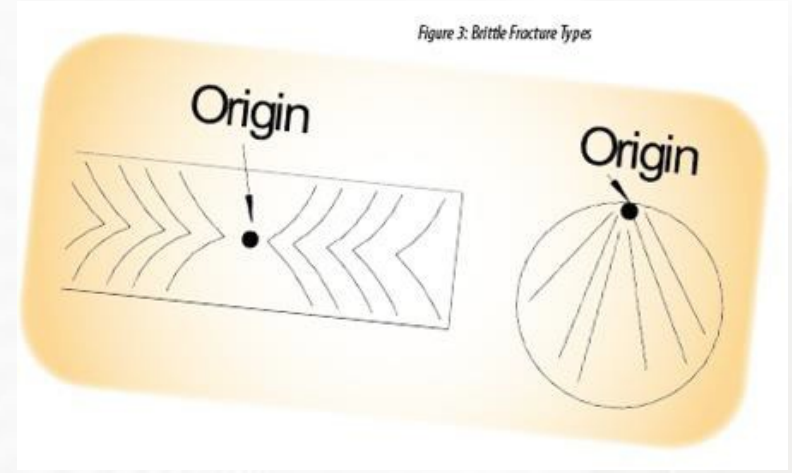
Sünek malzemenin çekme deneyi sonrası ortaya çıkan yüzeyler. Büyük oyuklar içeren oyukların içerisinde küçük oyuklar meydana gelmiştir. 1. şekil SEM, 2. ise TEM görüntüsüdür. TEM görüntüsünün içerisinde oyuklar içerisinde karbürler görülmektedir. Oyuklar eş eksenlidir.

Çatlak ilerleme yönün uygulanan gerilmeye yaklaşık olarak diktir. Gözle görünür bir deformasyon belirtisi olmaz. Çavuş izleri, çatlak merkezinden yayılan radyal izler ve düzgün yüzey belirtisidir.

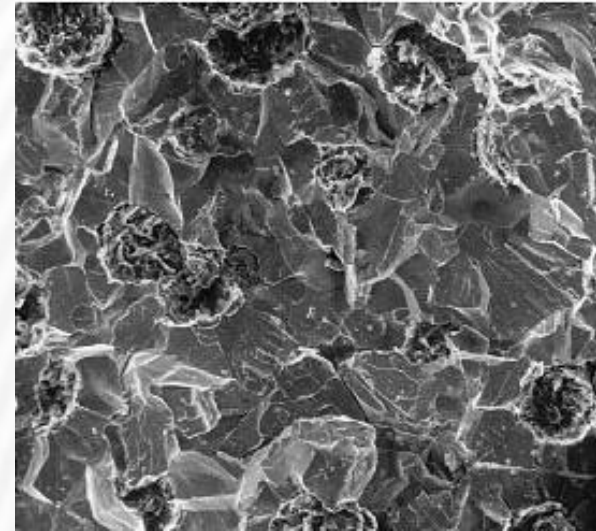
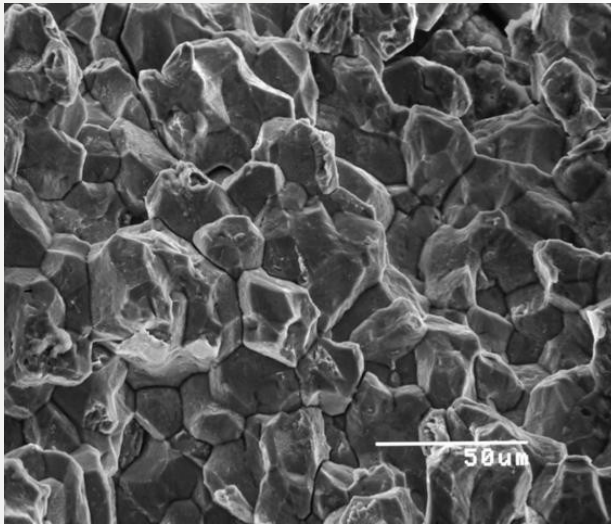
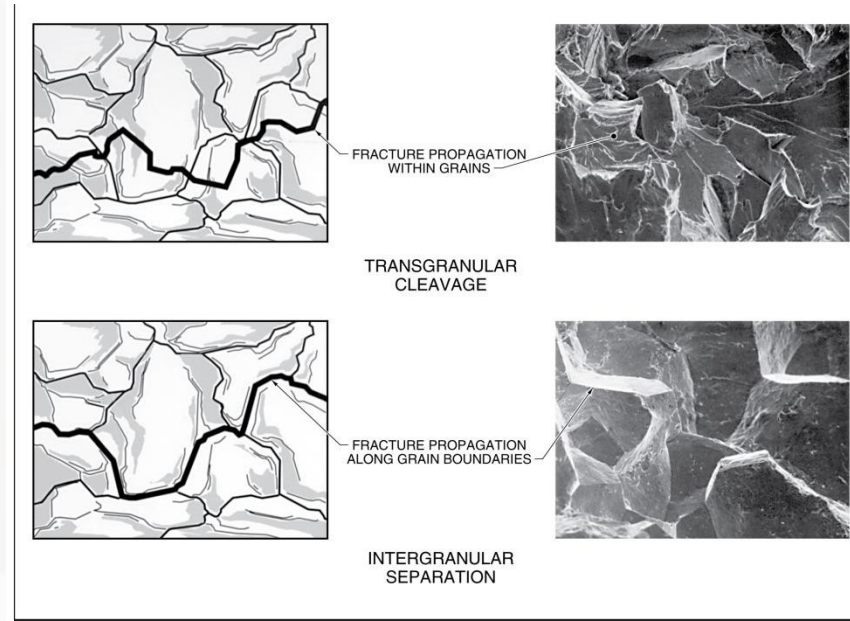


