Isıl işlemler

13. hafta

Yeniden Kristalleşme

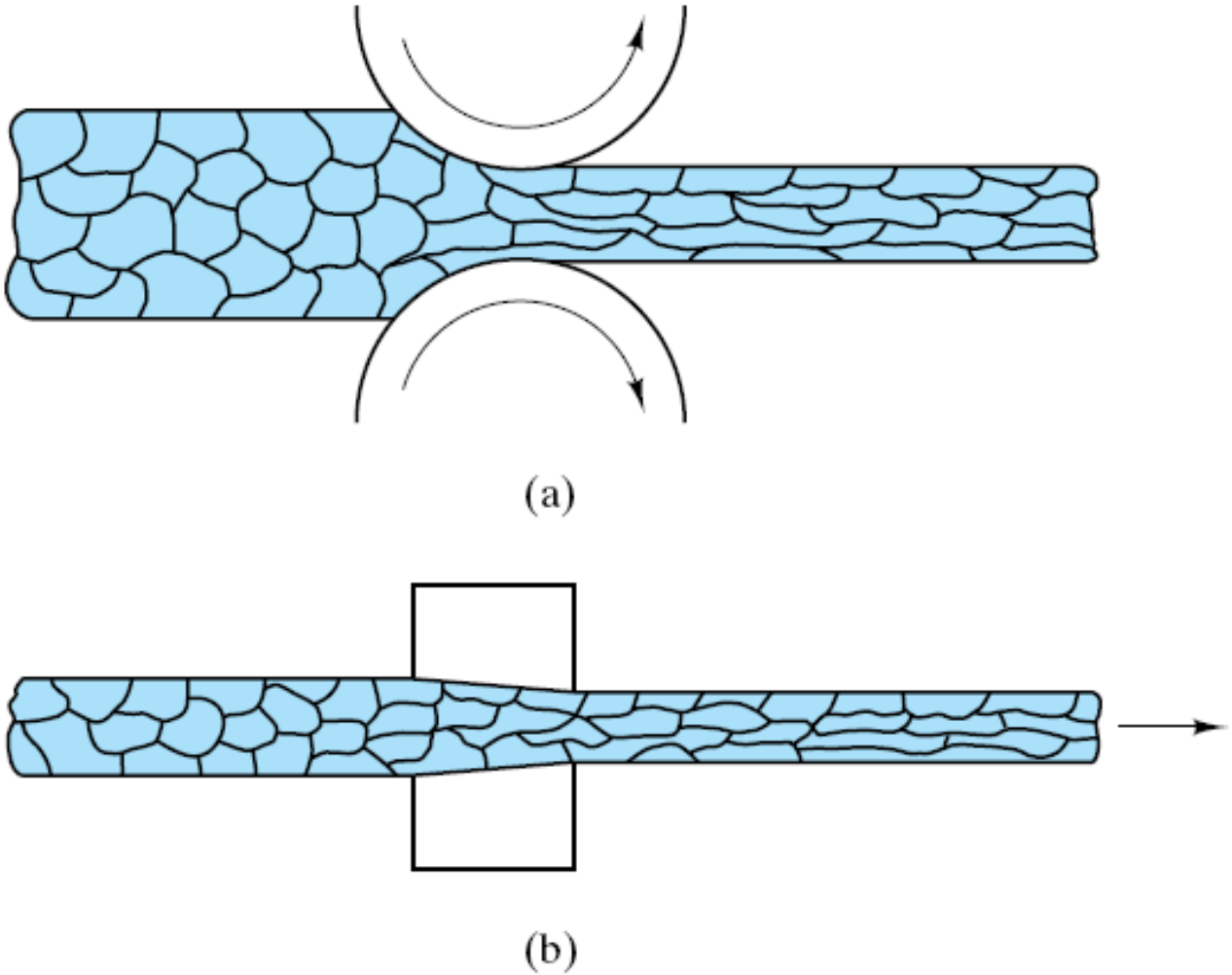


Figure 10-29 *Examples of cold-working operations: (a) cold-rolling of a bar or sheet and (b) cold-drawing a wire. Note in these schematic illustrations that the reduction in area caused by the cold-working operation is associated with a preferred orientation of the grain structure.*

Yeniden Kristalleşme Amaçları

1. Deformasyona devam edebilmek,

2. İnce taneli yüksek mukavemetli, yüksek tokluğa sahip malzeme üretmek,

3. Kontrollü tane boyutunda malzeme elde etmek

Yeniden kristalleşme difüzyonel bir faz dönüşümüdür.

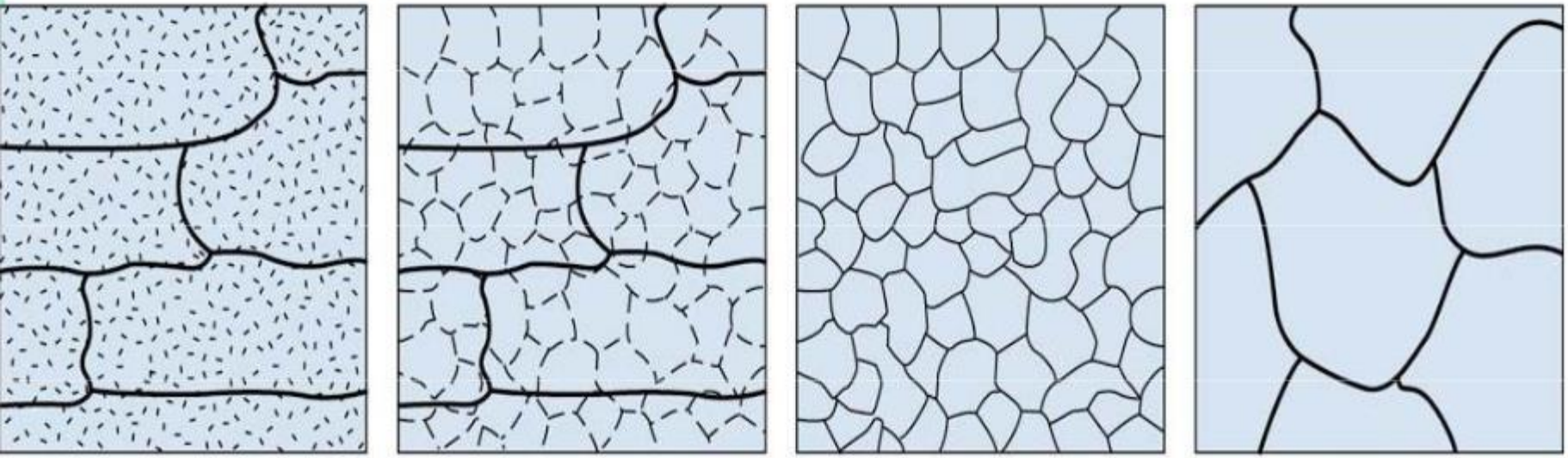
Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı≈ 1/3 – ½ T_m aralığıdır

Yeniden kristallenme safhaları

Toparlanma, Yeniden kristalleşme ve Tane büyümesi

<u>Toparlanma:</u> Deformasyondan serbest yeni tanelerin oluşumuna kadar olan tavlama işlemi.

<u>Yeniden kristalleşme:</u> Deformasyondan serbest yeni tanelerin çekirdeklenmesi ve büyümesi



(a) (b) (c) (d)

Şekil. Yeniden kristalleşmede sıcaklığın mikroyapıya etkisi: a) Soğuk haddelenmiş metal, b) toparlanmadan sonra, c) yeniden kristalleşmeden sonra, d) tane büyümesinden sonra

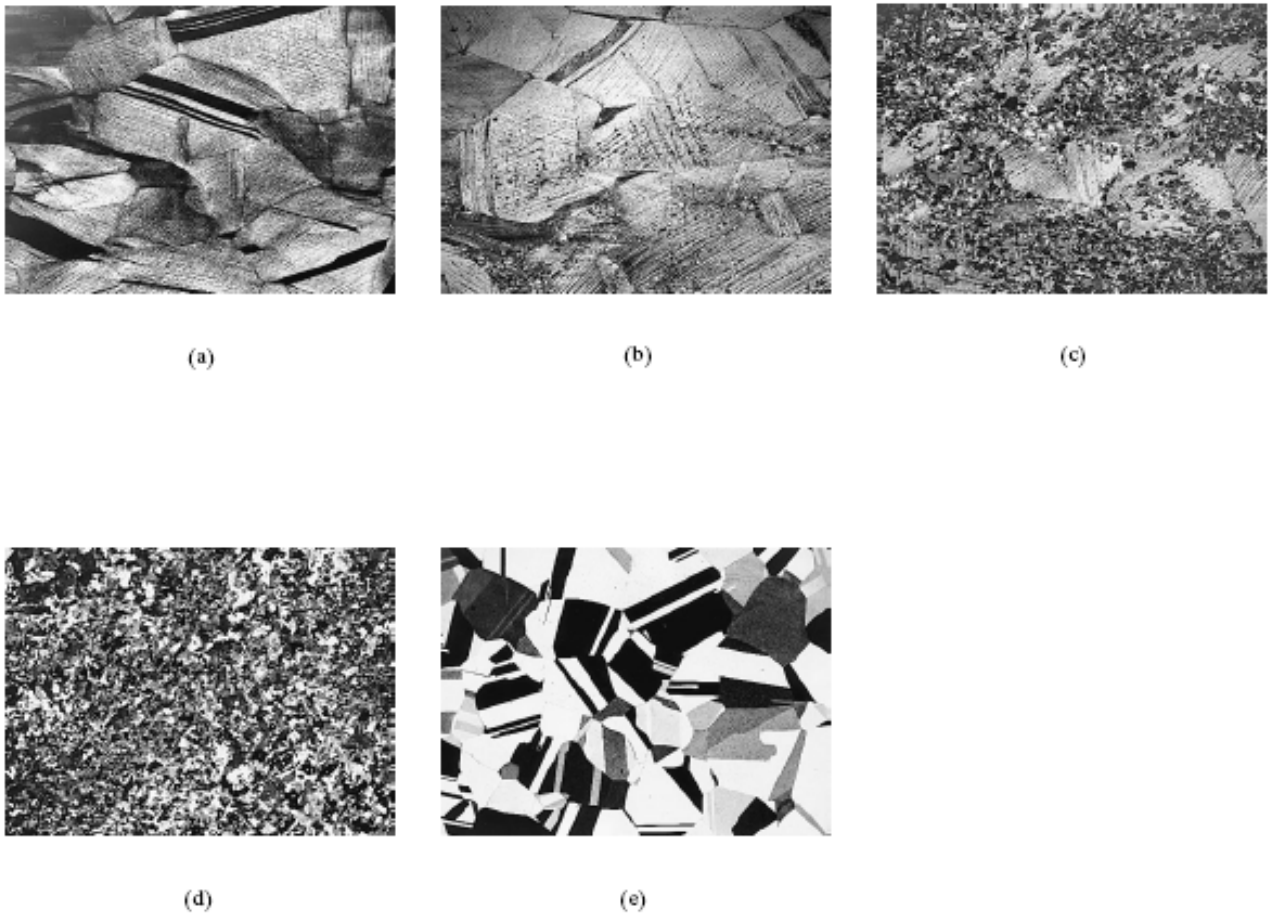
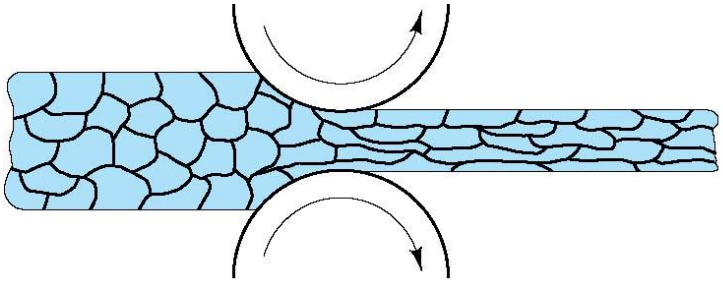


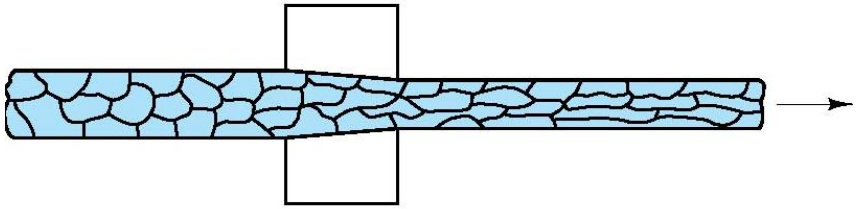
Figure 10-30 *Annealing can involve the complete recrystallization and subsequent grain growth of a cold-worked microstructure. (a) A cold-worked brass (deformed through rollers such that the cross-sectional area of the part was reduced by one-third). (b) After 3 s at 580° C, new grains appear. (c) After 4 s at 580° C, many more new grains are present. (d) After 8 s at 580° C, complete recrystallization has occurred. (e) After 1 h at 580° C, substantial grain growth has occurred. The driving force for this is the reduction of high-energy grain boundaries. The predominant reduction in hardness for this overall process had occurred by step (d). All micrographs at magnification of 75×. (Courtesy of J. E. Burke, General Electric Company, Schenectady, N.Y.)*

Soğuk şekil verme

- Sıcaklığın $T_b<0.2$ olduğu sıcaklıklarda plastik şekil değişimi işlemidir.(haddeleme, ekstrüzyon, vs.)
- Soğuk ş.ds dislokasyon yoğunluğu önemli miktarda artar. (metal en yumuşak halinde iken yapısında 10^{10} m/m^3, soğuk şekil değiştirmiş haldeyken ise yapısında $10^{16} m/m^3$)
- Taneler soğuk ş.d. yönünde uzama gösterirler.

$$\%SŞD = \frac{A_o - A_f}{A_o} x \ \%100$$





- Soğuk ş.d. Sırasında pekleşme ile dayanım ve sertlik artar süneklik ve elektrik iletkenliği azalır, iç gerilmeler artar.
- Belirli bir oranın üzerine çıkılması ile mikro çatlak oluşumu ve hasar meydana gelebilir.

- Malzemeyi hasara uğratmadan daha fazla plastik şekil değişimi yapabilmek için deformasyon öncesi düşük dislokasyon yoğunluğuna sahip yumuşak yapıya dönülmek isteniyorsa yeniden kristallenme tavlaması uyguanabilir.

