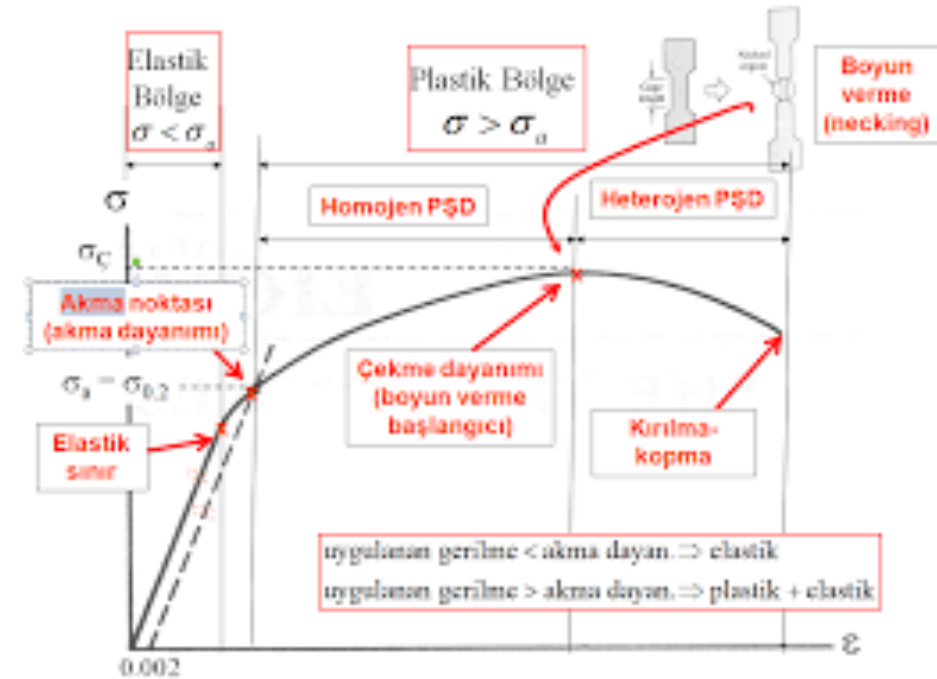


Mukavemet (DAYANIM) Artırıcı Yöntemler

HATIRLATMA

- *Dislokasyonlar, hareketli olan ve kayma gerilmesi uygulandığında kafes boyunca hareket edebilen çizgisel kristal kafes hatalarıdır (kusurlarıdır).
- *Malzeme özellikleri üzerinde son derece önemli etkileri vardır. Özellikle mekanik dayanım üzerinde, çünkü malzemelerin akması ve plastik olarak deforme olmasını sağlayan mekanizmadır.
- *Dislokasyonların hareketini zorlaştırarak metallerin dayanımı artırılabilir.



Neredeyse bütün mukavemet (dayanım) artırıcı yöntemlerdeki esas aşağıdaki kurala dayanır:

*DİSLOKASYON HAREKETLERİNİ SINIRLAMAK VEYA ENGELLEMEK
MALZEMENİN DAHA YÜKSEK SERTLİĞE ULAŞMASINI VE DAHA YÜKSEK
DAYANIMLI OLMASINI SAĞLAR*

ÇOK SAYIDA YÖNTEMLE BU SAĞLANABİLİR

1. Katı Çözelti (Ergiyik) Sertleşmesi
- 2..Tane Boyutunu Küçültme
3. Soğuk İşlem (Deformasyon) Sertleşmesi
4. Yaşlanma veya Çökelme/Çökelti Sertleşmesi
5. Dispersiyon Sertleşmesi

1. Katı Çözelti (Ergiyik) Sertleşmesi

Metalik malzemelerde katı çözelti oluşturmaının en önemli etkisi katı çözelti sertleşmesidir.

Katı çözeltinin mukavemet artırıcı etkisi, dislokasyon hareketlerine direncin artırılması sayesinde oluşur.

Cu-Zn (Pirinç) alaşımının saf Cu'dan ve Fe-C alaşımı olan çeliğin saf demirden daha mukavemetli olması katı çözelti sertleşmesi sayesinde olur.

HATIRLATMA:

KATI ÇÖZELTİ (ERGİYİK): Malzemeler yapılarının içerisinde, belli oranlarda farklı atomları çözebilirler. Bu durum “katı çözeltiler” olarak adlandırılır. Bir çözelti çözen ve çözünen olmak üzere iki bileşenden oluşur.

ÇÖZÜNÜRLÜK: Yabancı bir atomun farklı bir elementin kristal yapısına yer alan veya arayer atomu olarak yerleşmesidir. Çözünürlükte meydana gelen yapıdaki elementler kendi özelliklerini kaybeder ve oluşan çözelti tek bir yapı gibi davranır.

A)Sınırlı Çözünürlük

B)Sınırsız Çözünürlük (Kuralları var: boyut faktörü, kristal yapı, valans elektron sayısı, elektronegatiflik)

1. Katı Çözelti (Ergiyik) Sertleşmesi

KATI ÇÖZELTİ (ERGİYİK):

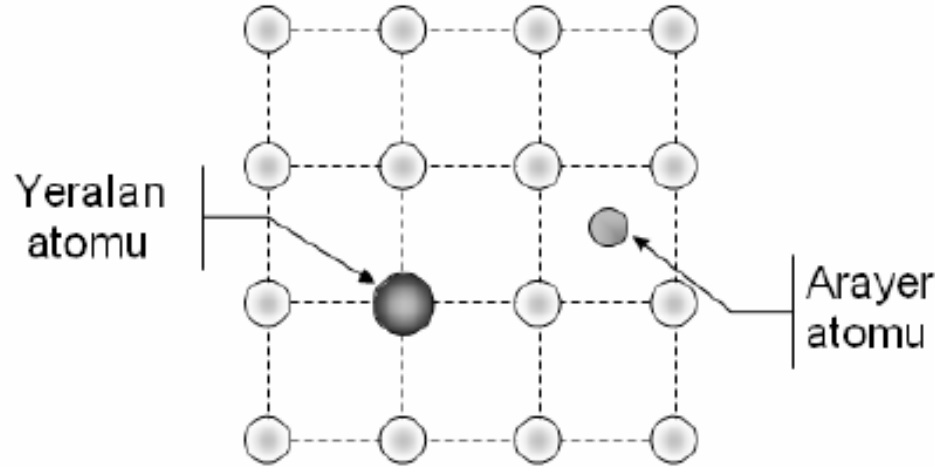
Malzemeler yapılarının içerisinde, belli oranlarda farklı atomları çözebilirler. Bu durum “katı çözeltiler” olarak adlandırılır. Bir çözelti çözen ve çözünen olmak üzere iki bileşenden oluşur.

ÇÖZÜNÜRLÜK:

Yabancı bir atomun farklı bir elementin kristal yapısına yer alan veya arayer atomu olarak yerleşmesidir. Çözünürlükte meydana gelen yapıdaki elementler kendi özelliklerini kaybeder ve oluşan çözelti tek bir yapı gibi davranır.

A)Sınırlı Çözünürlük

B)Sınırsız Çözünürlük (Kuralları var: boyut faktörü, kristal yapı, valans elektron sayısı, elektronegatiflik)

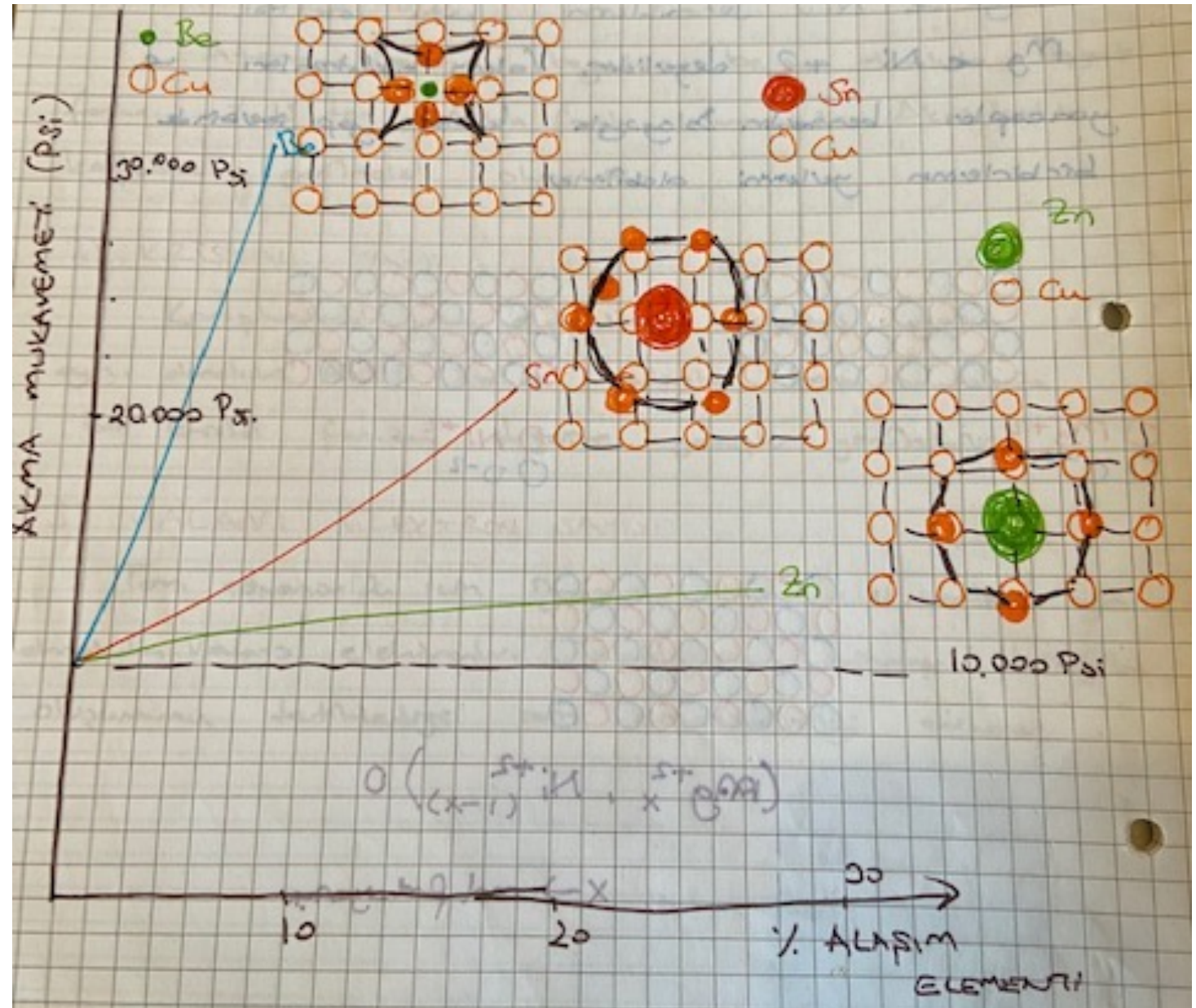


1. Katı Çözelti (Ergiyik) Sertleşmesi

Cu-Be

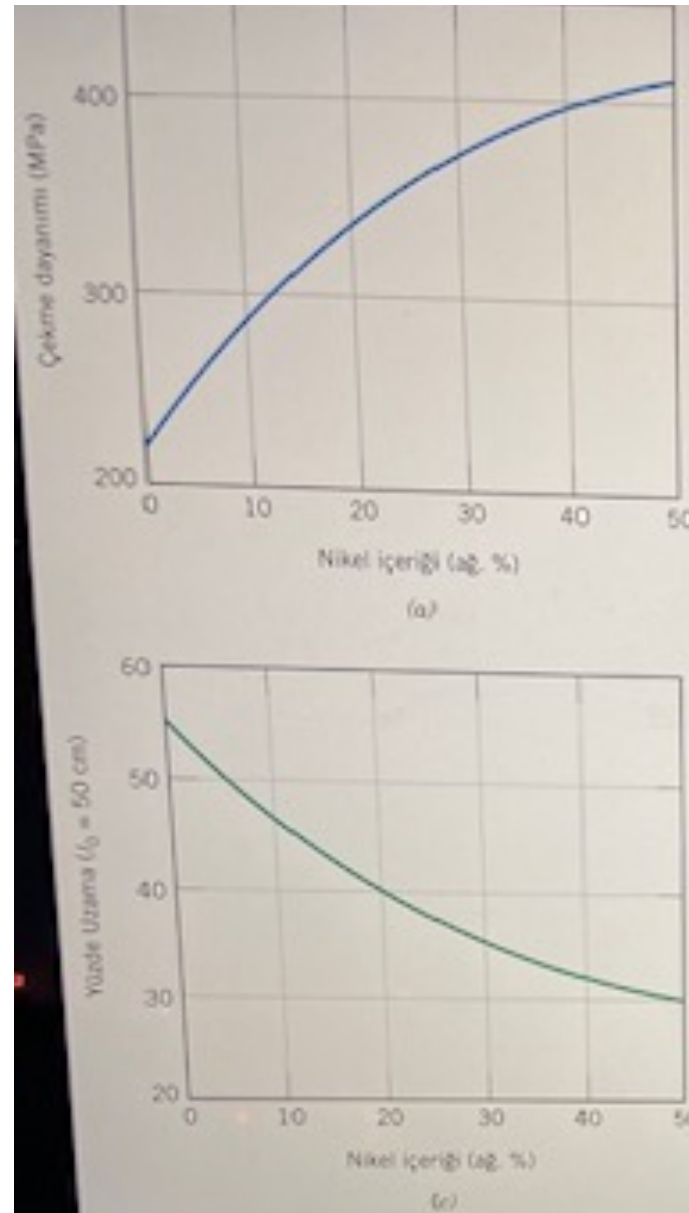
Cu-Sn

Cu-Zn



1. Katı Çözelti (Ergiyik) Sertleşmesi

Cu-Ni

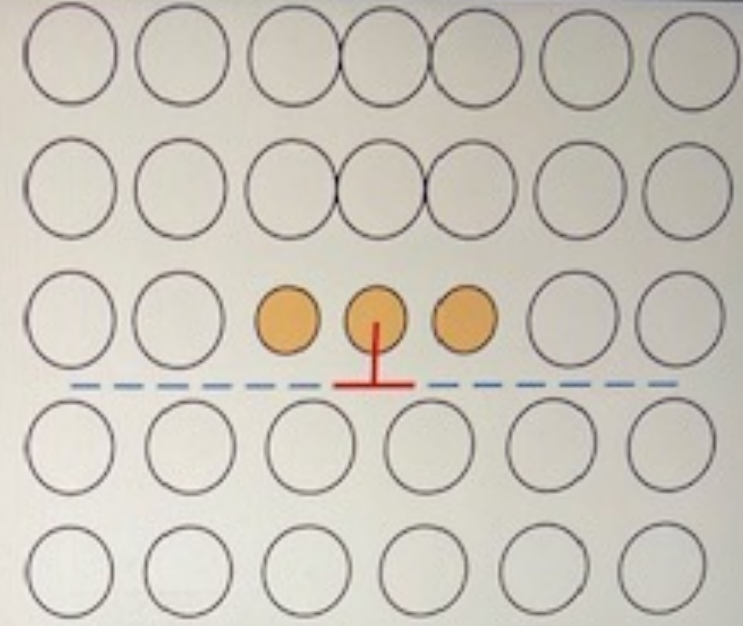


Şekil 7.16 Bakır-nikel alaşımında nikel içeriğiyle (a) çekme dayanımı (b) akma dayanımı ve (c) sünekliğin (% uzama) değişimi

1. Katı Çözelti (Ergiyik) Sertleşmesi



(a)

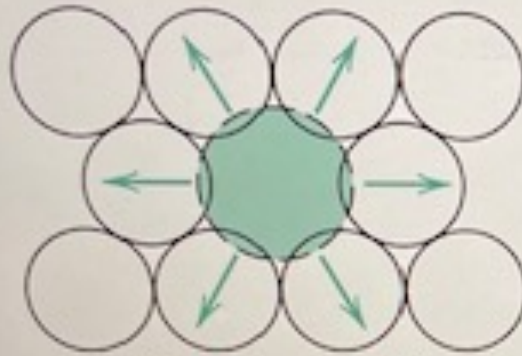


(b)

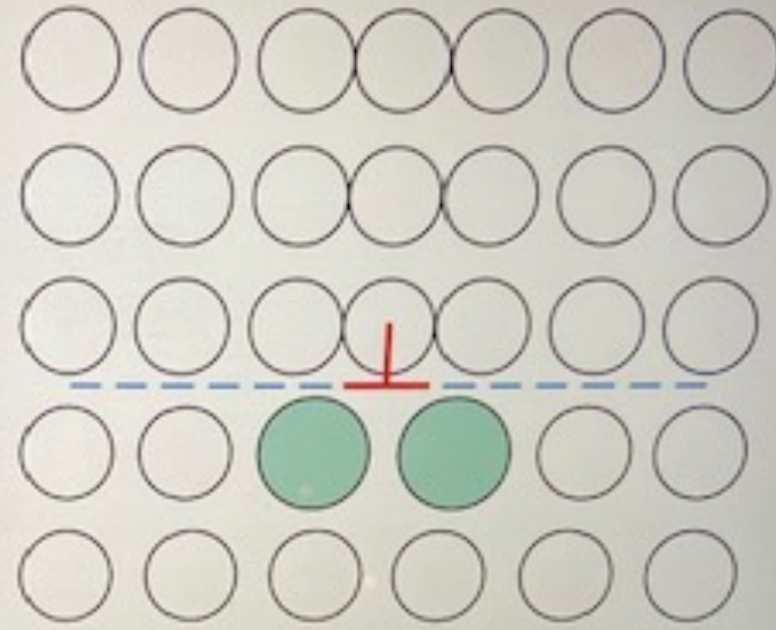
Şekil 7.17 (a) Daha küçük çapa sahip yeralan empürite atomlarının, matris atomları üzerine uyguladığı çekme şekil değişiminin şematik olarak gösterilmesi. (b) Empürite atomu ile dislokasyon arasındaki kafes şekil değişimlerini kısmi olarak yok edecek şekilde daha küçük empürite atomlarının kenar dislokasyona göre yerleşebileceği olası konumlar

1. Katı Çözelti (Ergiyik) Sertleşmesi

Şekil 7.18 (a) Daha büyük çapa sahip yeralan empürite atomlarının, matris atomları üzerine uyguladığı basma şekil değişiminin şematik olarak gösterilmesi. (b) Empürite atomu ile dislokasyon arasındaki kafes şekil değişimlerini kısmi olarak yok edecek şekilde daha büyük empürite atomlarının kenar dislokasyona göre yerleşebileceği olası konumlar.

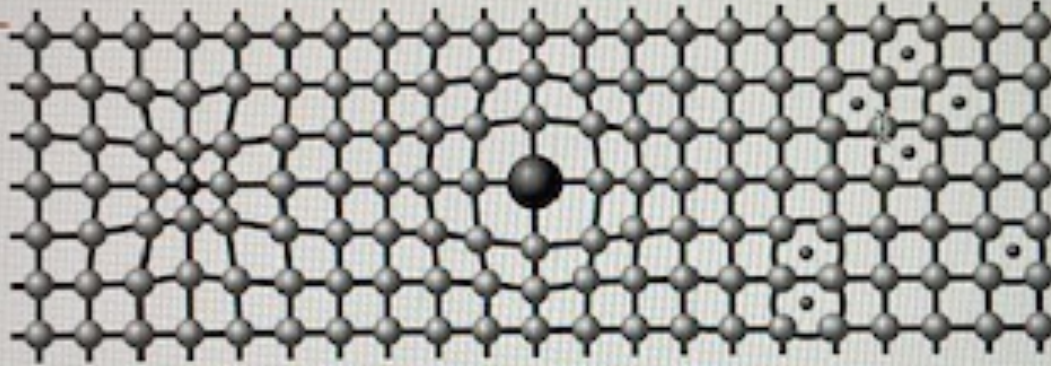


(a)



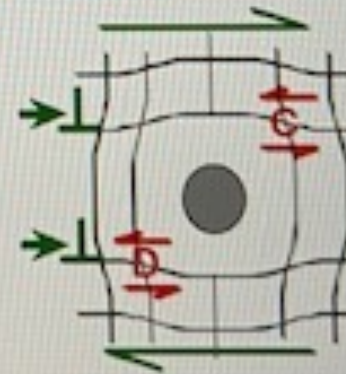
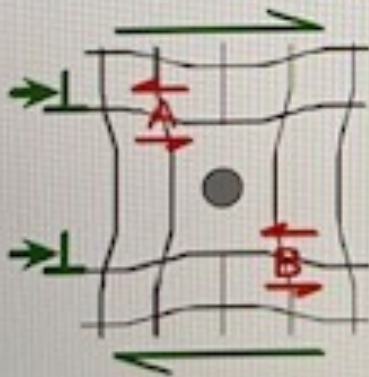
(b)

1. Katı Çözelti (Ergiyik) Sertleşmesi



Küçük yer alan empürite atomu

Büyük yer alan empürite atomu

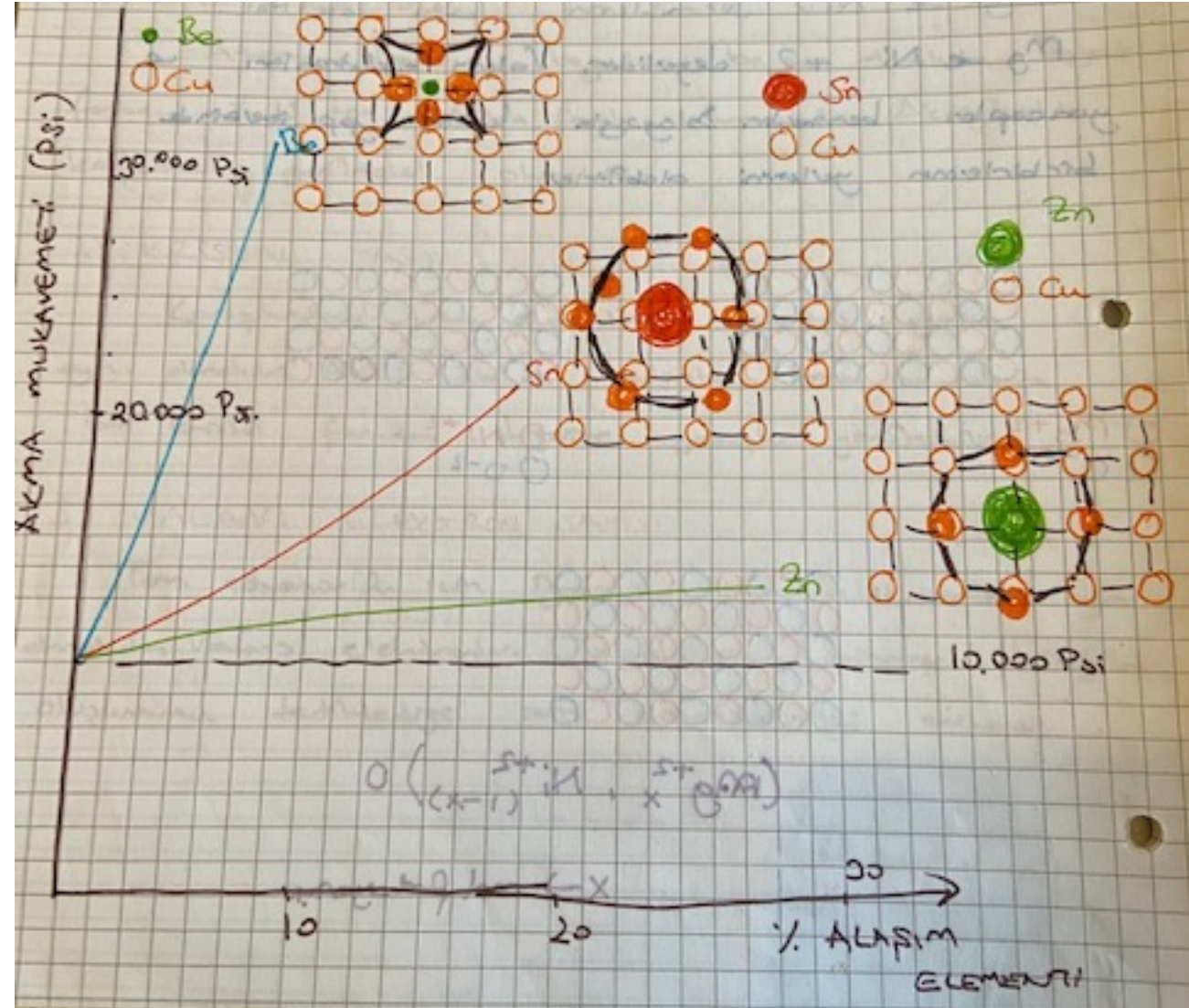


Empürite atomu, A ve B'de olduğu gibi C ve D de sağa doğru olan dislokasyon hareketine karşı yönlü yerel kayma üretir.