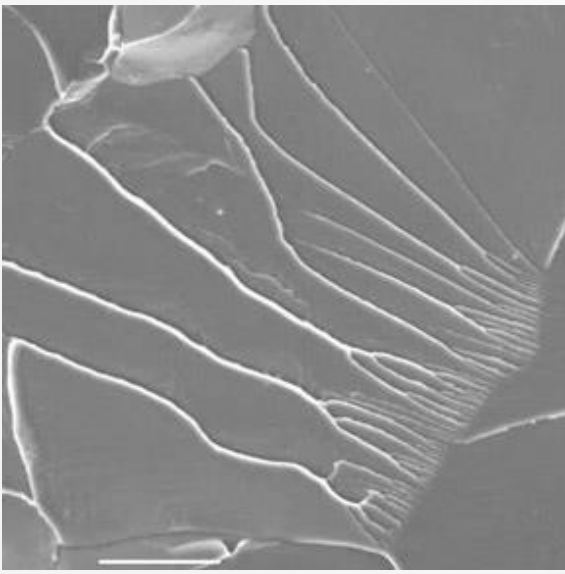
Çavuş izleri

Birleşim yerleri çatlak başlangıcını gösterir.

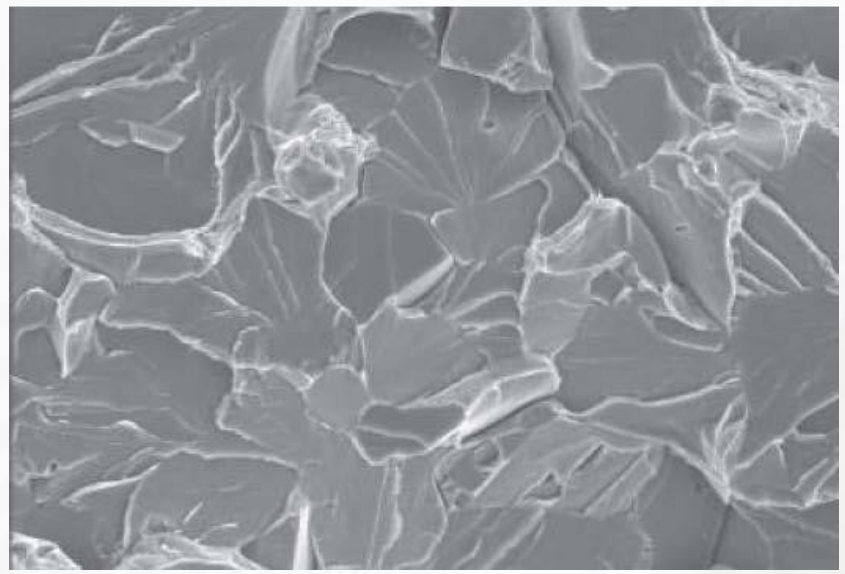


Taneler arası ve tane içi kırılma

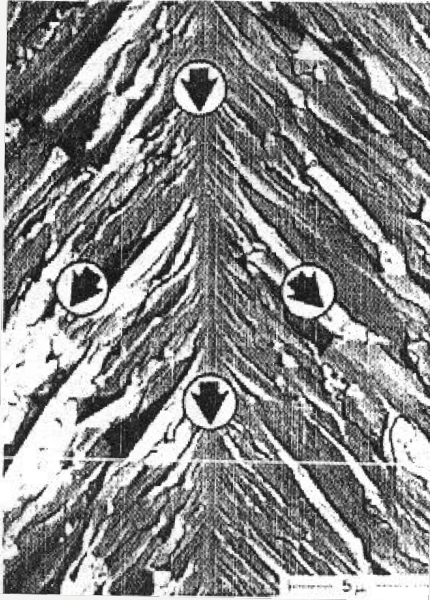




Nehir oluşumu (river patern)