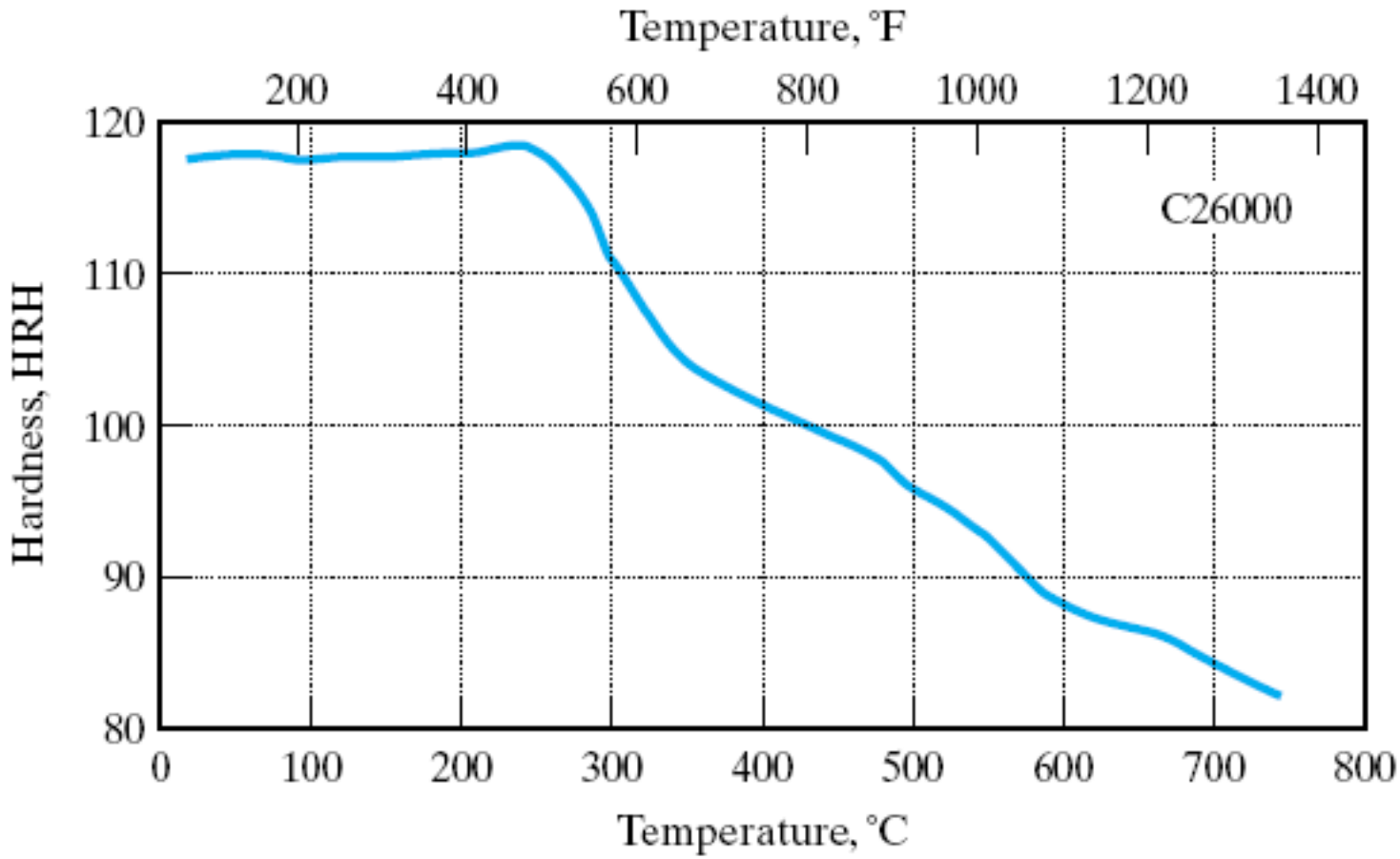


Figure 10-31 *The sharp drop in hardness identifies the recrystallization temperature as ~ 290°C for the alloy C26000, "cartridge brass." (From* Metals Handbook, *9th Ed., Vol. 4, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1981.)*

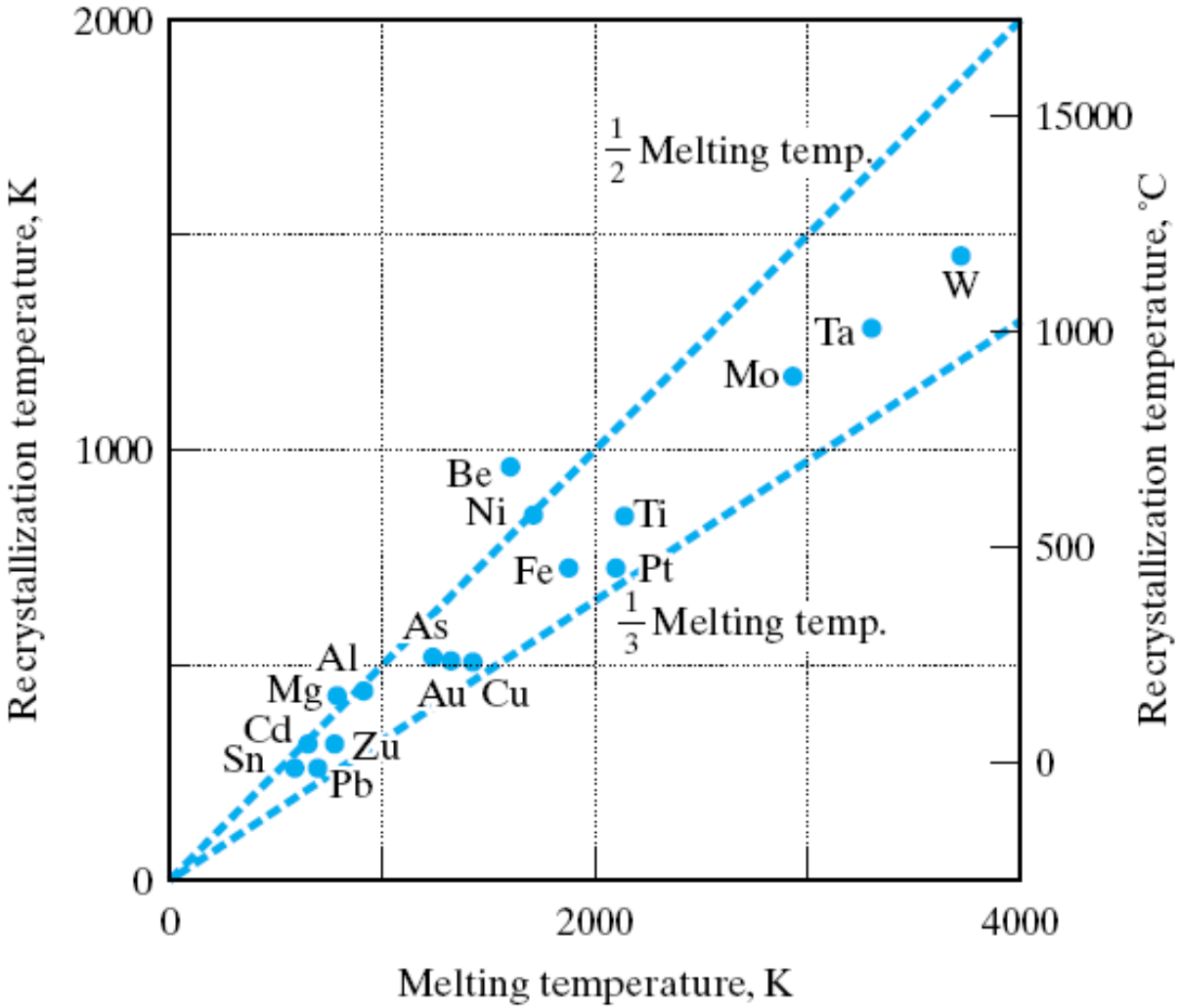


Figure 10-32 *Recrystallization temperature versus melting points for various metals. This plot is a graphic demonstration of the rule of thumb that atomic mobility is sufficient to affect mechanical properties above approximately* $\frac{1}{3}$ *to* $\frac{1}{2}T_m$ *on an* absolute *temperature scale. (From L. H. Van Vlack,* Elements of Materials Science and Engineering, *3rd Ed., Addison-Wesley Publishing Co., Inc., Reading, Mass, 1975.)*

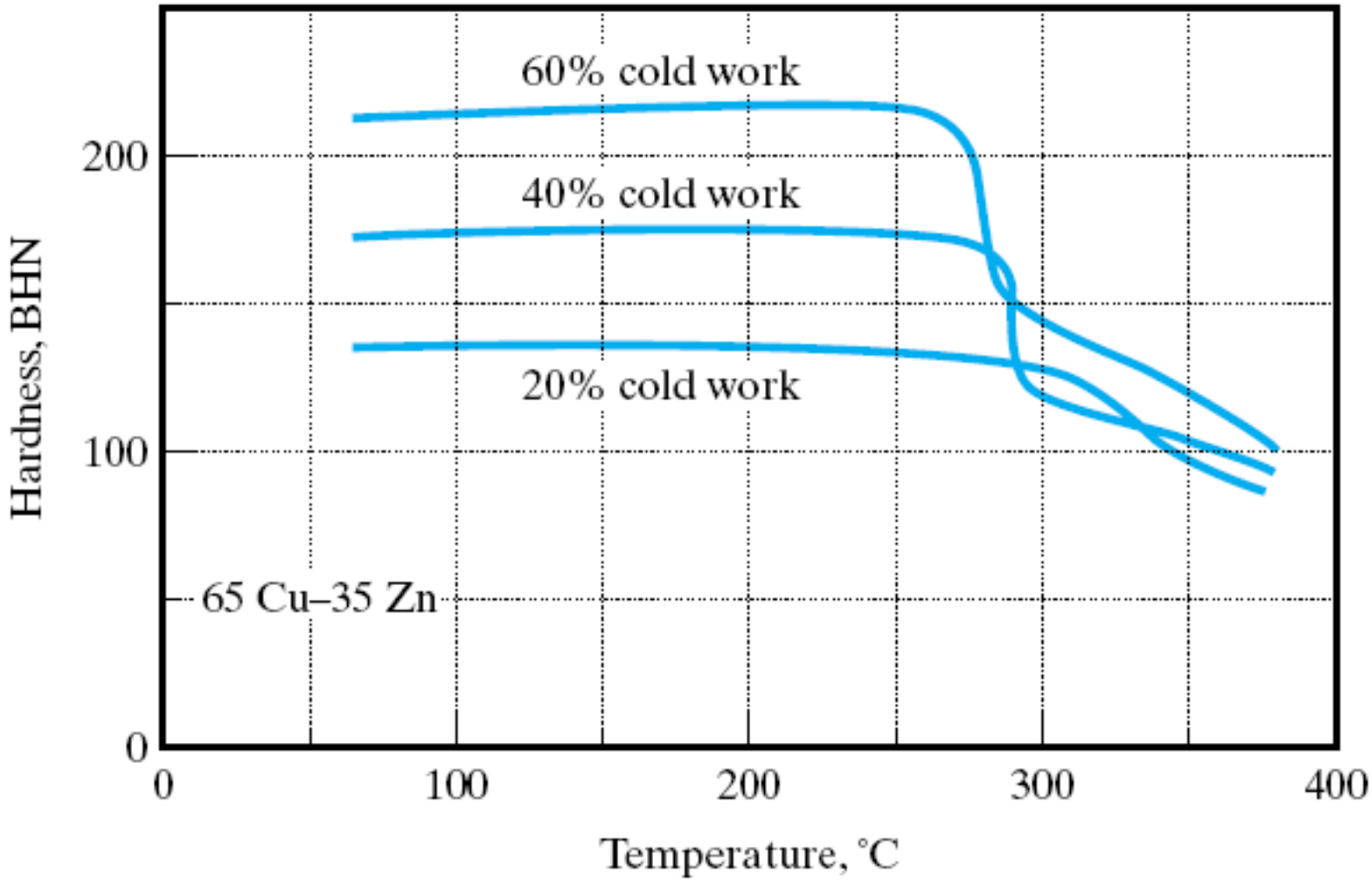


Figure 10-33 *For this cold-worked brass alloy, the recrystallization temperature drops slightly with increasing degrees of cold work. (From L. H. Van Vlack,* Elements of Materials Science and Engineering, *4th Ed., Addison-Wesley Publishing Co., Inc., Reading, Mass. 1980.)*

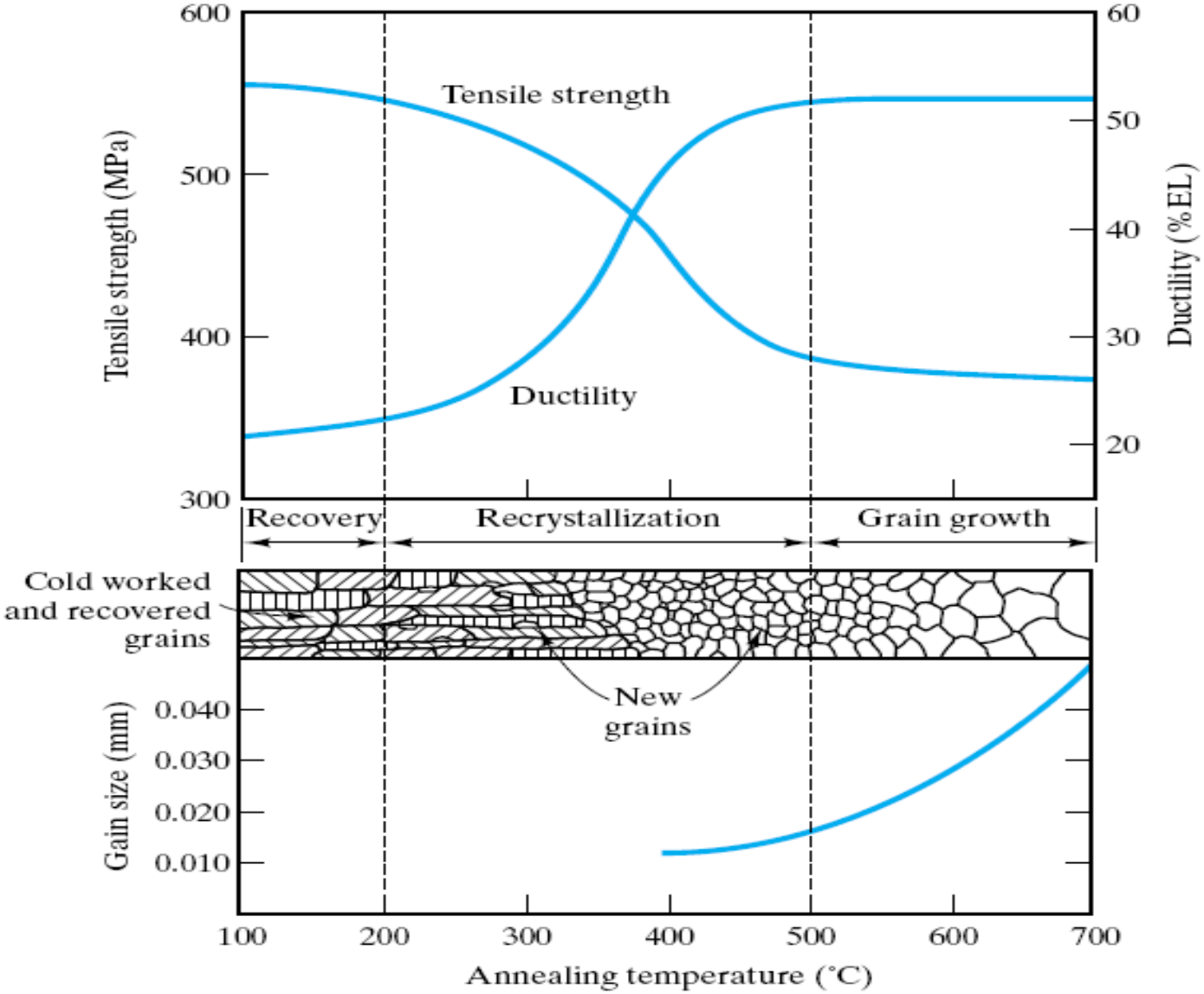


Figure 10-34 *Schematic illustration of the effect of annealing temperature on the strength and ductility of a brass alloy shows that most of the softening of the alloy occurs during the recrystallization stage. (After G. Sachs and K. R. Van Horn, Practical Metallurgy: Applied Physical Metallurgy and the Industrial Processing of Ferrous and Nonferrous Metals and Alloys, American Society for Metals, Cleveland, Ohio, 1940.)*

