



Biyoteknoloji

Nanoteknoloji

Tasarım

**BİYONANOTASARIM  
LABORATUVARI**

**BMM 205**

**Malzeme Biliminin Temelleri**

**Dislokasyonlar ve Güçlendirme**

**Mekanizmaları**

**Bölüm - 2**

**Dr. Ersin Emre Ören**

**Biyomedikal Mühendisliği Bölümü**

**Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü**

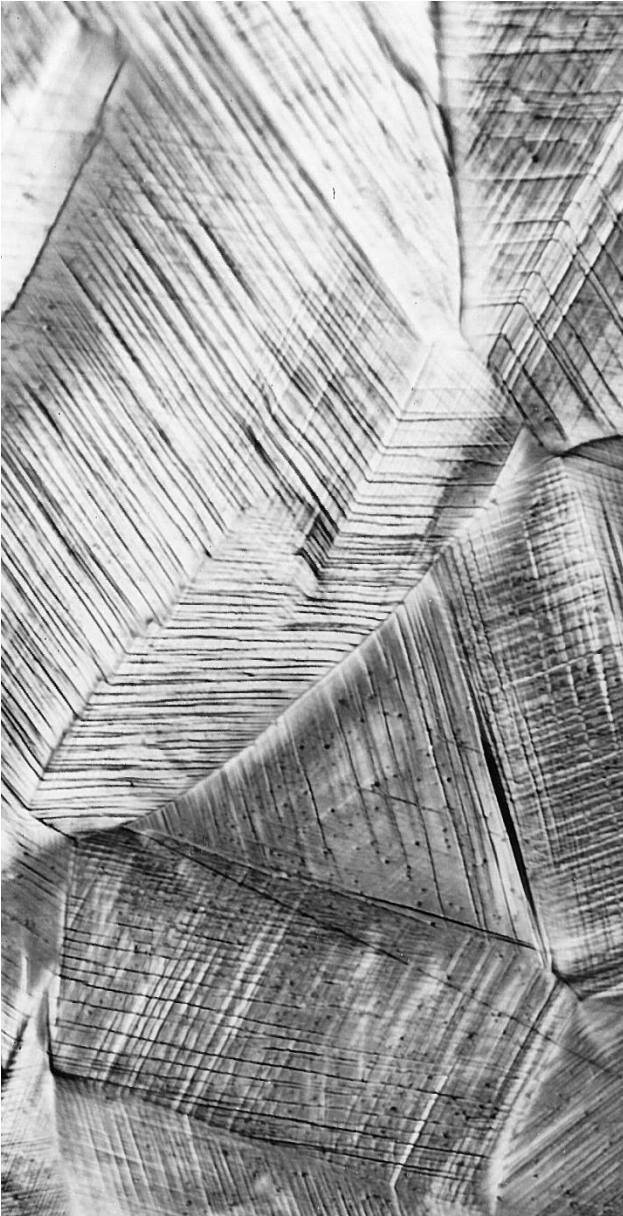
**TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi**

**Ankara - TÜRKİYE**

[eeoren@etu.edu.tr](mailto:eeoren@etu.edu.tr)

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

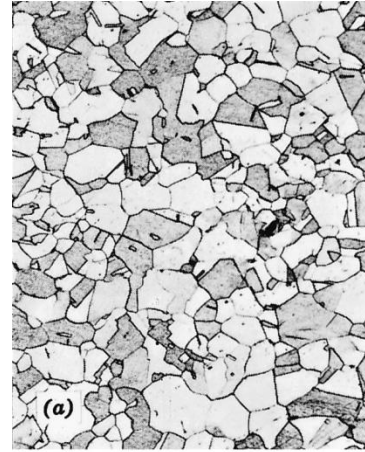
# ÇOK KRİSTALLİ MALZEMELERDE PLASTİK DEFORMASYON



Kayma Çizgileri (Bakır)

Taneler tamamen rastgele bir şekilde dizilmiş ve yönlenmişlerdir

- Kayma yönleri kristal yapıya göre farklılıklar gösterir. Uygulanan gerilime göre bazı tanelerdeki slip sistemleri harekete geçerken bazılarında geçmez.
- Kayma sistemleri harekete geçen taneler komşu taneler tarafından baskılanabilirler.
- Dislokasyonlar tane sınırlarını kolayca geçemezler.



Taneler uygulanan gerilim altında gerilim yönünde uzamışlardır.

Sonuç olarak çok kristalli malzemeler tek kristalli malzemelere göre daha dayanıklıdır. (içerisinde hiçbir kusur bulunmayanlar hariç).

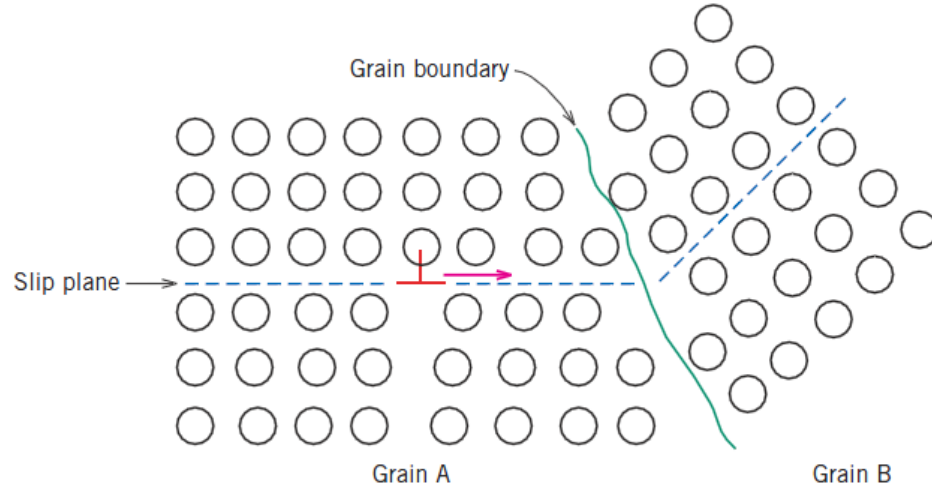
Dislokasyon hareketi ↔ metallerin mekanik davranışı

Metallerde plastik deformasyon olabilmesi dislokasyonların hareket edebilmesine bağlıdır.

Bütün güçlendirme mekanizmaları dislokasyonların hareketlerini durdurmak veya zorlaştırmak üzerinedir.



## Tane boyu küçülmesi (Grain size reduction):



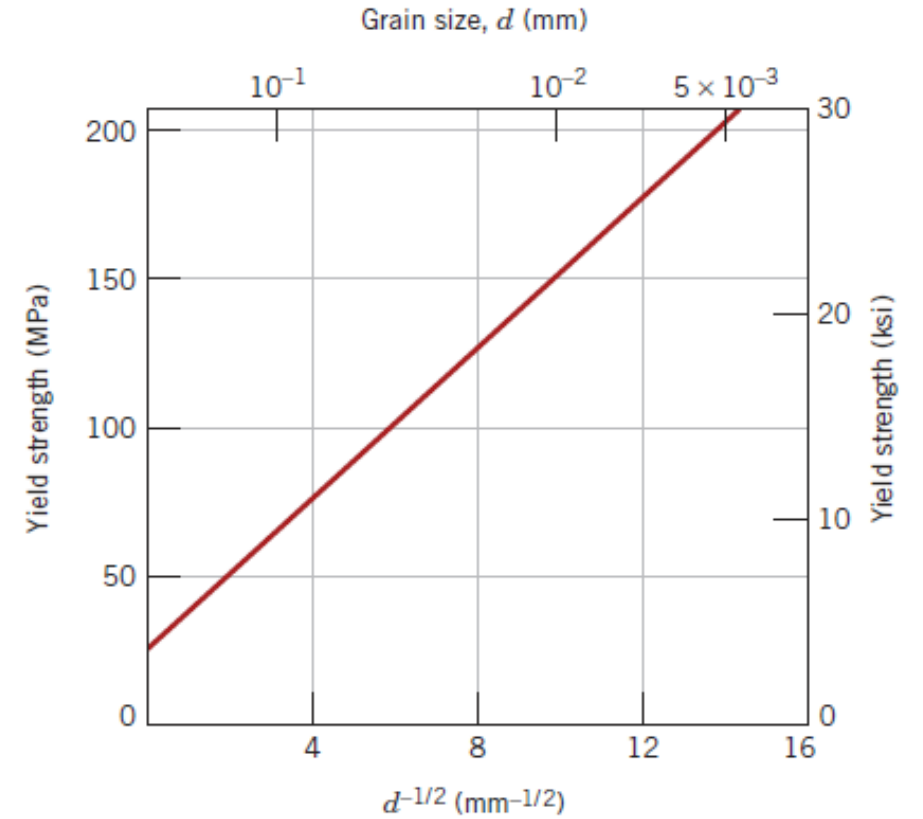
Küçük açılı (low angle) tane sınırları güçlendirme mekanizmaları için uygun değildir (dislokasyon hareketini engelleyemezler).