Klivaj kırılma



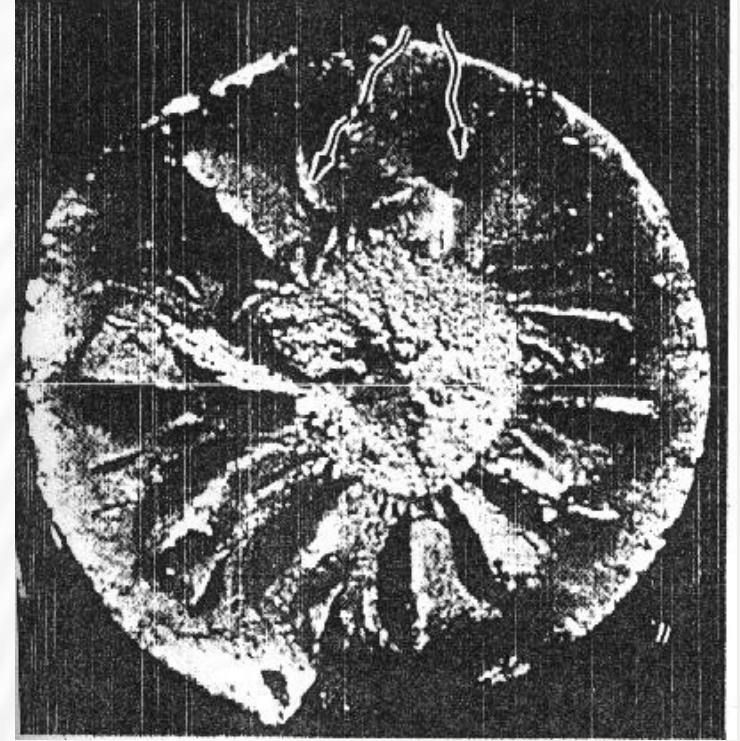
Balık sırtı kırılma

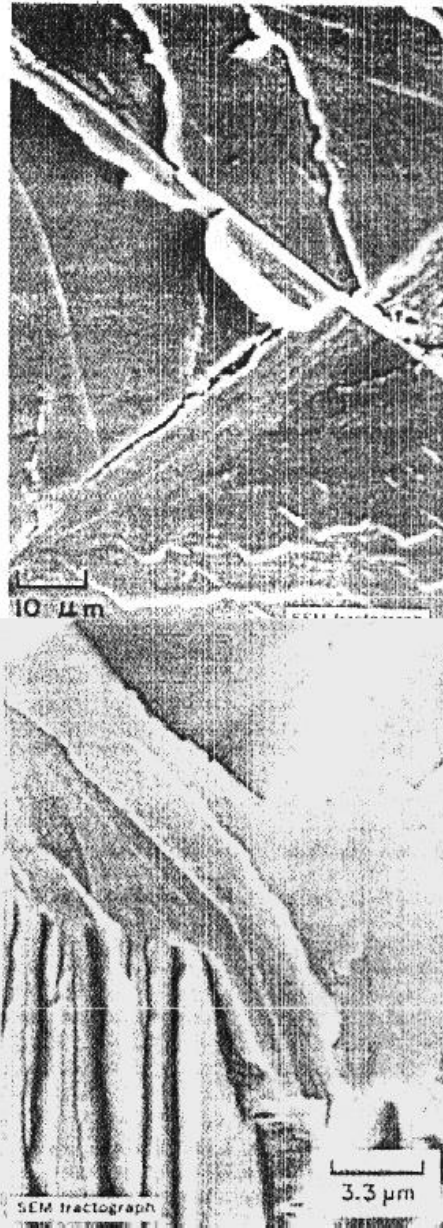
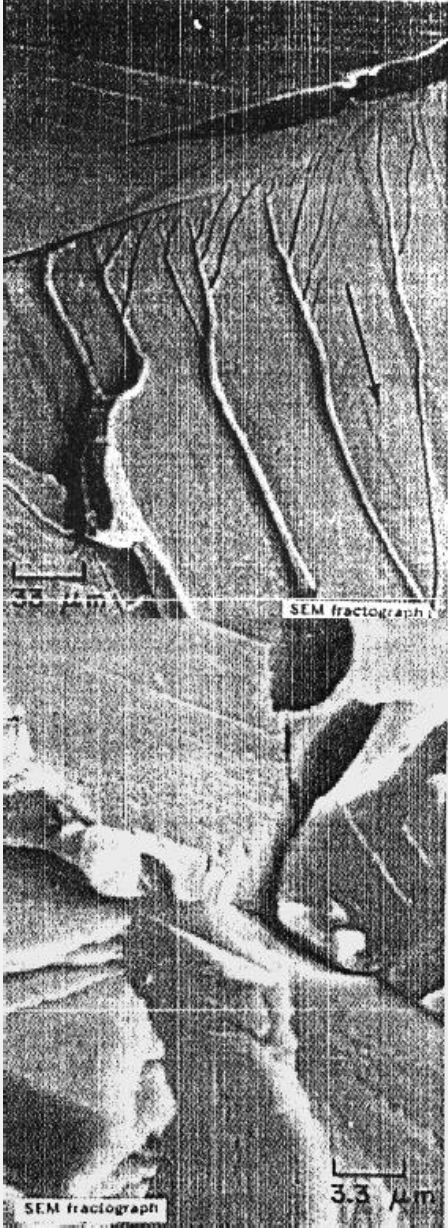