Plastik deformasyon sıcaklık aralığı

(0.3 – 0.5) T_m → Soğuk işlem

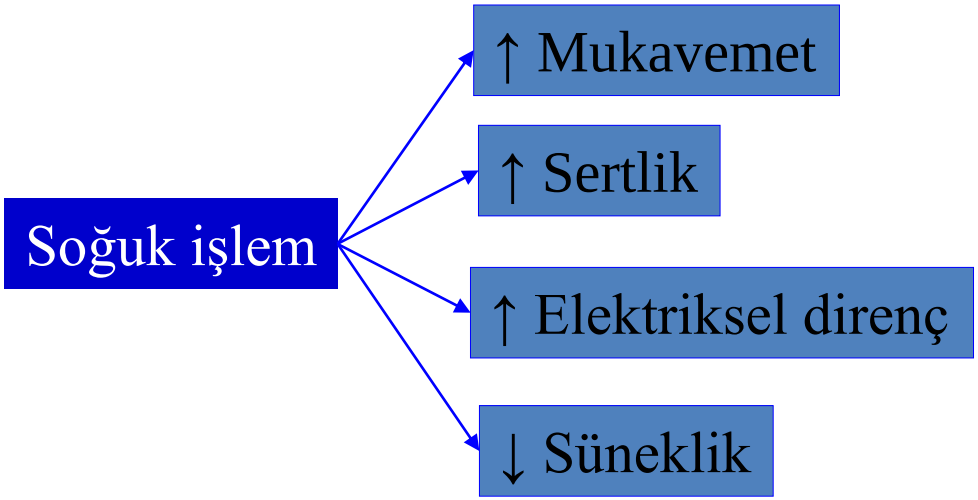
Soğuk işlem → ↑ noktasal kusur

Soğuk işlem → ↑ dislokasyon yoğunluğu

- Noktasal hatalar ve dislokasyonlar gerinme enerjisi ile ilişkilidir.
- Plastik deformasyonda harcanan enerjinin % (1 -10) 'u gerilim enerjisi şeklinde depolanır.

Tavlanmış malzeme	Soğuk işlem	Sertleşmiş malzeme
Annealed material	$\xrightarrow{\text{Cold work}}$	*Stronger material*
$\rho_{\text{dislocation}} \sim (10^6 - 10^9)$		$\rho_{\text{dislocation}} \sim (10^{12} - 10^{14})$

Dislokasyon yoğunluğu


Soğuk işlem
↑ Mukavemet
↑ Sertlik
↑ Elektriksel direnç
↓ Süneklik

Soğuk işlem → Tavlama →

Toparlanma-kendine gelme (Recovery)

↓

Yeniden kristalleşme (Recrystallization)

↓

Tane büyümesi (Grain growth)

Toparlanma, Yeniden kristalleşme ve Tane büyümesi

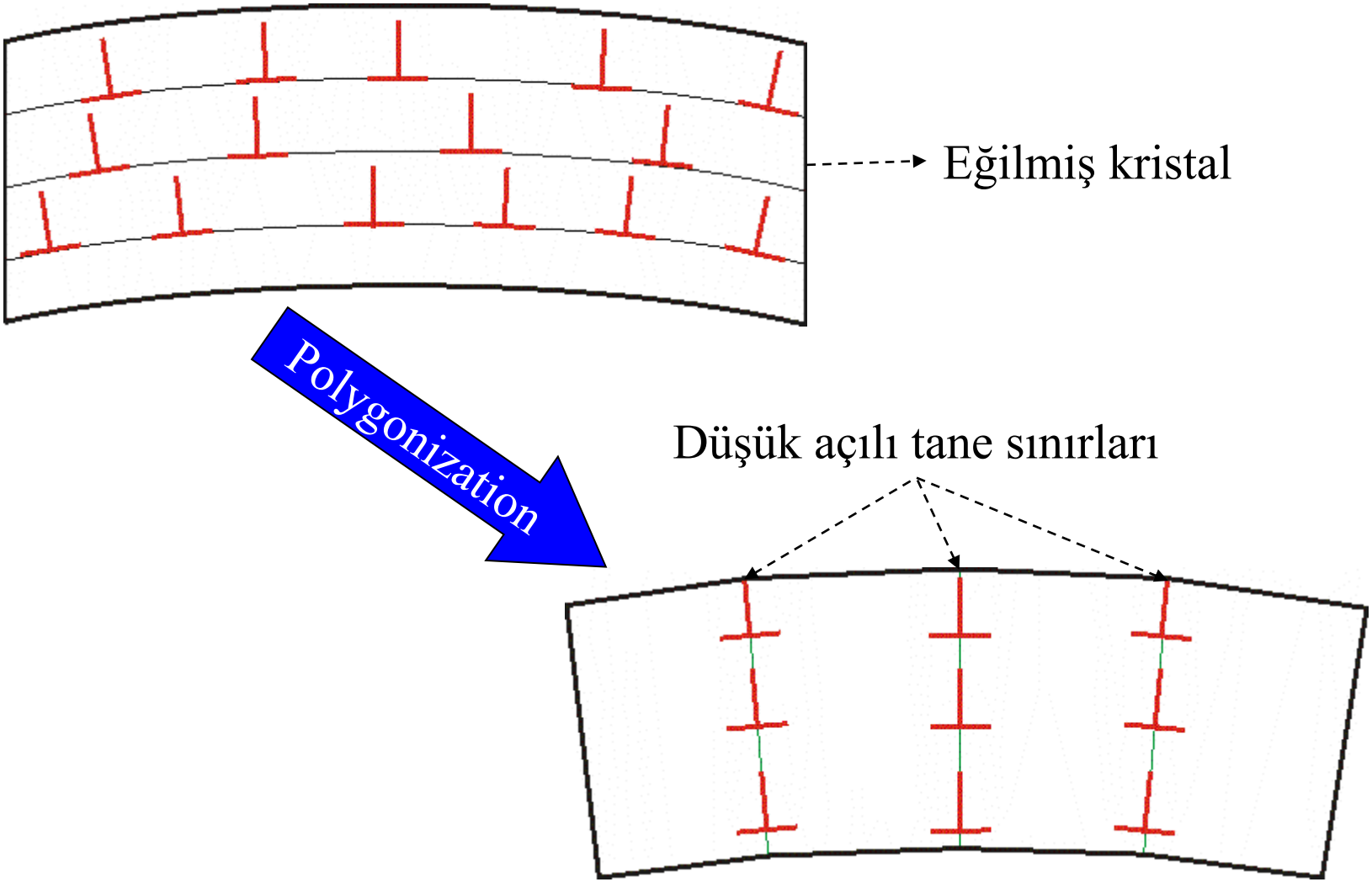
Toparlanma sırasında

1. Nokta hataları dengeye gelir

2. Bir kayma düzlemi üzerinde bulunan zıt işaretli dislokasyonlar birbirlerini yok ederler

(Bu durum dislokasyon yoğunluğunu çok azaltmaz)

POLYGONIZATION



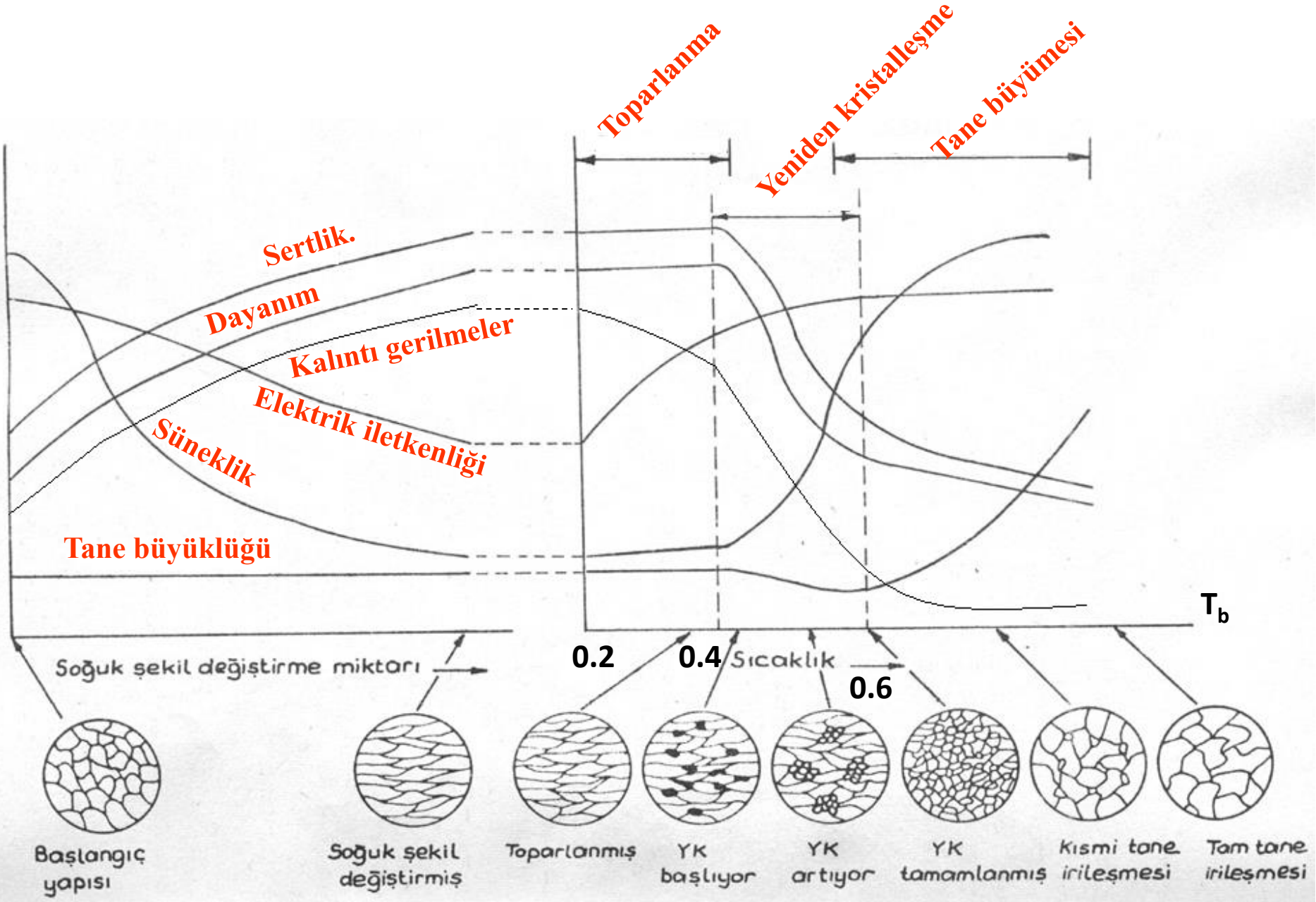
Yumuşatma tavı (Process Annealing)

- Soğuk şekil değiştirme ile dayanımı ve sertliği artmış, sünekliği ve elektrik iletkenliği azalmış metalin soğuk şekil değişiminden önceki yapısını tekrar kazandırmak için uygulanan ısıl işleme "**yumuşatma tavlaması**" adı verilir.

Yumuşatma Tavında

- Yumuşatma Tavı sırasında tav sıcaklıklarına bağlı olarak farklı aşamalar görülebilir:
  - Toparlanma
  - Yeniden kristalleşme
  - Tane irileşmesi

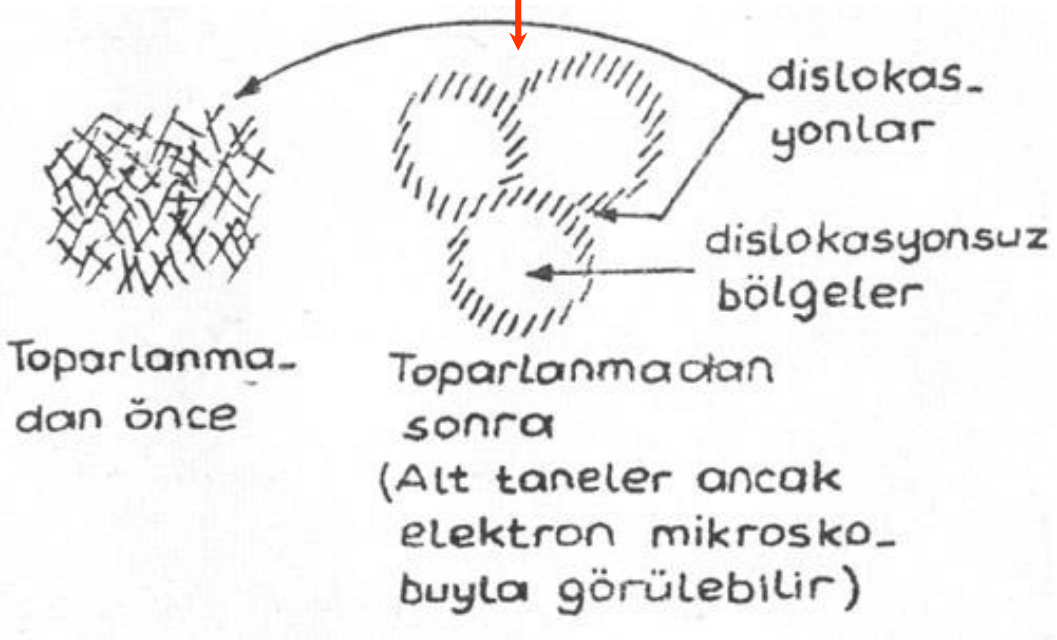
Yumuşatma tavı (ProcessAnnealing)



Toparlanma

- İç yapıda önemli ölçüde değişiklikler olmaz. (0.2 < Tb < 0.4)
- Tane içlerinde *noktasal kusurların azalması* ve *dislokasyonların* daha düşük iç enerji oluşturacak şekilde *yeniden dizilmesi* (poliganizasyon) için termal aktivasyon için yeterli sıcaklık vardır.
- Dislokasyonların dizilmesi ile **alt taneler** oluşur.
- Bu alt taneler YK sırasında oluşan gerçek taneler için çekirdekler görevi görür.
- Mekanik özelliklerden önemli bir değişme olmaz. Fakat elektrik iletkenliği önemli ölçüde artar.