1. Katı Çözelti (Ergiyik) Sertleşmesi

KATI ÇÖZELTİ SERTLEŞMESİNİN ne kadar etkin olacağı iki faktöre bağlıdır;

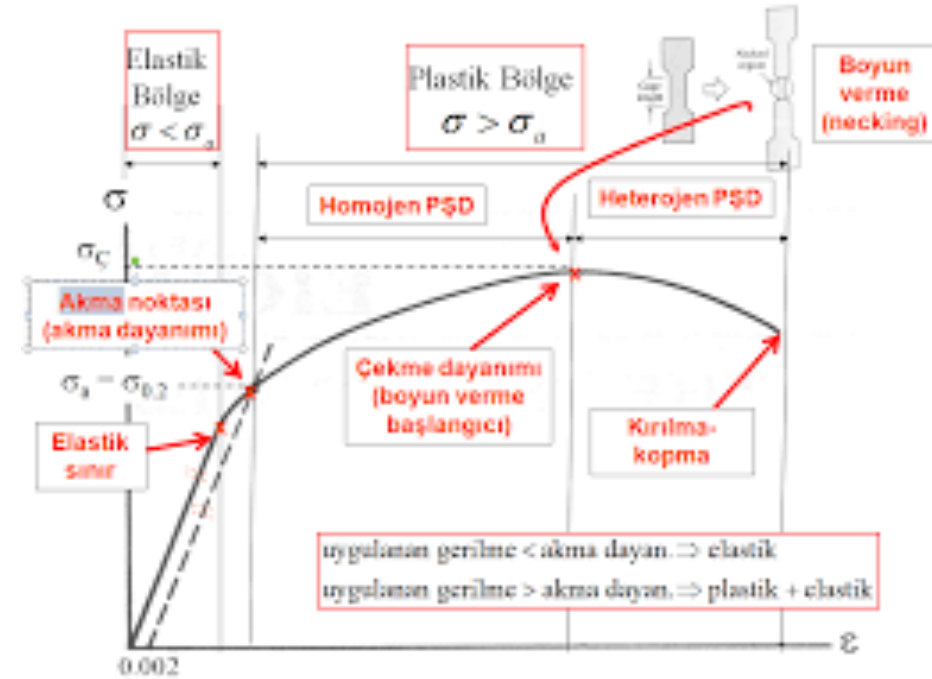
1. Ev sahibi ve misafir (yabancı) atomlar arasındaki yarıçap farkı ne kadar fazla ise (yer alan atom için) oluşan mukavemet artışı o kadar büyüktür.
2. Alaşım elemtinin miktarı arttıkça oluşan mukavemet artışı o kadar fazla olur.



1. Katı Çözelti (Ergiyik) Sertleşmesinin SONUÇLARI

Katı çözelti sertleşmesi ile MALZEME ÖZELLİKLERİ DEĞİŞİR;

1. Malzemenin akma dayanımı, maksimum çekme mukavemeti ve sertliği artar, alaşım yapmanın temel felsefesi budur.
2. Malzemenin sünekliliği düşer (sadece çok özel durumlarda (Cu-Zn alaşımı, hem mukavemet hem de süneklilik artar)
3. Malzemenin elektrik iletkenliği saf malzemeye göre düşüktür
4. Malzemenin sürünme mukavemeti veya yüksek sıcaklıktaki mukavemeti önemli derecede azalmaz.



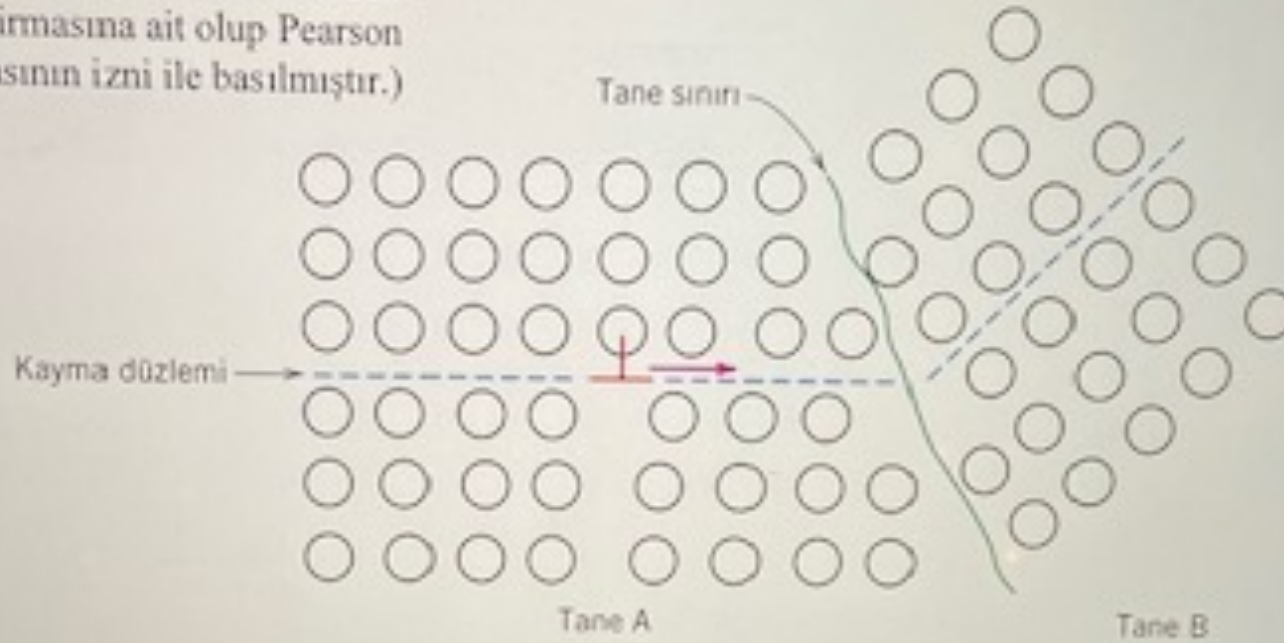
2. Tane Boyutu Küçültülerek Mukavemet Artırma

Şekil 7.14 Tane sınırıyla karşılaşan bir dislokasyonun davranışı. Burada, tane sınırlarının devam eden bir kaymaya karşı nasıl engel görevi gördüğü şekil üzerinde açıklanmıştır. Tane sınırında kayma düzlemi sürekli olmayıp tane sınırında doğrultusunu değiştirmektedir. (Van Vlack, *A Textbook of Materials Technology*, 1st edition (1973), p. 53. Yayın hakkı Pearson Education Firmasına ait olup Pearson Education Firmasının izni ile basılmıştır.)

Tane sınırı sayısı arttıkça dislokasyon hareketlerine engel sayısı da artacaktır.

Üç boyutlu sistemlerde vida dislokasyonu olması durumunda dislokasyonun tane sınırında yön değiştirerek hareketi mümkün.

Ancak çoğunlukla dislokasyon hareketi tane sınırında durur.

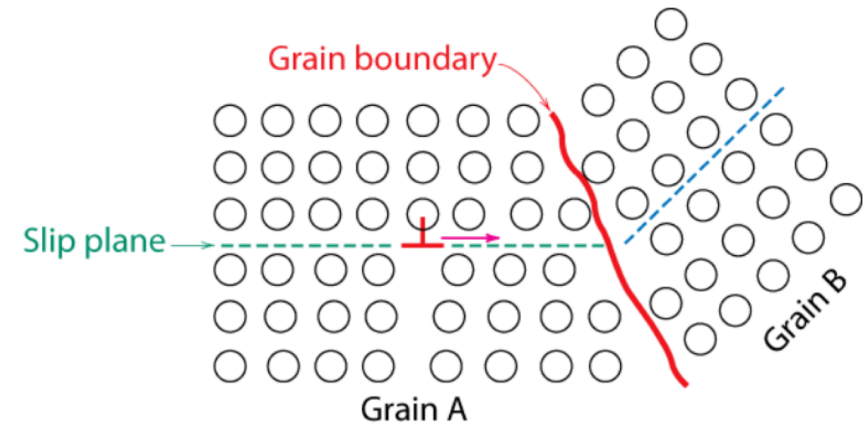


Saf metallere ve alaşım metallere uygulana bilen bir mukavemet artırma yöntemidir.

Yüksek sıcaklıklarda etkisini kaybeden bir mukavemetlendirme yöntemidir.

2. Tane Boyutu Küçültülerek Mukavemet Artırma

- Grain boundaries are barriers to slip.
- Barrier "strength" increases with increasing angle of misorientation.
- Smaller grain size: more barriers to slip.



Adapted from Fig. 7.14, *Callister 7e*.
(Fig. 7.14 is from *A Textbook of Materials Technology*, by Van Vlack, Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.)

- Hall-Petch Equation:

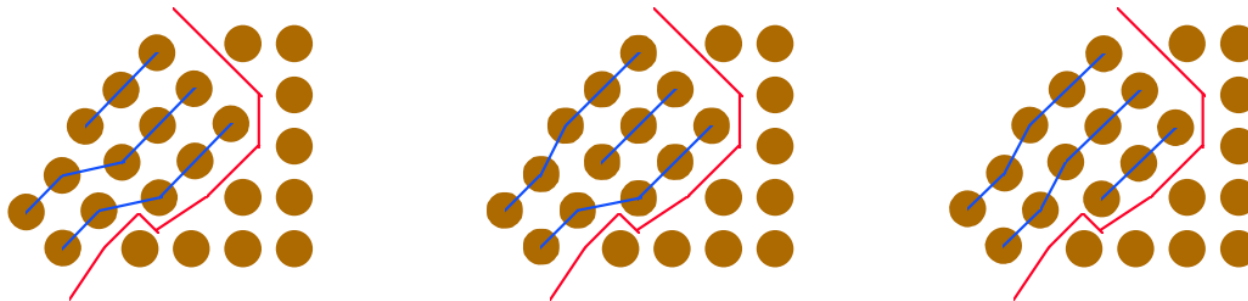


Figure 1. Representation of a Dislocation Stopped by a Grain Boundary (Red Line).

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$$

2. Tane Boyutu Küçültülerek Mukavemet Artırma

Hall-Petch
denklemini—akma
dayanımının tane
büyüklüğü ile olan
ilişkisi

$$\sigma_{Ak} = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad (7)$$

- *Hall-Petch denklemini* adı verilen bu ifade de d , ortalama tane çapı, σ_0 ve k_y ise malzemeye özgü sabitlerdir.

2. Tane Boyutu Küçültülerek Mukavemet Artırma

- **Hall-Petch Equation:** For many materials, Yield strength varies with grain size as
d: average grain diameter
 σ_0 and k_y are material constants

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$$

Hall-Petch equation is **not valid** for very large and extremely small grain materials

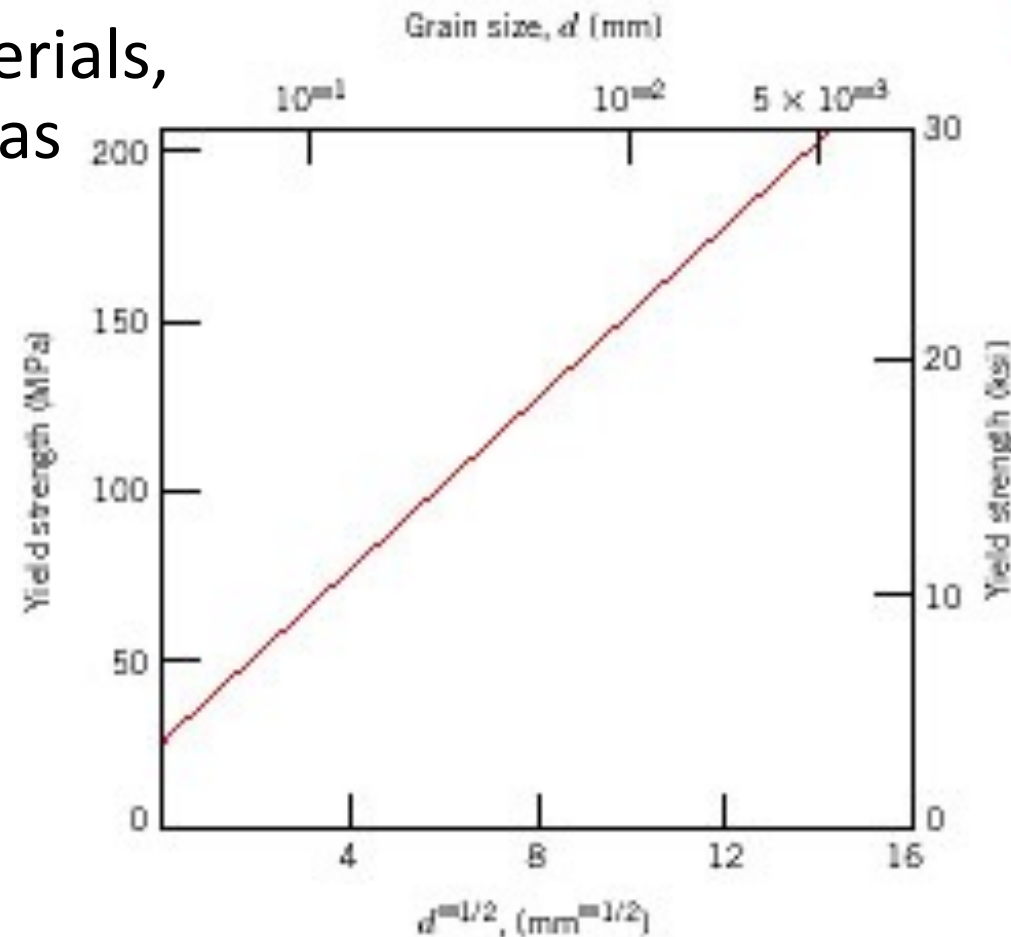
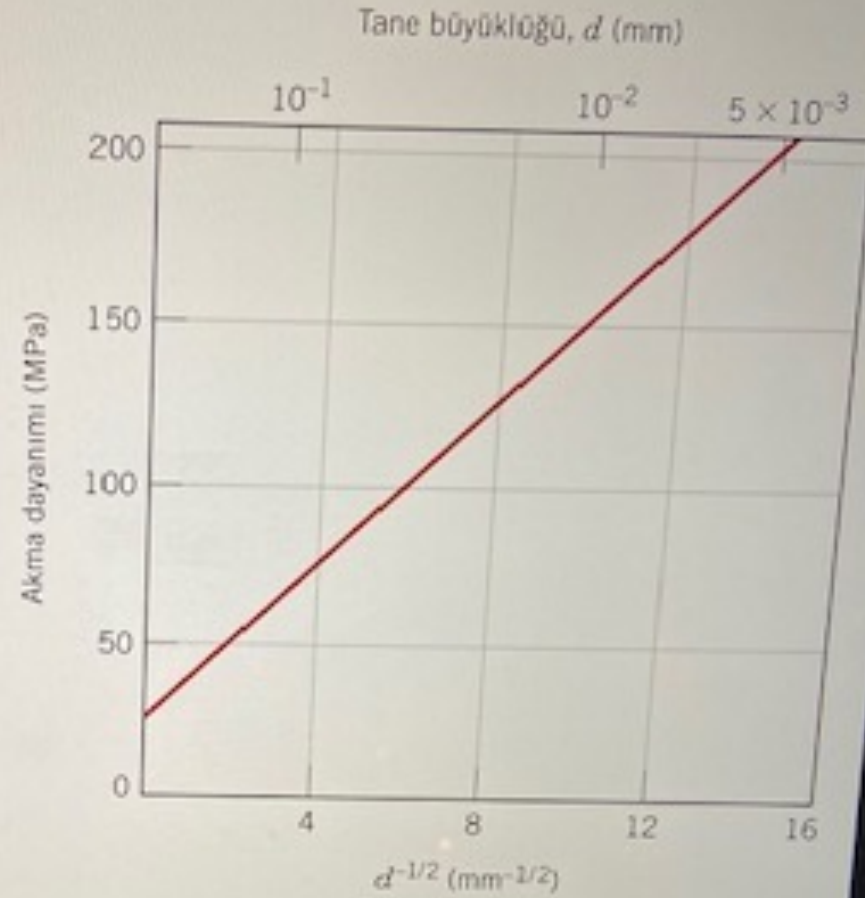


Figure 7.15 shows strength variation for brass

2. Tane Boyutu Küçültülerek Mukavemet Artırma

Şekil 7.15 70 Cu–30 Zn pirinç alaşımında tane büyüklüğünün akma dayanımına etkisi. Tane çapının sağdan sola doğru arttığına ve bu artışın doğrusal olmadığına dikkat ediniz (H. Suzuki, “The Relation Between the Structure and Mechanical Properties of Metals,” Vol. II, *National Physical Laboratory, Symposium No. 15*, 1963, p. 524.)

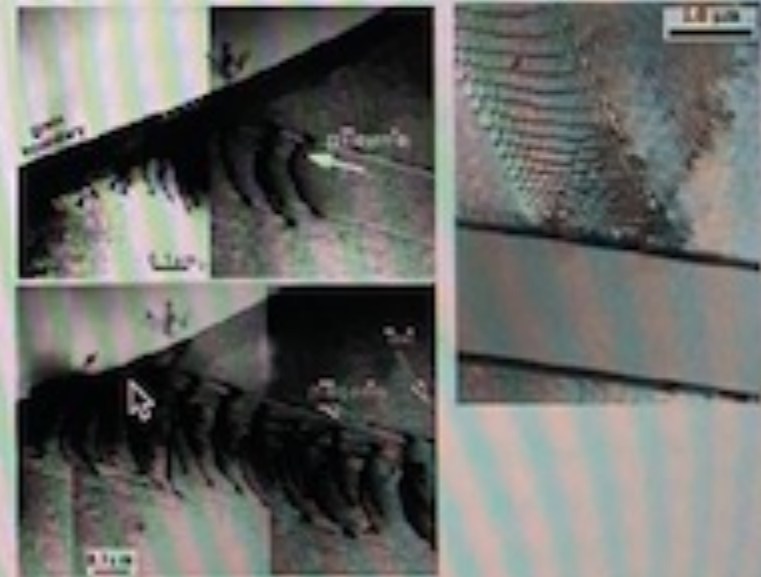
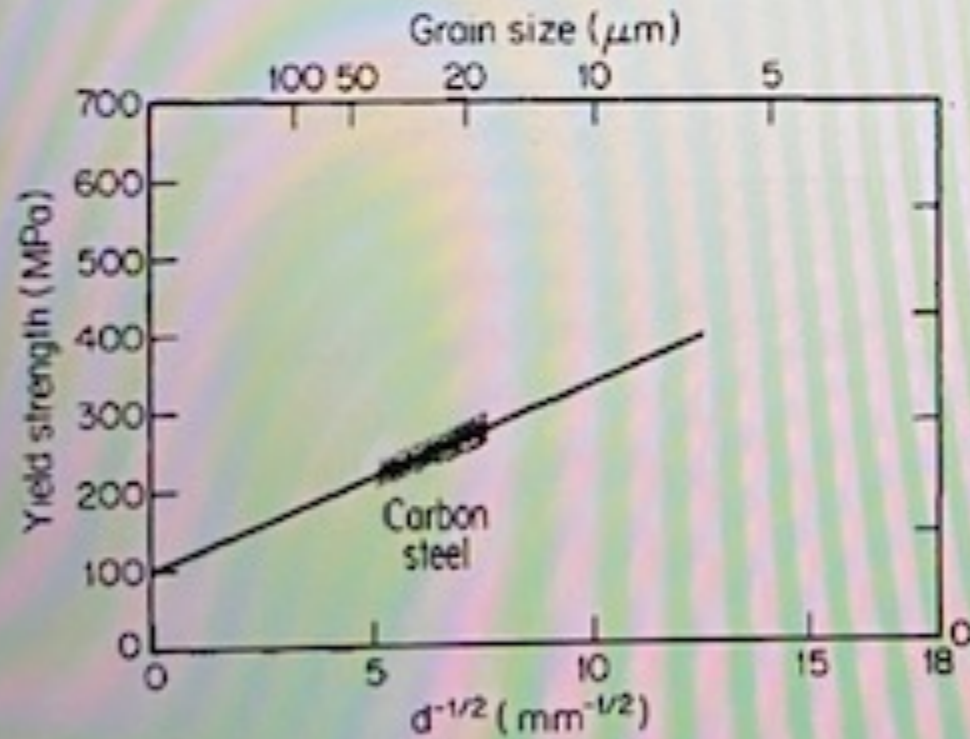


2. Tane Boyutu Küçültülerek Mukavemet Artırma

- ✓ • $T < 0.5T_m$: TS'leri dislokasyon hareketi engelleri olarak görev yapar..
- ✓ • Komşu tanelerdeki deformasyonun uyumluluk zorunluluğu, birden fazla kaymayı (5 bağımsız kayma sisteminin çalışması) ve dolayısıyla yüksek deformasyonla sertleşme oranını (n) oluşturur.
- ✓ • $T > 0.5T_m$: Tane Sınırları daha hızlı difüzyon yolları sağlar. Daha hızlı sürünme ile sonuçlanır.
- ✓ • Yüksek sıcaklıklarda. Tane sınırı kayması, sürünme deformasyonunun artması için başka bir olası mekanizmadır.
- ✓ • TS'leri doku oluşumu ve buna bağlı etkilere yol açar.

2. Tane Boyutu Küçültülerek Mukavemet Artırma

➤ Karbon çeliğinde Hall-Petch ilişkisi



$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}}$$

2. Tane Boyutu Küçültülerek Mukavemet Artırma

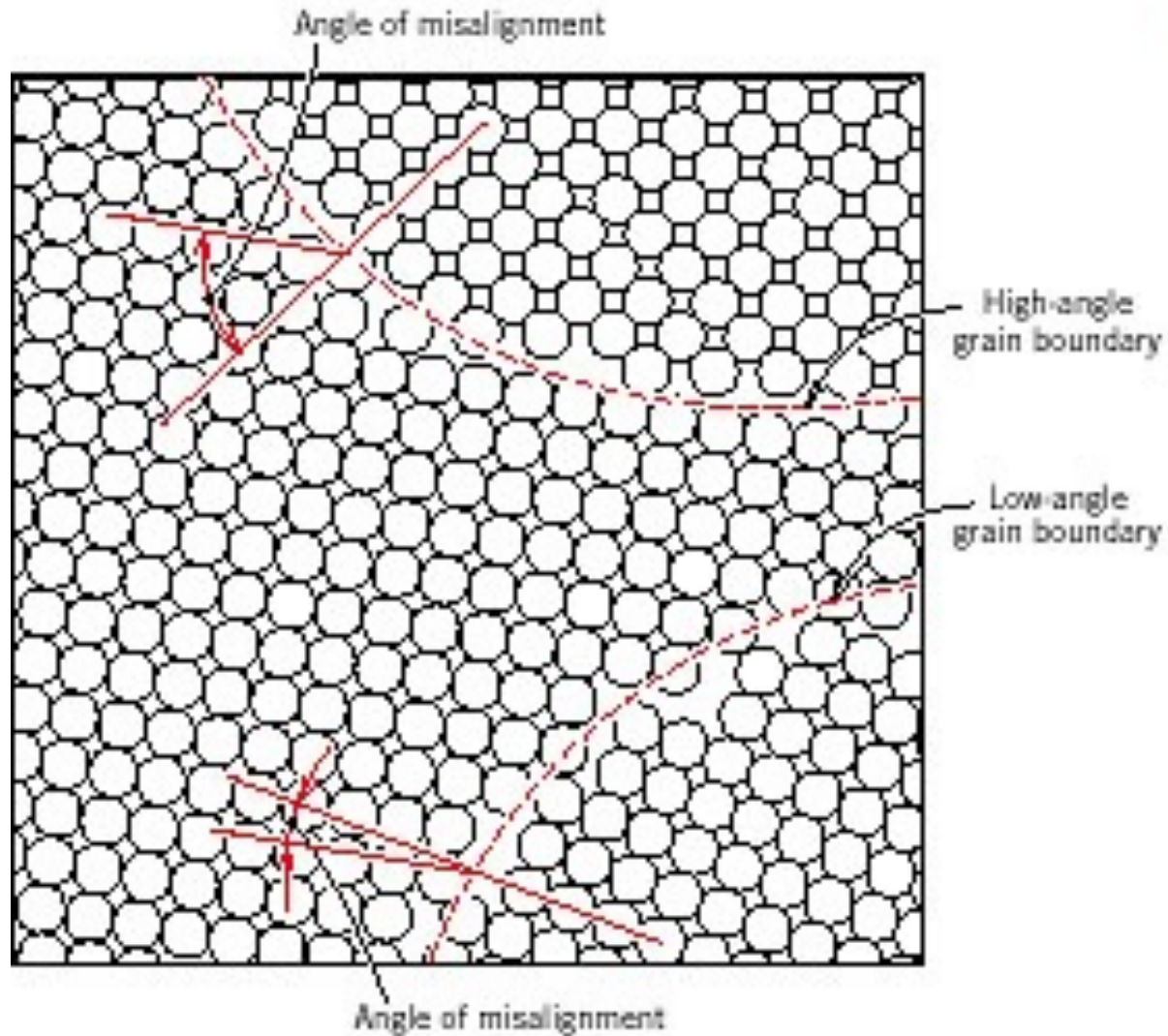


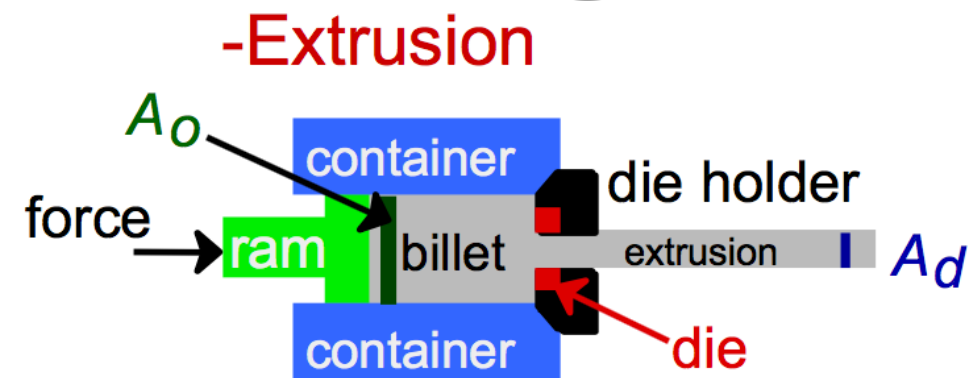
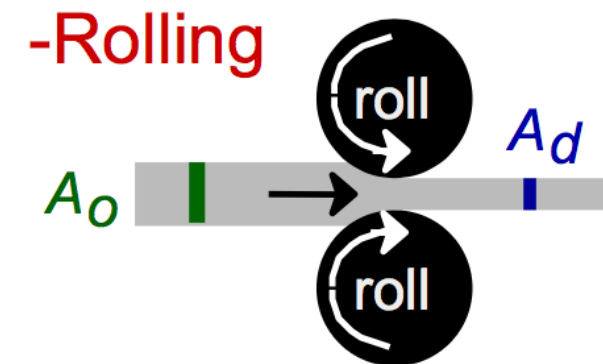
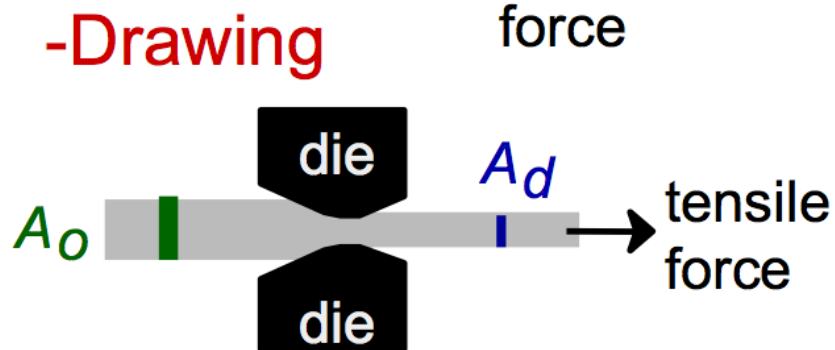
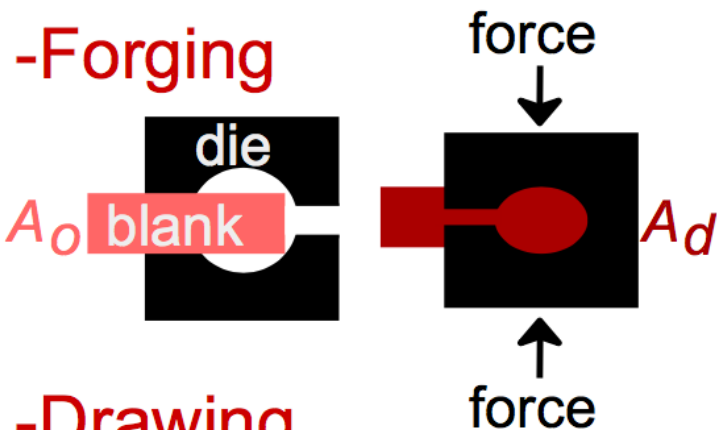
FIGURE 4.7 Schematic diagram showing low- and high-angle grain boundaries and the adjacent atom positions.