Tane boyundaki küçülme ile beraber malzemenin akma dayanımının yanında genellikle tokluğuda (toughness) artar.

Hall-Petch Denklemini:

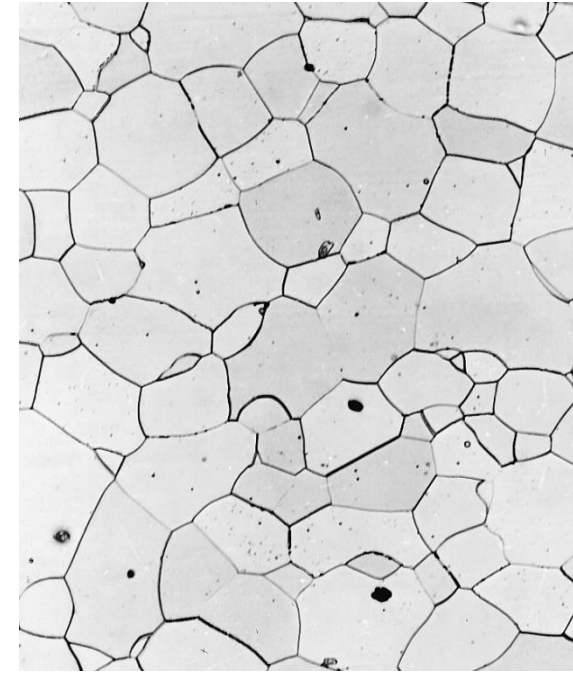
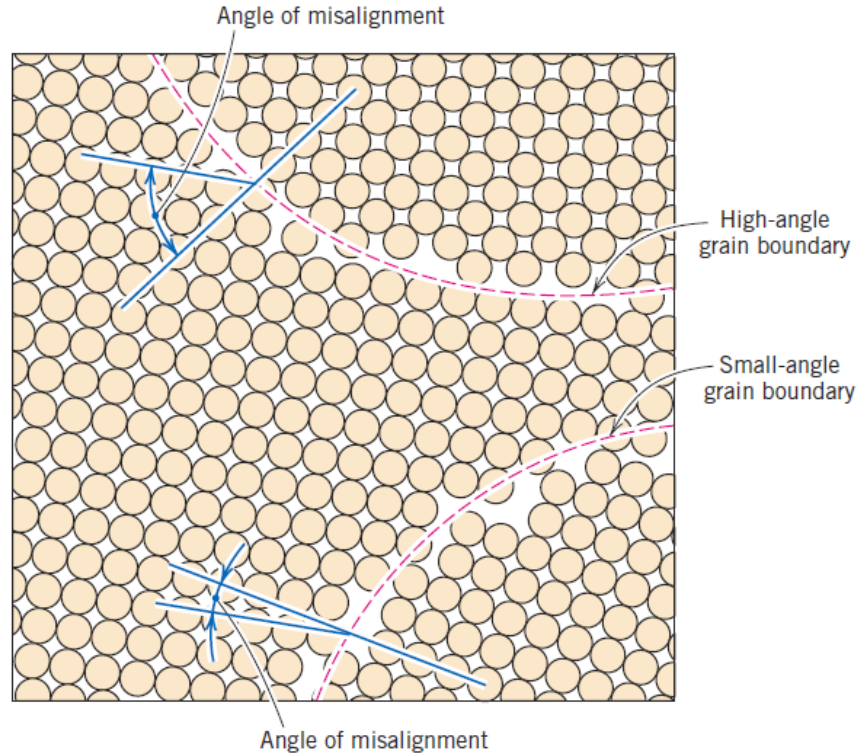
$$\sigma_y = \sigma_o + k_y d^{-1/2}$$

$d$ : ortalama tane boyu



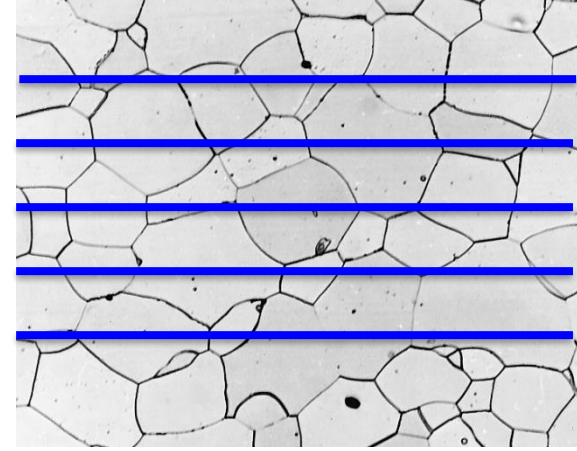
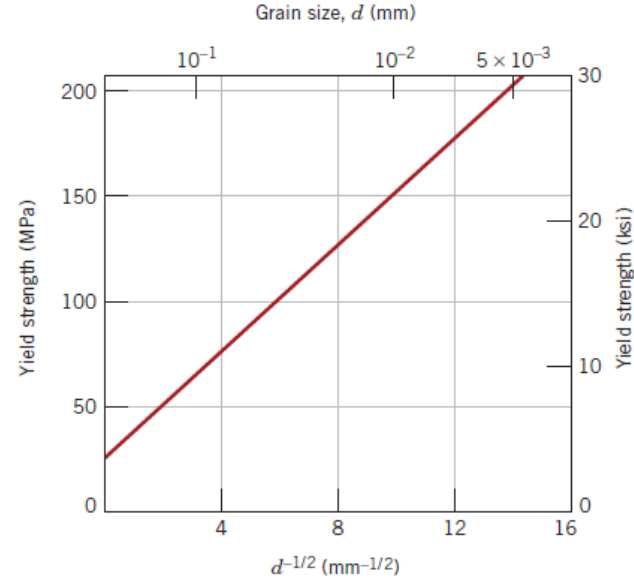
## Düzlemsel Kusurlar

**Tane sınırları (Grain boundaries):** Tane sınırları çok kristalli malzemelerde farklı kristal yönlere sahip taneleri birbirinden ayıran bölgelerdir.



## Düzlemsel Kusurlar

### Tane boyu belirlenmesi

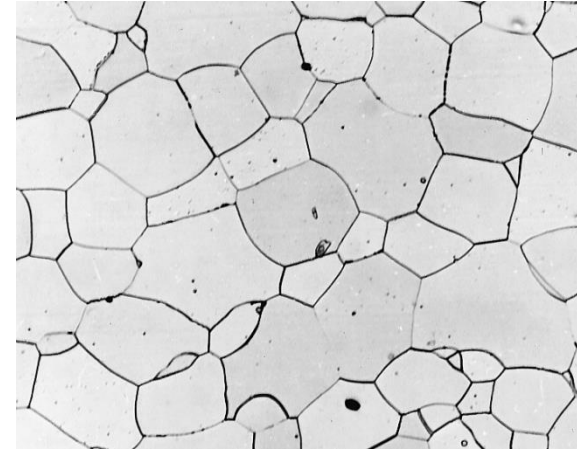


Kullanılan en yaygın yöntem ise, American Society for Testing Materials (ASTM) tarafından geliştirilmiştir.

$$N = 2^{n-1}$$

**N:** 100x büyütmede çekilen bir fotoğraf üzerinde 1 inç kare alan içerisindeki ortalama tane sayısı

**n:** Tane boyutu numarası



## Düzlemsel Kusurlar

### Tane boyu belirlenmesi

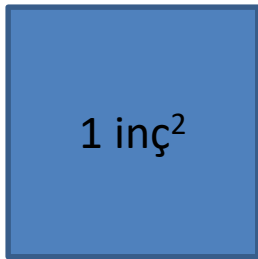
100x büyütme bir mikrograf üzerinde yapılan tane boyutu sayımı sonucu 1 inç karelik alanda ortalama 45 adet tane (grain) olduğu bulunmuştur.

Bu metal numunenin ASTM tane boyutu numarası nedir?

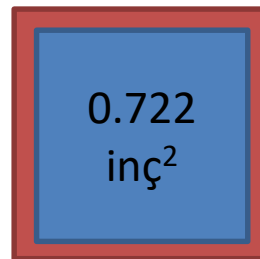
$$N = 2^{n-1}$$

$$\log N = (n-1) \log 2 \quad n = \frac{\log N}{\log 2} + 1 \quad n = \frac{\log 45}{\log 2} + 1 = 6.5$$

Aynı numunenin 85x büyütmede çekilmiş mikrografı üzerinde 1 inç karelik alanda kaç adet tane (grain) bulunur?