Dislokasyonların düzenlenmesi ile oluşan "Alt taneler"



Yeniden kristalleşme

- Sıcaklığın atomsal hareketler için gereken aktivasyonu sağlayacak şekilde olması ile (0.4 < Tb < 0.6) gerçekleşir.
- Artan sıcaklık ile atomlar daha düşük enerjili bölgelere hareket etme imkanı bulur.
- Soğuk ŞD ile oluşan iç yapıda yeni eş eksenli ve iç gerilmesiz küçük tanelerin çekirdeklenip büyümesi ile bütün yapı küçük yeni taneler ile kaplanır.

Yeniden kristalleşme sıcaklığı: Malzemenin en az yarısının 1 saat içinde Y.K.si için gereken sıcaklıktır.

–Soğuk Ş.D. miktarı (%S. İş.) arttıkça yeniden kristalleşme ile oluşan tane boyutu küçülür.

–Soğuk Ş.D. miktarı (%S. İş.) arttıkça yeniden kristalleşme sıcaklığı azalır.

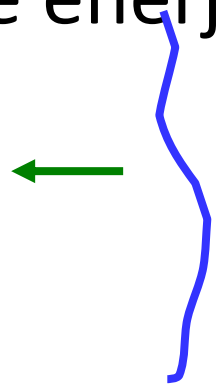
- Bunun sebebi; YK için gereken enerjinin bir bölümünün depolanan mekanik enerji tarafından sağlanmasıdır. Dolayısıyla ısıl enerji katkısı böylece azalır, YK daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşebilir.
- YK nın gerçekleşebilmesi için malzeme kesitinde mutlaka soğuk şekil değiştirmenin bulunması gerekir (%5-10).

Yeniden kristalleşme

Zorlanmış-gerilmiş taneler-> Gerilimsiz taneler

Proses için itici güç =

Depolanmış dislokasyon şekil değiştirme enerjisi



Yeniden kristalleşme sıcaklığı:

Bir saatte soğuk şekillendirilmiş malzemenin %50'sinin yeniden kristalleştiği sıcaklık

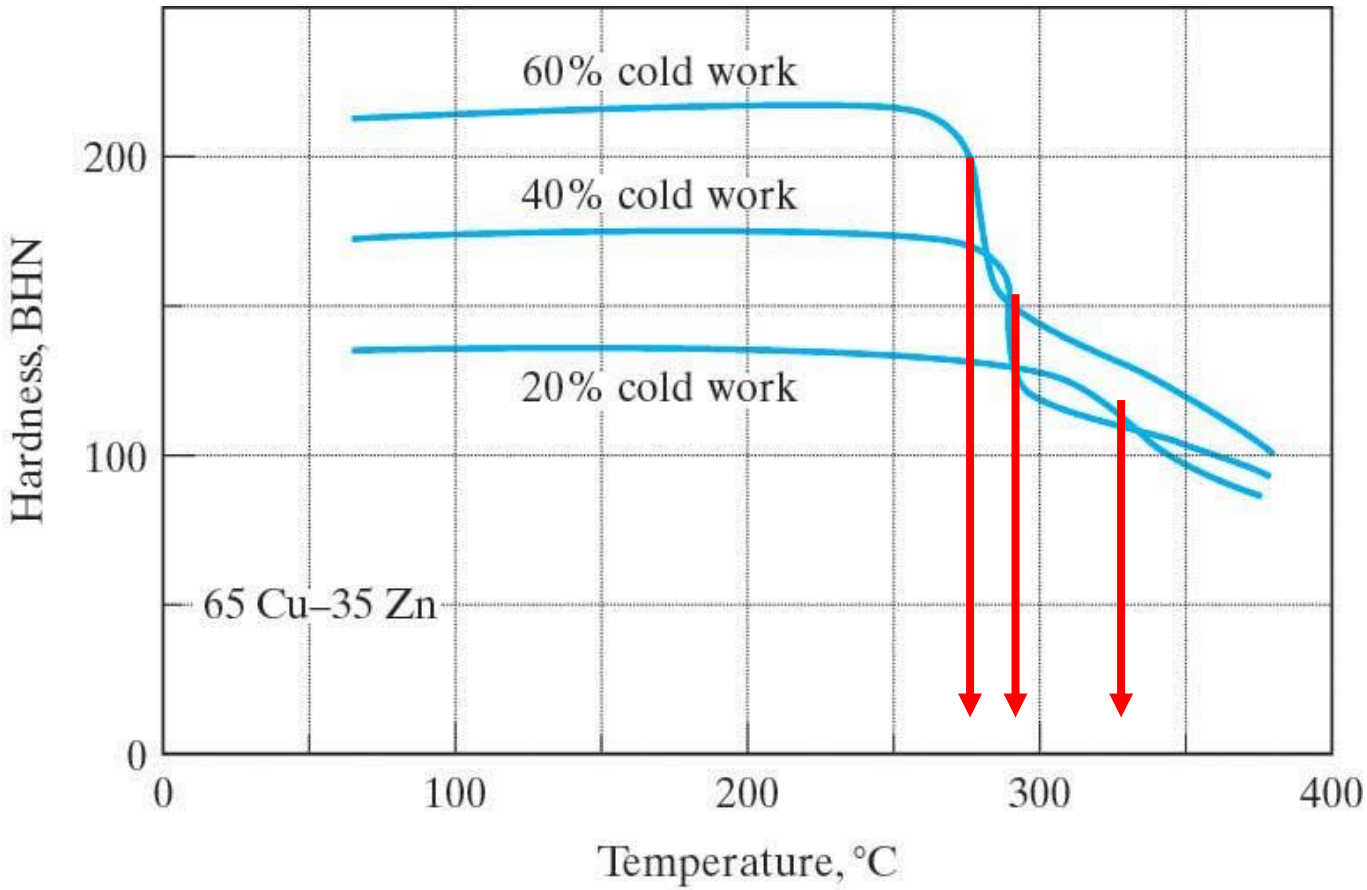
Genel olarak 0.4 T_m (K) civarı

Yeniden kristalleşme sıcaklığını etkileyen faktörler:

1. Soğuk işlem derecesi
2. Başlangıç tane boyutu
3. Soğuk işlem sıcaklığı
4. Metalin saflığı veya bileşimi

Çözünen faz (Drag) etkisi

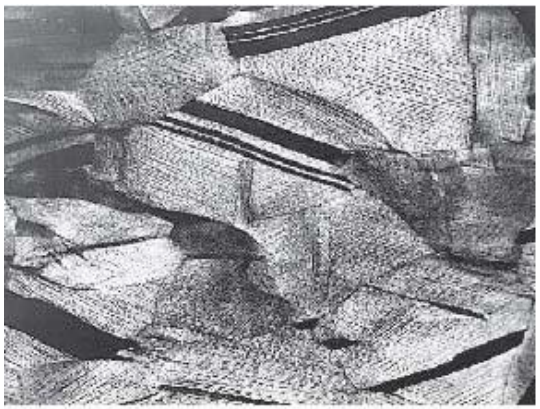
İkinci faz partiküllerinin engelleme (pinning) etkisi


60% cold work
40% cold work
20% cold work
65 Cu–35 Zn
Hardness, BHN
200
100
0
0
100
200
300
400
Temperature, °C

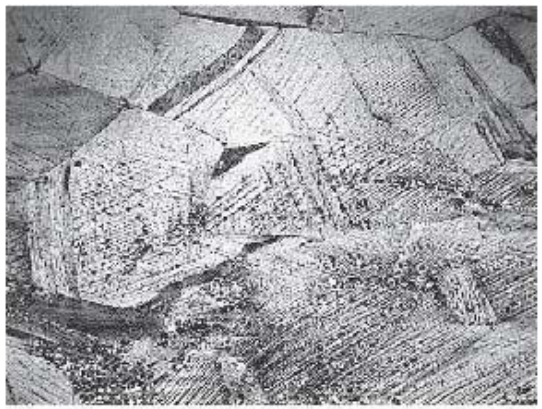
Tane büyümesi

- Yeniden kristalleşme ile oluşan ve soğuk Ş.D. ye nazaran daha kararlı (düşük enerjili) iç yapının, yüksek sıcaklıkta tutulmaya devam etmesi tanelerde zamanla büyümesine denir.

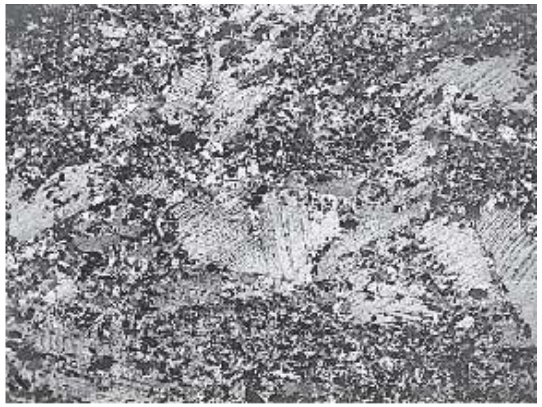
- *Tane büyümesine sebep olan itici güç*: yüksek enerji bölgeleri olan *tane sınırlarının azaltılıp iç enerjini düşürülmesi eğilimidir*. Malzeme sonuçta sadece bir büyük tane şeklinde olup min enerjiye sahip olmak eğilimi gösterir.



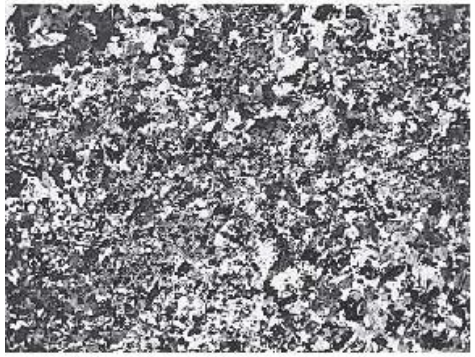
(a)



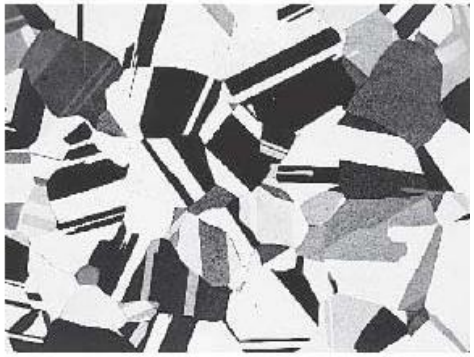
(b)



(c)



(d)



(e)

Prinçte; (a) soğuk ş.d. Yapı, (b) yeni tanelerin görülmesi, (c) yeni tanelerin oluşumu, (d) Y.K tamamlanması, (e) Tane büyümesi

Tane büyümesi

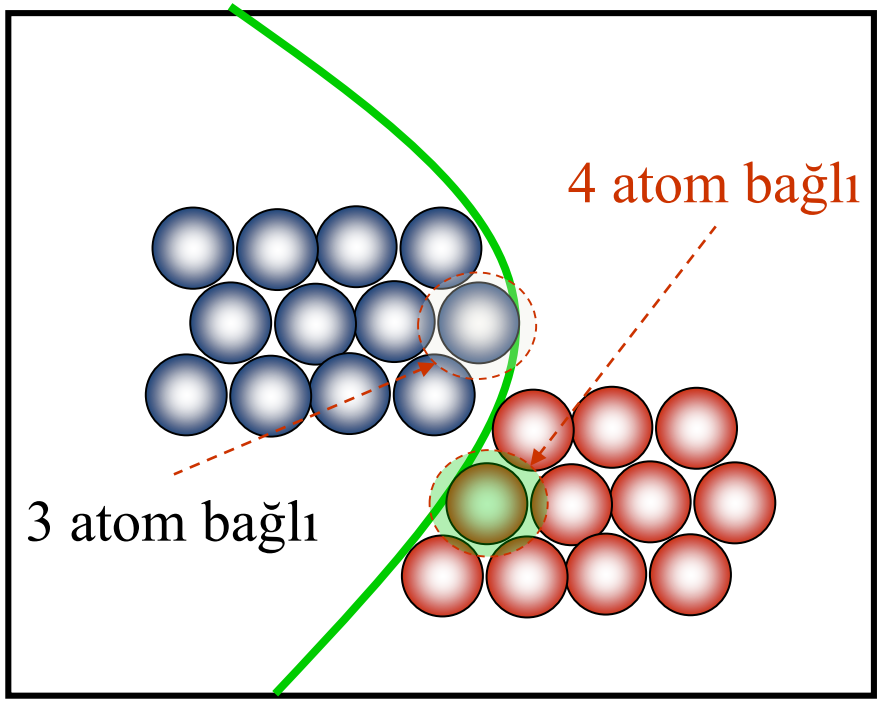
Yeniden kristallenme sonrası ortalama tane boyutu büyür.

İtici güç → tane sınır enerjisinde azalma

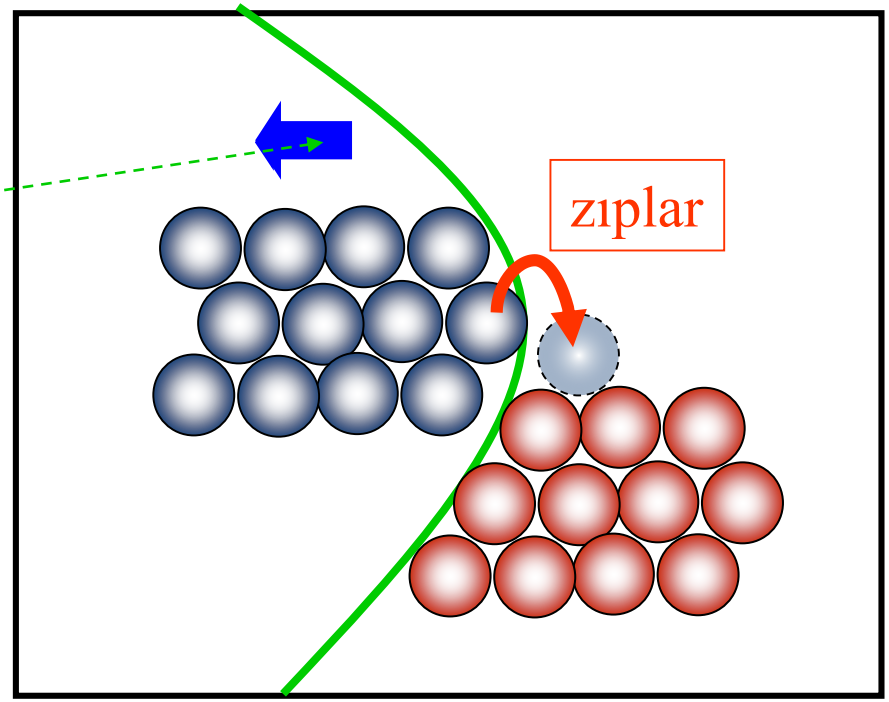
Empüriteler işlemi geciktirir.