2. Tane Boyutu Küçültülerek Mukavemet Artırma

- **High-angle** grain boundaries
 - Dislocations may not traverse grain boundaries during deformation
 - A stress concentration ahead of a slip plane in one grain may activate sources of new dislocation in an adjacent grain.
- **Small-angle** grain boundaries
 - Not effective in interfering because of slight misalignment
- **Twin** boundaries
 - Effectively block slip and increase the strength of the material
- Boundaries between two **different phases**
 - Impediment (obstacle/barrier) to movements of dislocations
 - Important in strengthening complex alloys

3. Soğuk Şekil/ İşlem (Deformasyon) Sertleşmesi

- Room temperature deformation.
- Common forming operations change the cross sectional area:



Adapted from Fig.
11.8, Callister 7e.

3. Soğuk Şekil/ İşlem (Deformasyon) Sertleşmesi

- Plastik deformasyon nedeniyle dislokasyon konsantrasyonunda meydana gelen artış (work hardening) pekleşmeye sebep olur.
- Bunun sebebi dislokasyonların, dislokasyonların hareketlerine engel olmasıdır.
- Dislokasyonlar arasındaki etkileşime bağlı olarak; diğer dislokasyonlar zayıf veya kuvvetli engel olabilir.

$$\tau = \tau_0 + \alpha G b \rho^{1/2}$$

τ : Akma dayanımı (kayma)

τ_0 : Çok düşük dislokasyon yoğunluğundaki akma dayanımı

α : malzeme sabiti (HMK için 0.4, YMK için 0.2)

ρ : Dislokasyon yoğunluğu

3. Soğuk Şekil/ İşlem (Deformasyon) Sertleşmesi

- Sünek bir metalin plastik deformasyon sırasında sertlik ve dayanımının artması **pekleşme** olarak adlandırılır. Bu olaya, pekleşme yanı sıra *deformasyon sertleşmesi* adı da verilmektedir.
- Pekleşmenin gerçekleşmesi için metallerin, ergime sıcaklıklarının (Kelvin cinsinden) kabaca yarısından daha düşük sıcaklıklarda şekillendirilmesi, yani **soğuk şekillendirilmesi** gerekir.

3. Soğuk Şekil/ İşlem (Deformasyon) Sertleşmesi

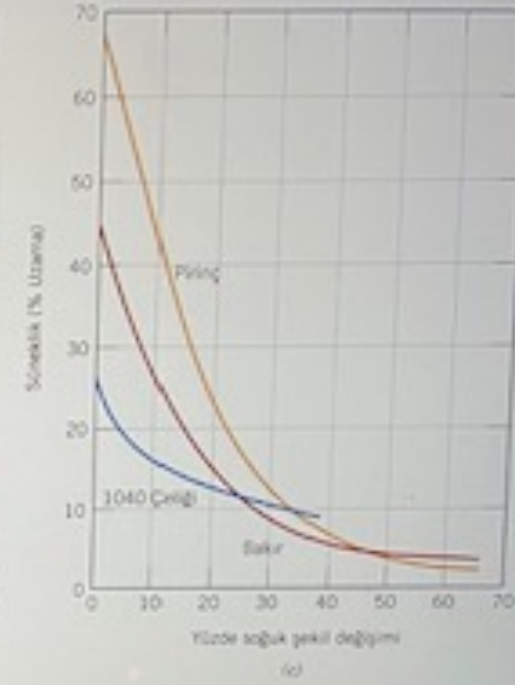
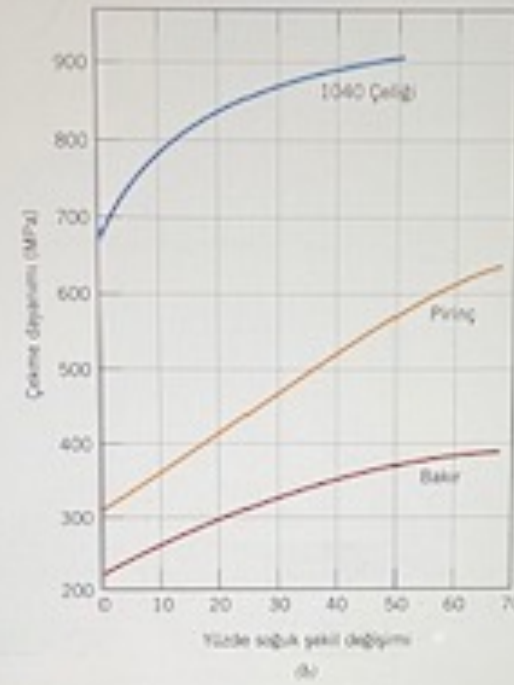
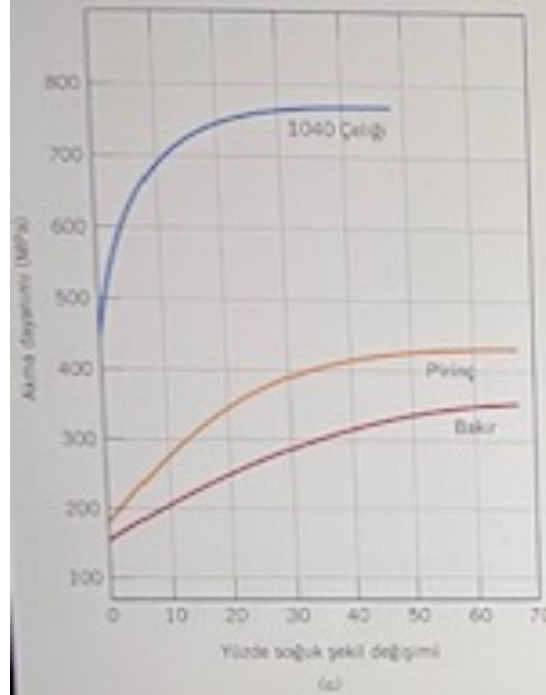
- Bazı durumlarda plastik deformasyon derecesini ifade etmek için birim şekil değişimi yerine daha kullanışlı olan *yüzde soğuk şekil değişimi* ifadesi kullanılır. A_0 , deformasyon öncesi ilk kesit alanı ve A_d ise deformasyon sonrası kesit alanı olmak üzere soğuk şekil değişimi yüzdesi (% SSD) ,

Yüzde soğuk şekil değişimi—ilk ve deformasyon sonrası kesit alanıyla olan ilişkisi

$$\% \text{ SSD} = \left(\frac{A_0 - A_d}{A_0} \right) \times 100 \quad (7.8)$$

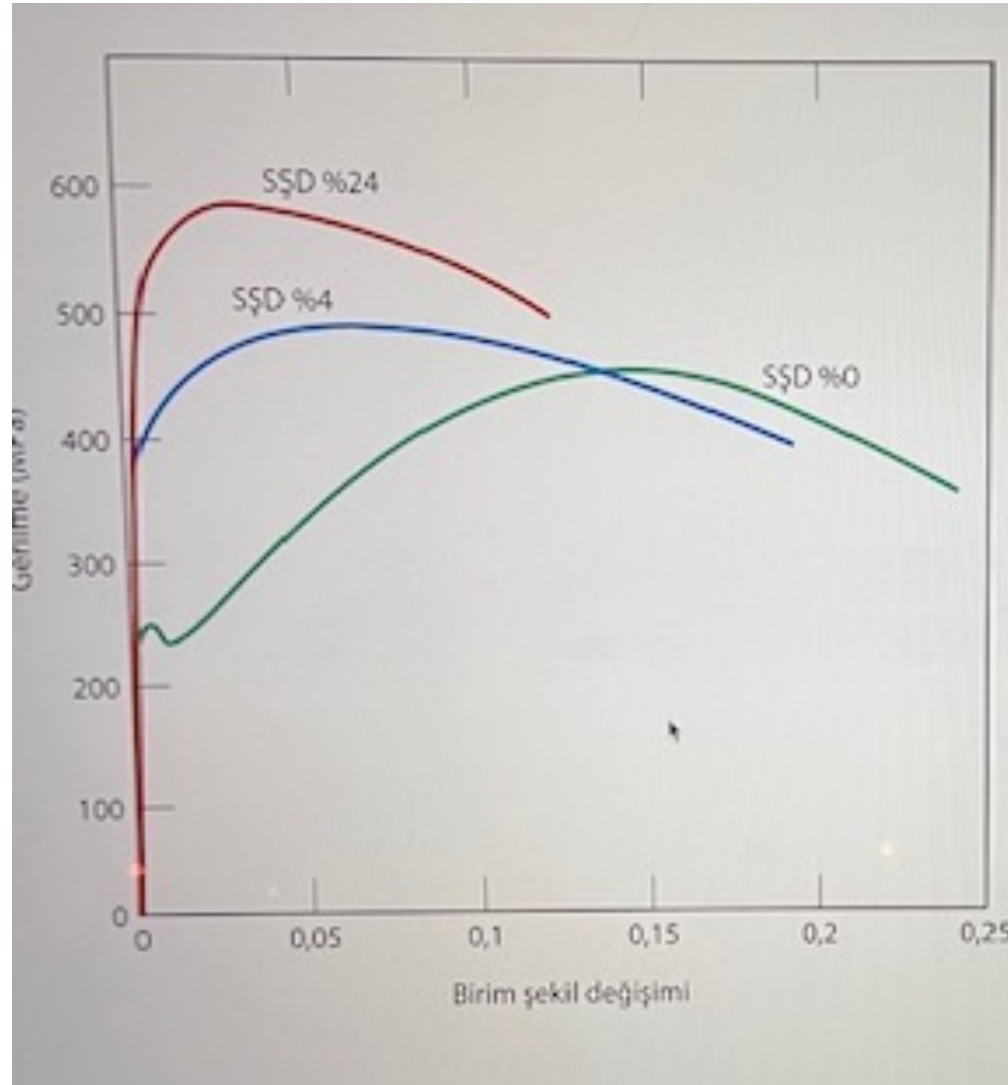
olarak tanımlanır.

3. Soğuk Şekil/ İşlem (Deformasyon) Sertleşmesi



Şekil 7.19 1040 çeliği, pirinç ve bakırda artan soğuk şekil değişimi yüzdesiyle (a) akma dayanımındaki artış (b) çekme dayanımındaki artış, ve (c) süneklikteki (%uzama) azalma. [*Metals Handbook: Properties and Selection: Irons and Steels*, Vol. 1, 9th edition, B. Bardes (Editor), American Society for Metals, 1978, p. 226; and *Metals Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals*, Vol. 2, 9th edition, H. Baker (Managing Editor), American Society for Metals, 1979, p. 276-327.]

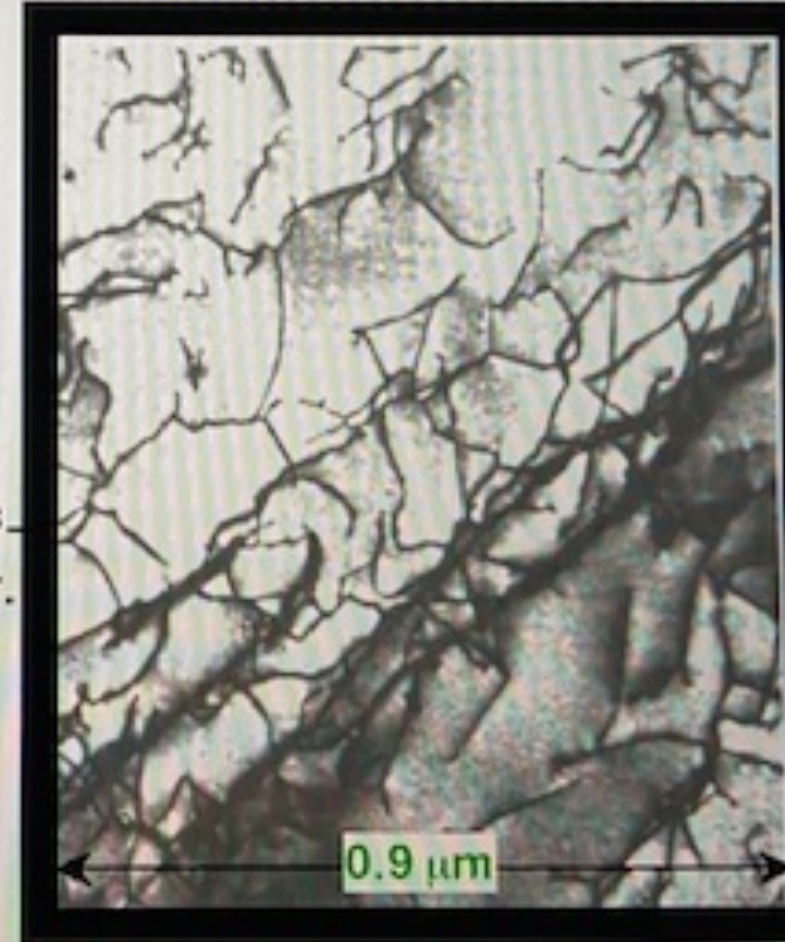
3. Soğuk Şekil/ İşlem (Deformasyon) Sertleşmesi



Şekil 7.20 Soğuk şekil değişiminin düşük karbonlu çeliğin gerilme-birim şekil değişimi davranışına etkisi; eğriler SSD'nin % 0, % 4 ve % 24 değerleri için çizilmiştir.

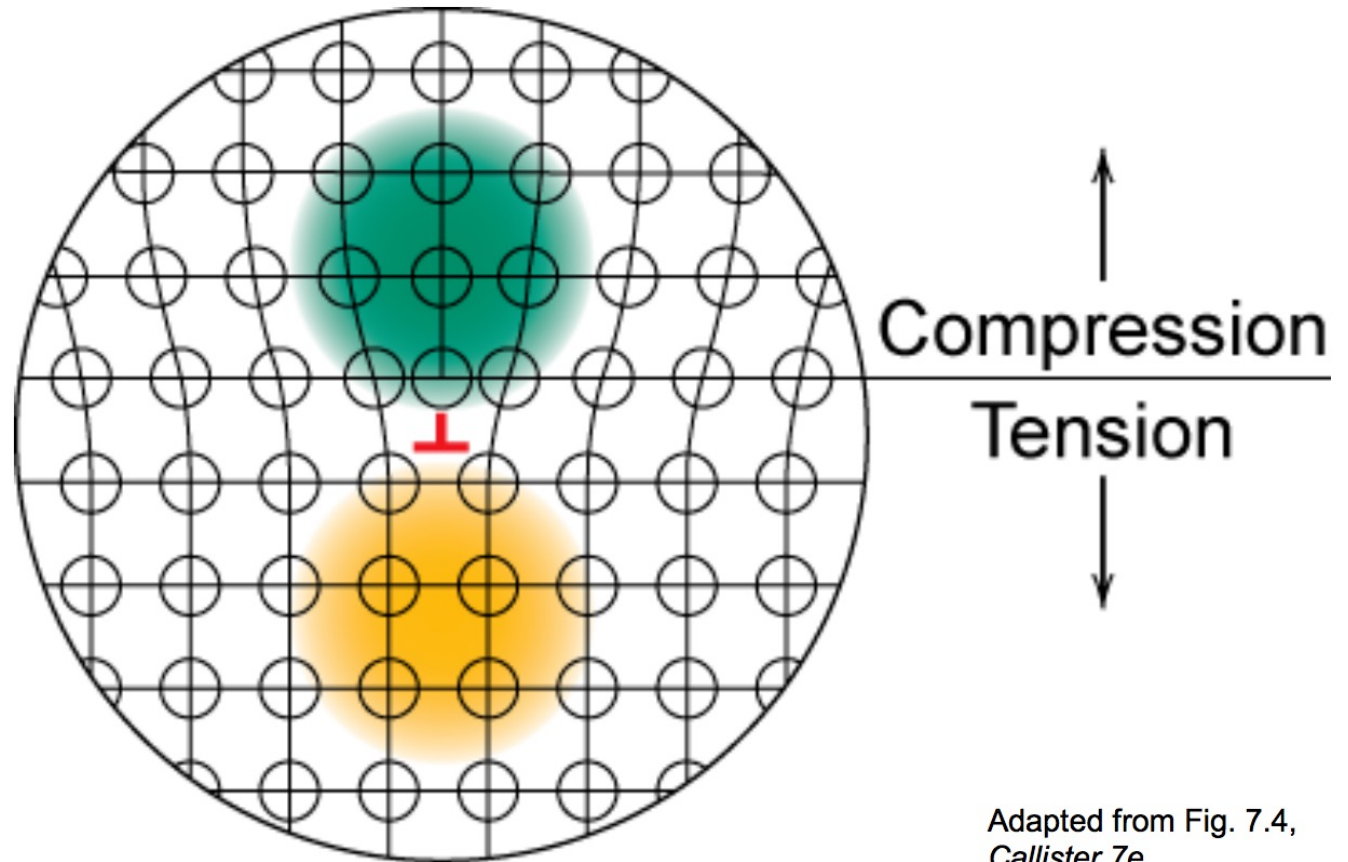
3. Soğuk Şekil/ İşlem (Deformasyon) Sertleşmesi

- Soğuk şekil değiştirmiş yapı, deformasyon sertleşmesinin giderilmediği ($0,0 - 0,5 T_m$) bir sıcaklık bölgesine plastik deformasyon uygulandığında meydana gelir.
- Soğuk şekil değiştirmiş yapı $\sim 10^8 - 10^{10} \text{ mm}^{-2}$ dislokasyon içerirken, tavlınmış yapı, $\sim 10^3 - 10^4 \text{ mm}^{-2}$ dislokasyona sahiptir.
- Dislokasyonlar soğuk şekil verme sırasında birbirleriyle takılır/karışır. Bu nedenle dislokasyon hareketi daha zor hale gelir.



3. Soğuk Şekil/ İşlem (Deformasyon) Sertleşmesi

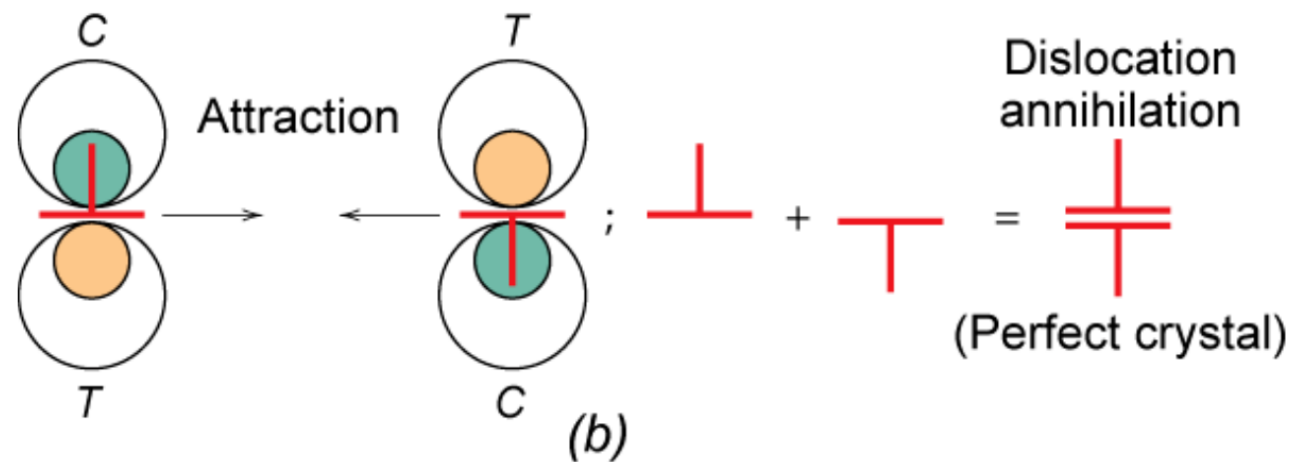
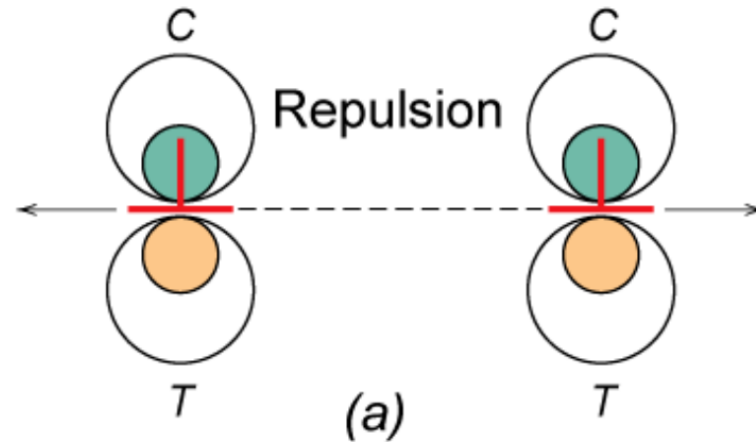
Stress Concentration at Dislocations



Effects of Stress at Dislocations

3. Soğuk Şekil/ İşlem (Deformasyon) Sertleşmesi

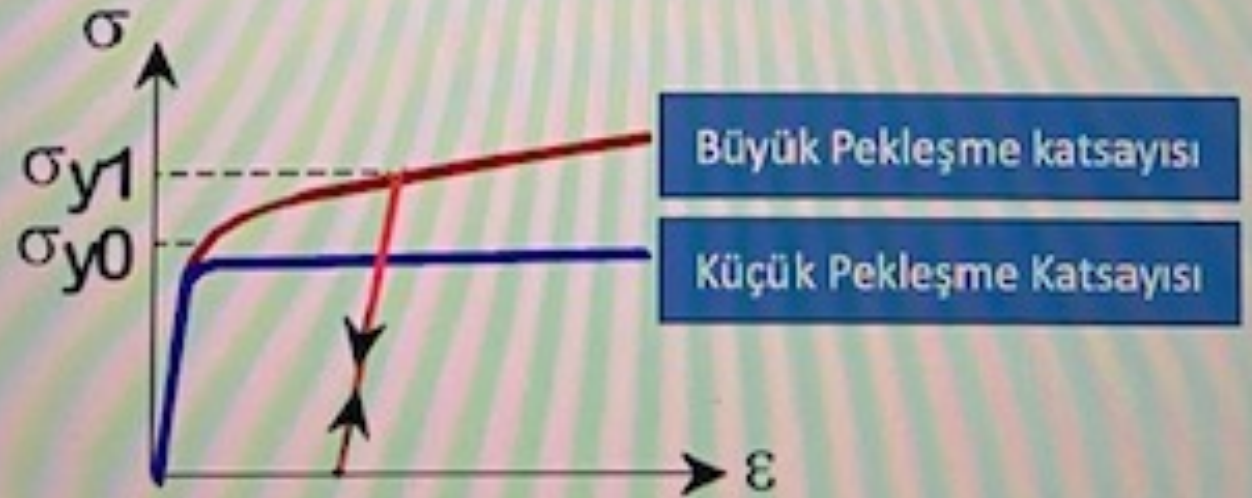
Adapted from Fig.
7.5, Callister 7e.