100x



85x

$$N_{45} = \frac{45}{0.722} = 62.3$$

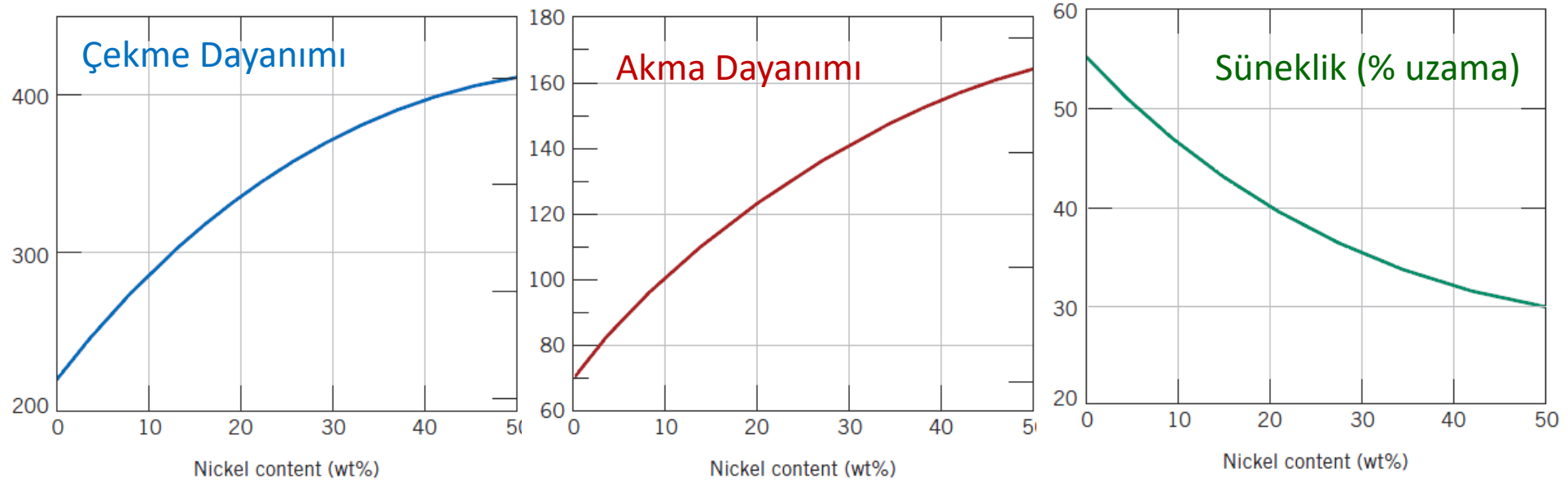
$$N_{Mx} = \frac{N_{100x}}{\left(\frac{M}{100}\right)^2}$$



## Katı çözelti alaşımlama (Solid solution hardening):

Malzemeleri güçlendirmenin bir diğer yolu da sisteme arayer ve anayer atomları (impurities) eklemektir.

Yüksek saflıktaki metaller her zaman için alaşımlarından daha yumuşak ve güçsüzdürler.

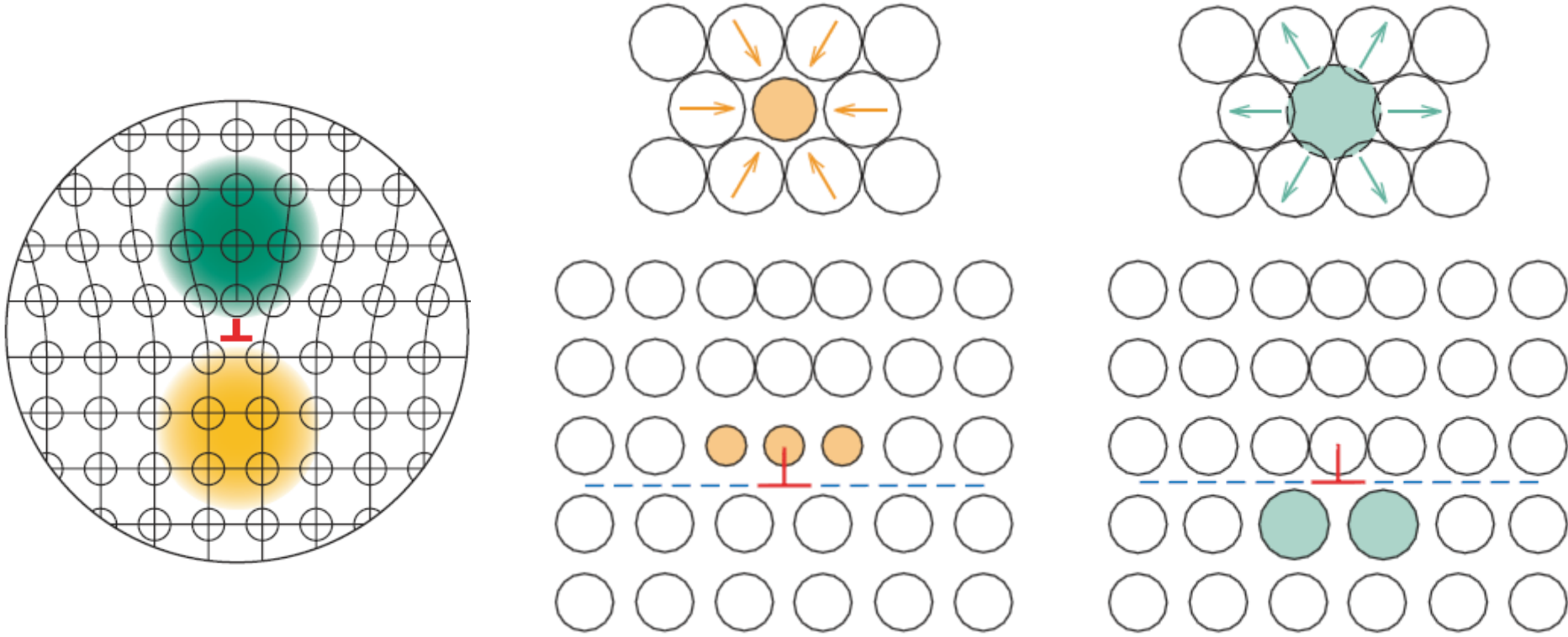


Sistemdeki yabancı arayer ve anayer atomları kafes gerinim alanları (lattice strain fields) oluştururlar.



## Katı çözelti alaşımlama (Solid solution hardening):

Oluşan kafes gerinimleri sonucu safsızlık atomları dislokasyonların gerinim alanları ile etkileşime girerek dislokasyon hareketini yavaşlatırlar.



Safsızlık atomları dislokasyon bölgelerine doğru yayılım yaparak (difüzyon) bu bölgelerde yoğunlaşırlar ve dislokasyon hareketini sınırlarlar.

## Gerinim ile güçlendirme / Soğuk işleme (Strain hardening/Cold working):

Sünek metaller erime sıcaklığının oldukça altında plastik deformasyona maruz kalırsa daha güçlü (akma dayanımı artışı) hale gelirler.