Tane büyümesi

- Genel etki
  - Tane sınır enerjisinde azalma
- Lokal etki
  - bağ sayısı artışı *(koordinasyon sayısı artışı)*



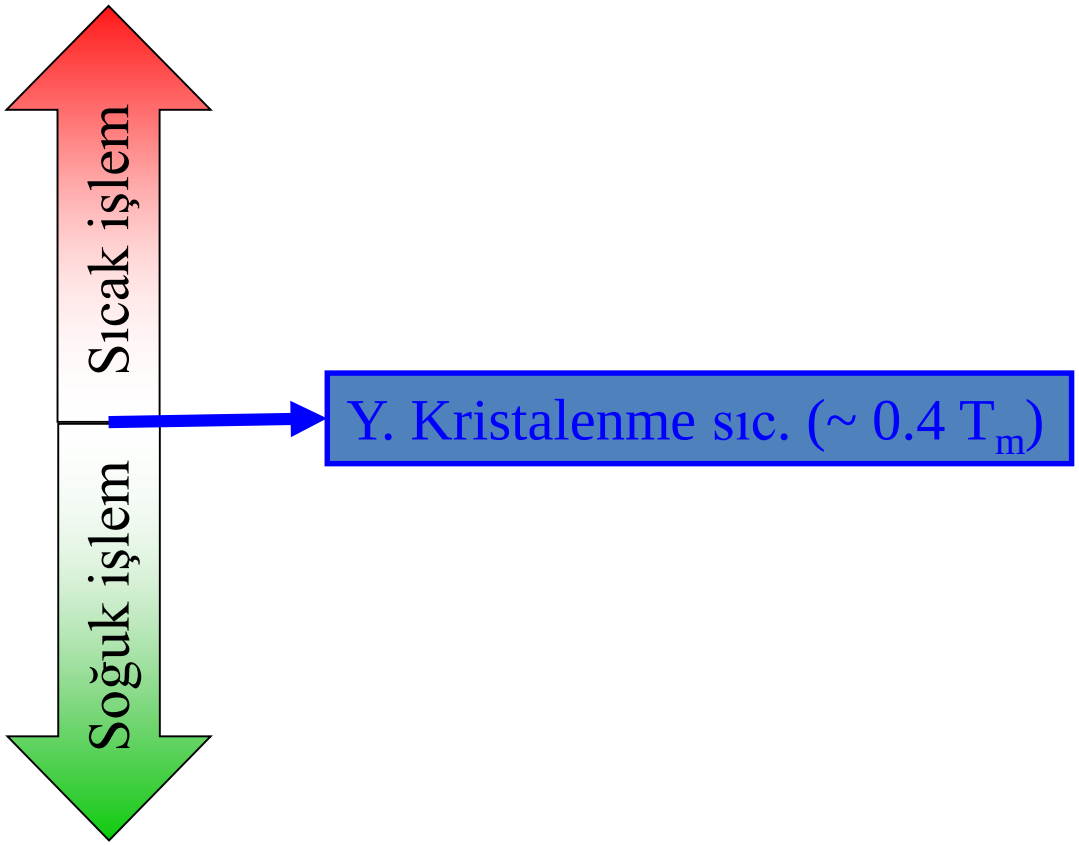
Tane sınır göçü doğrultusu

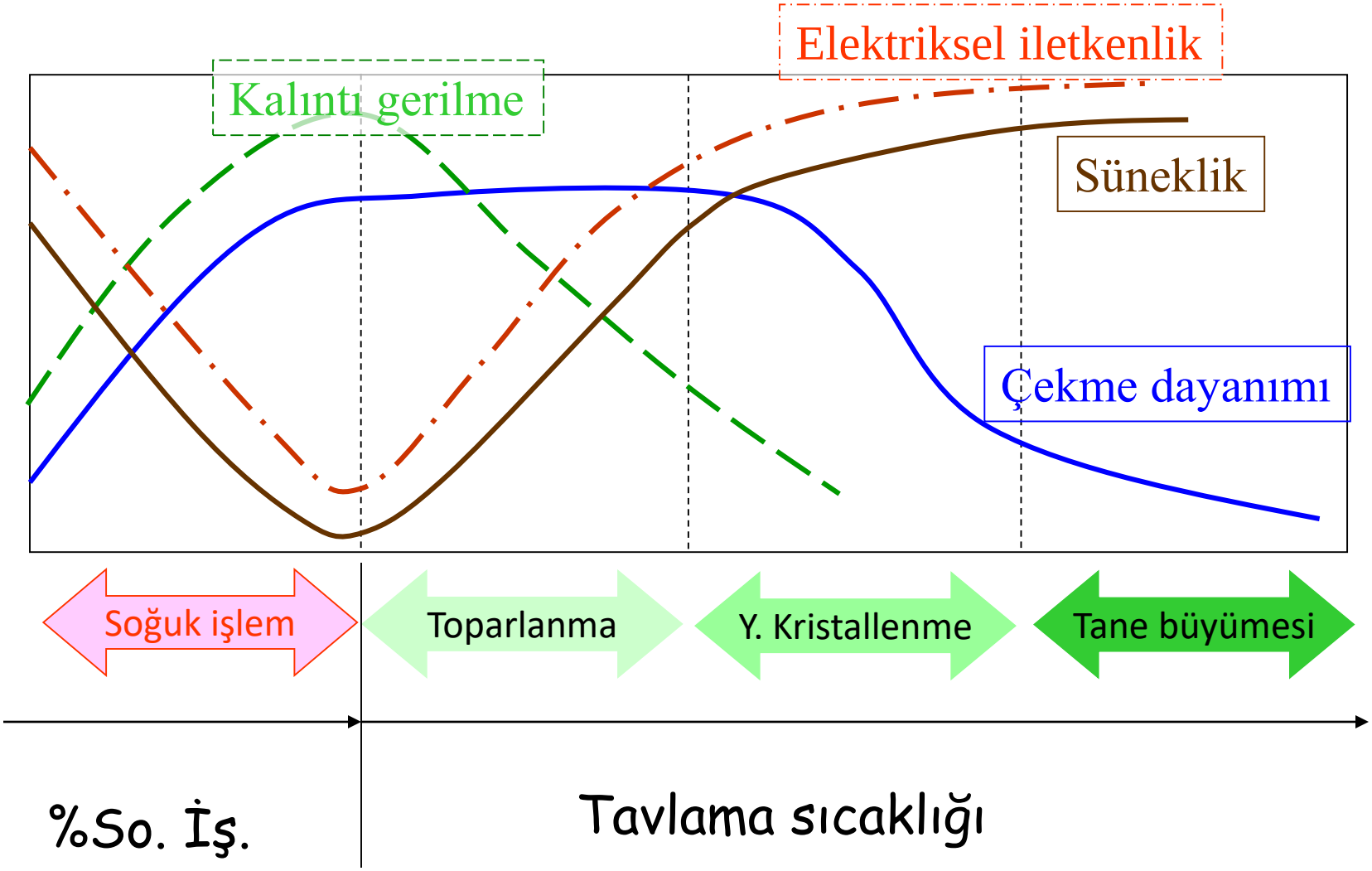


Sınır, eğrilik merkezine doğru hareket eder

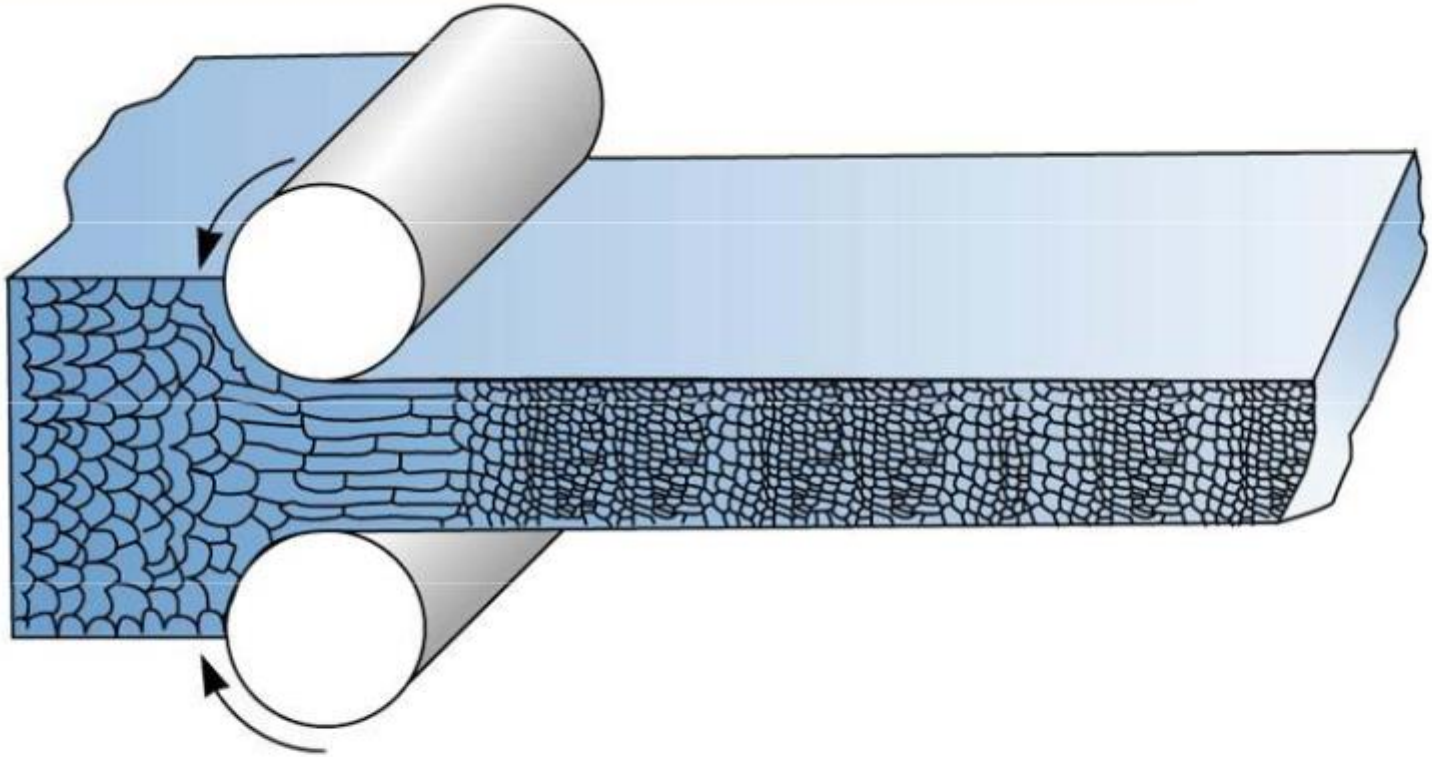
Sıcak ve soğuk işlem

- Sıcak işlem ⇨ Plastik deformasyon $T_{yen.\ kris.}$ ↑
- Soğuk işlem ⇨ Plastik deformasyon $T_{yen.\ kris.}$ ↓



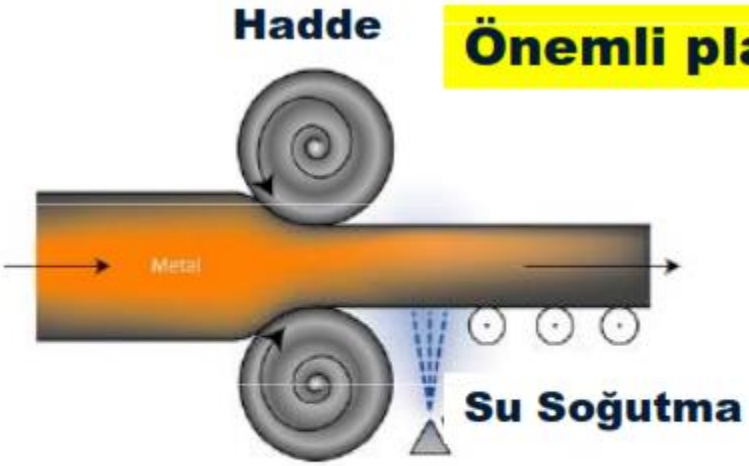

Elektriksel iletkenlik
Kalıntı gerilme
Süneklik
Çekme dayanımı
Soğuk işlem
Toparlanma
Y. Kristallenme
Tane büyümesi
%So. İş.
Tavlama sıcaklığı

Yeniden Kristalleşmenin Pratik Uygulamaları

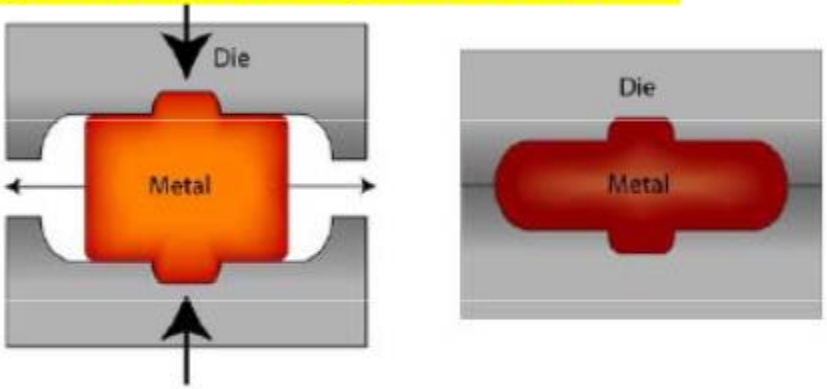


Sıcak işlem esnasında anizotropik olarak uzayan taneler hemen yeniden kristalleşirler. Sıcak işlem sıcaklığı kontrol altında tutulur ve son haddelemeden sonra tekrarlı yeniden kristalleşmeden dolayı çok ince taneler elde edilir.