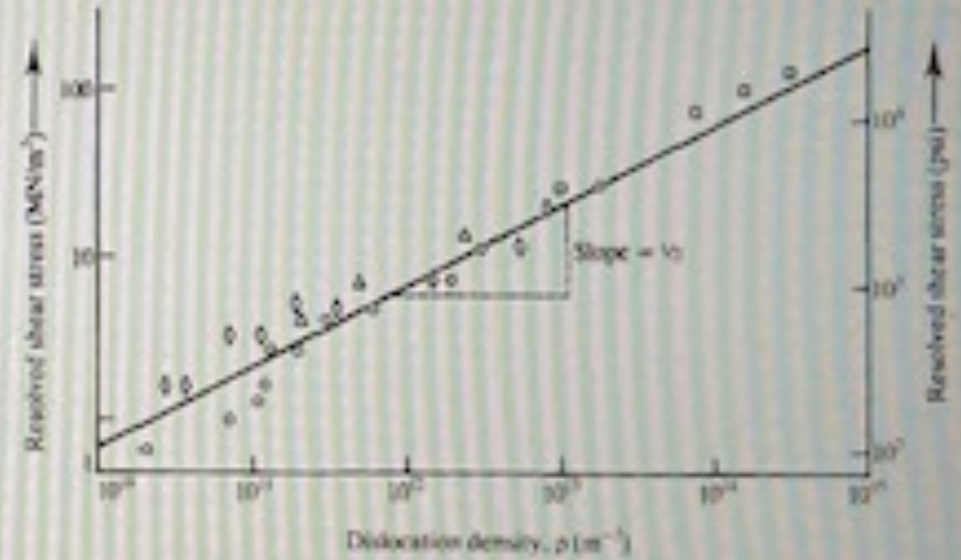
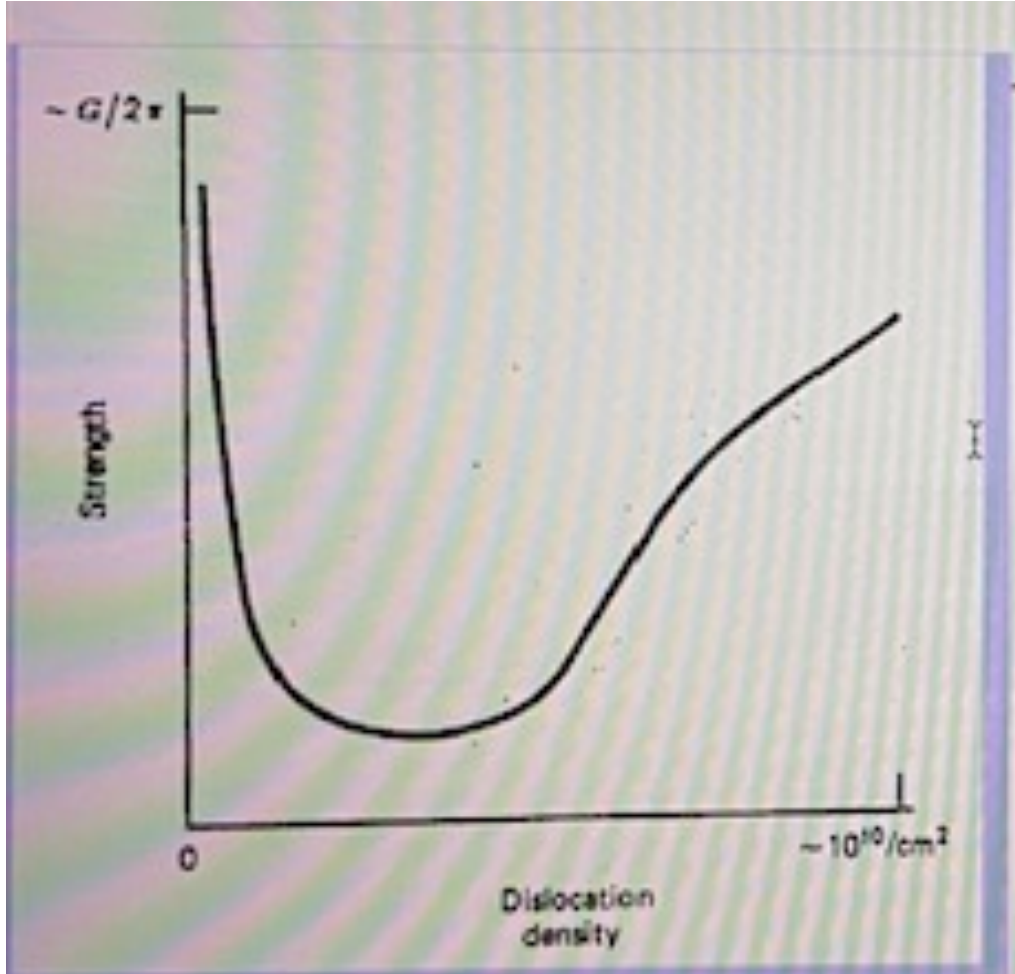
3. Soğuk Şekil/ İşlem (Deformasyon) Sertleşmesi

Soğuk Şekil Verme Sonucu:

- Dislokasyon yoğunluğu artar, bu da akma dayanımında bir artışa yol açar: Malzemeler sertleşir.
- Süneklik ve çekme dayanımı da artar.



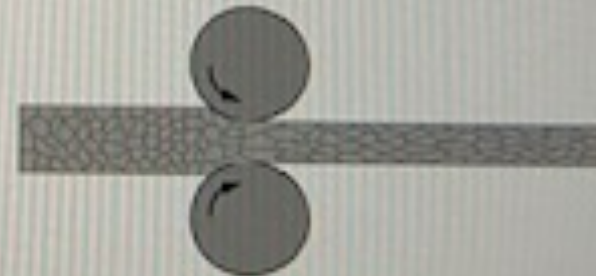
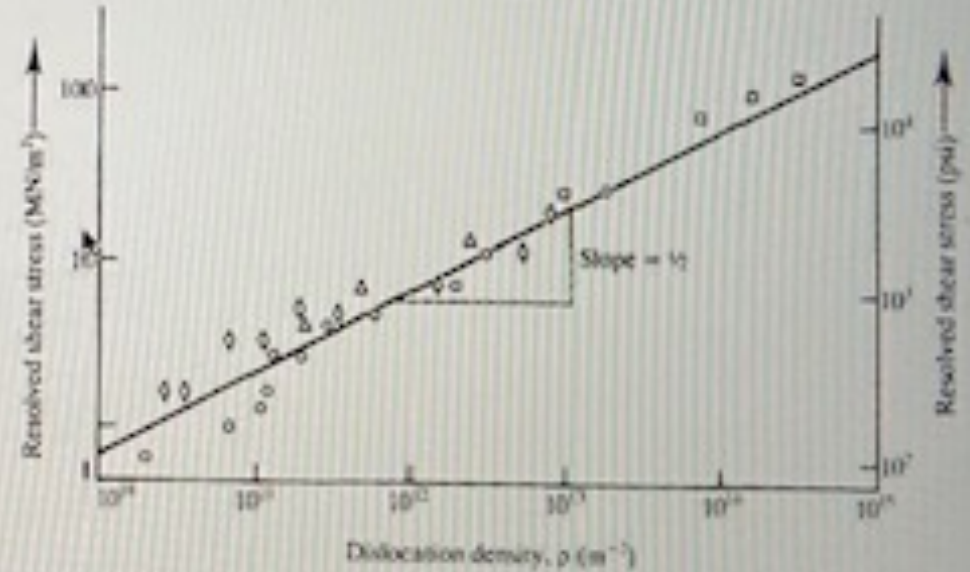
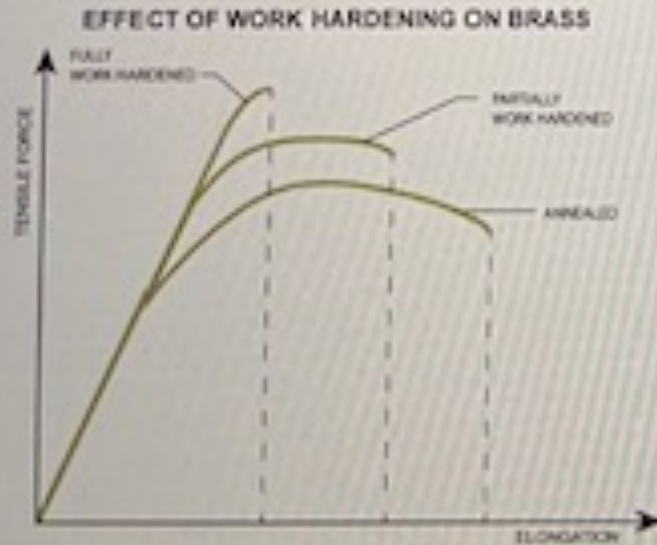
3. Soğuk Şekil/ İşlem (Deformasyon) Sertleşmesi



Yukardaki şekilde, bakır kristalinde, kritik kayma gerilmesinin dislokasyon yoğunluğuna bağlı olarak değişimi görülmektedir.

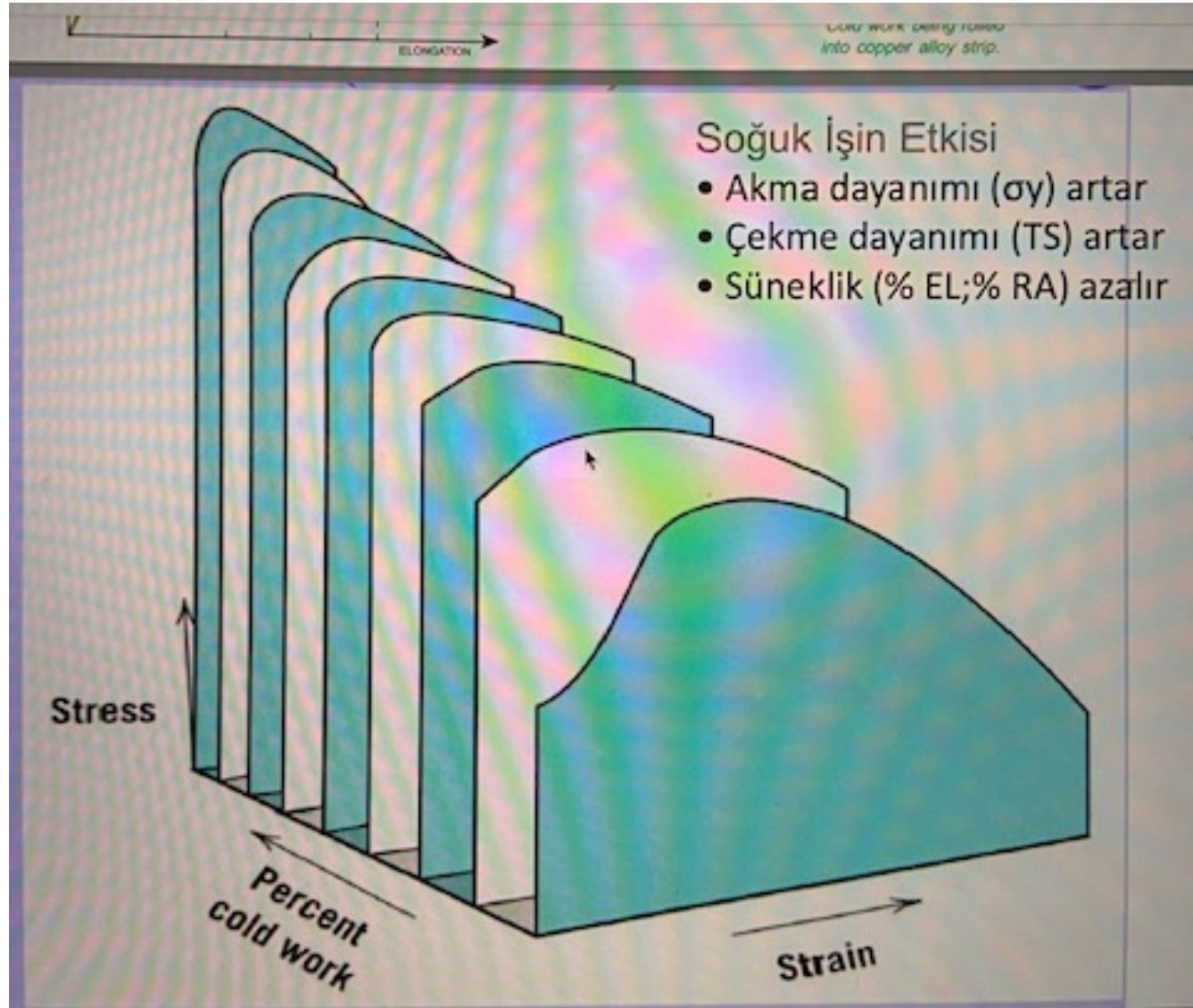
3. Soğuk Şekil/ İşlem (Deformasyon) Sertleşmesi

Yandaki şekilde, bakır kristalinde, kritik kayma gerilmesinin dislokasyon yoğunluğuna bağlı olarak değişimi görülmektedir.



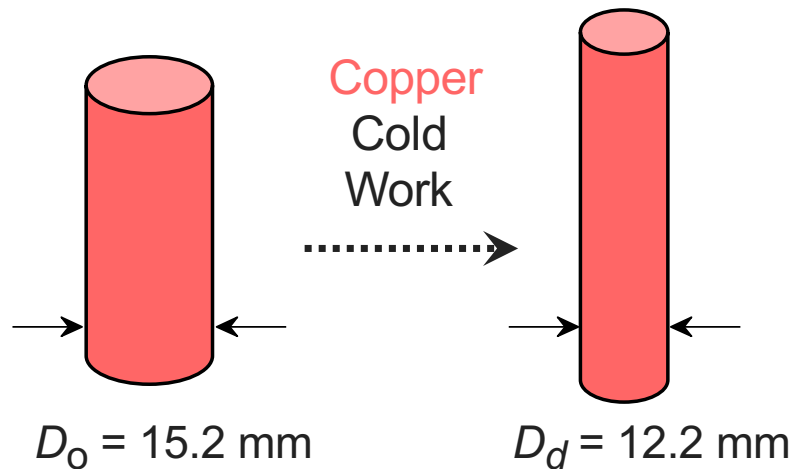
Cold work being rolled into copper alloy strip.

3. Soğuk Şekil/ İşlem (Deformasyon) Sertleşmesi



3. Soğuk Şekil/ İşlem (Deformasyon) Sertleşmesi

- What are the values of yield strength, tensile strength & ductility after cold working Cu?

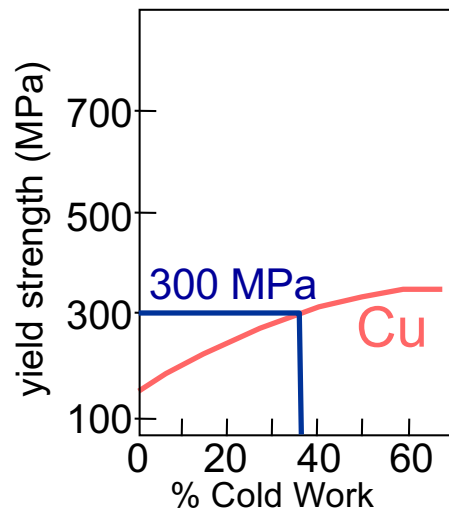


$$\begin{aligned}\%CW &= \frac{\frac{\pi D_o^2}{4} - \frac{\pi D_d^2}{4}}{\frac{\pi D_o^2}{4}} \times 100 \\ &= \frac{D_o^2 - D_d^2}{D_o^2} \times 100\end{aligned}$$

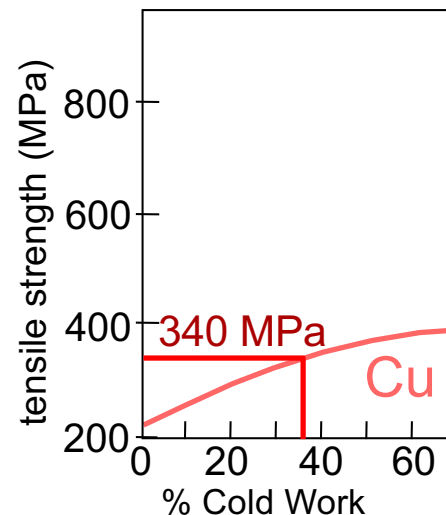
$$\%CW = \frac{(15.2 \text{ mm})^2 - (12.2 \text{ mm})^2}{(15.2 \text{ mm})^2} \times 100 = 35.6\%$$

3. Soğuk Şekil/ İşlem (Deformasyon) Sertleşmesi

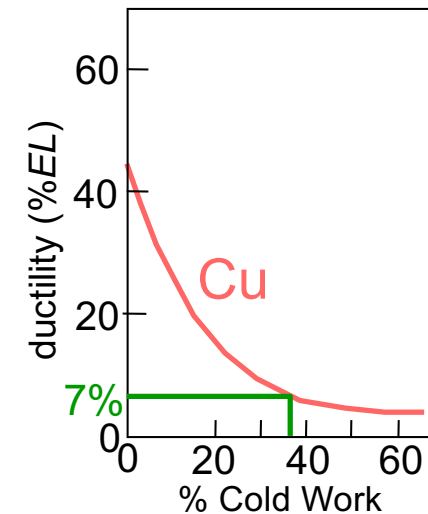
- What are the values of yield strength, tensile strength & ductility for Cu for %CW = 35.6%?



$$\sigma_y = 300 \text{ MPa}$$



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



$$\%EL = 7\%$$

Adapted from Fig. 8.19, *Callister & Rethwisch 4e*. (Fig. 8.19 is adapted from *Metals Handbook: Properties and Selection: Iron and Steels*, Vol. 1, 9th ed., B. Bardes (Ed.), American Society for Metals, 1978, p. 226; and *Metals Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals*, Vol. 2, 9th ed., H. Baker (Managing Ed.), American Society for Metals, 1979, p. 276 and 327.)

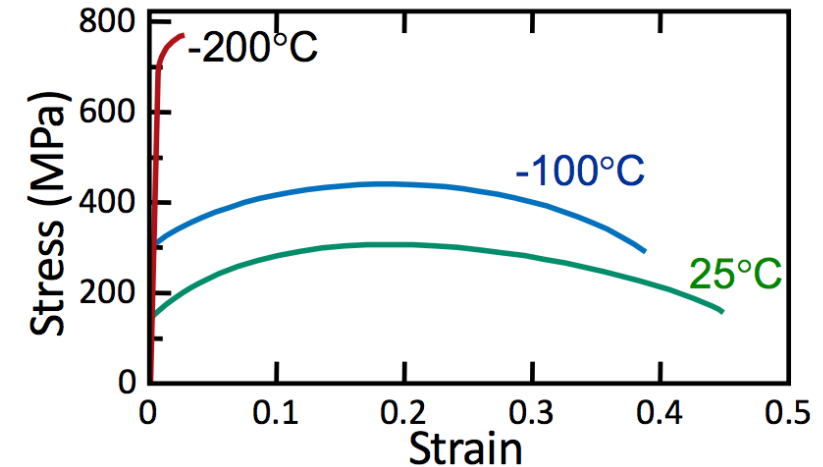
3. Soğuk Şekil/ İşlem (Deformasyon) Sertleşmesi

σ - ϵ Behavior vs. Temperature

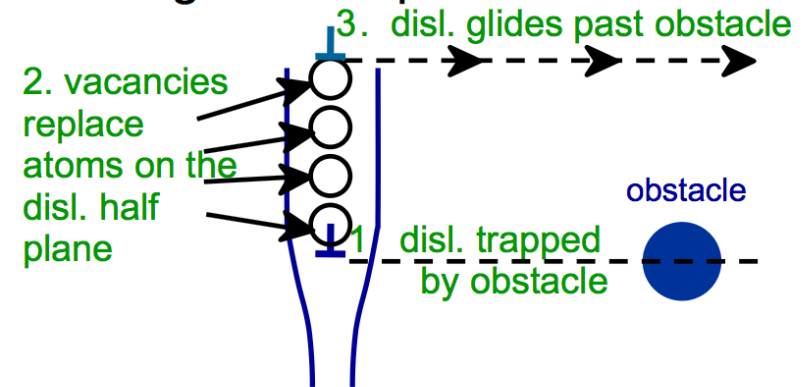
SOĞUK İŞLEM SONRASI
TAVLAMA İLE MUKAVEMET
SÜNEKLİK İLİŞKİSİ

- Results for polycrystalline iron:

Adapted from Fig. 6.14,
Callister 7e.



- σ_y and TS decrease with increasing test temperature.
- $\%EL$ increases with increasing test temperature.
- Why? Vacancies help dislocations move past obstacles.

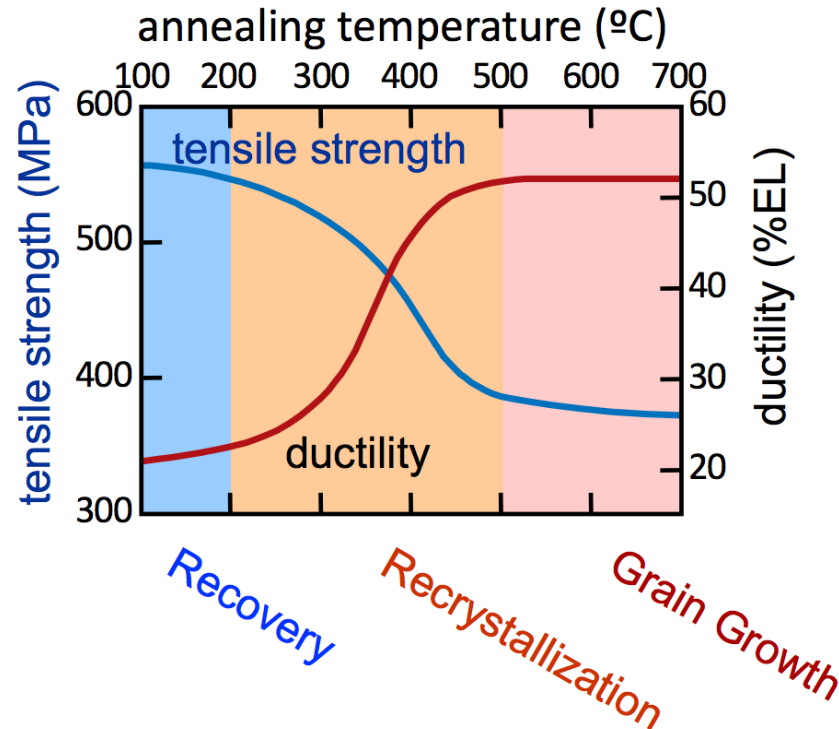


3. Soğuk Şekil/ İşlem (Deformasyon) Sertleşmesi

Effect of Heating After %CW

SOĞUK İŞLEM
SONRASI TAVLAMA
İLE MUKAVEMET
SÜNEKLİK İLİŞKİSİ

- 1 hour treatment at *T_{anneal}*...
decreases *TS* and increases *%EL*.
- Effects of cold work are reversed!



- 3 Annealing stages to discuss...

Adapted from Fig. 7.22, *Callister 7e*. (Fig. 7.22 is adapted from G. Sachs and K.R. van Horn, *Practical Metallurgy, Applied Metallurgy, and the Industrial Processing of Ferrous and Nonferrous Metals and Alloys*, American Society for Metals, 1940, p. 139.)

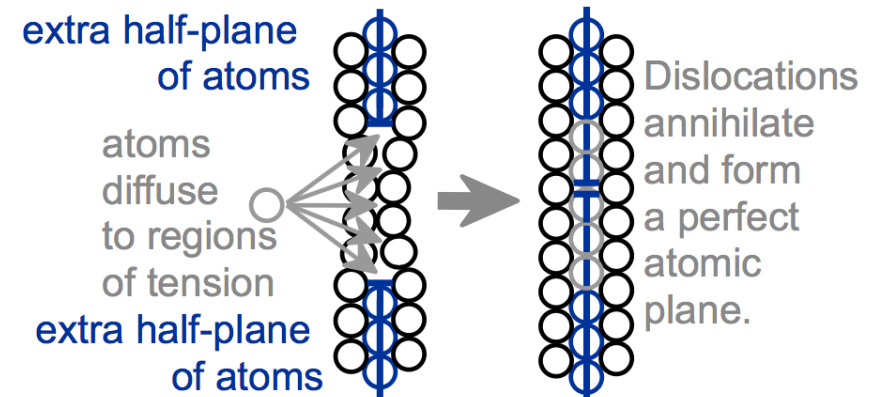
3. Soğuk Şekil/ İşlem (Deformasyon) Sertleşmesi

Recovery

SOĞUK İŞLEM SONRASI TAVLAMA İLE MUKAVEMET SÜNEKLİK İLİŞKİSİ

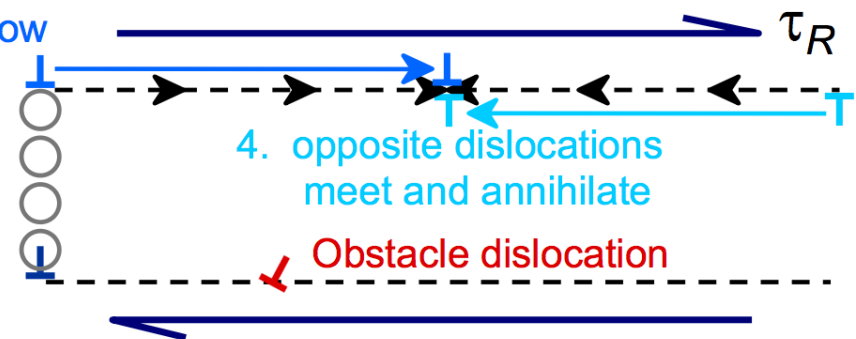
Annihilation reduces dislocation density.