Radyal izler

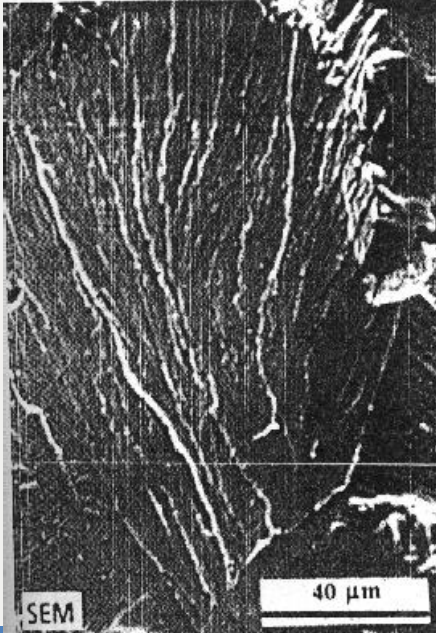
Konik-çanak kırılma görülmektedir. Sünek kırılmada oluşan plastik deformasyon sonrası boyun verme gerçekleşmiştir. Kırılma yüzeyi mattır. Gevrek kırılmada ise kesitte hiçbir değişiklik olmayıp, kırılma yüzeyi parlaktır. Kırılmış kesitin ortasında sünek kırılmanın olduğu lifli bölge bulunmaktadır (son kopma gölgesi). Bu gölgenin etrafında ise radyal bölge görülmektedir. Radyal çizgiler gevrek kırılma belirtisidir.

Gevrek kırılmada, kırılma yüzeyleri kırılmış yüzeyin merkezinden yayılan radyal bölge ile karakterize edilir. Bu radyal izler (ridge) çatlak yayılmasına paraleldir ve eş düzlemlı olmayan iki çatlak orta malzemenin yırtılmasıyla birleştiği zaman oluşur. Öncelikle quasi-klivaj yayılan çatlak numunenin dış yüzeyine doğru hızla ilerler. Ayrıca gevrek kırılmada daha küçük lifli bölge oluşur.





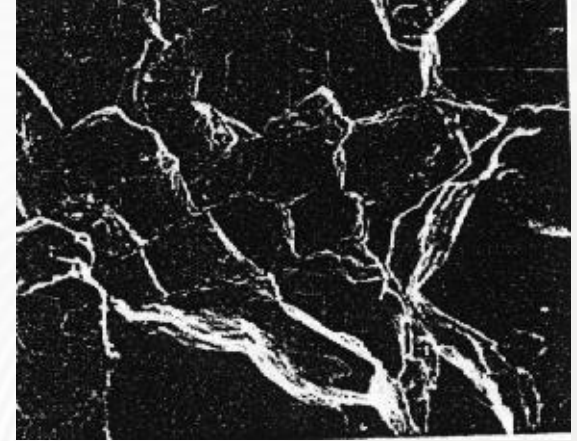
Klivaj kırılması örnekleri. 1. resimde klivaj kırılması ikizlenmenin altında başlamış, keskince nehir izleri oluşmuştur. Çatlak ilerlemesi ok yönündedir. 2. resimde bloklanmış klivaj kırılması görülmektedir. Resmin merkezinde dil görünümlü hasar görülmektedir. İkincil çatlaklar belirgindir. 3. resimde düz klivaj yüzeyleri görülmektedir. 4. resim 3. resme benzerdir. Kristalografik düzlemler boyunca düz klivaj yüzeyleri mevcuttur. Ayrıca ikiz sınırlarında nehir oluşumu meydana gelmiştir.