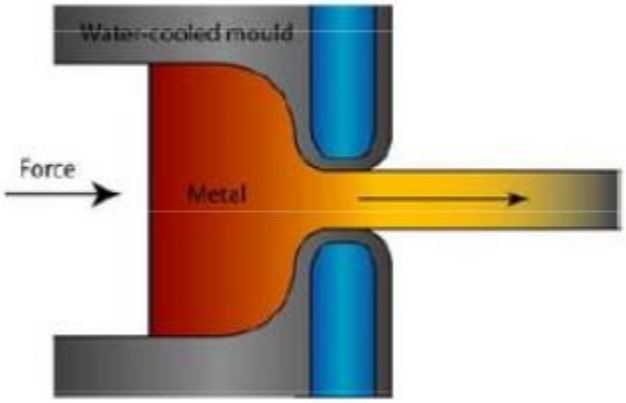
Önemli plastik şekil verme yöntemleri



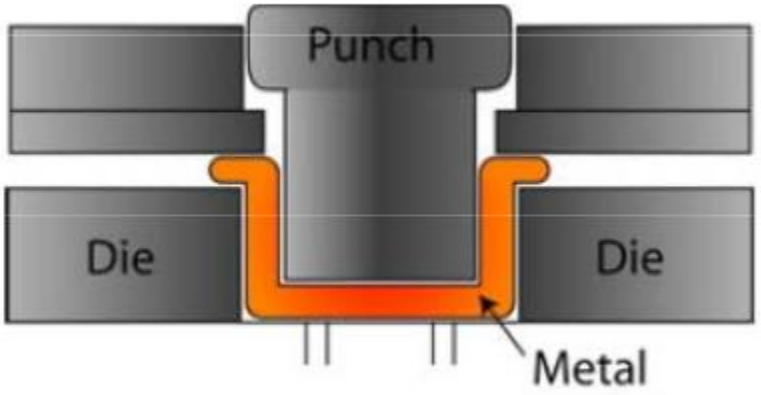
Haddeleme



Dövme

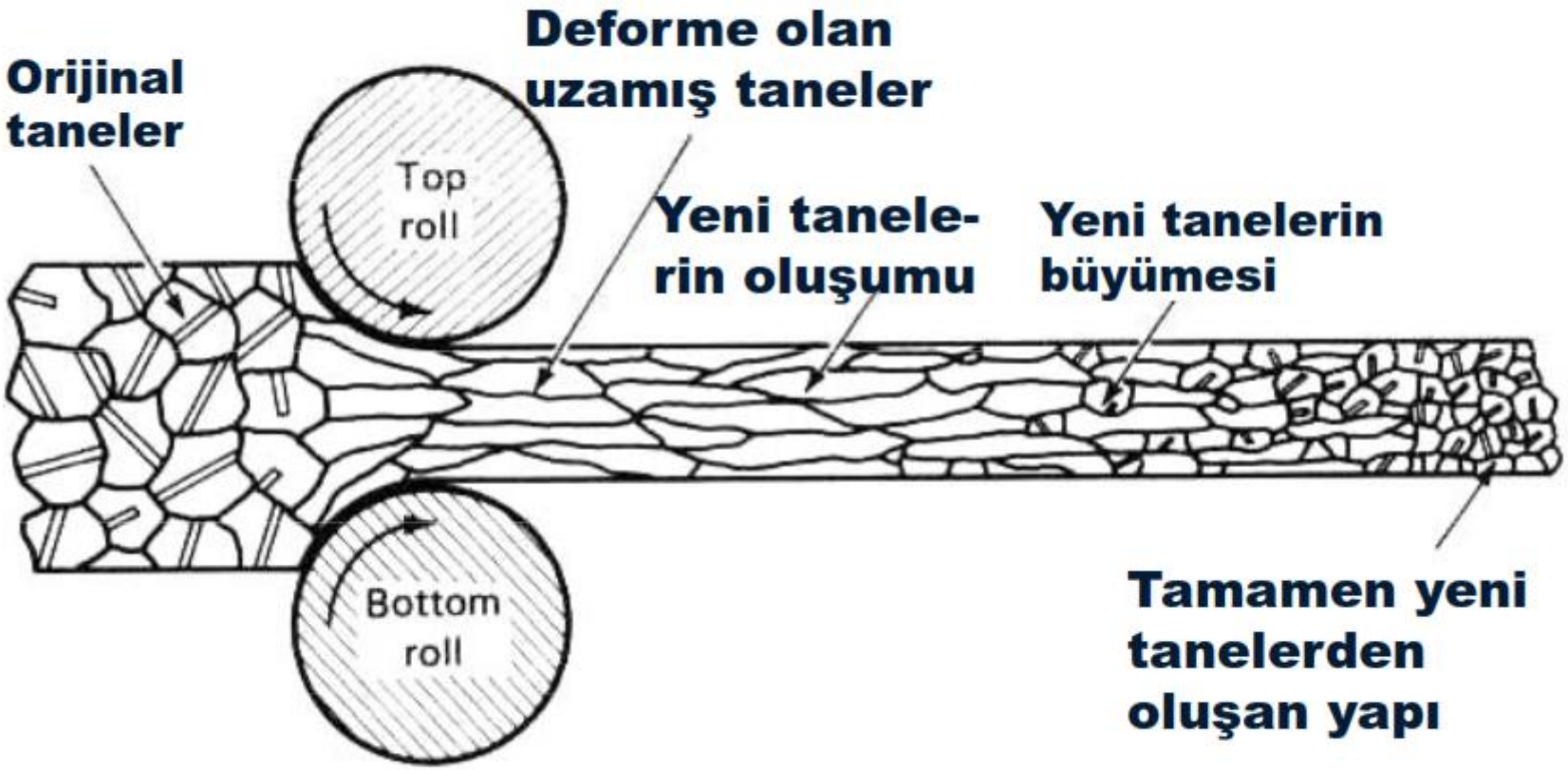


Ekstrüzyon



Derin çekme

Sıcak Işlem



Şekil. Sıcak haddeleme sırasında yeniden kristalleşme.

Tekstür

Yüksek miktarda deformasyon uygulandığında, birbirinden bağımsız taneler deformasyon yönünde tercihli bir kristallografik oryantasyon verir.

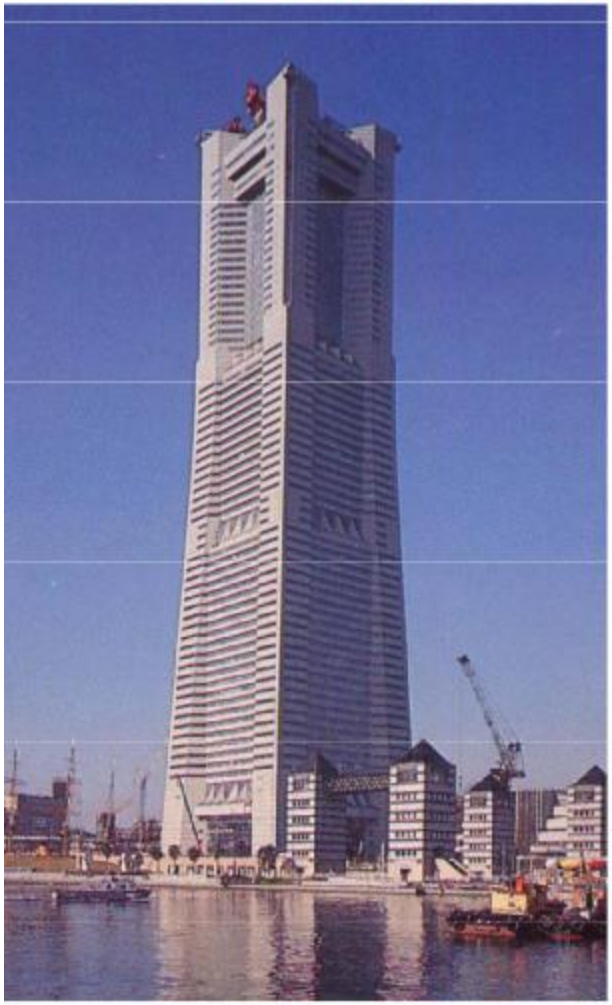
Taneler arasındaki bu tercihli yönlenme, deformasyon tekstürü olarak bilinir.

Deformasyon tekstürü içeren bir metal tavlandığında, tercihli büyüme olur

Yeniden kristalleşme tekstürü veya tavlama tekstürü olarak adlandırılan yapı oluşur.

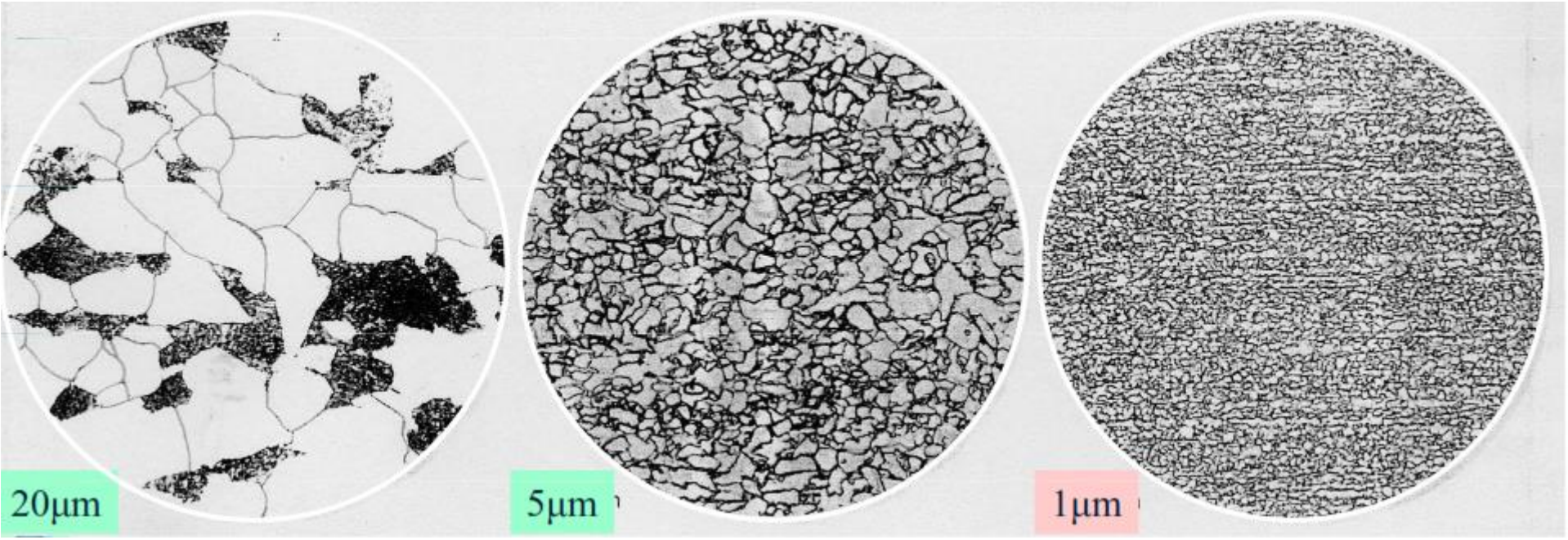
İnce Taneli Çelik Üretimi

Termo mekanik kontrollü (TMCP) çeliklerinin uygulanması



TMCP (Thermo Mechanical Conrolled Steels

TMPC çeliklerinde tane boyutunun tekrarlı yeniden kristalleşme ile mikrometre altına bile indirilebilir.. Böylece çok yüksek mukavemetli ve tokluğu yüksek çelikler elde edilir.



Geleneksel Haddeleme → TMCP → UİT (ultra ince tane)

ÇÖKELME SERTLEŞMESİ

Çökelme sertleşmesi

- İç yapıda, dislokasyon hareketlerini engelleyerek dayanımın artmasına sebep olan çok küçük ve sert ikinci fazların çökeltilmesi işlemidir.

Çökelme Sertleşmesi Oluşum Şartları

1. Sistem karışabilirlik aralığı içermeli
2. Alaşım denge diyagramı solvüs eğrisi içermeli
3. Yüksek sıcaklıkta yüksek, düşük sıcaklıkta düşük çözünürlük olmalı
4. Çözen ve çözünenin atom çapları yakın olmalı
5. Çözen ve çözünenin kristal sistemleri benzer olmalı

İlk iki şart mutlaka olmalı,

Diğer şartlar çökelme serleşmesinin etkisini arttırır

Çökeltme sertleşmesinde adımlar

1. Çözeltiye alma işlemi (solution treatment): Malzeme tek faz bölgesine ısıtılarak çökelecek olan sert 2. faz, tek faz içerisinde tamamen çözülür.
2. Ani soğutma (Su verme, Quenching): Oda sıcaklığına ani soğutma ile 2. fazın çökelmesi engellenir ve aşırı doymuş katı çözelti elde edilir.
3. Yaşlandırma işleminde; aşırı doymuş katı çözelti, çözündürme sıcaklığından daha düşük olan yaşlandırma sıcaklığına tekrar ısıtılarak çok küçük bağdaşık veya uyumlu (koherent) 2. faz tanecikleri çökeltilir. (Bu çökeltiler dislokasyonlara engel teşkil ederek malzemenin dayanımını arttırır).

- Aşırı yaşlanma: çökelmelerin çok büyüyerek bağdaşıklığın (koherentliğin) kaybolması (bu durum istenmez).

Çökelme İşlem Safhaları

- Solvüs eğrisi altına ani olarak soğutma,
- Nisbeten yüksek bir sıcaklıkta yaşlanma ile denge çökeltisi oluşmaya başlar.
- Denge çökeltisinden önce iki yarı kararlı çökelti oluşumu gözlenmiş.
- Al-Cu % 4.5 Cu alaşımı 550 °C' de çözeltiye alınmış, soğutma ve yaşlandırmada

$$\text{GP Zonları} \rightarrow \theta'' \rightarrow \theta' \rightarrow \theta$$

Al-Cu alaşımlarında

GP Zonları → Geçiş Çökeltileri → Dengesel Çökelti

Alaşımlarda Genel

θ" Çökeltisi: Isıtma ile GP zonları çözünmeye başlar ve II. çökelti θ" oluşmaya başlar.

θ′ Çökeltisi: Optik mikroskopta gözlenebilecek belki de ilk çökelti.

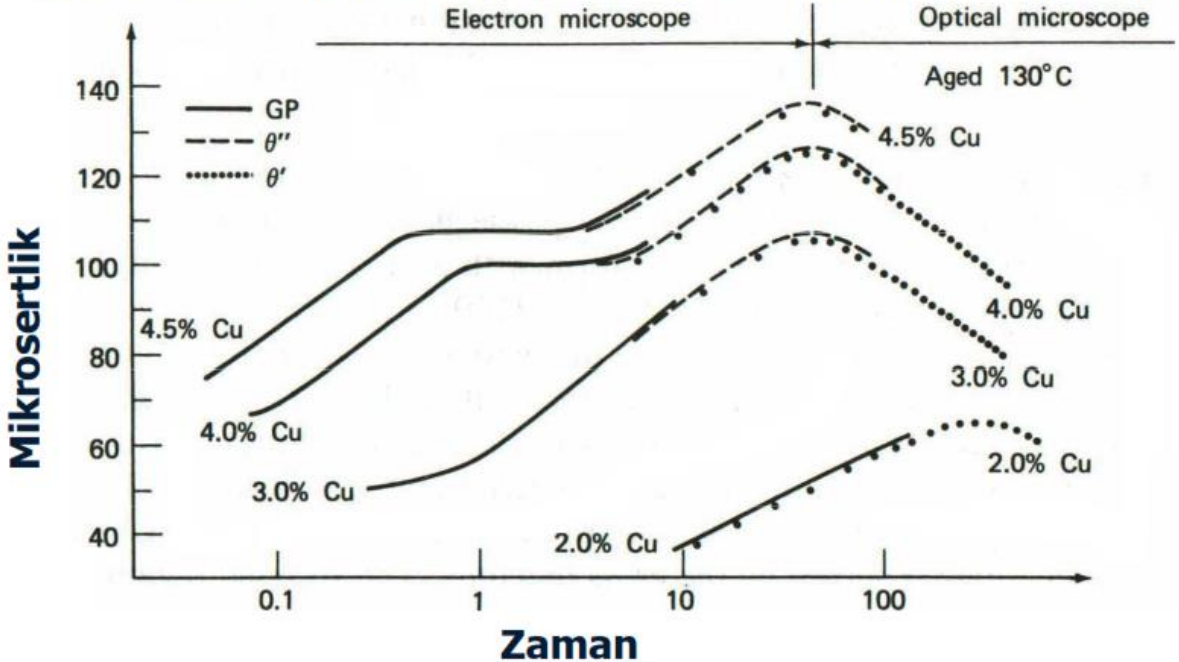
Boyutu = 1000 A° civarı a = b = 4.04 A° ve c = 5.8 A° (tetragonal faz)