- Scenario 1
Results from
diffusion



- Scenario 2

3. "Climbed" disl. can now
move on new slip plane
2. grey atoms leave by
vacancy diffusion
allowing disl. to "climb"
1. dislocation blocked;
can't move to the right

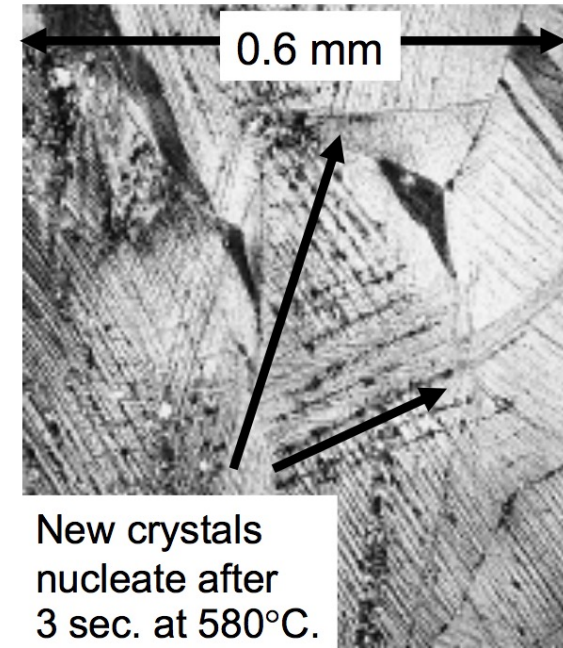
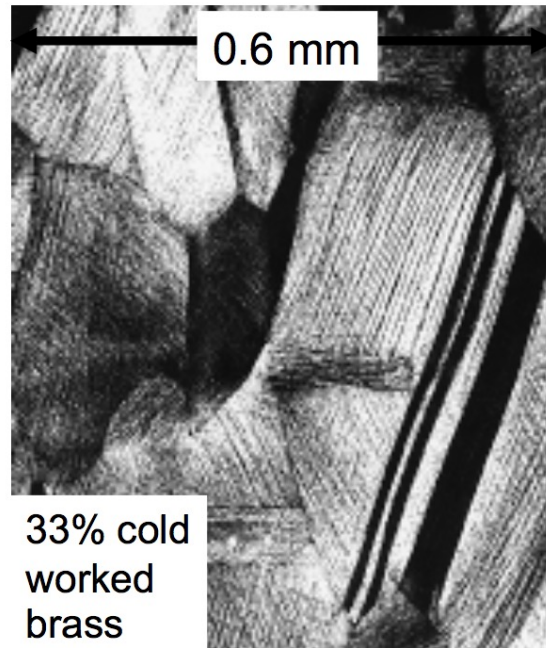


3. Soğuk Şekil/ İşlem (Deformasyon) Sertleşmesi

Recrystallization

SOĞUK İŞLEM SONRASI TAVLAMA İLE MUKAVEMET SÜNEKLİK İLİŞKİSİ

- New grains are formed that:
 - have a small dislocation density
 - are small
 - consume cold-worked grains.



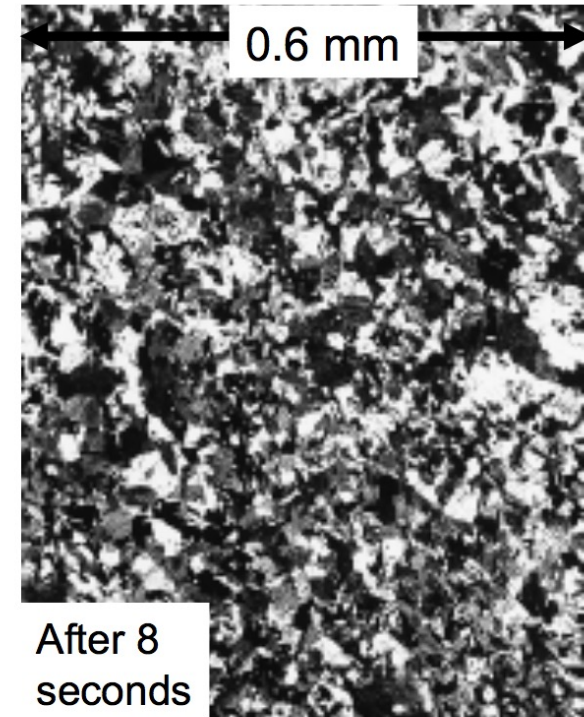
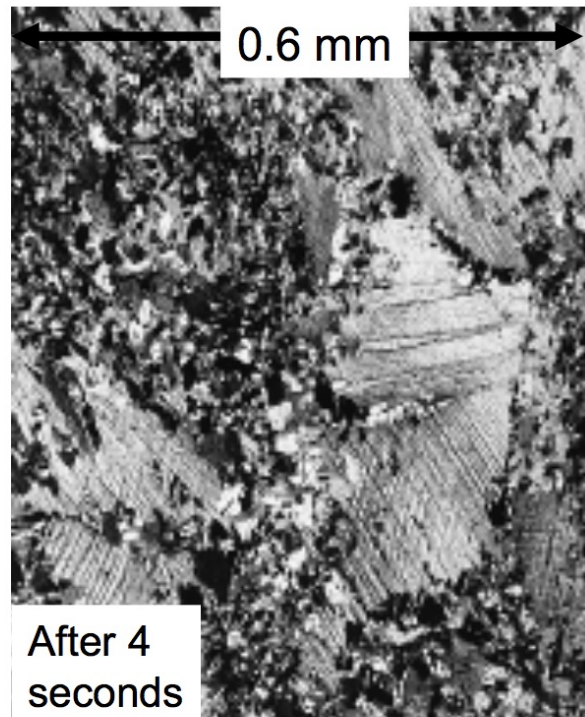
Adapted from
Fig. 7.21 (a),(b),
Callister 7e.
(Fig. 7.21 (a),(b)
are courtesy of
J.E. Burke,
General Electric
Company.)

3. Soğuk Şekil/ İşlem (Deformasyon) Sertleşmesi

Further Recrystallization

SOĞUK İŞLEM SONRASI
TAVLAMA İLE
MUKAVEMET SÜNEKLİK
İLİŞKİSİ

- All cold-worked grains are consumed.



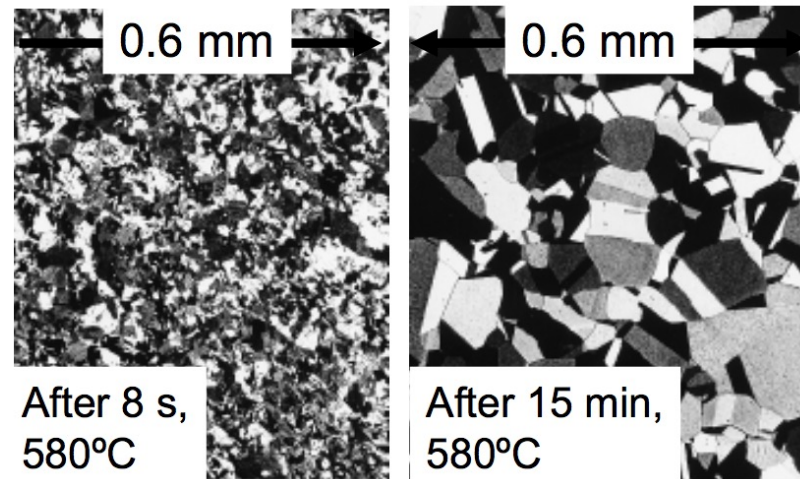
Adapted from
Fig. 7.21 (c),(d),
Callister 7e.
(Fig. 7.21 (c),(d)
are courtesy of
J.E. Burke,
General Electric
Company.)

3. Soğuk Şekil/ İşlem (Deformasyon) Sertleşmesi

Grain Growth

SOĞUK İŞLEM SONRASI TAVLAMA İLE MUKAVEMET SÜNEKLİK İLİŞKİSİ

- At longer times, larger grains consume smaller ones.
- Why? Grain boundary area (and therefore energy) is reduced.



Adapted from
Fig. 7.21 (d),(e),
Callister 7e.
(Fig. 7.21 (d),(e)
are courtesy of
J.E. Burke,
General Electric
Company.)

- Empirical Relation:

exponent typ. ~ 2
grain diam.
at time t .

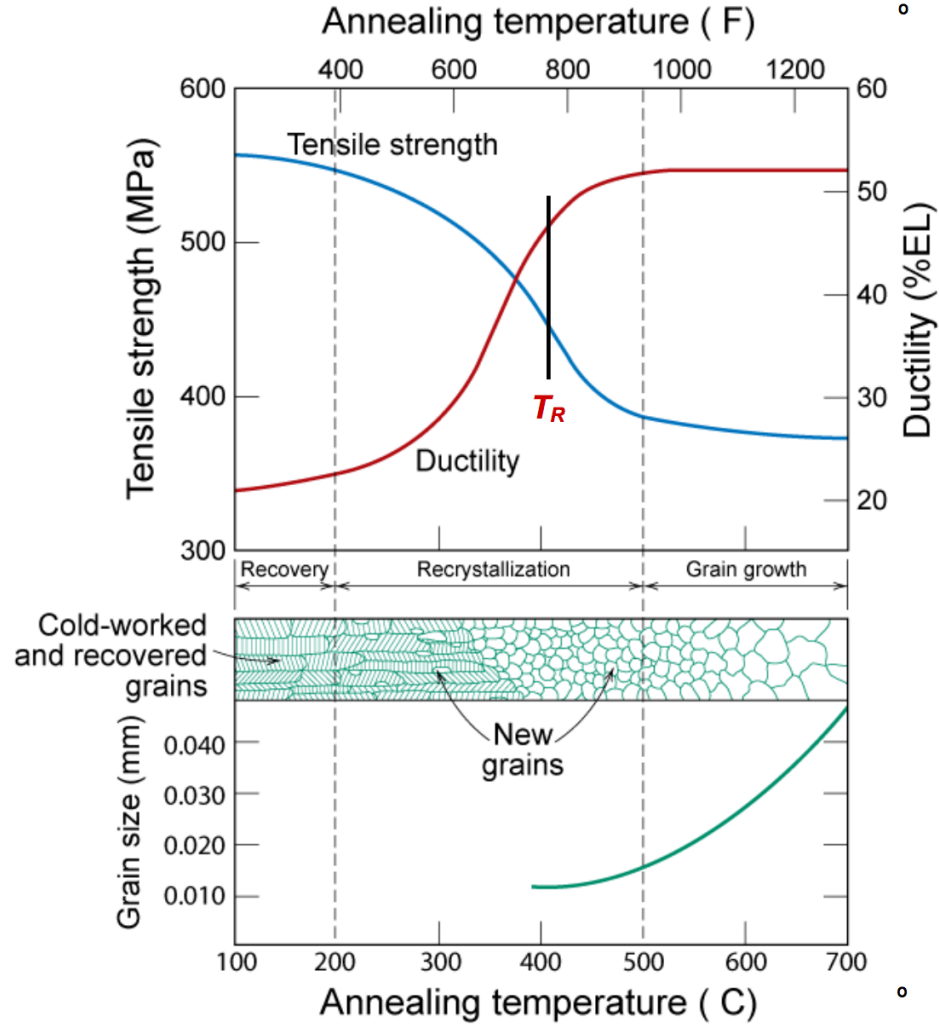
$$d^n - d_o^n = Kt$$

coefficient dependent
on material and T .

elapsed time
Ostwald Ripening

3. Soğuk Şekil/ İşlem (Deformasyon) Sertleşmesi

SOĞUK İŞLEM
SONRASI
TAVLAMA İLE
MUKAVEMET
SÜNEKLİK İLİŞKİSİ



T_R = recrystallization temperature

Adapted from Fig. 7.22, Callister 7e.

SOĞUK İŞLEM SONRASI TAVLAMA İLE MUKAVEMET SÜNEKLİK İLİŞKİSİ

Recrystallization Temperature, T_R

T_R = recrystallization temperature = point of highest rate of property change

1. $T_m \Rightarrow T_R \approx 0.3-0.6 T_m$ (K)
2. Due to diffusion $\rightarrow$ annealing time $\rightarrow T_R = f(t)$
shorter annealing time $\Rightarrow$ higher T_R
3. Higher %CW $\Rightarrow$ lower T_R – strain hardening
4. Pure metals lower T_R due to dislocation movements
 - Easier to move in pure metals $\Rightarrow$ lower T_R

SOĞUK İŞLEM SONRASI TAVLAMA İLE MUKAVEMET SÜNEKLİK İLİŞKİSİ

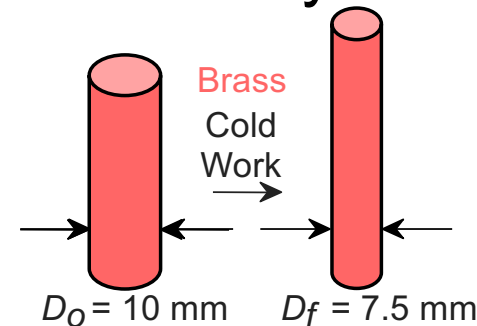
Diameter Reduction Procedure - Problem

A cylindrical rod of brass originally 10 mm (0.39 in) in diameter is to be cold worked by drawing. The circular cross section will be maintained during deformation. A cold-worked tensile strength in excess of 380 MPa (55,000 psi) and a ductility of at least 15 %*EL* are desired. Furthermore, the final diameter must be 7.5 mm (0.30 in). Explain how this may be accomplished.

SOĞUK İŞLEM SONRASI TAVLAMA İLE MUKAVEMET SÜNEKLİK İLİŞKİSİ

Solution

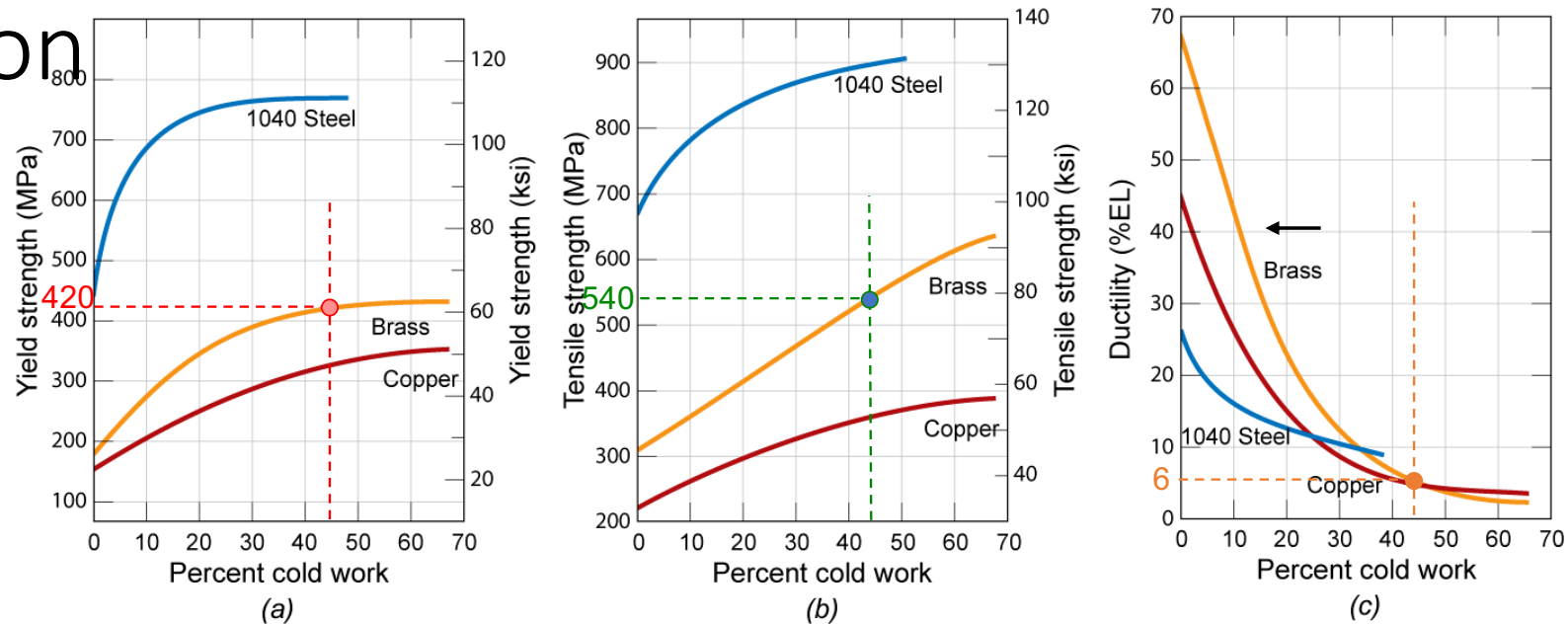
What are the consequences of directly drawing to the final diameter?



$$\begin{aligned}\%CW &= \left(\frac{A_o - A_f}{A_o} \right) \times 100 = \left(1 - \frac{A_f}{A_o} \right) \times 100 \\ &= \left(1 - \frac{\pi D_f^2 / 4}{\pi D_o^2 / 4} \right) \times 100 = \left(1 - \left(\frac{7.5}{10} \right)^2 \right) \times 100 = 43.8\%\end{aligned}$$

SOĞUK İŞLEM SONRASI TAVLAMA İLE MUKAVEMET SÜNEKLİK İLİŞKİSİ

Solution

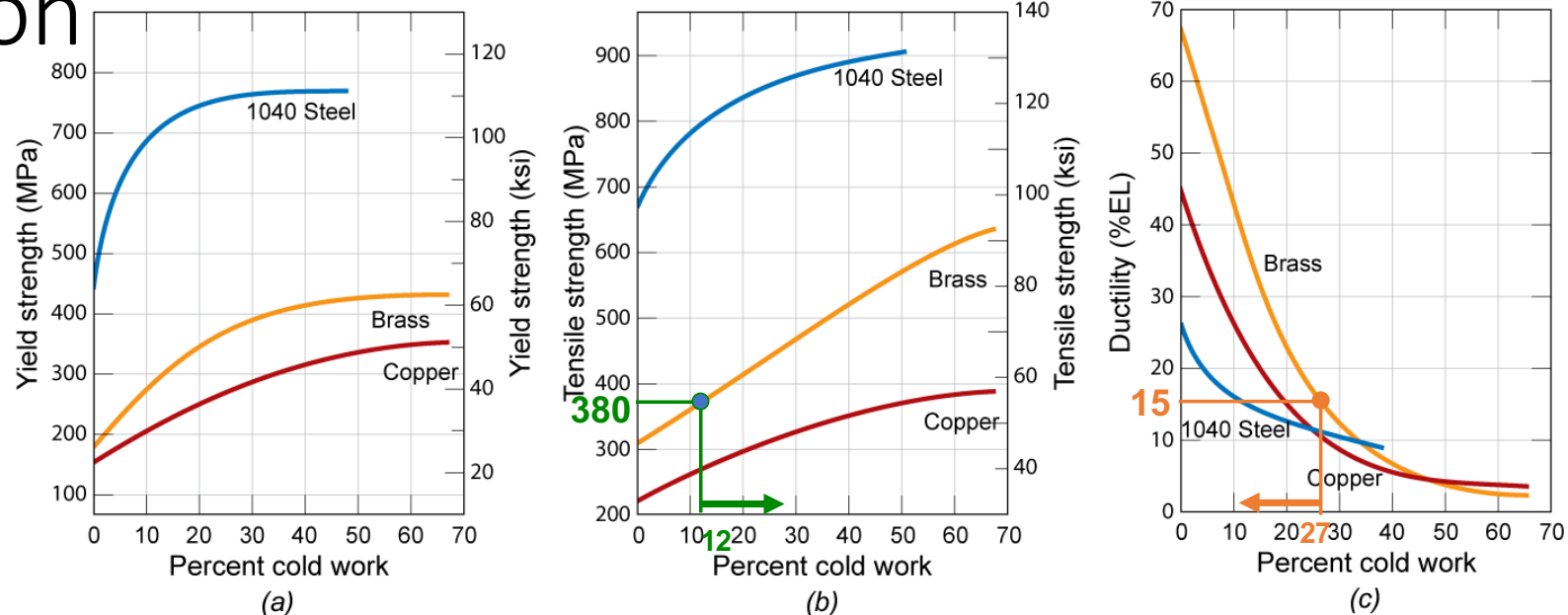


Adapted from Fig. 8.19,
Callister & Rethwisch 4e.

- For %CW = 43.8%
 - $\sigma_y = 420$ MPa
 - $TS = 540$ MPa > 380 MPa
 - %EL = 6 < 15
- This doesn't satisfy criteria... what other options are possible?

SOĞUK İŞLEM SONRASI TAVLAMA İLE MUKAVEMET SÜNEKLİK İLİŞKİSİ

Solution



For $TS > 380 \text{ MPa}$ $\longrightarrow$ $> 12 \%CW$

For $\%EL > 15$ $\longrightarrow$ $< 27 \%CW$

$\therefore$ our working range is limited to $12 < \%CW < 27$

Adapted from Fig. 8.19,
Callister & Rethwisch 4e.

SOĞUK İŞLEM SONRASI TAVLAMA İLE MUKAVEMET SÜNEKLİK İLİŞKİSİ

Solution

Cold work, then anneal, then cold work again

- For objective we need a cold work of $12 < \%CW < 27$
– We'll use 20 %CW
- Diameter after first cold work stage (but before 2nd cold work stage) is calculated as follows:

$$\%CW = \left(1 - \frac{D_{f2}^2}{D_{02}^2}\right) \times 100 \Rightarrow 1 - \frac{D_{f2}^2}{D_{02}^2} = \frac{\%CW}{100}$$

$$\frac{D_{f2}}{D_{02}} = \left(1 - \frac{\%CW}{100}\right)^{0.5} \Rightarrow D_{02} = \frac{D_{f2}}{\left(1 - \frac{\%CW}{100}\right)^{0.5}}$$

$$\text{Intermediate diameter} = D_{f1} = D_{02} = 7.5 \text{ mm} / \left(1 - \frac{20}{100}\right)^{0.5} = 8.39 \text{ mm}$$

SOĞUK İŞLEM SONRASI TAVLAMA İLE MUKAVEMET SÜNEKLİK İLİŞKİSİ

Solution

Stage 1: Cold work – reduce diameter from 10 mm to 8.39 mm

$$\%CW_1 = \left(1 - \left(\frac{8.39 \text{ mm}}{10 \text{ mm}} \right)^2 \right) \times 100 = 29.6$$

Stage 2: Heat treat (allow recrystallization)

Stage 3: Cold work – reduce diameter from 8.39 mm to 7.5 mm

$$\%CW_2 = \left(1 - \left(\frac{7.5}{8.49} \right)^2 \right) \times 100 = 20$$

Fig 8.19
 $\Rightarrow$

Therefore, all criteria satisfied

$$\begin{aligned}\sigma_y &= 340 \text{ MPa} \\ TS &= 400 \text{ MPa} \\ \%EL &= 24\end{aligned}$$

SOĞUK İŞLEM SONRASI TAVLAMA İLE MUKAVEMET SÜNEKLİK İLİŞKİSİ

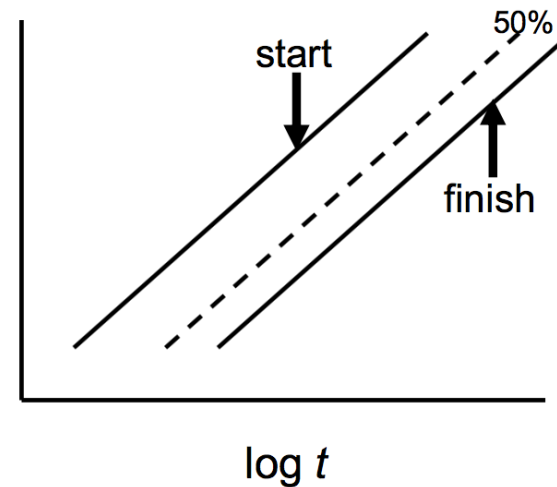
Rate of Recrystallization

$$\log R = -\log t = \log R_0 - \frac{E}{kT}$$

$$\log t = C + \frac{B}{T}$$

note : $R = 1/t$

$1/T_R$



- ☐ Hot work $\rightarrow$ above T_R
- ☐ Cold work $\rightarrow$ below T_R
- ☐ Smaller grains
 - stronger at low temperature
 - weaker at high temperature