Klivaj görüntüleri, 1. resim düşük sıcaklıkta (-192°C) ani kırılma sonucu ortaya çıkmıştır. Kayma hatları çok belirgindir. 2. şekilde çatlak ilerleme yönü alttan yukarı doğrudur. Tek bir tanenin klivaj düzlemi üzerinde değişen çatlak ilerleme doğrultusu nedeniyle tüy gibi bir görüntü ortaya çıkmıştır. 3. şekilde çok sayıda ikizlenme nedeniyle tek bir düzlemde çatlağın ilerledi sonucu çıkabilir. Çatlak doğrultusu ikiye ayrılmıştır. 4 resimde sol tarafta çok sayıda çatlak başlangıcı vardır. Çatlak ilerleme yönü sağdan sola doğrudur. Sol taraftaki tanede ikizlenme oluşmuştur.

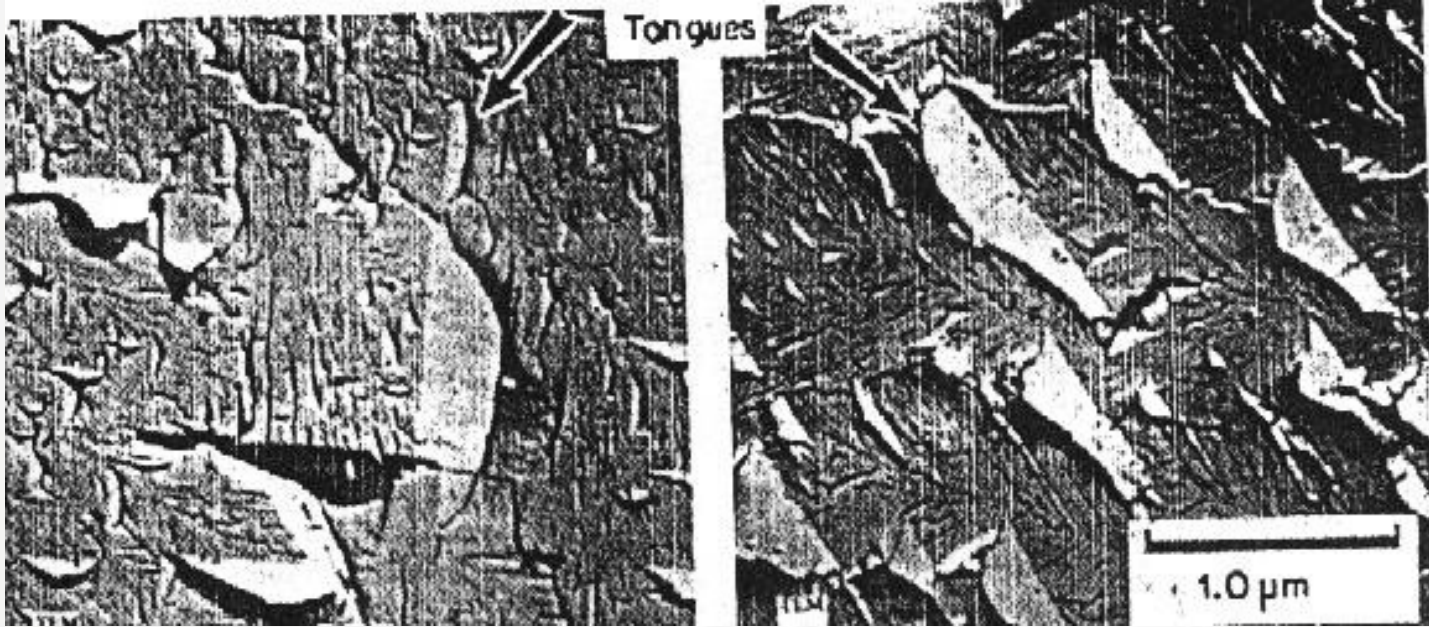


Kayma izlerini gösteren klivaj kırılması. Kayma hatlarını sünek bölgelerin oluşmasını takip ederek oluşan plastik deformasyon ortaya çıkarır.