Dislokasyon yoğunluğu artar



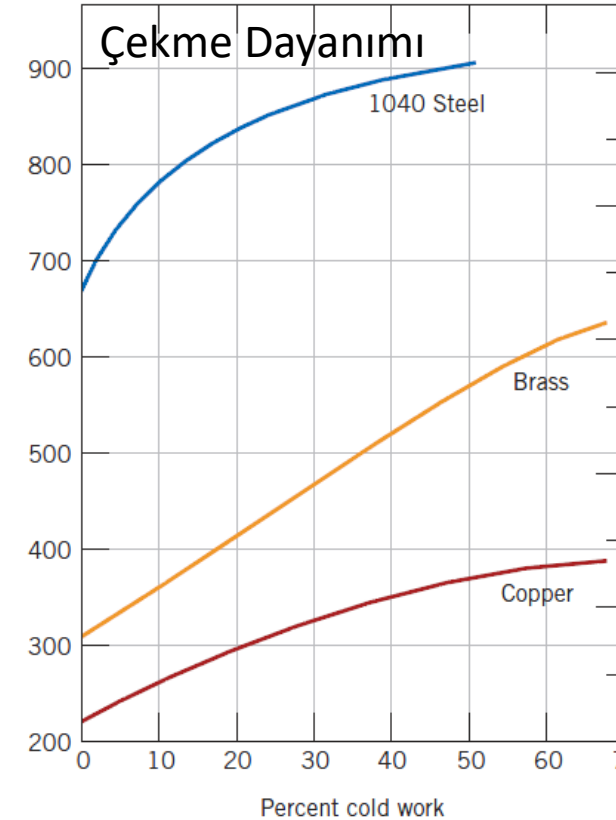
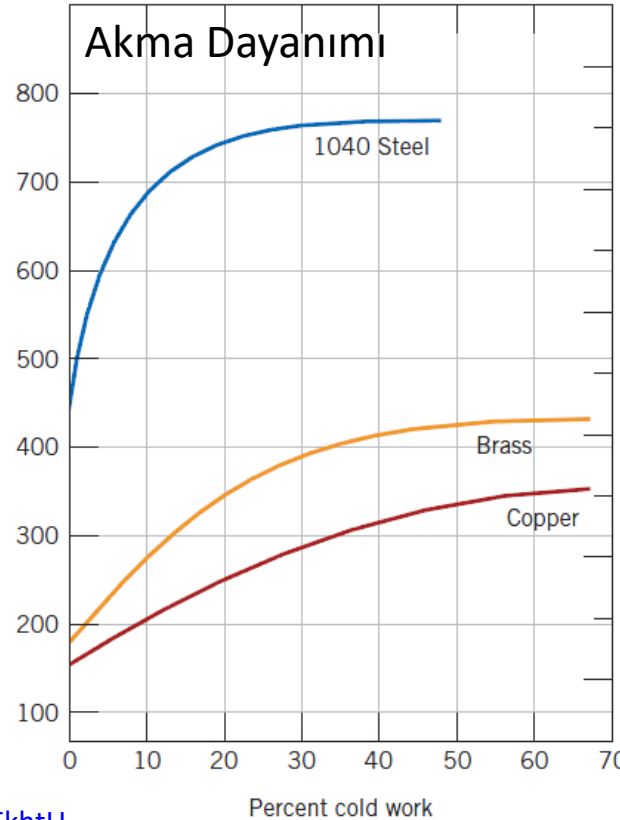
Dislokasyonlar arasındaki ortalama uzunluk azalır



Dislokasyonlar birbirlerini engellemeye başlarlar

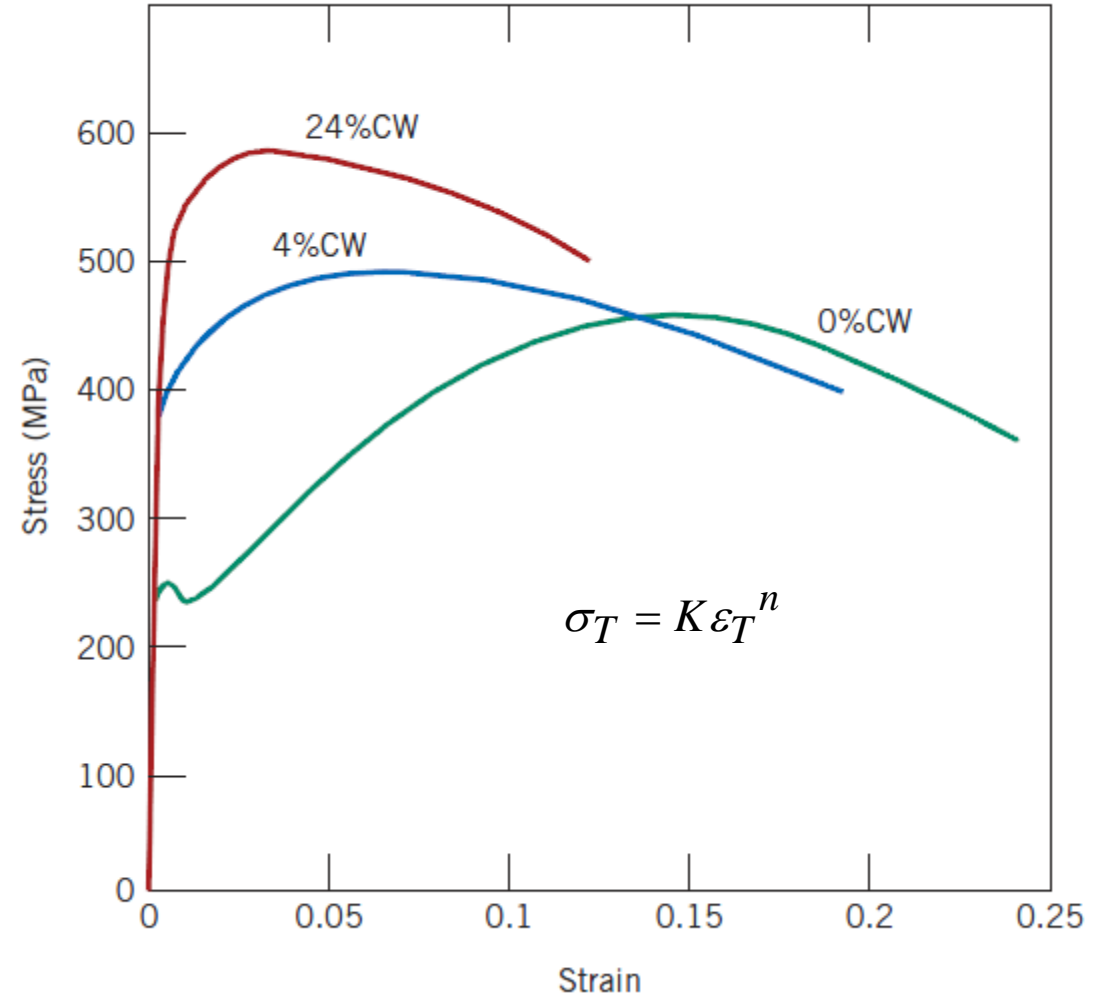
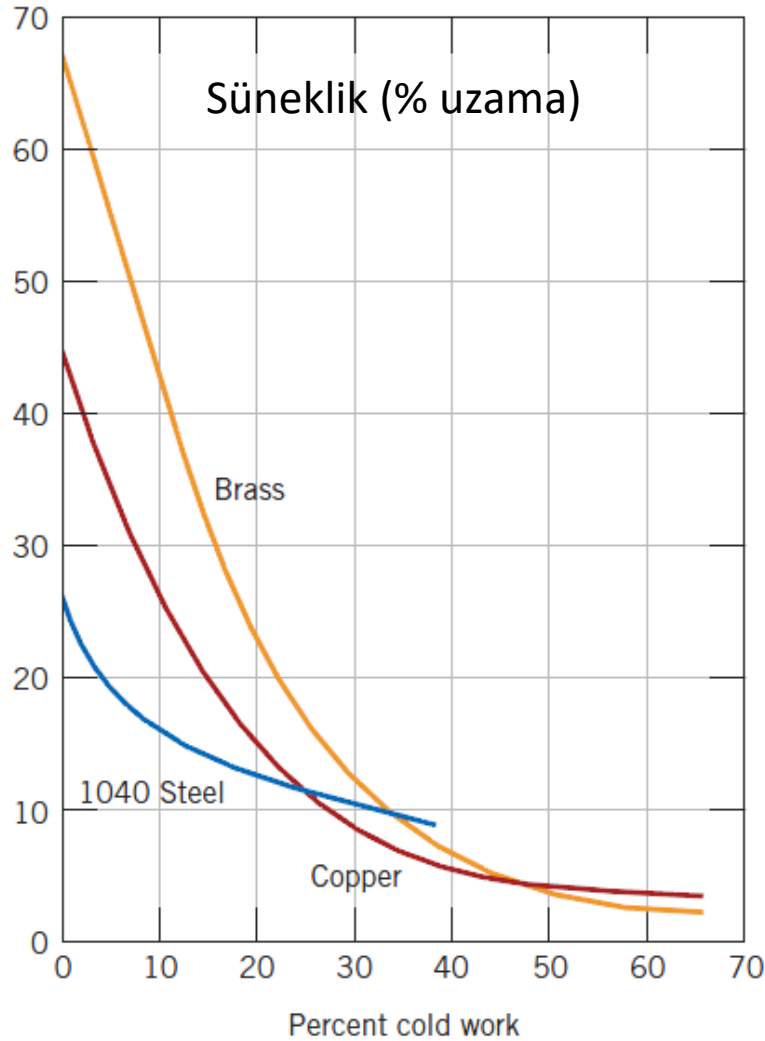
Genellikle bir metalin ne kadar plastik deformasyona uğradığı **soğuk işleme yüzdesi (% cold work)** ile belirtilir.