4. Yaşlanma veya Çökelme/Çökelti Sertleşmesi

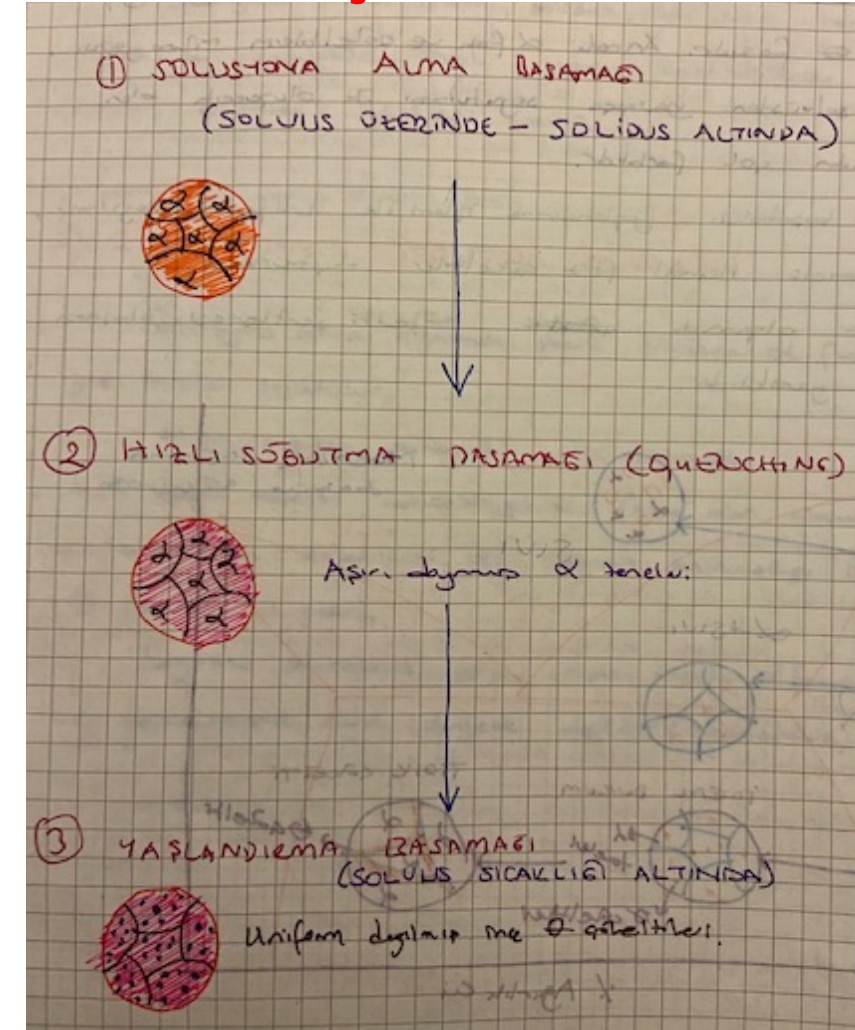
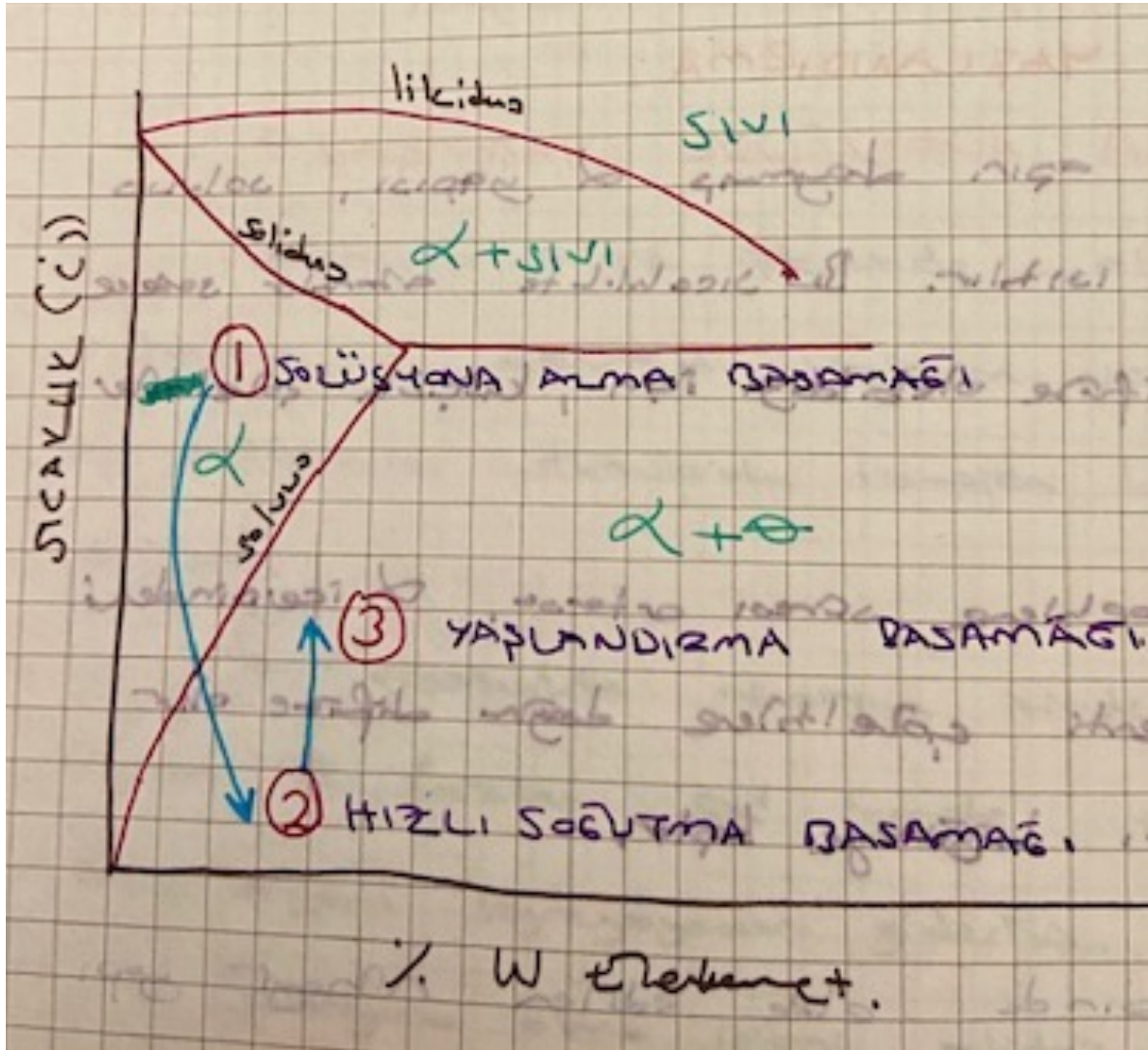
Üniform olarak dağılmış nanoboyutlu koherent parçaların daha yumuşak ve sünek matriks içine çökmesi esasına dayanır. Yaşlanma ile malzemenin akma sınırı çok kolay ısı işlemleri yardımıyla malzeme yoğunluğu artmadan yükseltilebilir. Örneğin alüminyumun akma dayanımı 20.000 psi'dan 60.000 psi'a çıkarılabilir (3 katına).

YAŞLANMA ISIL İŞLEMİ

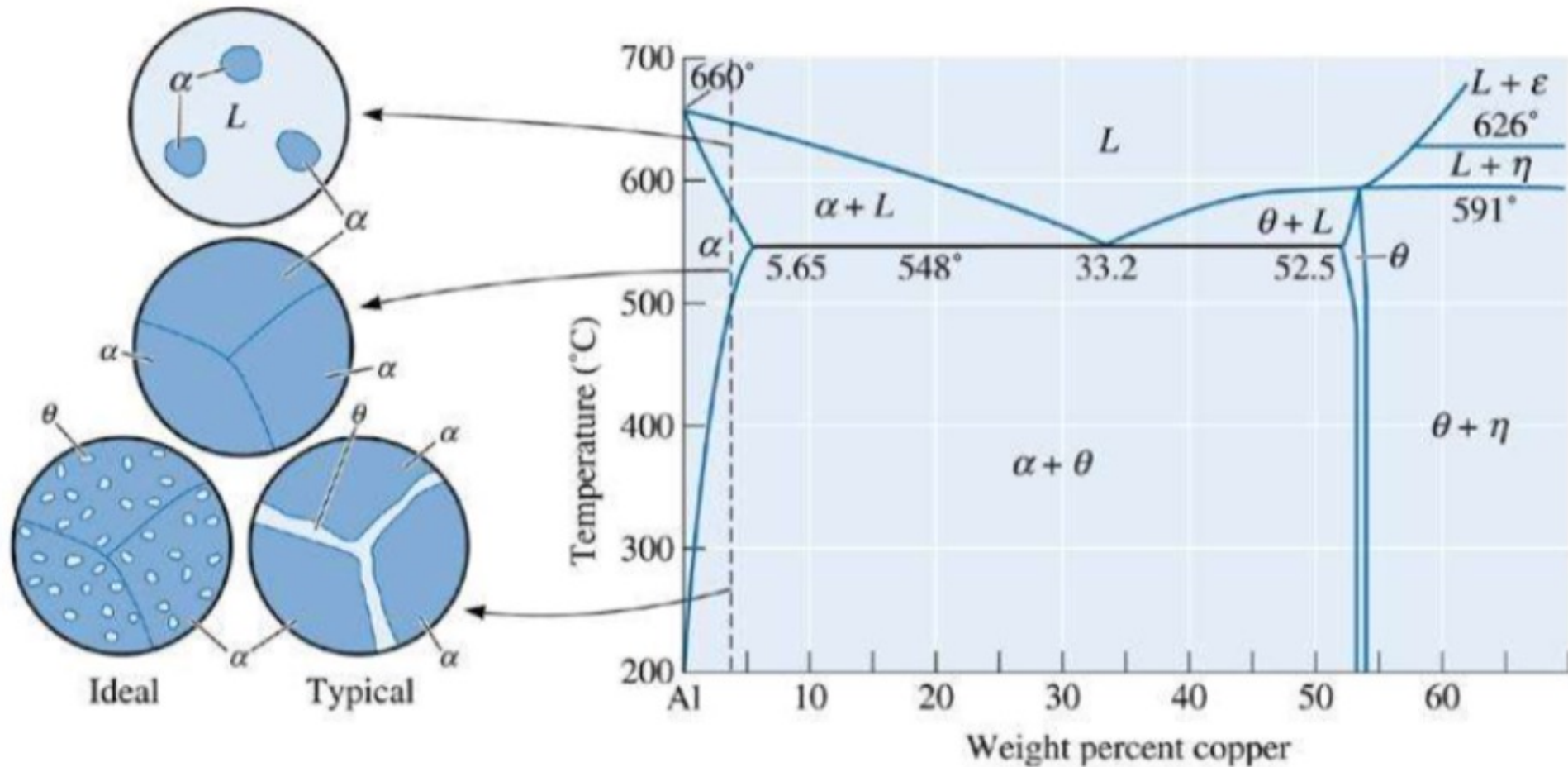
1. Basamak: Solüsyona alma
2. Basamak: Soğutma
3. Basamak: Yaşlandırma

1. Solüsyona alma işleminde alaşım solvus sıcaklığı üzerinde ve ötektoid dönüşüm sıcaklığının altında bir sıcaklıkta tutularak homojen bir alfa α katı fazı oluşturmaları sağlanır. Bu basamakta alaşımın içinde daha önceden çökelmiş tüm (θ) fazları alfa içinde çözülür ve yapıdaki segregasyonlar giderilir.
2. Soğutma: Solüsyona alma işleminden sonra tamamen alfa (α) fazı içeren yapı hızlı soğutulur. Hızlı soğutma sırasında α içerisinde katı çözelti çözünürlüğünden fazla olan alaşımların çekirdeklenerek çökmesi için zaman tanınmadığı için (θ) fazları oluşmaz. Soğuma sonrası yapı aşırı doymuş (α) fazıdır ve termodinamik olarak dengede değildir (kararsız yapı).
3. Yaşlandırma aşamasında aşırı doymuş (α) yapısı, solvus sıcaklığının altına ısıtılır. Bu sıcaklıkta atomlar sadece küçük mesafelerde difüze olabildiği için küçük çökelti oluşur. Bu sıcaklıkta bekleme süresi artarsa α içerisindeki fazla alaşım elementi çözeltilere doğru difüze olur ve çözelti parçacıkları büyümeye başlar. Yaşlandırma sonrası elde edilen nihai yapı $\alpha + \theta$ fazıdır.

4. Yaşlanma veya Çökelme/Çökelti Sertleşmesi



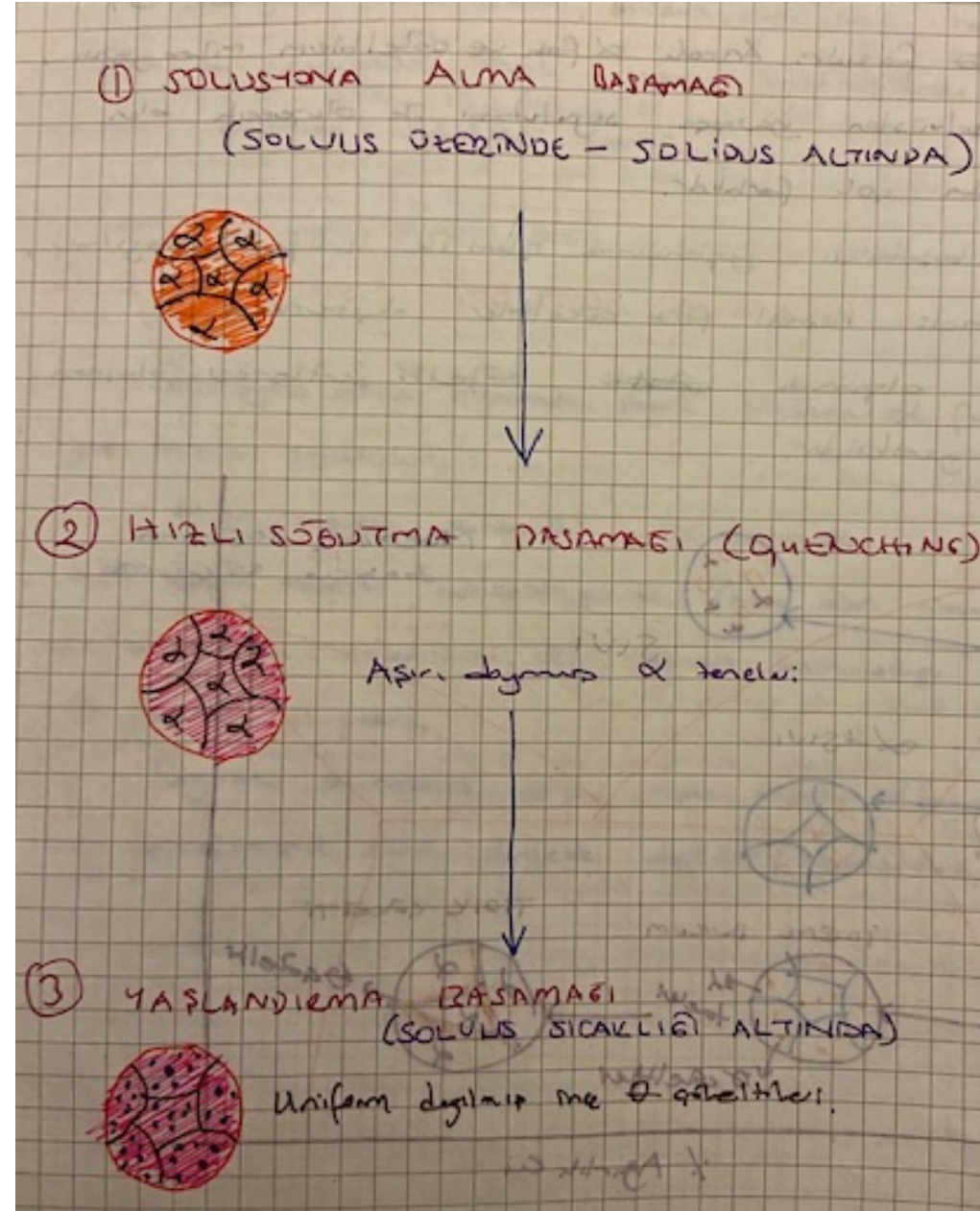
4. Yaşlanma veya Çökelme/Çökelti Sertleşmesi



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning, Inc. is a trademark used herein under license.

The aluminum-copper phase diagram and the microstructures that may develop during cooling of an Al-4% Cu alloy.

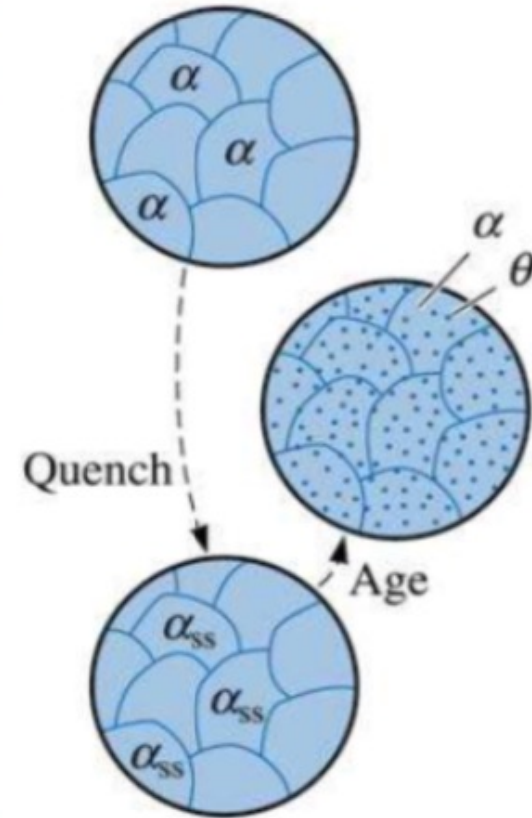
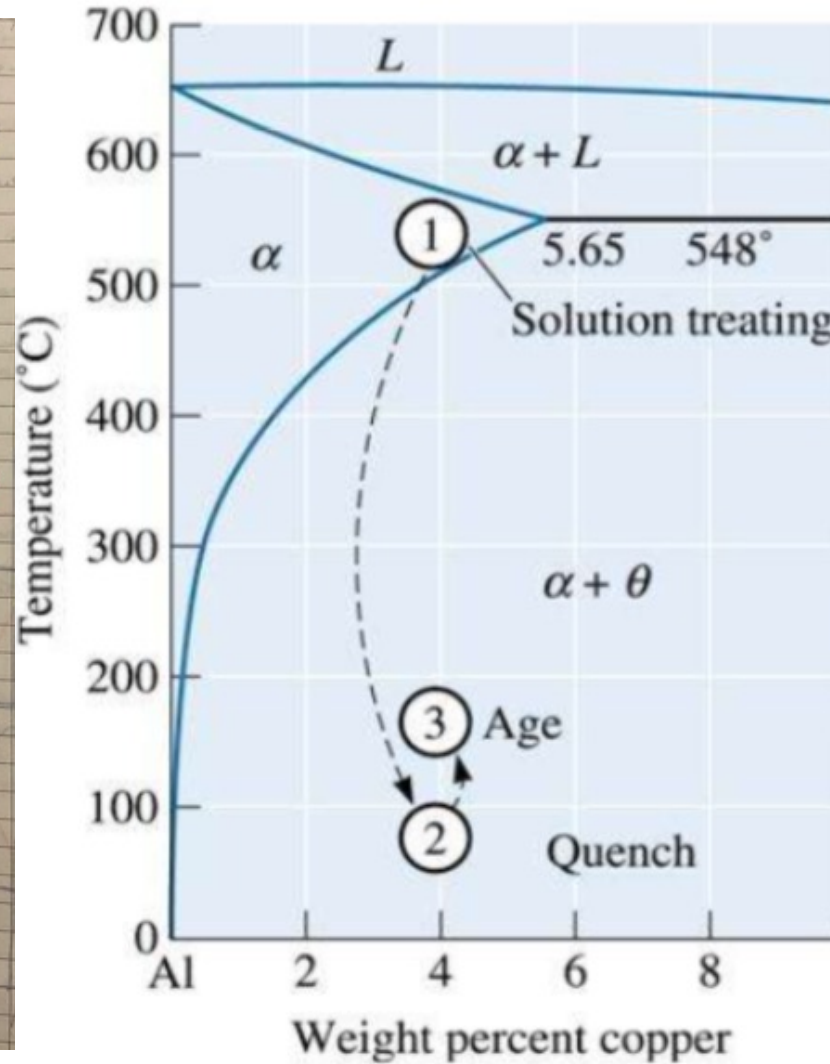
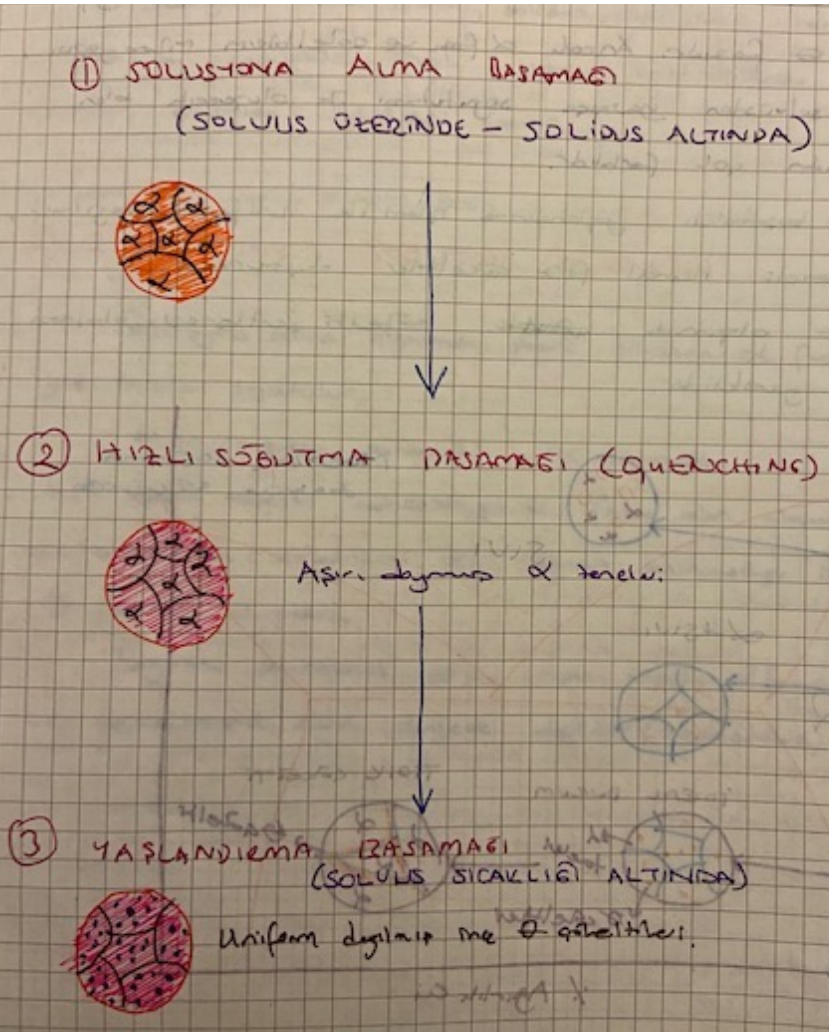
4. Yaşlanma veya Çökelme/Çökelti Sertleşmesi