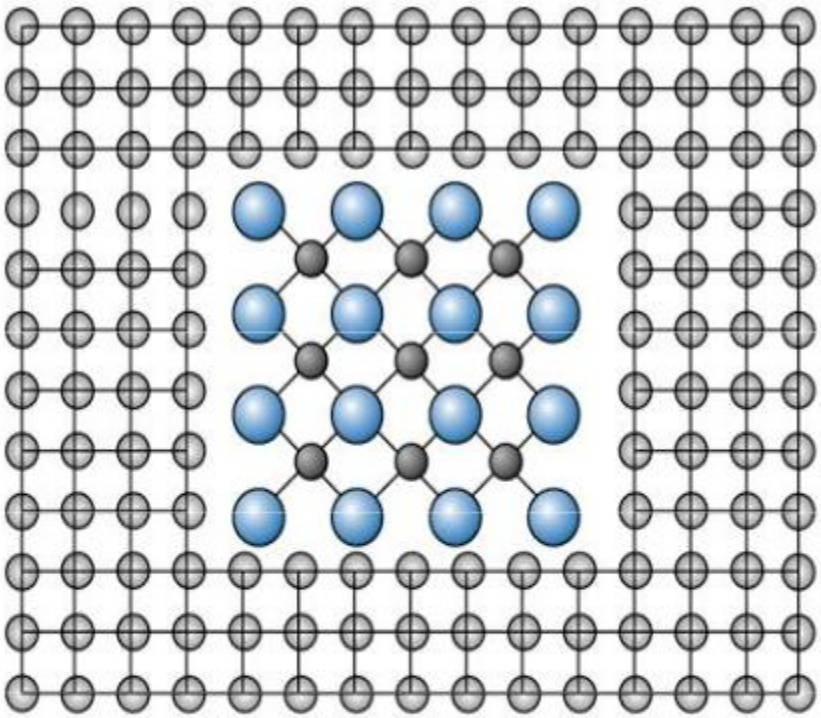
Üçüncü sırada çökelen faz. Kristallografik ilişki {100} θ ||{100}matriks

θ Çökeltisi: Denge çökeltisi, a = 6.06 A° ve c = 4.87 A° (tetragonal)

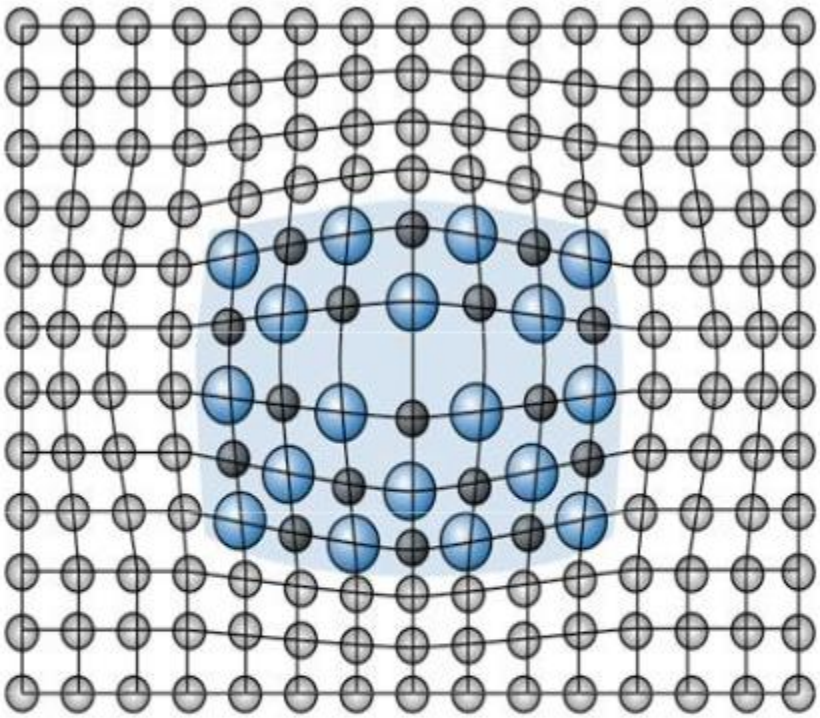
Çözen ve çözünen atom boyut farkları yaklaşık % 12′ den daha küçük ise,

Dengesel çökeltinin kristal yapısı basit ise GP zonu gözlenebilmekte.





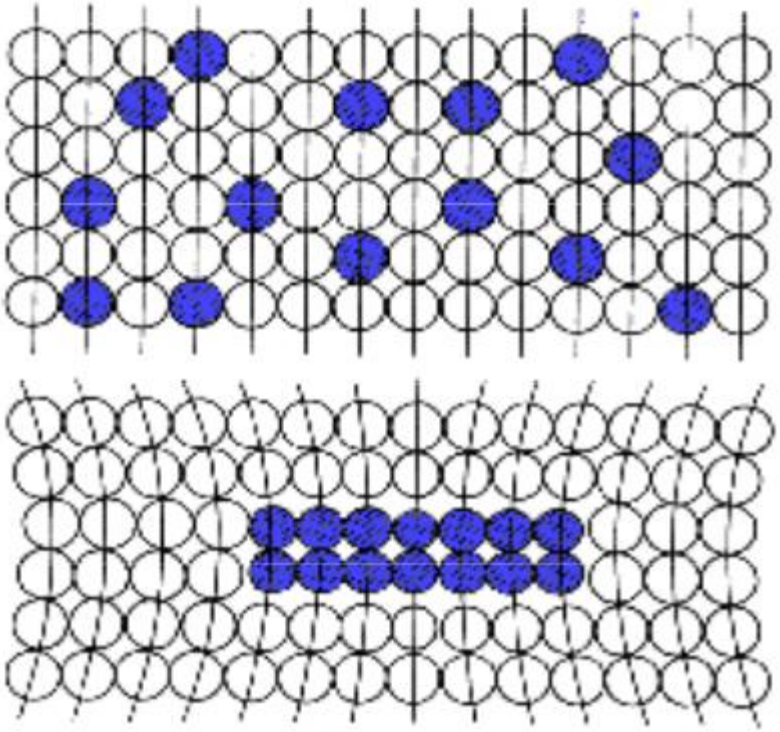
a)



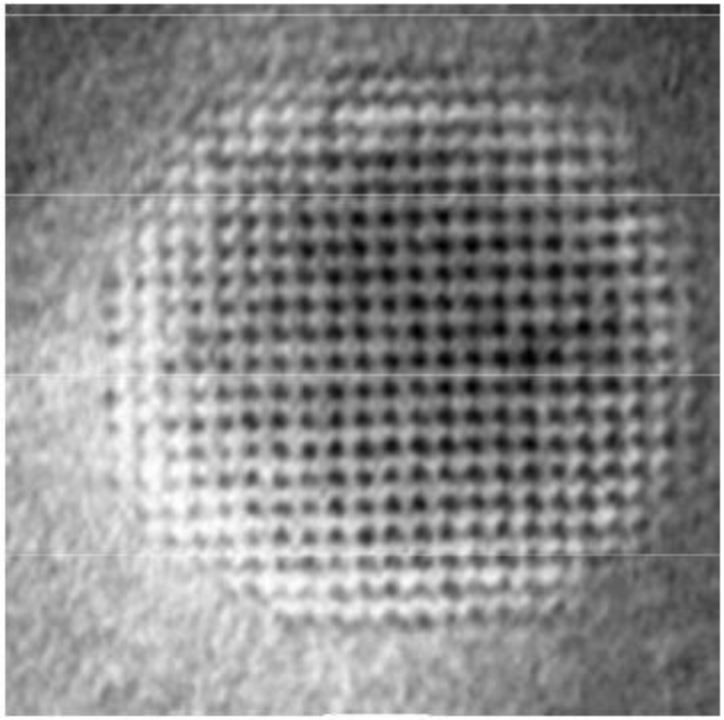
b)

Şekil. a) Ana faz ile uyumsuz bir çökelti, b) Latis parametresi matriksten büyük bir uyumlu çökelti ve

Uyumlu çökeltiler etrafında meydana gelen deformasyon alanı mukavemetin daha da artmasına sebebiyet verir.

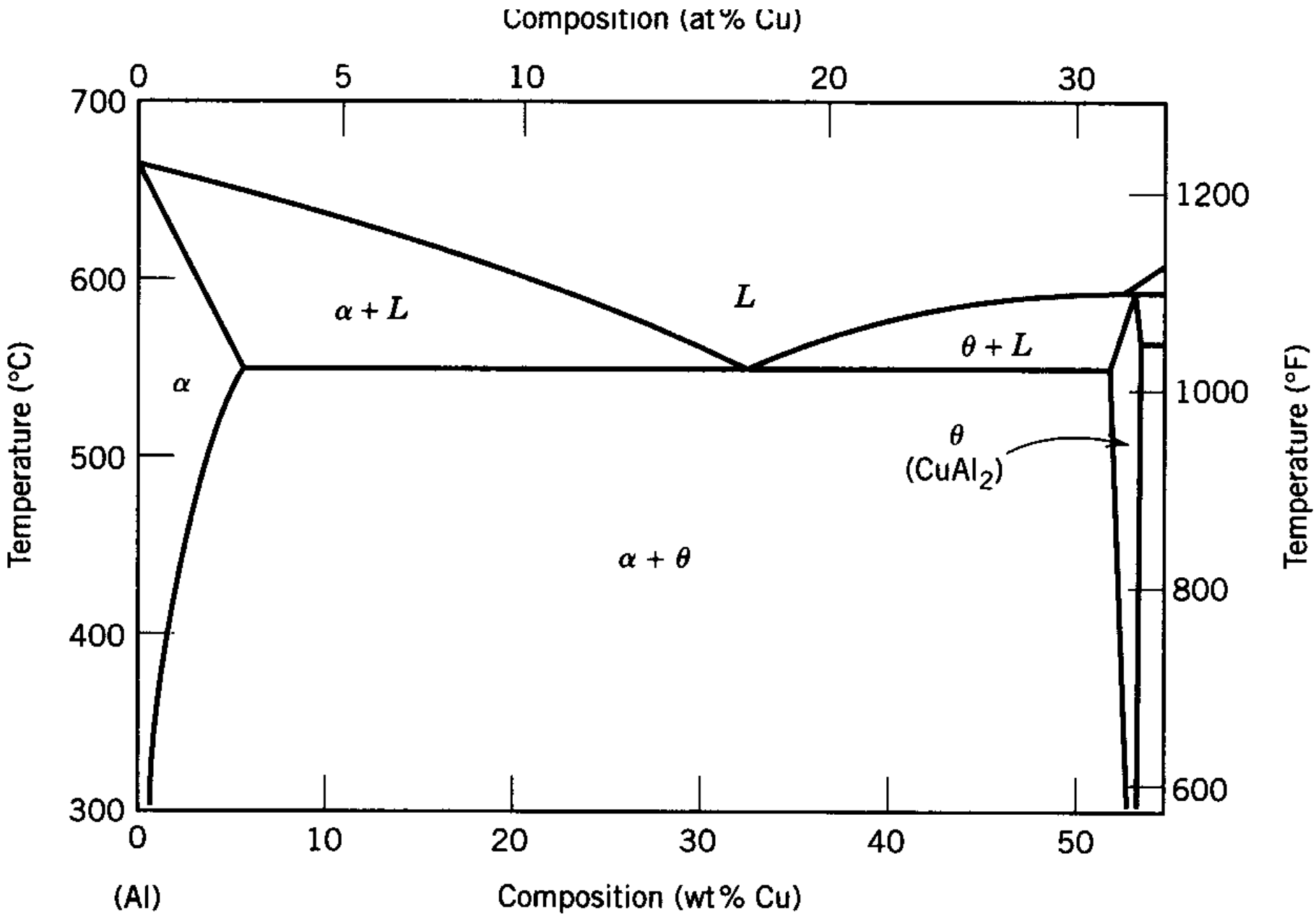


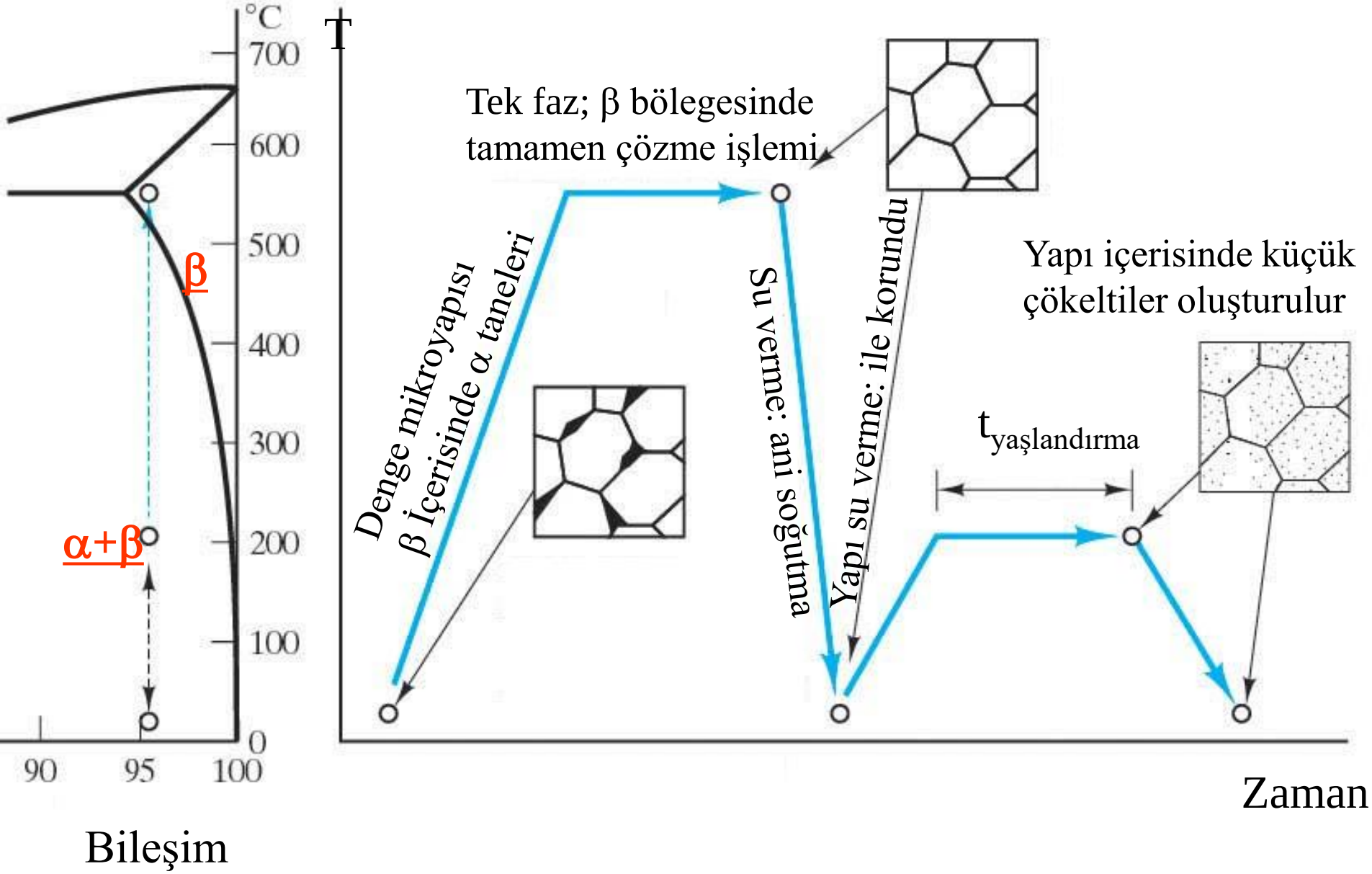
a)