$$\%CW = \frac{A_o - A_d}{A_o} \times 100$$



## Gerinim ile güçlendirme / Soğuk işleme (Strain hardening/Cold working):

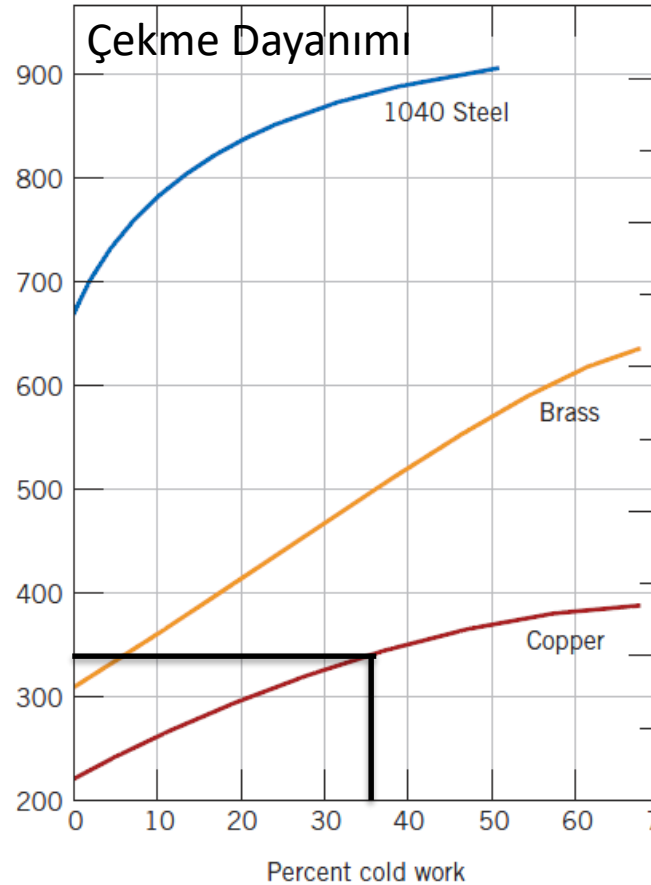
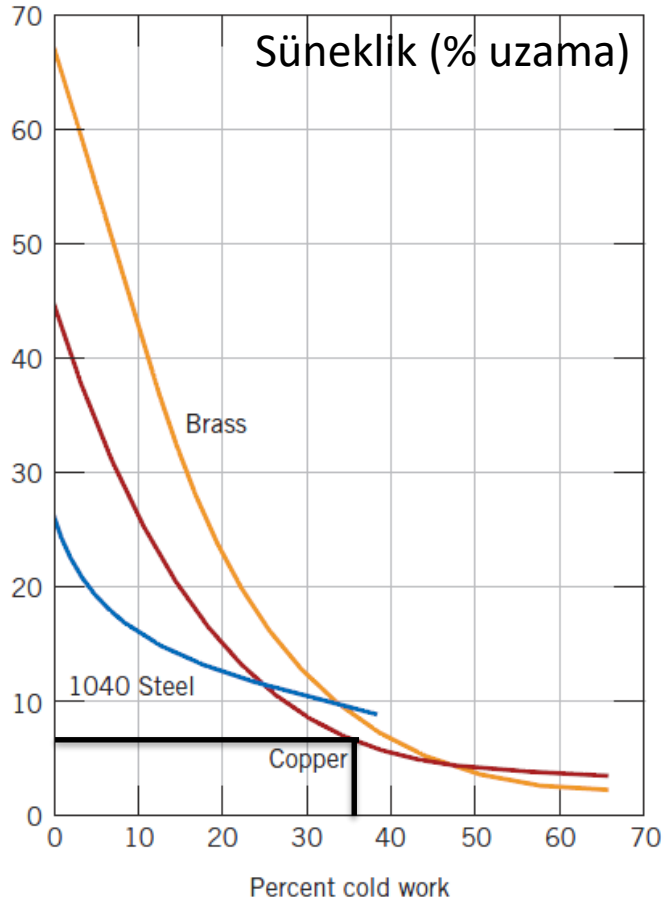
Akma ve çekme dayanımlarında artışın bedelini süneklikteki azalma ile öderiz.



# GÜÇLENDİRME MEKANİZMALARI

## Soru

Silindir şeklindeki bakır bir çubuğun soğuk işleme sonucunda çapı 15.2 mm'den 12.2 mm'ye düşürülürse çekme dayanımını ve sünekliliğini (% de uzama) aşağıdaki grafikleri kullanarak hesaplayınız.



$$\begin{aligned}\%CW &= \frac{A_o - A_d}{A_o} \times 100 \\ &= \frac{15.2^2 - 12.2^2}{15.2^2} \times 100 \\ &= 35.6\%\end{aligned}$$

$$\sigma_{TS} = 340 \text{ MPa}$$

$$\%EL = 7\%$$

## Toparlanma, Yeniden Kristalleşme ve Tane Büyümesi

Soğuk işleme sırasında malzemelerin özelliklerinde ve mikroyapılarında şu değişiklikler olur:

- Tane şekillerinde değişim
- Dislokasyon yoğunluğunda artış
- Gerinim ile güçlendirme (strain hardening).

**Tavlama** (malzemeyi yeteri kadar yüksek sıcaklıkta yeteri kadar uzun tutmak) ile bu değişiklikler kısmen veya tamamen geri döndürülebilir. Bu geri dönüşüm, yüksek sıcaklıklarda olan iki farklı işlem ile olur: Toparlanma (recovery) ve yeniden kristalleşme (recrystallization). Bu iki olayı bazen tane büyümesi (grain growth) de takip edebilir.

**Toparlanma (Recovery):** Toparlanma sırasında malzeme içerisindeki soğuk işleme sırasında oluşmuş olan iç gerilmeler giderilir.

- Yüksek sıcaklıklarda atomların difüzyon hızları artar.
- Dislokasyon sayılarında düşme olur.
- Malzeme içerisinde oluşan gerinim enerjileri düşer.
- Malzeme özellikleri soğuk işleme öncesine kısmen geri döner.

Toparlanma sırasında soğuk işlenmiş metalin dayanımında az miktarda düşüş olur ama buna karşılık sünekliğinde ciddi miktarda artış olur.

## Toparlanma, Yeniden Kristalleşme ve Tane Büyümesi

Toparlanmadan sonra bile sistemdeki taneler görece daha yüksek gerinim enerjilerine sahiptirler:

**Yeniden Kristalleşme (Recrystallization):** Yeniden kristalleşme gerinimsiz (strain free) ve eş-eksenli (belirli yönlerde uzamamış) yeni tanelerin oluşma sürecidir.

Bu yeni oluşan tanelerin dislokasyon yoğunlukları düşüktür ve soğuk işleme öncesi özelliklere sahiptir.

Yeni tane oluşumu için itici güç: Sistem iç enerjisini gerinimli tanelerden gerinimsiz tanelere geçerek düşürmeye çalışır.

**Tane Büyümesi (Grain growth):** Yeniden kristalleşme tamamlandıktan sonra gerinimsiz (strain free) ve eş-eksenli yeni taneler yüksek sıcaklıkta büyümeye devam ederler.

Tane büyümesi için önceden toparlanma ve yeniden kristalleşme olmasına gerek yoktur. Yükseltilmiş sıcaklıklarda bütün çok taneli malzemelerde gözlenir.

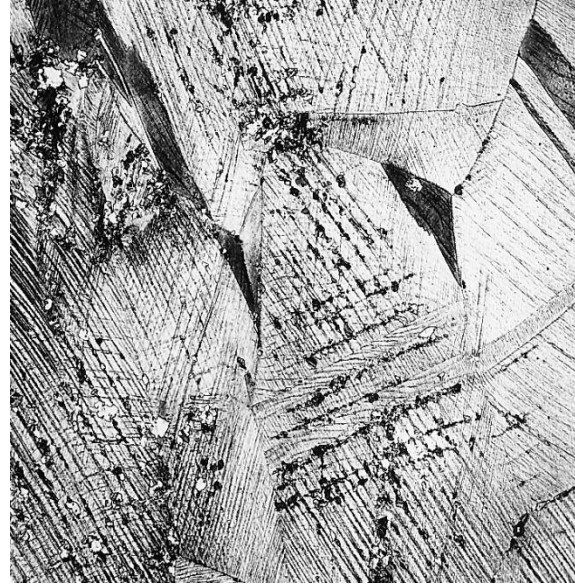
Tane büyümesi için itici güç: Sistem içersindeki tane sınırlarını ve bunlardan kaynaklanan enerjiyi azaltmaya çalışır.