Aşırı doymuş
alfa taneleri

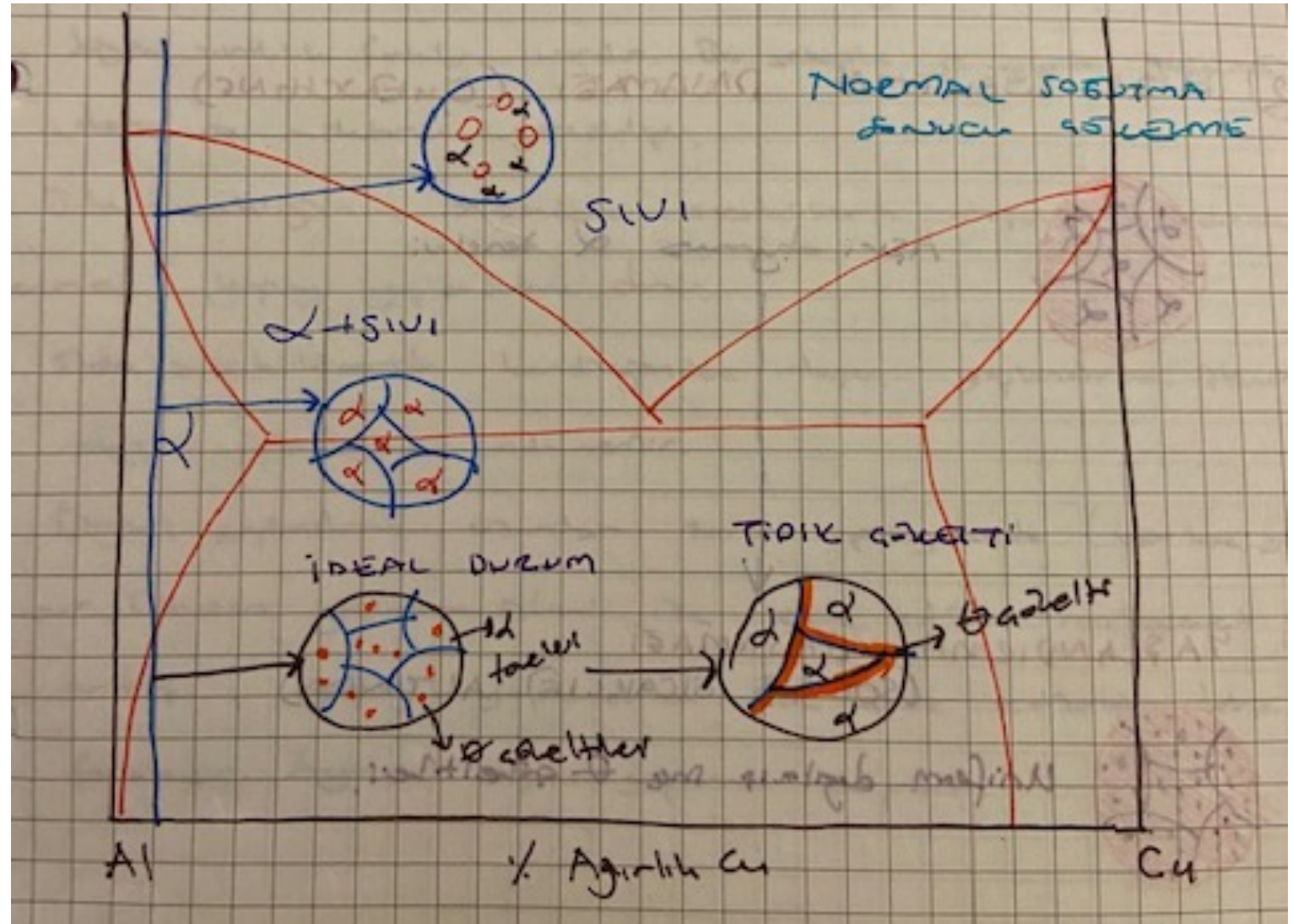
Homojen
dağılmış ince
deta
çökeltileri

4. Yaşlanma veya Çökelme/Çökelti Sertleşmesi



4. Yaşlanma veya Çökelme/Çökelti Sertleşmesi

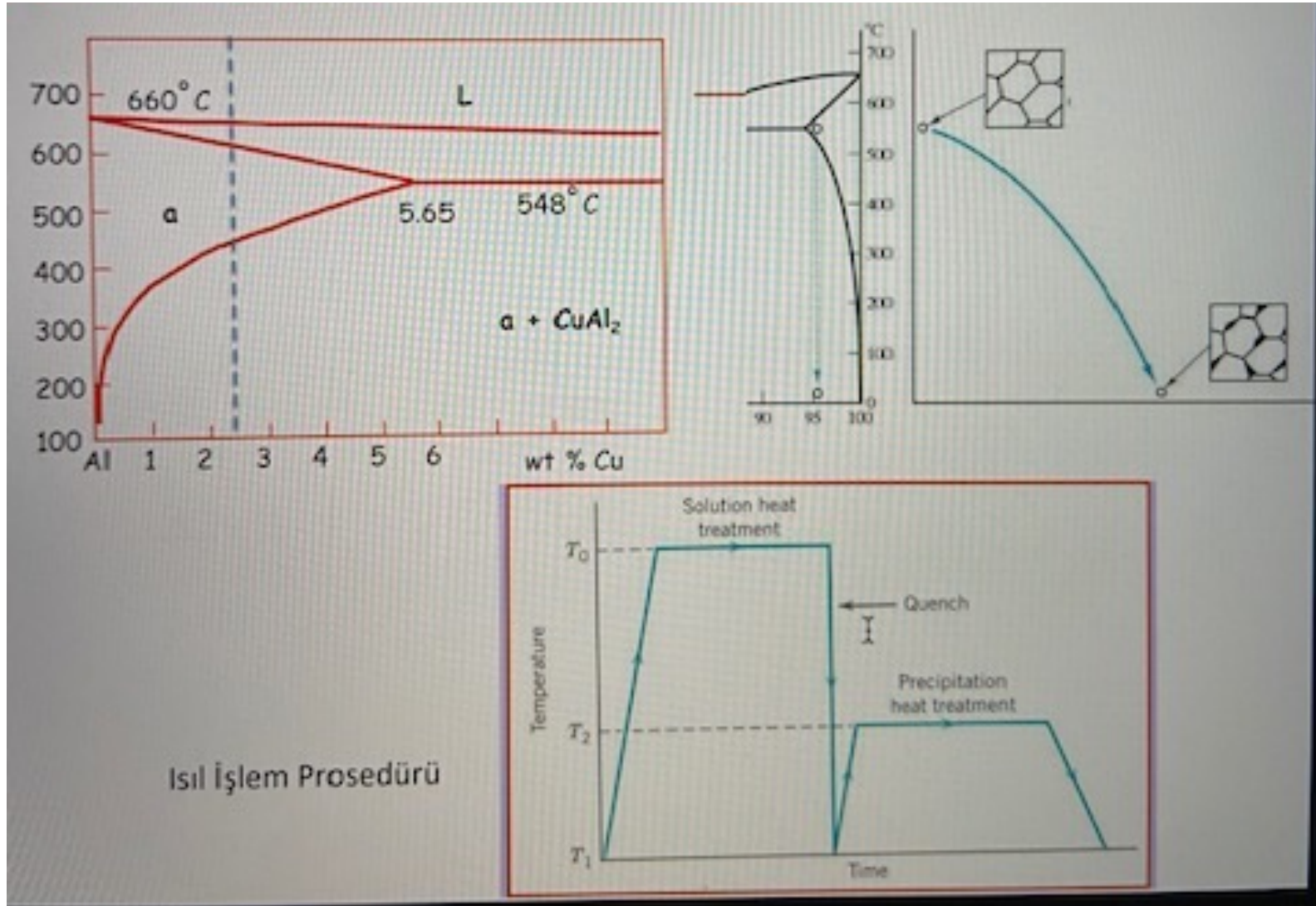
Al-Cu



4. Yaşlanma veya Çökelme/Çökelti Sertleşmesi

- ❑ Çökelme sertleşmesi veya yaşlandırma sertleşmesi, yapıda, yüksek sıcaklıkta çözünebilen, düşük sıcaklıklarda sınırlı bir çözünürlüğe sahip olan ikinci bir fazın olmasını gerektirir.
- ❑ Mikroyapıda çökelen ikincil faz tanelerinin dayanımı artırmak için kullanıldığı yöntemlerden birisidir.
- ❑ Çok küçük ve sert olan bu taneler dislokasyonların hareketini zorlaştırmakta ve böylece de dayanımın artmasını sağlamaktadır.
- ❑ Çökelme sertleşmesinde şu faktörler önemlidir:
 - Tane boyutu ve hacim oranı
 - Tanenin şekli
 - Tane ve matris arasındaki sınırın türü(bağdaşıklık)
 - Tanenin mekanik dayanımı (elastik modülü, akma dayanımı)

4. Yaşlanma veya Çökelme/Çökelti Sertleşmesi



4. Yaşlanma veya Çökelme/Çökelti Sertleşmesi

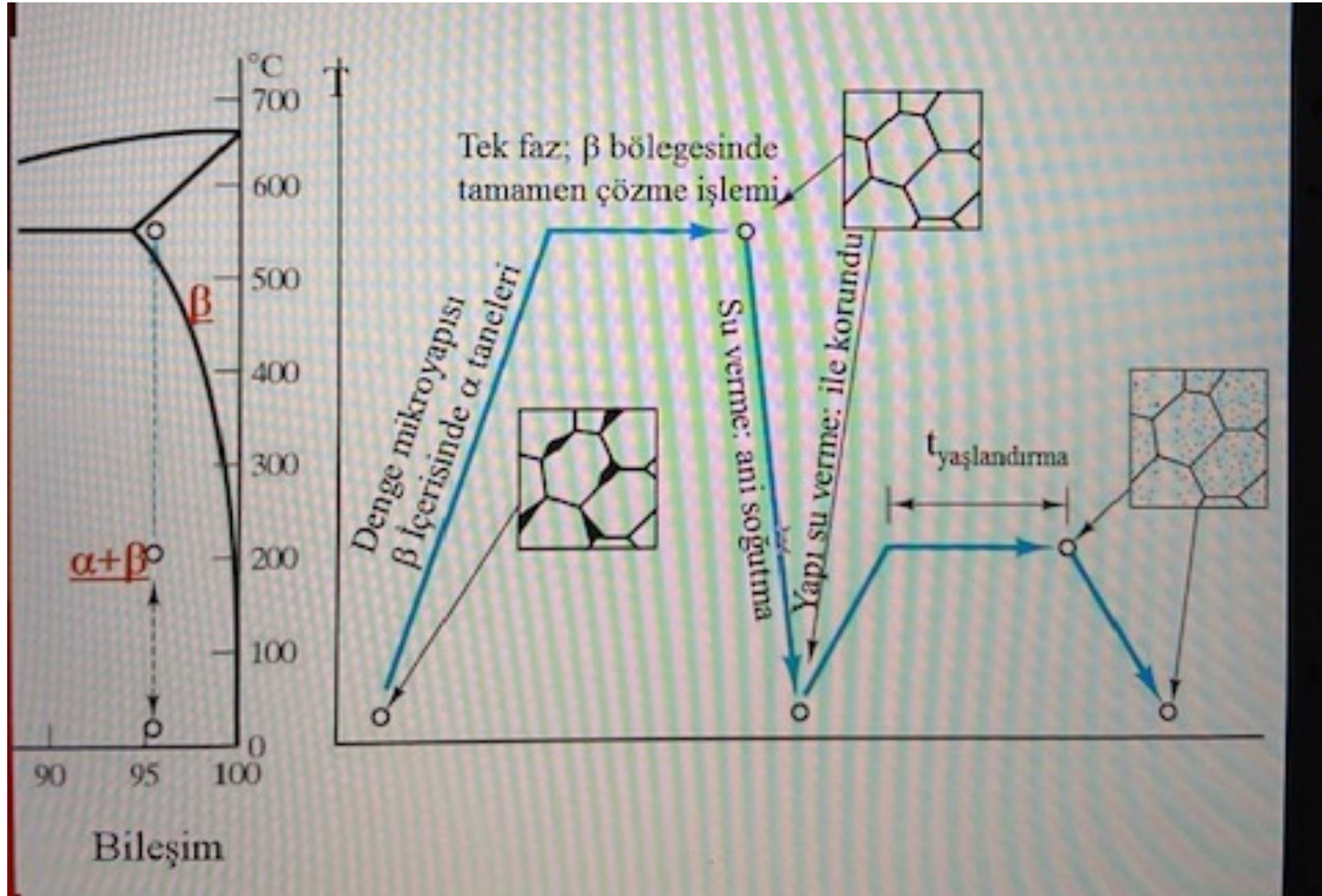
YAŞLANMA ISIL İŞLEMİ

1. Basamak: Solüsyona alma
2. Basamak: Soğutma
3. Basamak: Yaşlandırma

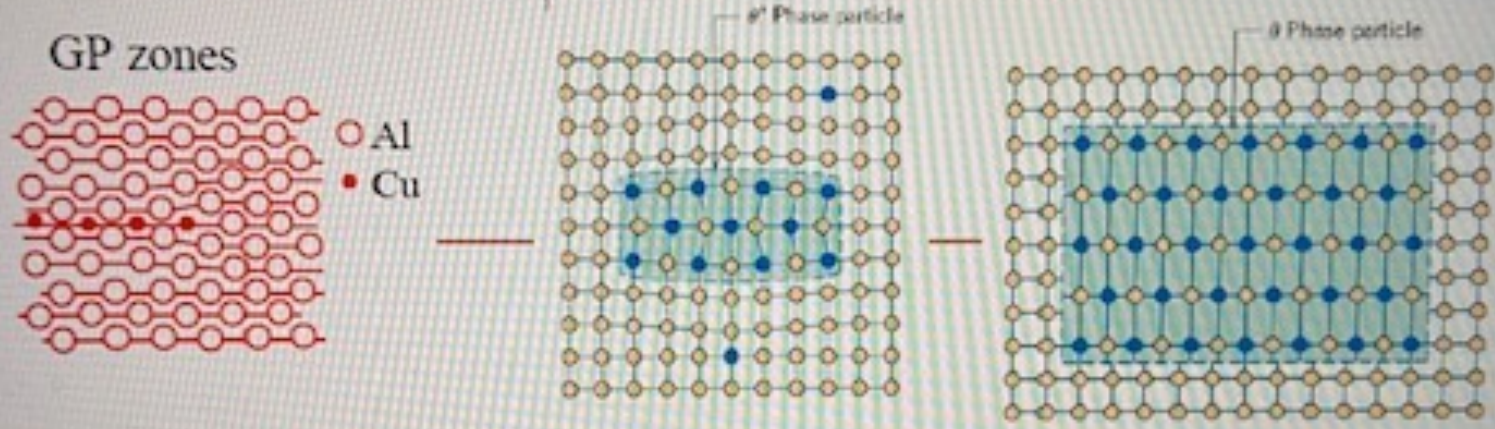
ÇÖKELME SERTLEŞMESİNİN AŞAMALARI

- **Çözündürme işlemi** (solution treatment): Malzeme tek faz bölgesine ısıtılarak çökelecek olan sert 2. faz, tek faz içerisinde tamamen çözülür.
- **Ani soğutma** (Quenching): Oda sıcaklığına ani soğutma ile 2. fazın çökmesi engellenir ve aşırı doymuş katı çözelti elde edilir.
- **Yaşlandırma işlemi** (Aging)nde; aşırı doymuş katı çözelti, çözündürme sıcaklığından daha düşük olan yaşlandırma sıcaklığına tekrar ısıtılarak çok küçük bağdaşık (koherent) 2. faz tanecikleri çökeltir. (Bu çökelti dislokasyonlara engel teşkil ederek malzemenin dayanımını artırır).
- **Aşırı yaşlanma**: çökelmelerin çok büyüyerek bağdaşıklığın (koherentliğin) kaybolması (bu durum istenmez).

4. Yaşlanma veya Çökelme/Çökelti Sertleşmesi



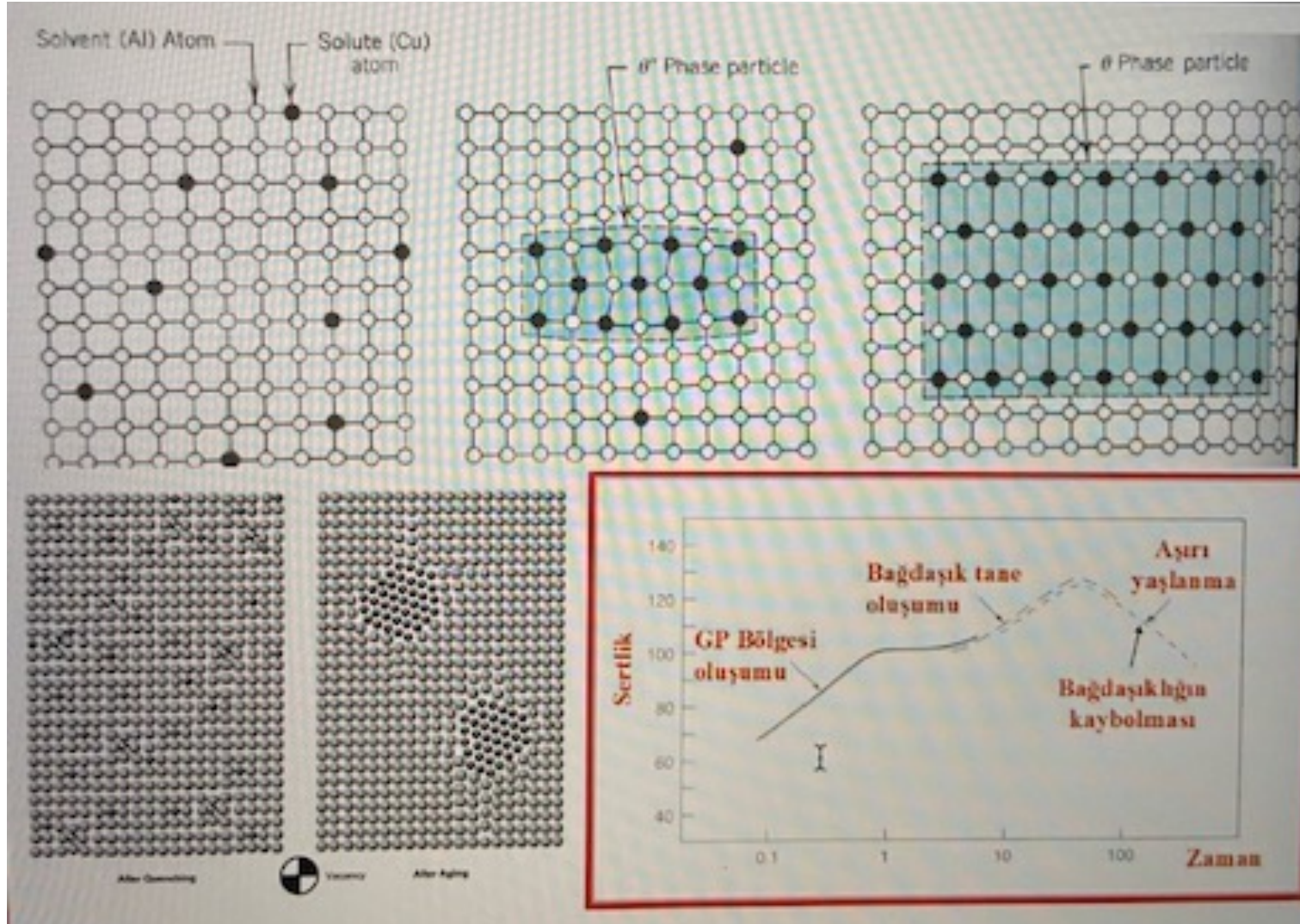
4. Yaşlanma veya Çökelme/Çökelti Sertleşmesi



The diagram illustrates the stages of precipitation hardening in an Al-Cu alloy. It consists of three parts: 1. GP zones: A cluster of Al atoms (red circles) with a few Cu atoms (red squares) interspersed. 2. θ' Phase particle: A cluster of Al atoms with a higher concentration of Cu atoms, forming a coherent precipitate. 3. θ Phase particle: A larger, incoherent precipitate with a distinct Al-Cu interface. A legend indicates that red circles represent Al and red squares represent Cu.

- ❑ Çökeltmenin ilk aşamasında, çok küçük koherent-GP bölgeler (Guinier preston zones) oluşur,
- ❑ GP bölgeleri genelde dislokasyon altındaki boşluklarda çekirdeklenir (sistemin enerjisini düşürmek için) ve dislokasyon hareketlerini engeller.
- ❑ Bu bölgeler, daha büyük bağdaşık (koherent) çökeltilere dönüşür. Bağdaşık çökelti kafesi aşırı gererek dayanım artışı oluştururlar.
- ❑ Daha sonra sıcaklığın veya zamanın gerekenden yüksek tutulması halinde tane büyümesi gerçekleşir. Dayanım düşmeye başlar.

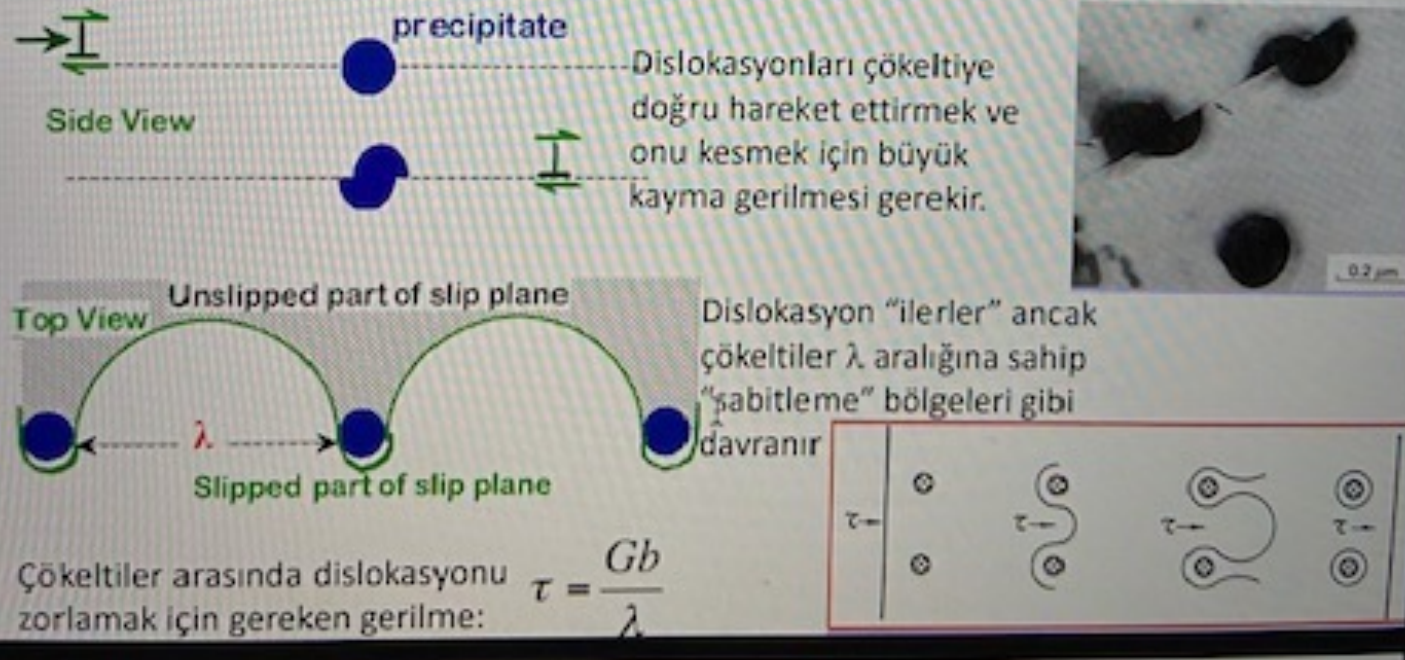
4. Yaşlanma veya Çökelme/Çökelti Sertleşmesi



4. Yaşlanma veya Çökelme/Çökelti Sertleşmesi

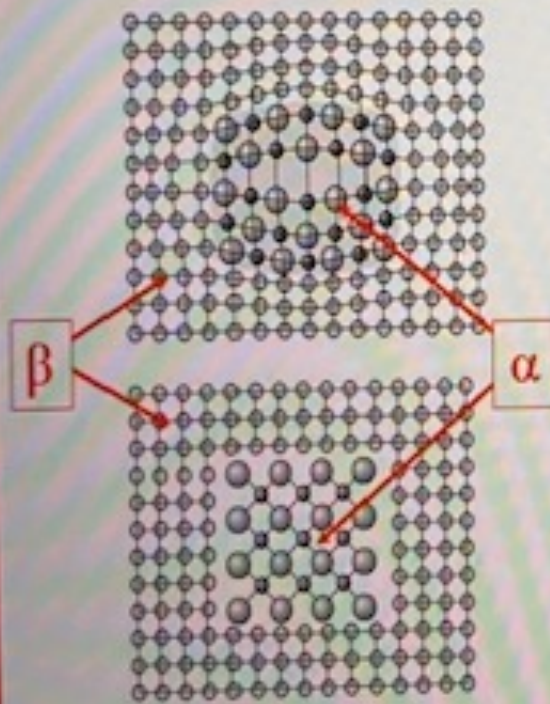
Dislokasyonların Çökeltilerle Etkileşimi

İkinci faz parçacıkları, iki farklı şekilde hareket ederek dislokasyonların hareketini geciktirir. Sert çökeltilerin kesilmesi zordur. Örn: Metallerdeki seramikler (Demir veya Alüminyumda SiC).



4. Yaşlanma veya Çökelme/Çökelti Sertleşmesi

Aşırı yaşlanma

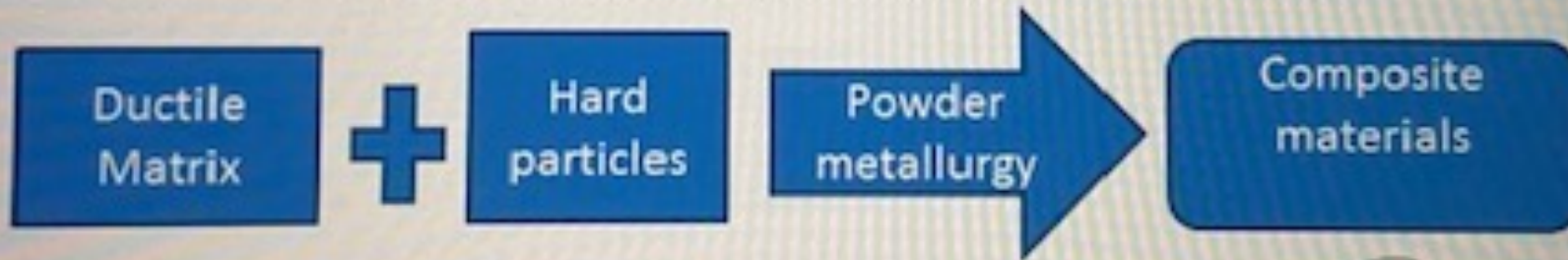


- ☐ Aşırı büyüme: Çökeltilerin çok büyümesi ile oluşan gerilmeler artık taşınamaz ve bağdaşıklık sona erer.
- ☐ Çökeltinin sertleştirme etkisi azalır.
- ☐ Yeterince uzun süre beklendiğinde kararlı ilk yapıya geri dönülür.