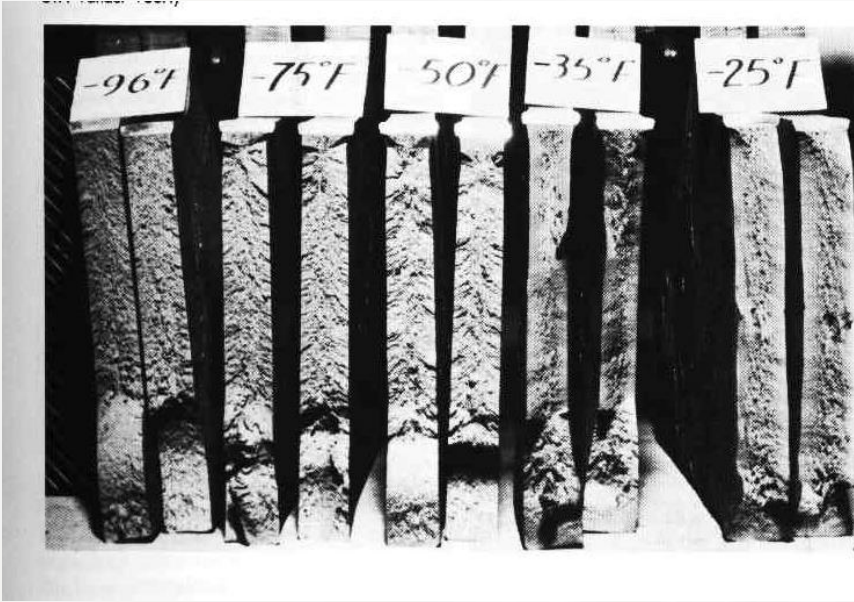


Sertleştirilmiş çelikte taneler arası kırılma görülmektedir. Kırılma taneler arasında meydana gelmiştir. Zaten taneler arası kırılma tane sınırlarının zayıflaması sonucu ortaya çıkmaktadır.

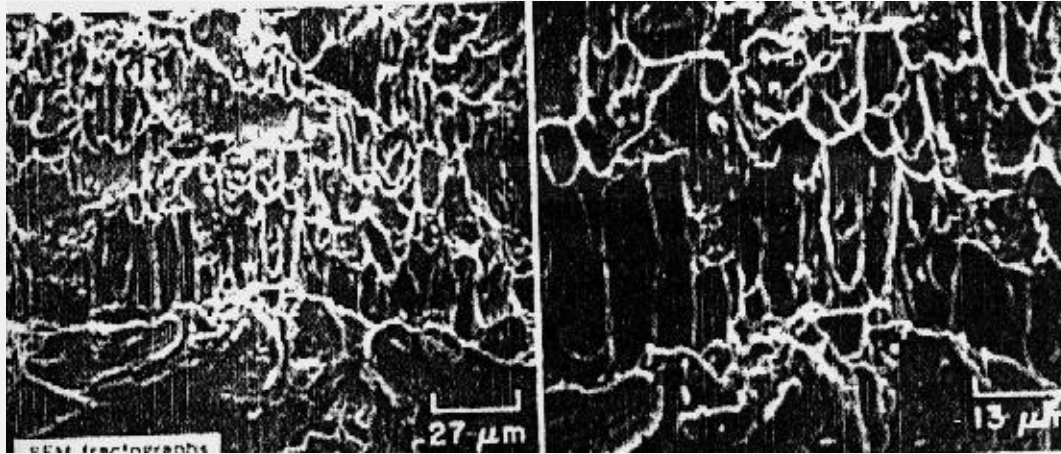
Klivaj kırılmanın en belirgin hali nehir oluşumudur. Küçük kılcallar birleşerek büyük bir çatlağa yol açarlar. Çatlağı ilerleme yönü akıntı yönündedir. Beyaz ok klivaj adımını, siyah ok ise çatlak ilerleme yönünü göstermektedir.