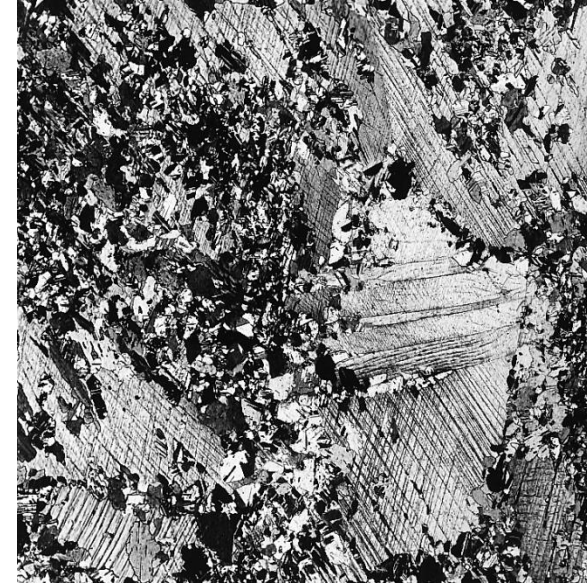
# Toparlanma, Yeniden Kristalleşme ve Tane Büyümesi



(a) Soğuk işleme (33%CW)



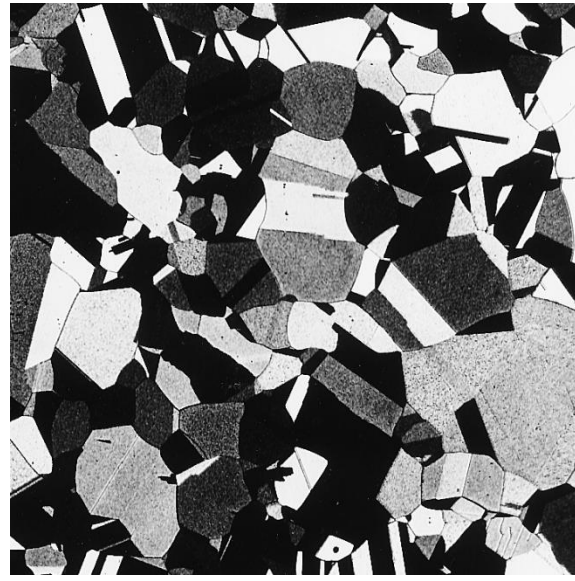
(b) 3 saat 580°C



(c) 4 saat 580°C



(d) 8 saat 580°C



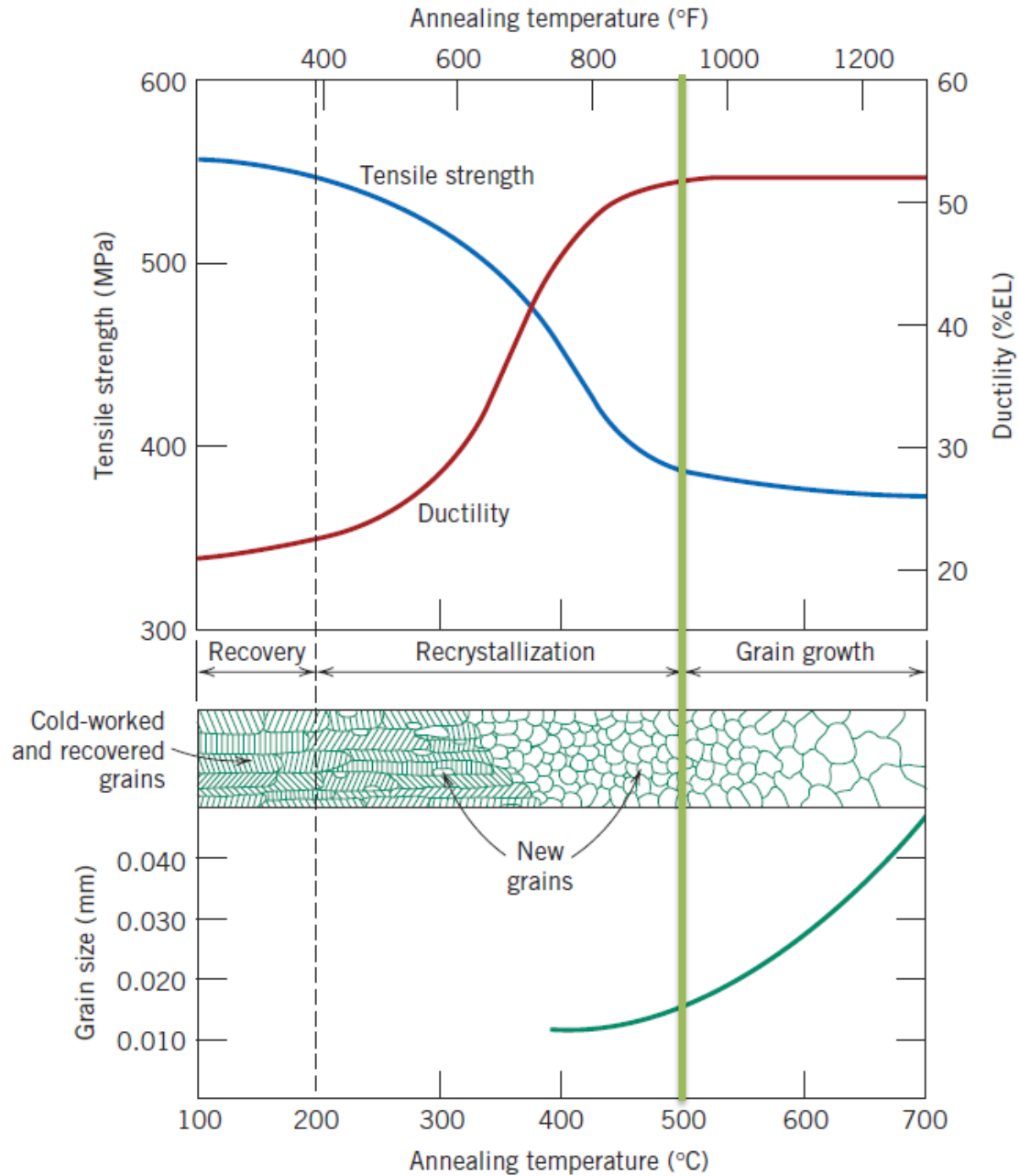
(e) 15 saat 580°C



(f) 15 saat 700°C



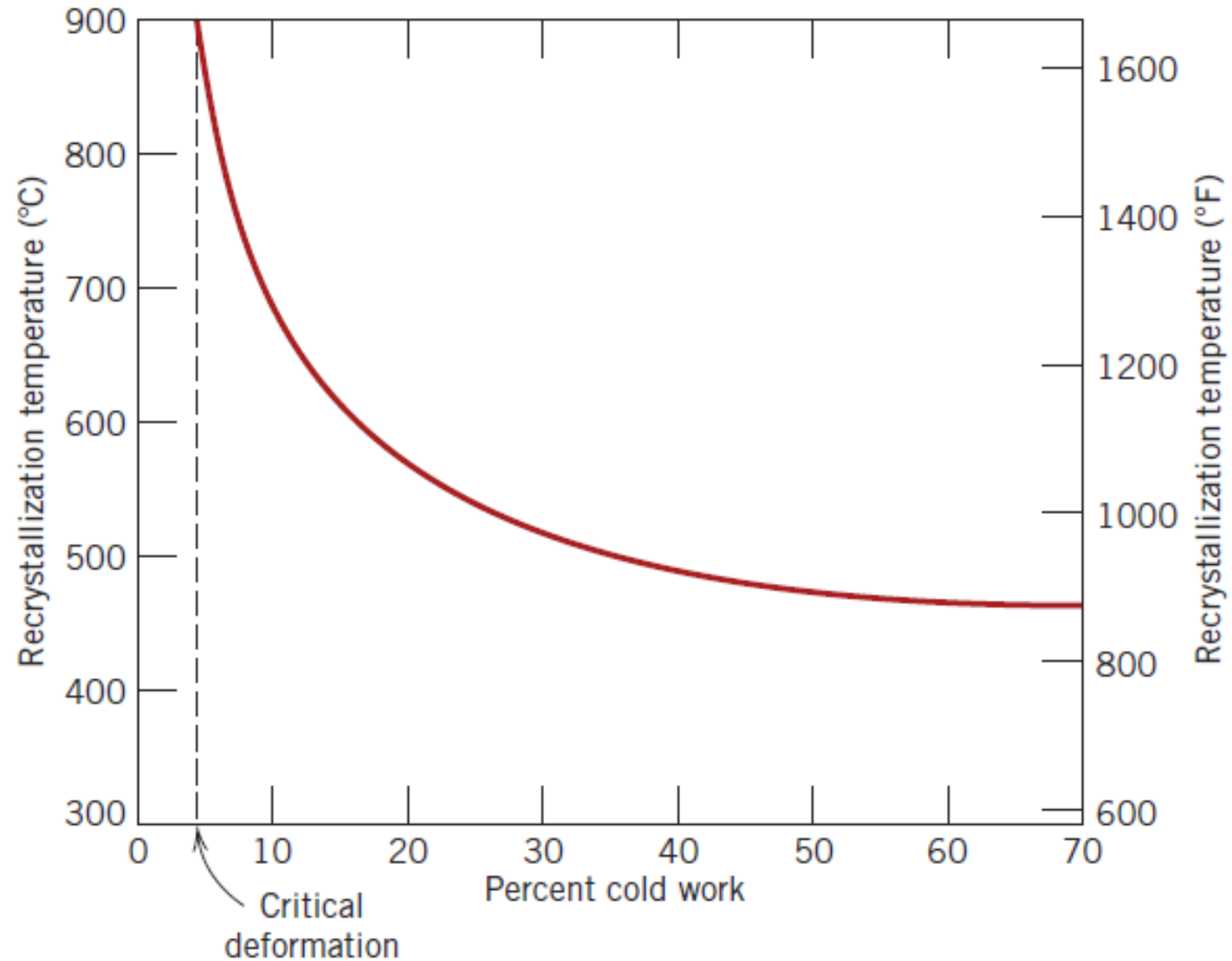
# Toparlanma, Yeniden Kristalleşme ve Tane Büyümesi