4. Yaşlanma veya Çökelme/Çökelti Sertleşmesi

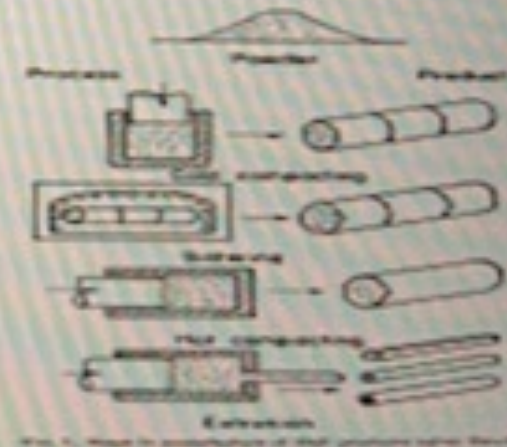
Birinci fazın matrisi içinde ikinci faz partiküllerinin homojen dağıtılmasına bağlı dislokasyonların çivilenmesine (pining) sağlayan bir işlem

Normalde Sert parçacıkların boyut aralığı (1nm den 1 μm



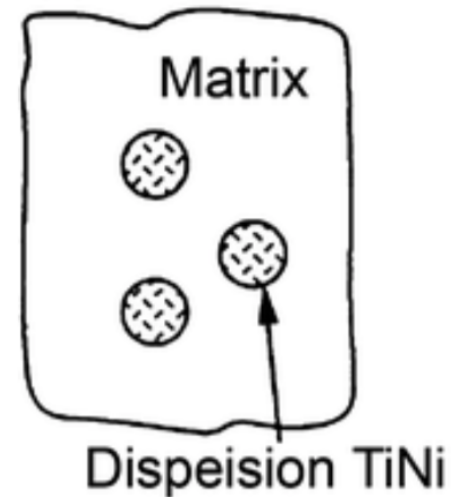
Examples:

- 14%Al₂O₃ in Al- "SAP" Composite
- 1-2%ThO₂ in Ni-20%Cr-TD nickel
- WC in CO- Cemented Carbide cutting tools

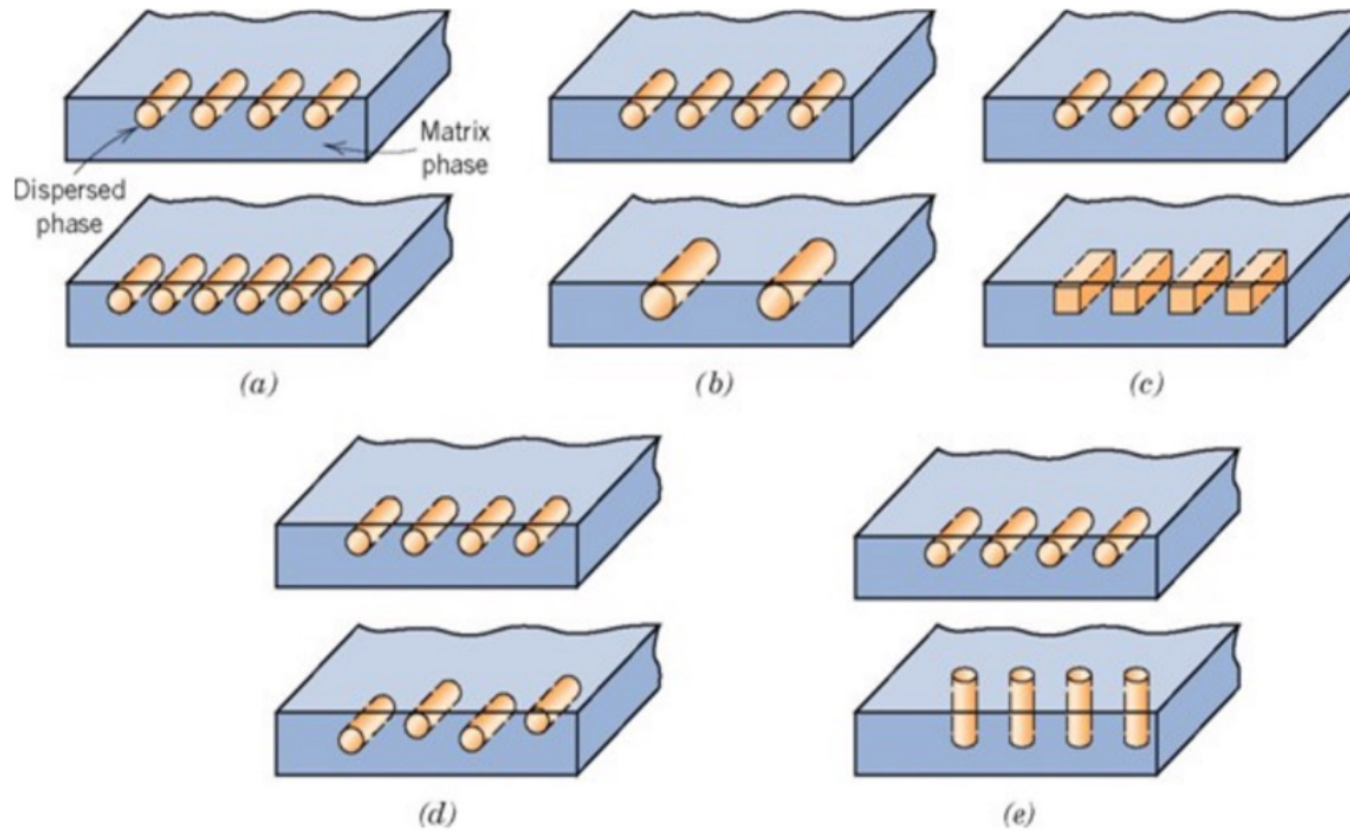


5. DISPERSİYON Sertleşmesi

- **Dispersion strengthening** is a well known procedure used for improving the hardness of metallic materials.
- Dispersion-strengthened means of strengthening materials where in very small particles (usually less than $0.1\ \mu\text{m}$) of a hard yet inert phase are uniformly dispersed within a load-bearing matrix phase
- Dispersed phase may be metallic or nonmetallic, generally oxide materials are used.



5. DISPERSİYON Sertleşmesi

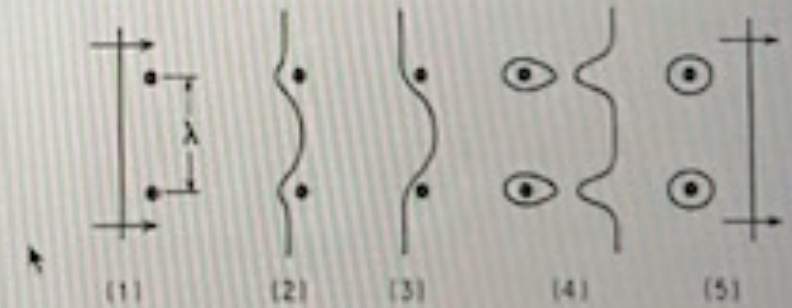


5. DISPERSİYON Sertleşmesi

Mekanizma

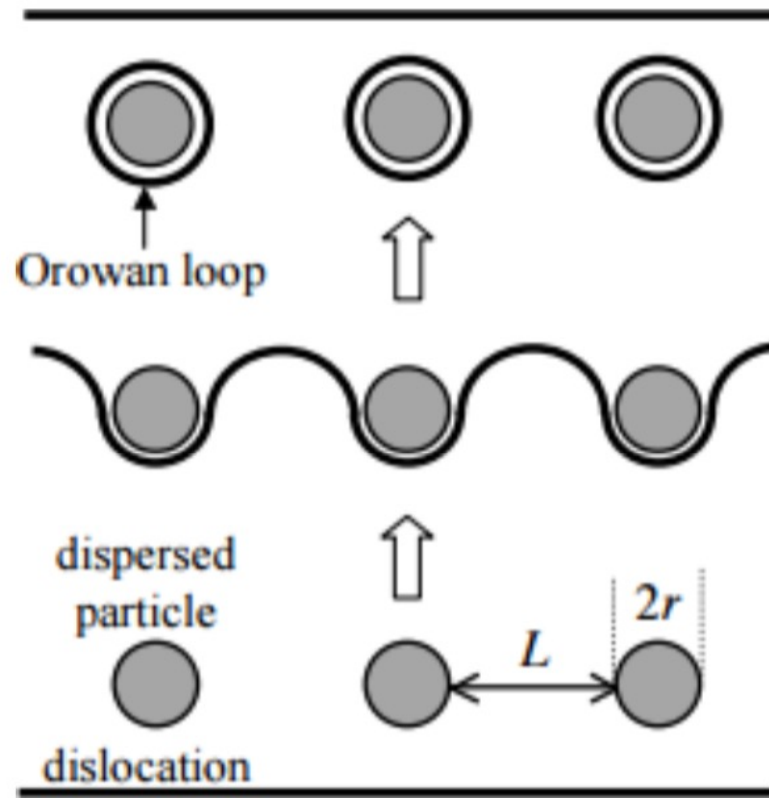
Orowan Modeli

- Orowan eğilme modeliyle dislokasyonların engelleri bypass ederek geçmesi
- Aralarında λ kadar mesafe olan iki parçacık arasında bir dislokasyon çizgisini eğmek için gereken kayma gerilmesi $\tau \sim Gb / \lambda$
- Düz bir dislokasyon çizgisi parçacıklara ulaşır.
- Araya giren çizgi eğilir
- Kritik bir yarıçapa ulaşır
- Her parçacığın etrafında bir halka bırakarak engellerden ayrılır



5. DISPERSİYON Sertleşmesi

Orowan Mechanism



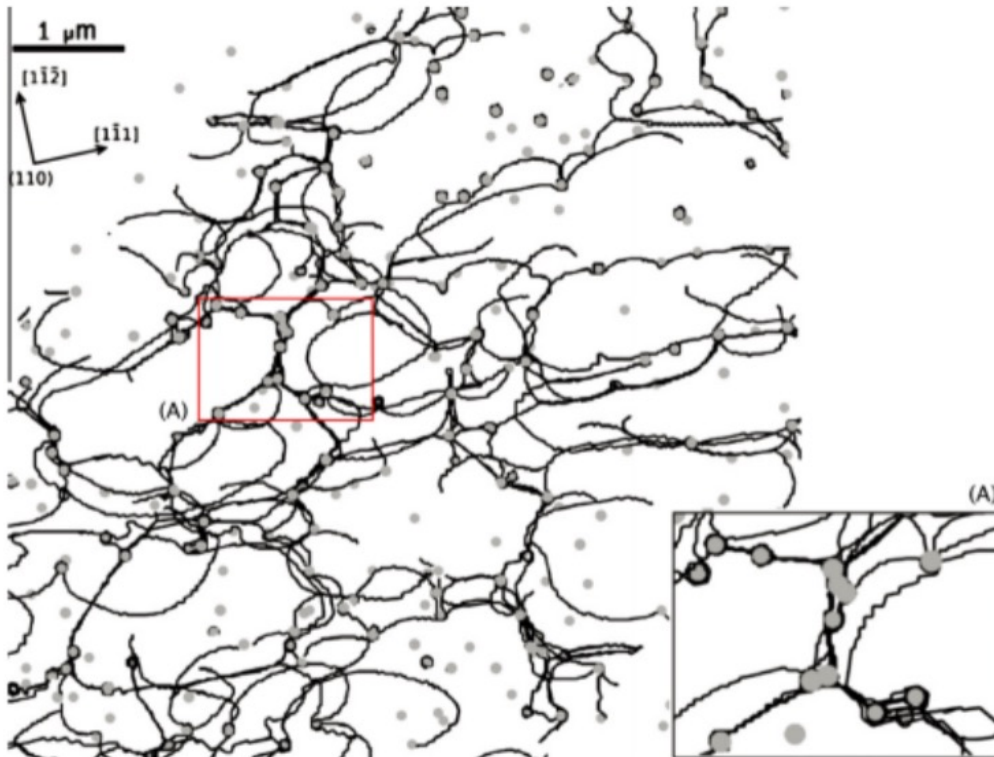
Orowan Mechanism For Dispersion Hardening

$$\tau = \frac{\mu b}{L}$$

CRSS for the Orowan
mechanism (Orowan stress)

5. DISPERSİYON Sertleşmesi

Orowan Mechanism



Simulated microstructure resulting from the interaction between a single slip system with a random distribution of carbides. $s = 75$ MPa and $c = 1\%$. The thin foils extracted from the simulated volume have a thickness of 0.2 μm and are parallel to the dislocation glide plane. The enlargement (A) shows the formation of dipoles and multipoles aligned along the smallest carbide spacing.

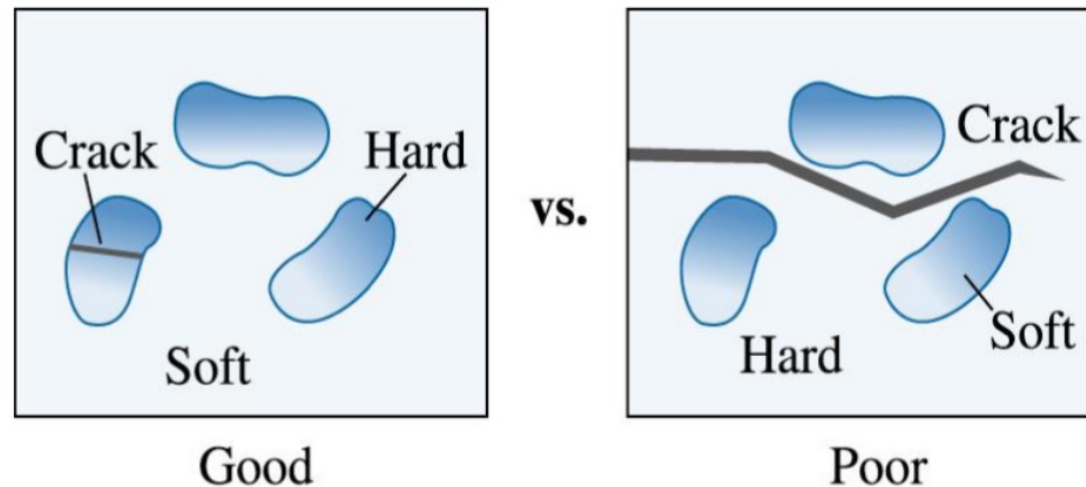
5. DISPERSİYON Sertleşmesi

- **Dispersoids** can be introduced by a variety of methods but “Mechanical Alloying” was a breakthrough enabling obtaining of a homogeneous dispersoid distribution.
- The dispersoids are usually 10-250 nm diameter oxide particles and are introduced by physical means rather than chemical precipitation.
- They are located within the grains and at grain boundaries but are not coherent with the matrix as in precipitation hardening.
- The dispersed particles are sufficiently small in size to impede dislocation movement and thus improve yield strength as well as stiffness.

Requiring of good dispersion hardening

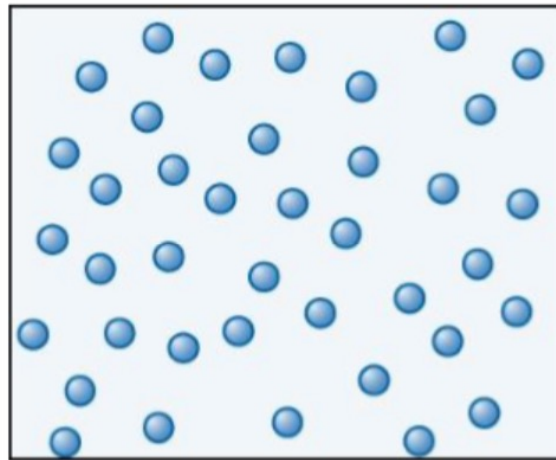
- ✓ Dispersed phase should be hard and discontinuous to prevent crack or load coming on material.

5. DISPERSİYON Sertleşmesi



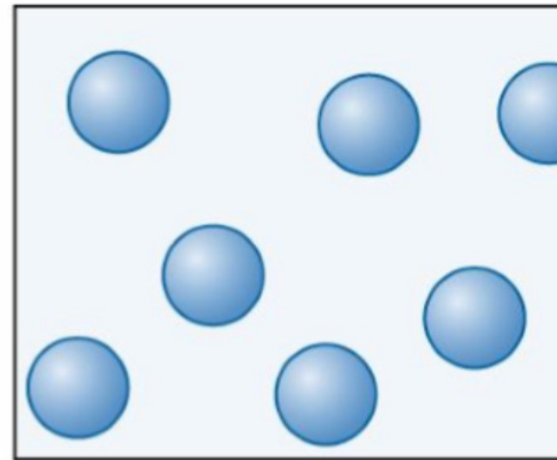
5. DISPERSİYON Sertleşmesi

- ✓ Dispersed phase should be small and much because of increasing number of absorbing atoms.



Good

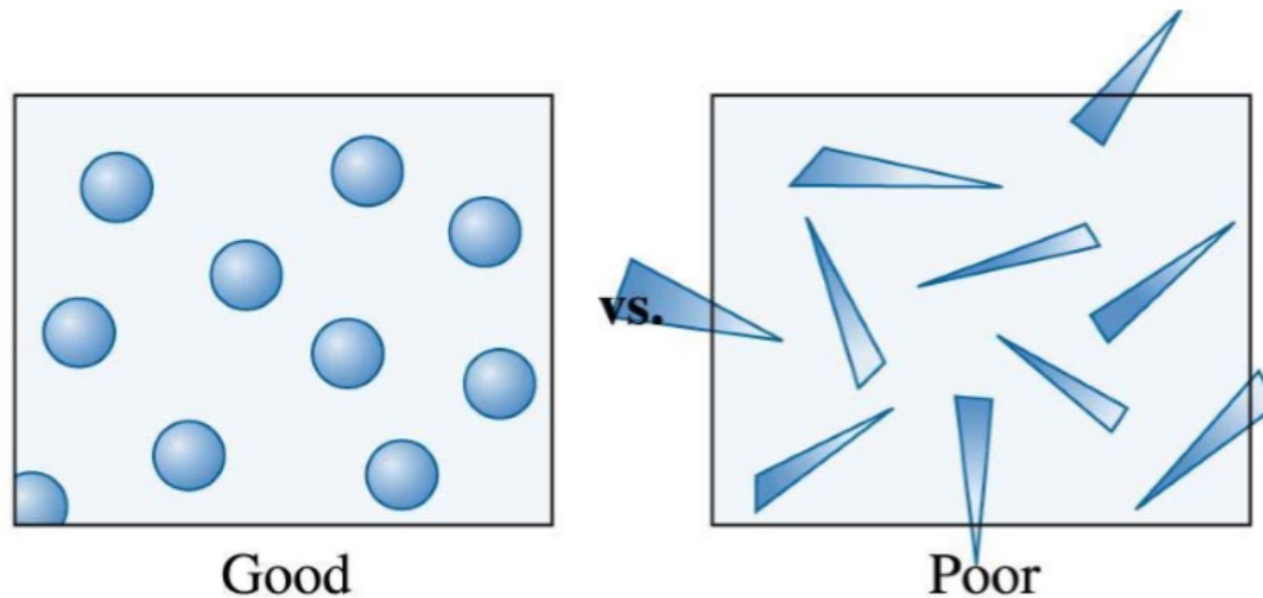
vs.



Poor

5. DISPERSİYON Sertleşmesi

- ✓ Dispersed phase's particles should be spherical form instead of acicular form to absorb occurring fracture and not to occur any crack or fracture in material.



5. DİSPERSİYON Sertleşmesi

WETTABILITY

In dispersion hardening, wettability is more important to generate a strong enough interface to allow effective transfer and distribution of a load from the matrix to the reinforcement.

Wettability can be defined as the ability of a liquid to spread on a solid surface and represent the extent of intimate contact between a liquid and a solid. It can be described by the angle of contact between a drop of liquid resting on a solid substrate.

The contact angle at equilibrium, θ , is determined by the following equation, often referred to as the Young –Dupre equation:

5. DISPERSİYON Sertleşmesi

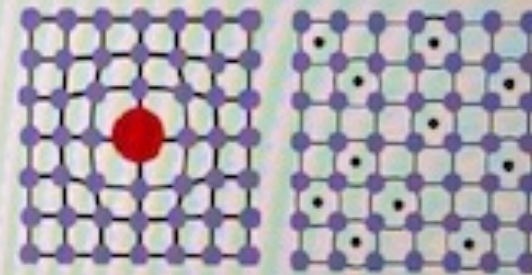
İkinci Faz Parçacıklarla Sertleşmeyi Etkileyen Faktörler

- 1- Parçacık veya Çökeltinin Sertliği
- 2- Parçacık veya Çökeltinin şekli
- 3- Parçacık veya Çökeltinin Büyüklüğü
- 4- Parçacık veya Çökeltilerin Hacimsel Oranı
- 5- Parçacık veya Çökeltilerin yapıdaki dağılımı

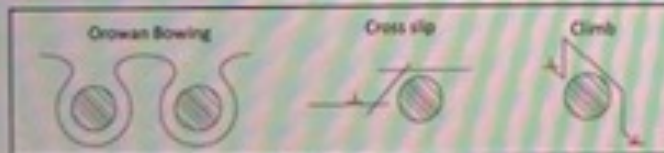
Dispersiyon Sertleşmesi & Çökeltme Sertleşmesi: FARKLAR

Dispersiyon Sertleşmesiyle Çökelme Sertleşmesi Arasındaki Farklar

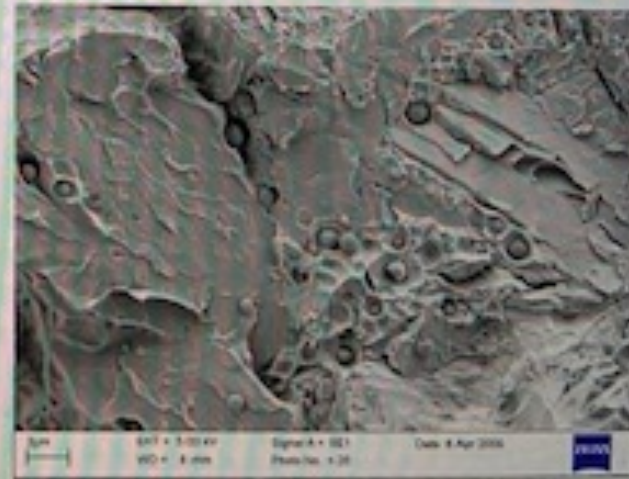
- ÇS de bağdaşıklık vardır, DS de yok
- DS tüm sıcaklıklarda kararlı iken ÇS değil
- DS de zaman faktörü önemli değil
- DS ile herhangi bir alaşım yapılabilir
- DS de kimyasal kararlılık daha fazla
- ÇS izotropik, DS anizotropik



Koherent çökeltiyi bir kenar dislokasyonunun geçişi.



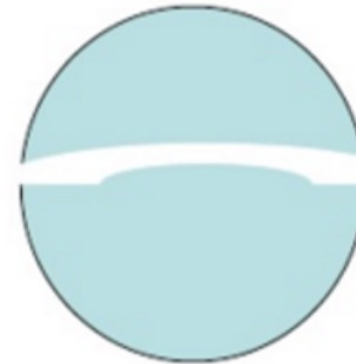
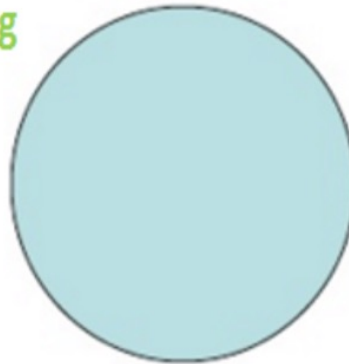
nispeten büyük ve küçük bağdaşıklığa sahip bir çökelti
ile dislokasyon arasındaki karşılıklı etkileşim



Precipitation Hardening vs. Dispersion-Strengthened Composites

Shear τ 

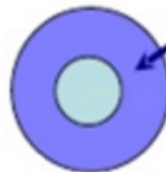
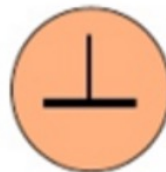
Precipitation Hardening



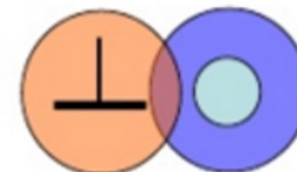
Strong Particle
>500 nm

Dislocation shears through
the dispersion

Dispersion Strengthened



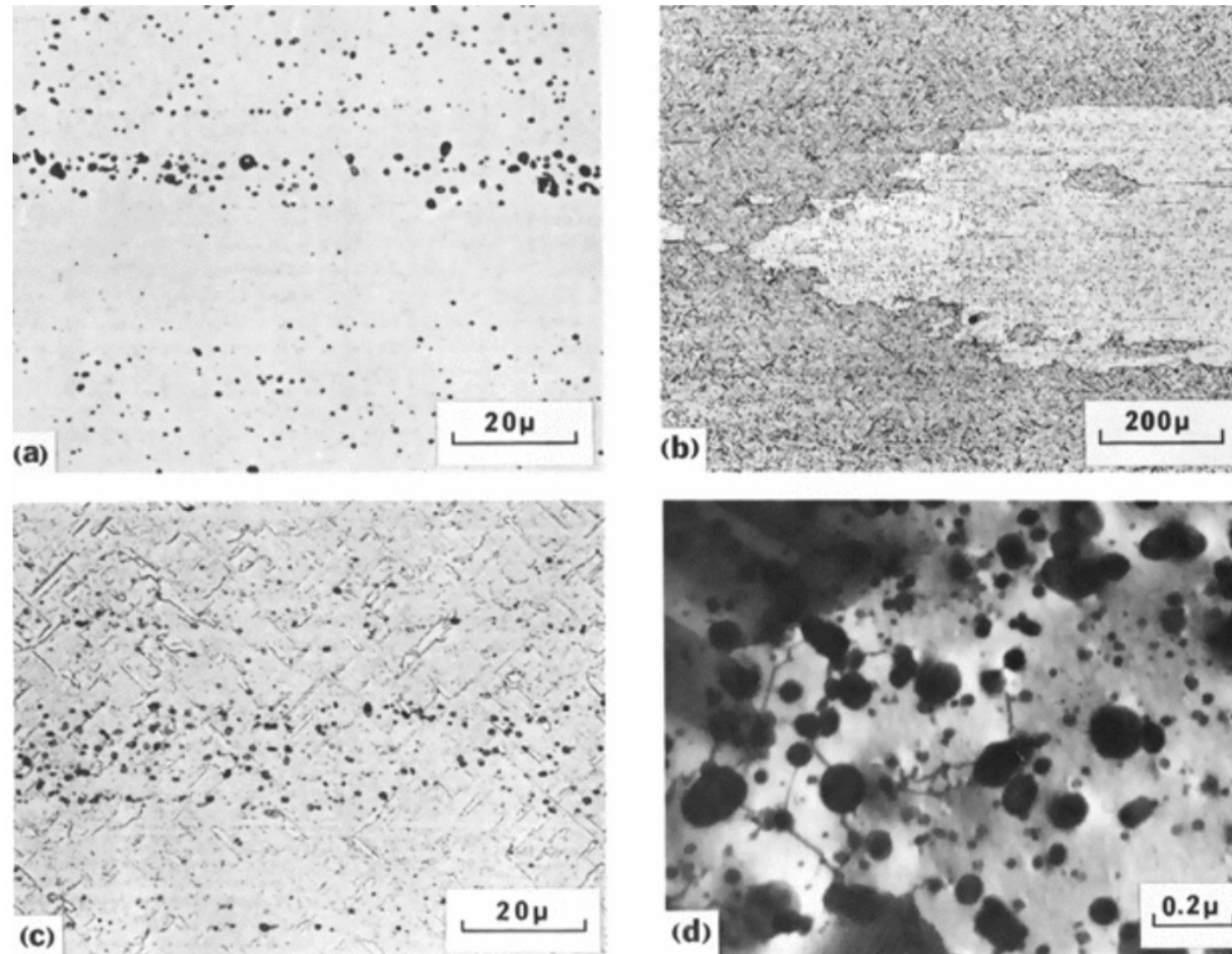
Stress field of
dispersion



Strong Particle
<100 nm

Dislocation stopped

Structure Of TD-NiC



(a) Stringers of internal oxide (b) large, elongated grain morphology (c) annealing twins and (d) transmission micrograph of substructure