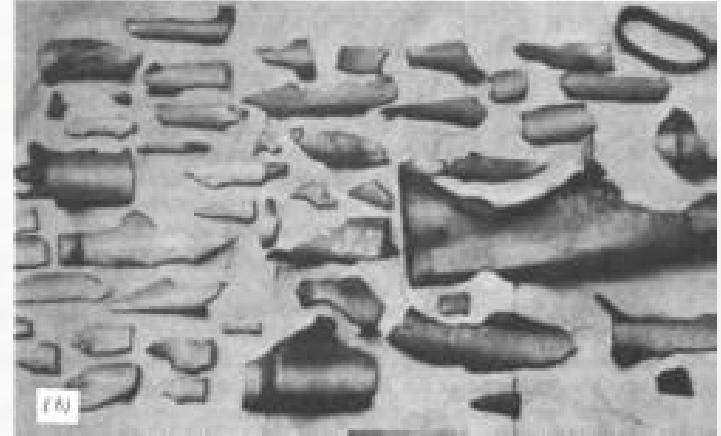
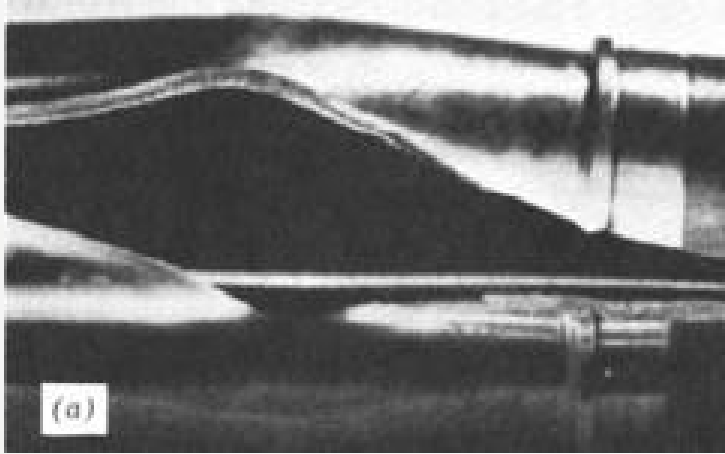
Dil görünümlü kırılma oluşumu. Bazen klivaj düzlemlerinin yüzeylerinde oluşur. Şekilde klivaj düzlemlerinin kesişmesine ve dillerin yönlenmesine dikkat edin.



Şekilde farklı sıcaklıklarda meydana gelen kırılma sonucu oluşan çavuş izleri görülmektedir. Çavuş izleri belirli bir sıcaklıktan sonra meydana gelir. Düşük sıcaklıklarda çavuş izleri oluşabilir fakat kırılma yüzeyinde belirgin bir özellik olmayabilir.



Şekilde gözyaşı şeklinde oyuklar (tear dimples) görülmektedir. Bu görüntü 1040 çeliğinin çentik darbe deneyi sonrası çentik dibinden alınmıştır. Bu tür oyuklar incecik parabole ve çentik dibinde çatlak başlangıcının kenarına doğru işarete benzer. Tamamen mattırlar.