**Tavlama Sıcaklığı:** Yeniden kristalleşmenin 1 saat içerisinde tamamlandığı sıcaklıktır.

$$\frac{1}{3}T_m \leq T_{Tavlama} \leq \frac{1}{2}T_m$$

- Soğuk işleme oranı
- Alaşımın saflığı



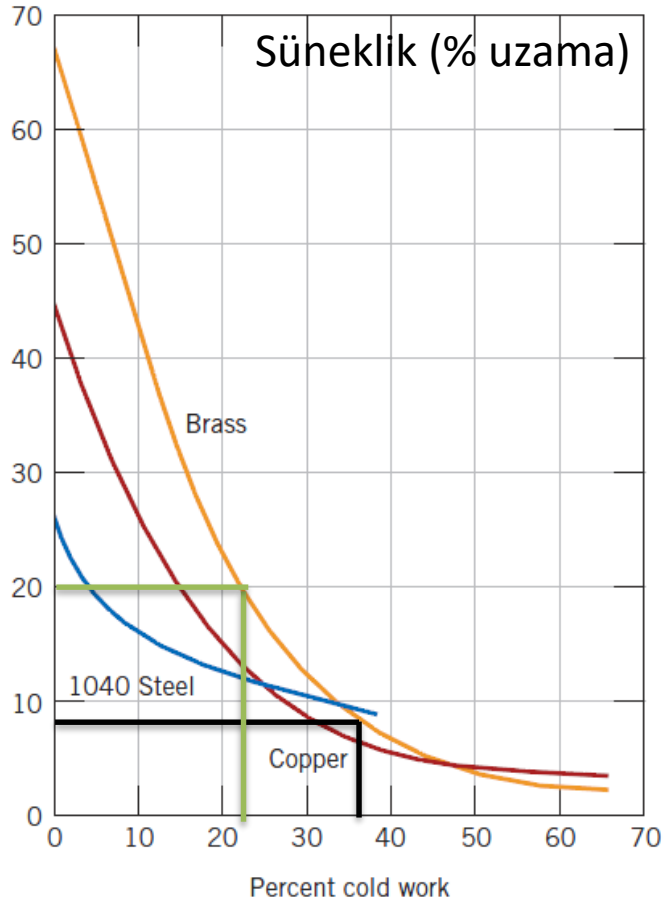
**Table 7.2** Recrystallization and Melting Temperatures for Various Metals and Alloys

<i>Metal</i>	<i>Recrystallization Temperature</i>		<i>Melting Temperature</i>	
	<i>°C</i>	<i>°F</i>	<i>°C</i>	<i>°F</i>
Lead	−4	25	327	620
Tin	−4	25	232	450
Zinc	10	50	420	788
Aluminum (99.999 wt%)	80	176	660	1220
Copper (99.999 wt%)	120	250	1085	1985
Brass (60 Cu–40 Zn)	475	887	900	1652
Nickel (99.99 wt%)	370	700	1455	2651
Iron	450	840	1538	2800
Tungsten	1200	2200	3410	6170

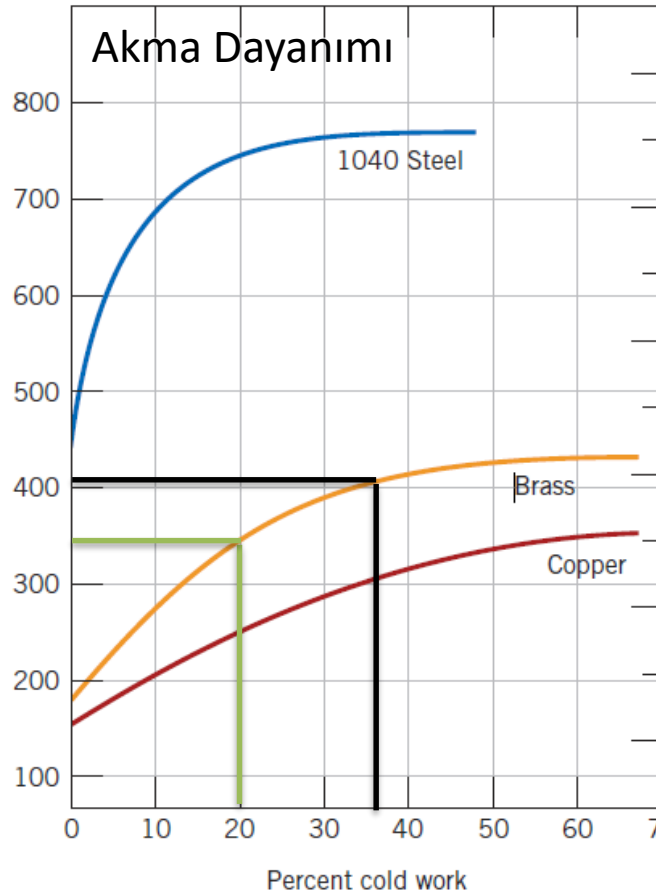
# GÜÇLENDİRME MEKANİZMALARI

## Soru

Silindir şeklinde ve çapı 6.4 mm olan prinç bir çubuk işlenecektir. Bu malzemenin soğuk işleme sonucunda akma dayanımının en az 345 MPa ve sünekliliğinin de en az 20% EL olması istenmektedir. Bunlara ek olarak prinç çubuğun kullanım çapının 5.1 mm olması gerekmektedir.



$$\%CW = 21.5\%$$



$$\begin{aligned}\%CW &= \frac{A_o - A_d}{A_o} \times 100 \\ &= \frac{6.4^2 - 5.1^2}{6.4^2} \times 100 \\ &= 36.5\%\end{aligned}$$

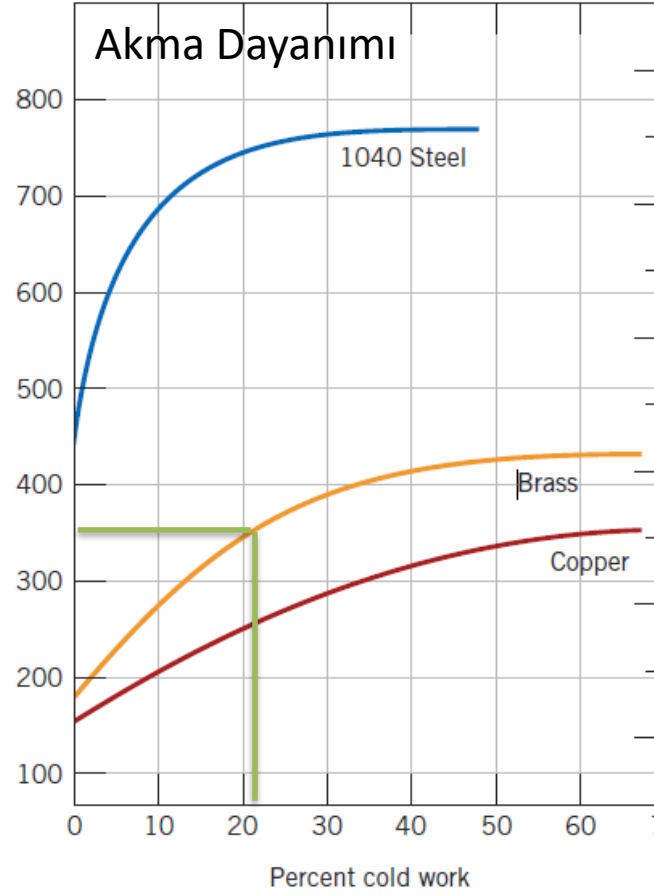
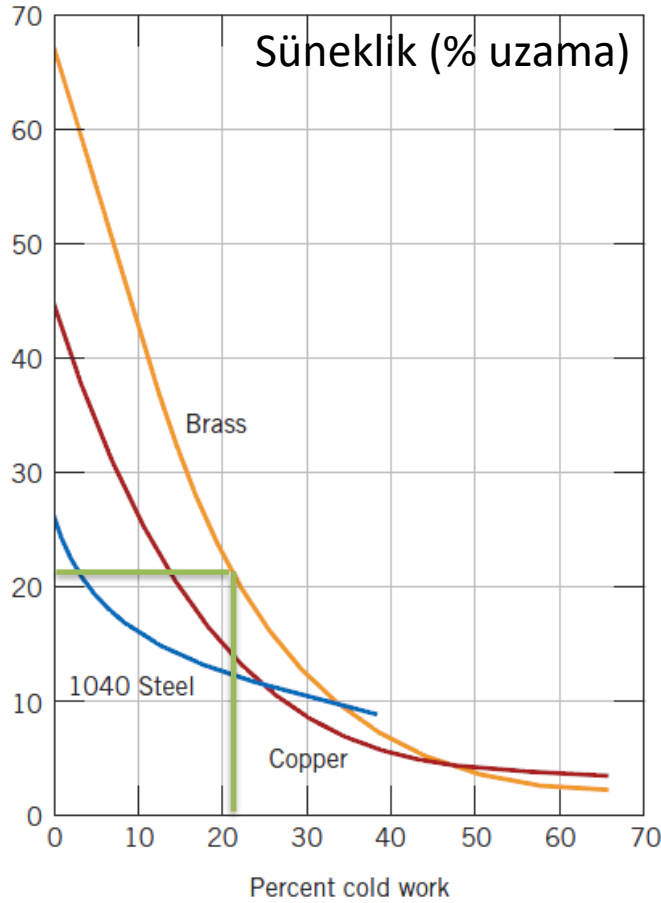
$$\sigma_y = 410 \text{ MPa}$$

$$\%EL = 8\%$$

# GÜÇLENDİRME MEKANİZMALARI

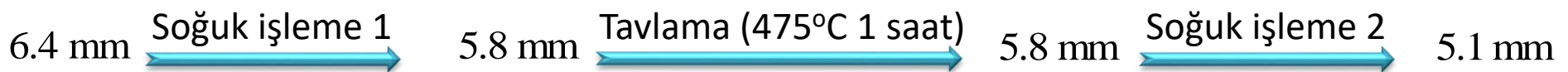
## Soru

Silindir şeklinde ve çapı 6.4 mm olan prinç bir çubuk işlenecektir. Bu malzemenin soğuk işleme sonucunda akma dayanımının en az 345 MPa ve sünekliliğinin de en az 20% EL olması istenmektedir. Bunlara ek olarak prinç çubuğun kullanım çapının 5.1 mm olması gerekmektedir.

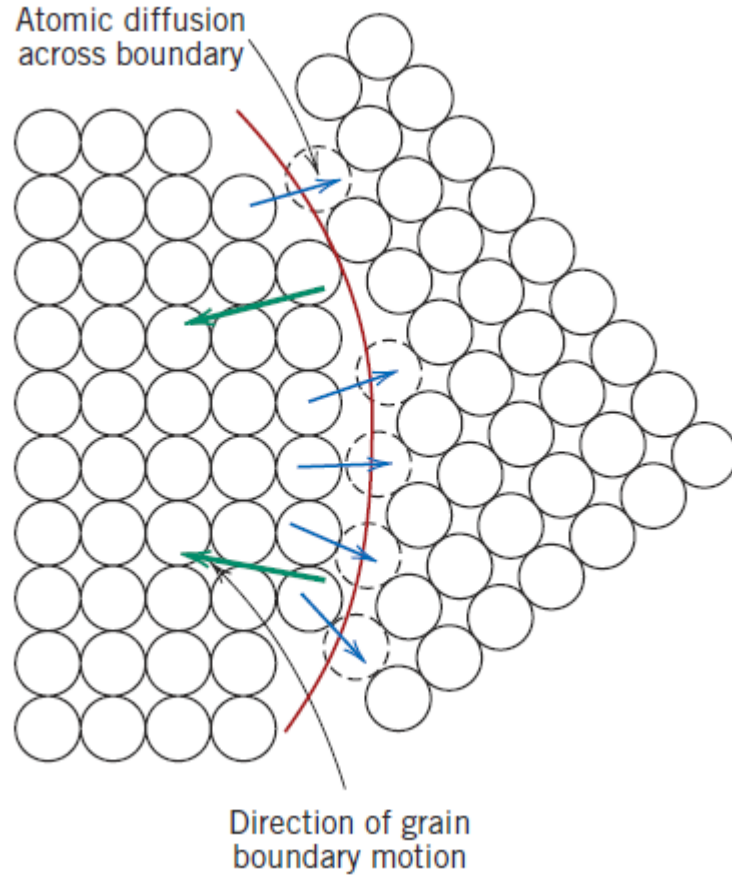


$$\begin{aligned} \%21.5 &= \frac{A_o - A_d}{A_o} \times 100 \\ &= \frac{r_o^2 - 5.1^2}{r_o^2} \times 100 \end{aligned}$$

$$r_o = 5.8 \text{ mm}$$

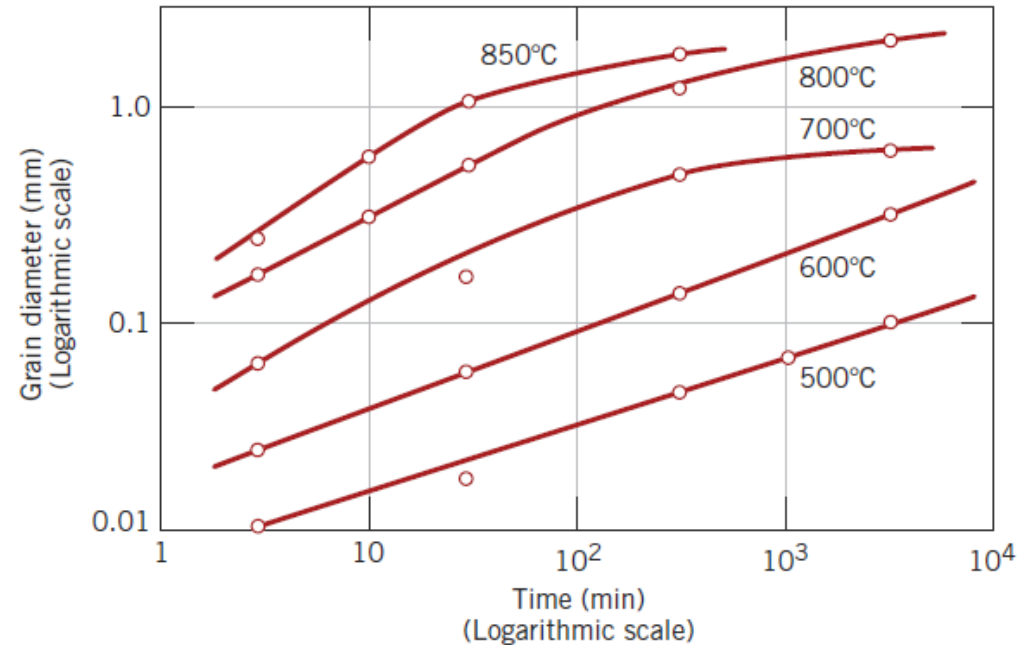


**Tane Büyümesi (Grain growth):** Yeniden kristalleşme tamamlandıktan sonra gerinimsiz (strain free) ve eş-eksenli yeni taneler yüksek sıcaklıkta büyümeye devam ederler.



Çok kristalli malzemelerde tane boyutunun zamanla değişimi:

$$d^n - d_o^n = Kt \quad n \geq 2$$



**Önümüzdeki Ders Saatinde**

**Ders Kitabımızın 8. Bölümündeki**

**METALLERİN KIRILMASI, YORULMASI VE SÜRÜNMESİ**

**adlı konuya başlayacağız!**