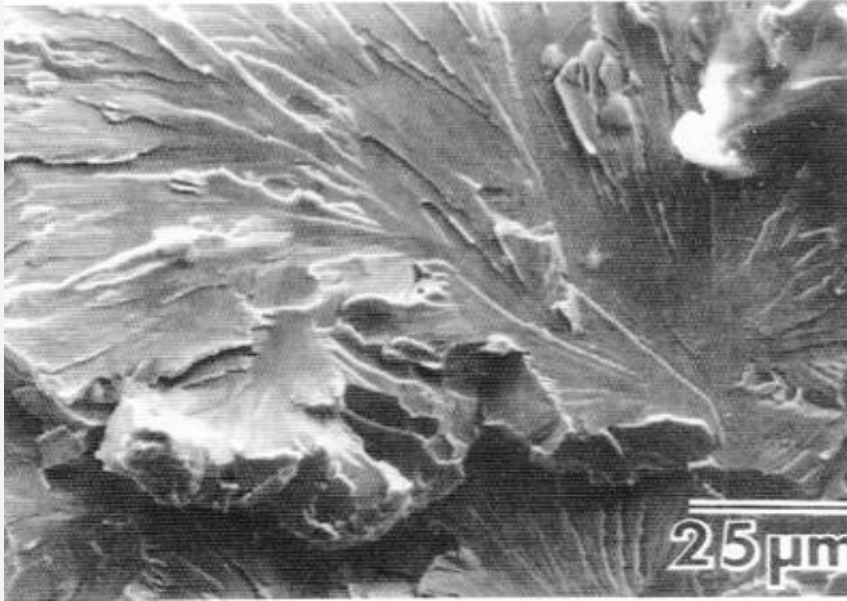


Sünek kırılma

- Tek parça
- Büyük deformasyon
-

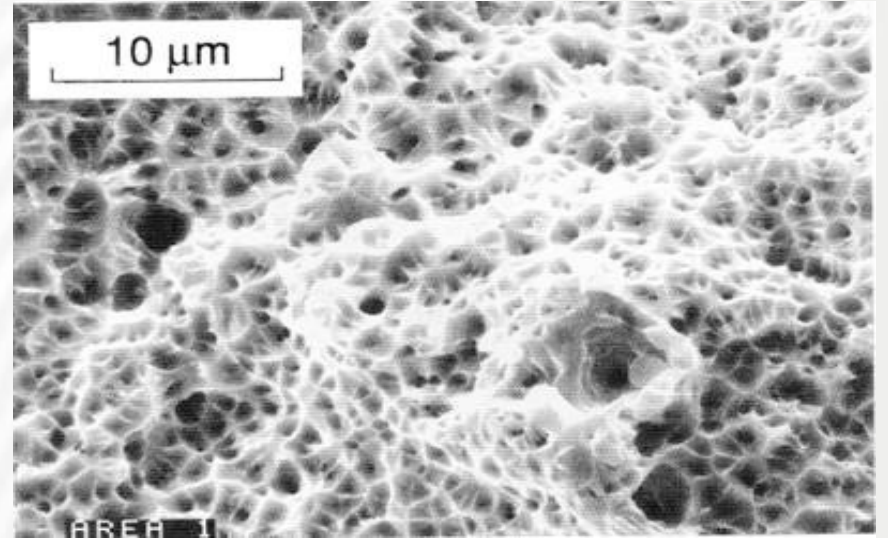
Gevrek kırılma

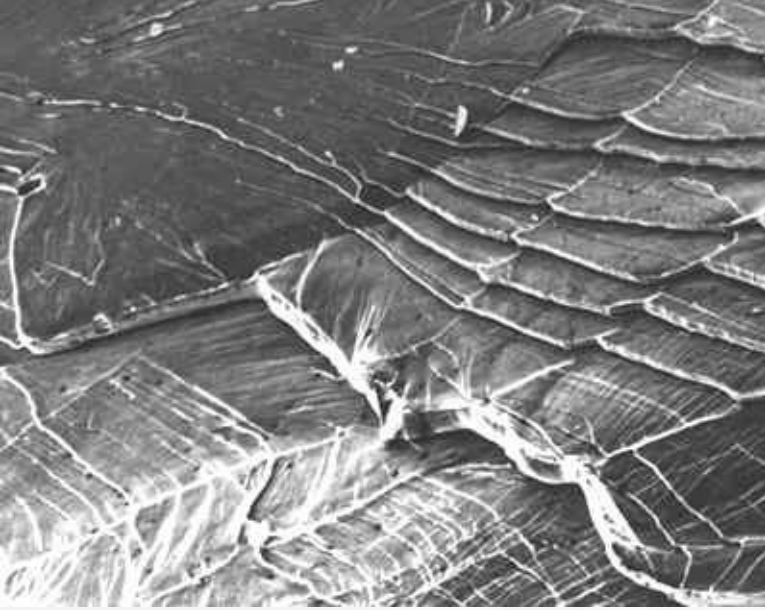
- Çok parça
- Az deformasyon
-



Klivaj kırılma

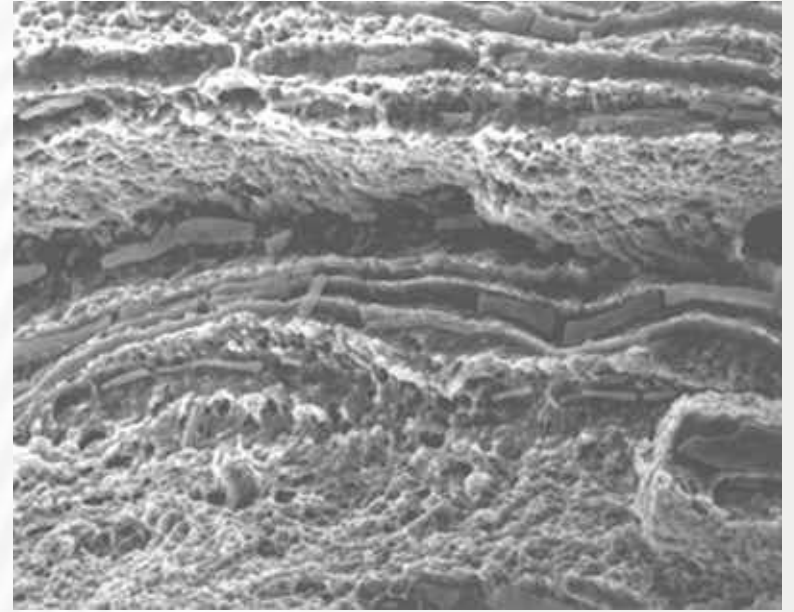
Sünek kırılma, oyuklanma
şeklinde yırtılma





Klivaj kırılma

Sünek kırılma, oyuklanma
şeklinde yırtılma



Kırılma türünü etki eden faktörler

	Gevrek Kırılma	Sünek Kırılma
İç yapı	Kaba taneli yapı	İnce taneli yapı
Sıcaklık	Düşük sıcaklık	Yüksek sıcaklık
Gerilme hali (çentik)	Çok eksenli gerilme hali	Çentik yok
Şekil değiştirme hızı	Yüksek şekil değiştirme hızı	Düşük şekil değiştirme hızı
Yükleme şartları	-	Hidrostatik basınç