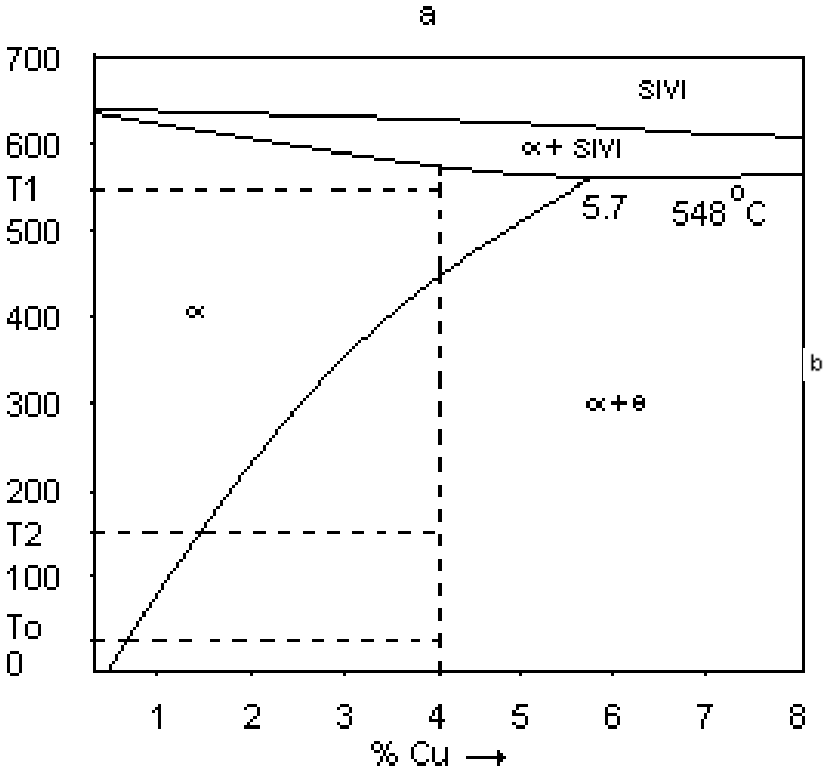


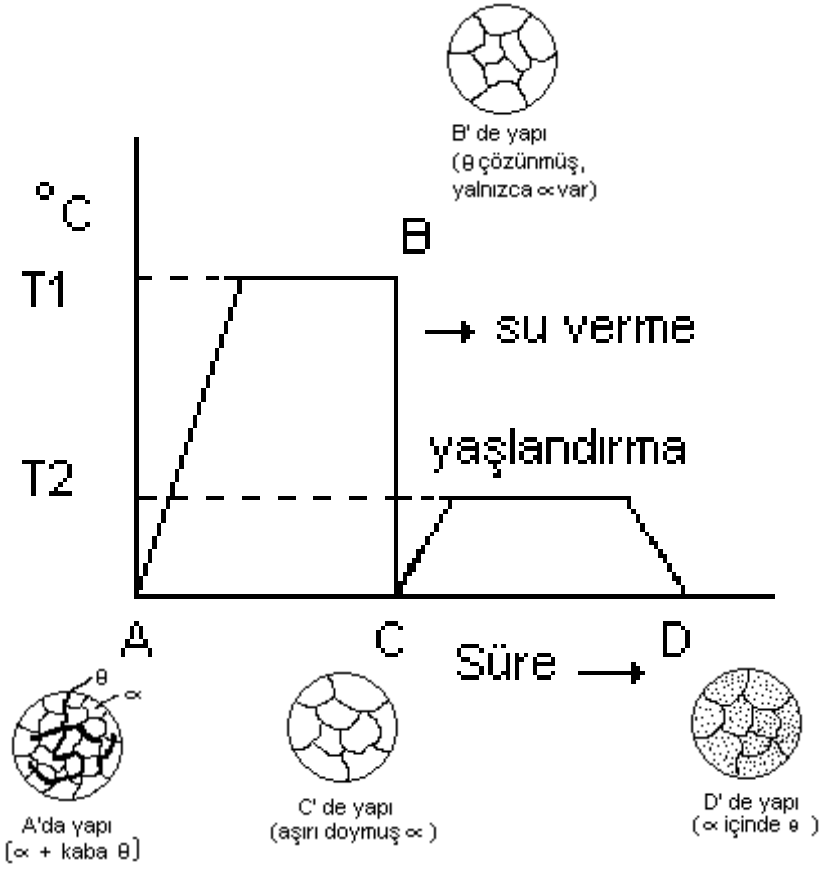
b)

Şekil. a) Latis parametresi matriksten küçük bir uyumlu çökelti. b) Bir Al alaşımında çökelen 8 nm çapında çökelti partikülünün yüksek çözünürlüklü TEM yapısı. Alaşım Al - % 0.3 Sc alaşımıdır ve 300 °C de 350 saat yaşlandırılmıştır.


Composition (at% Cu)
0
5
10
20
30
700
600
500
400
300
Temperature (°C)
1200
1000
800
600
Temperature (°F)
α + L
L
θ + L
α
θ
(CuAl2)
α + θ
0
10
20
30
40
50
(Al)
Composition (wt% Cu)


°C
700
600
500
400
300
200
100
0
90
95
100
β
α+β
Bileşim
T
Tek faz; β bölegesinde
tamamen çözme işlemi
Denge mikroyapısı
β İçerisinde α taneleri
Su verme: ani soğutma
Yapı su verme: ile korundu
Yapı içerisinde küçük
çökeltiler oluşturulur
t yaşlandırma
Zaman

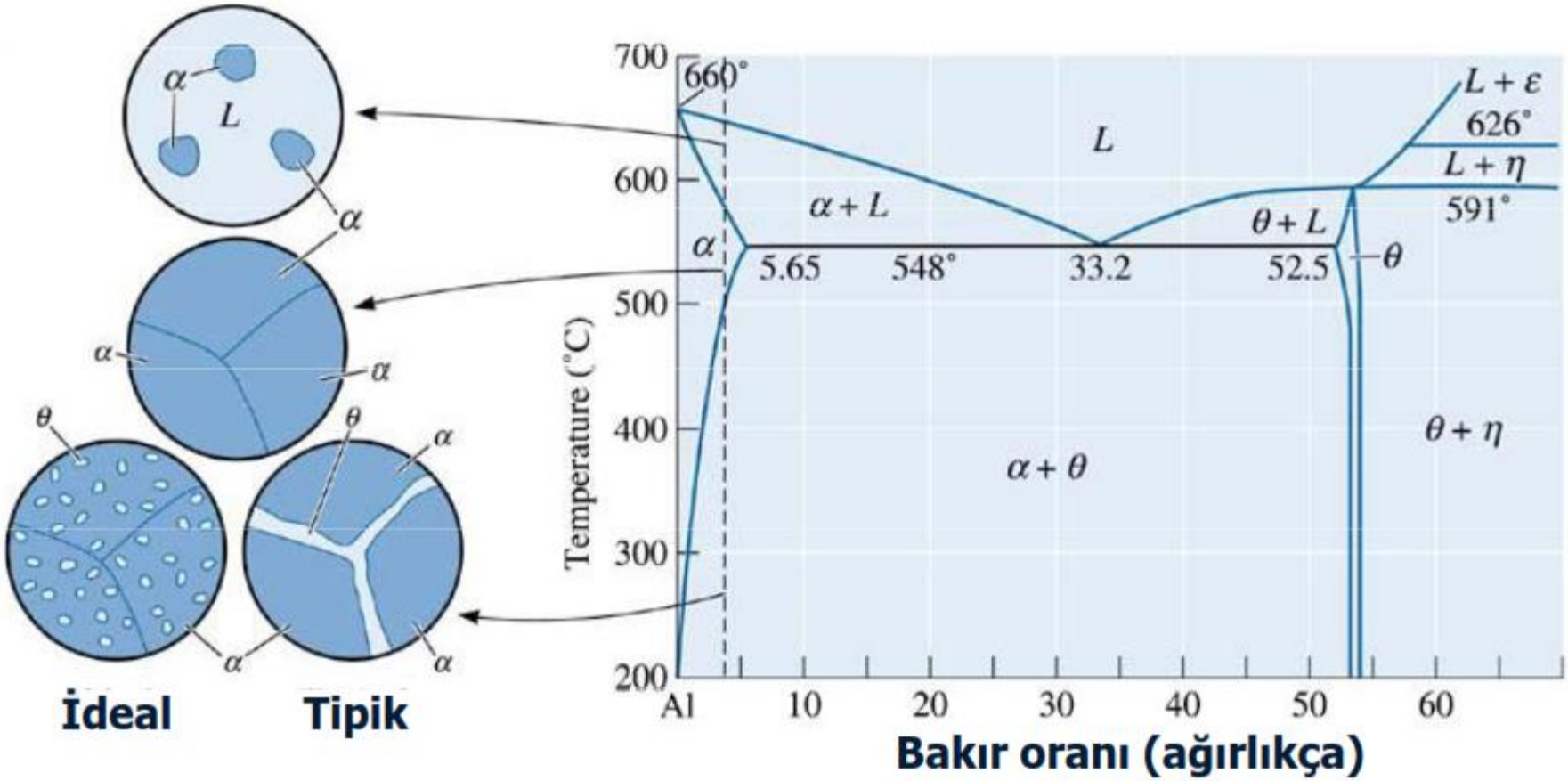




a) Al içinde Cu nun max Çözünürlüğü

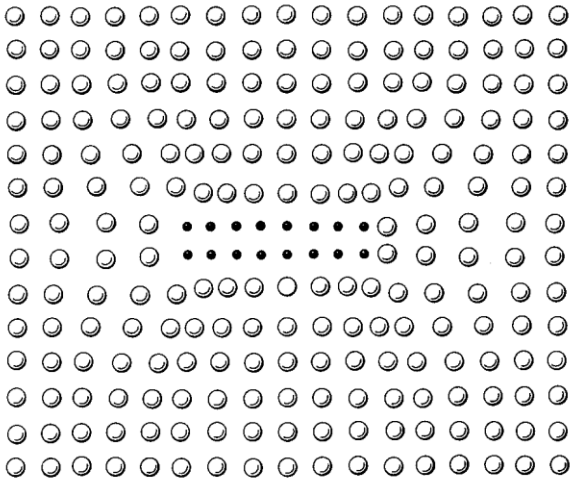
b) % 0.4 Cu-Al alaşımının yaşlandırma işlemi ve oluşan yapılar

Direkt döküm yapısı yüksek mukavemetli olmaz. Oluşan intermetalik tane sınırlarına birikir (segregasyon)

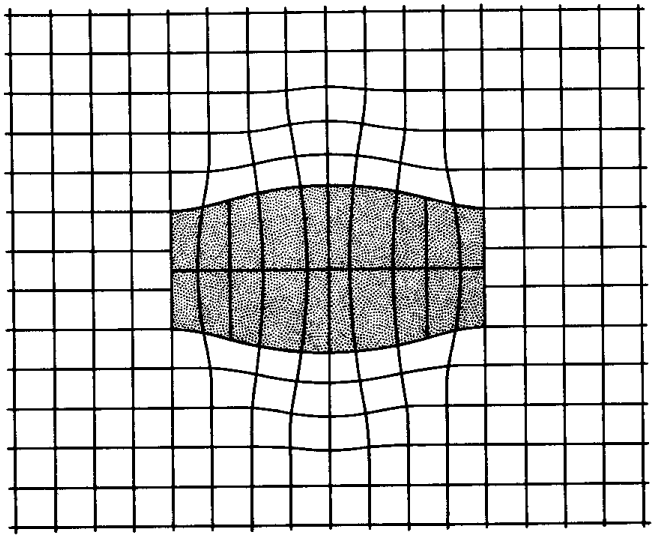


- Yaşlandırma işleminde; yaşlandırma sıcaklığı oda sıcaklığında gerçekleşiyorsa, buna **doğal yaşlandırma** (natural aging), seçilen bir sıcaklıkta fırın içerisinde gerçekleşiyorsa **yapay yaşlandırma** (artificial aging) adı verilir.

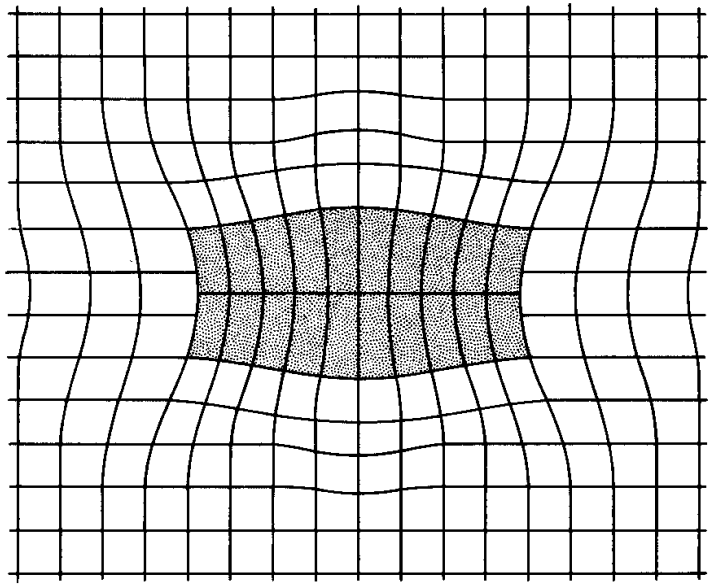
Preston zone

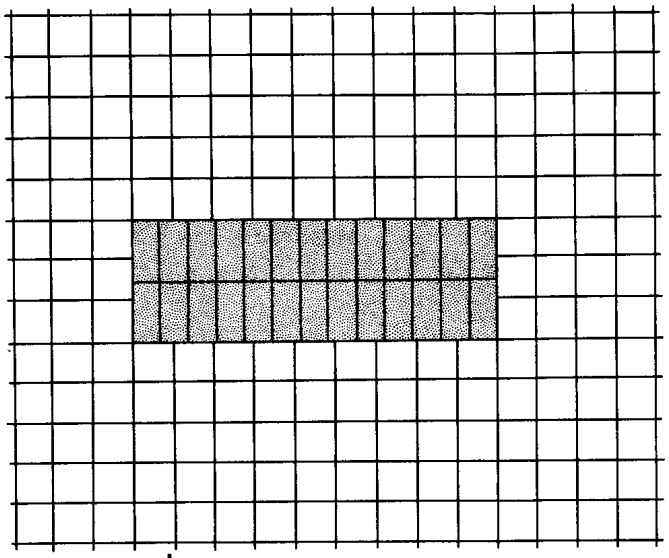


Teta'' phase

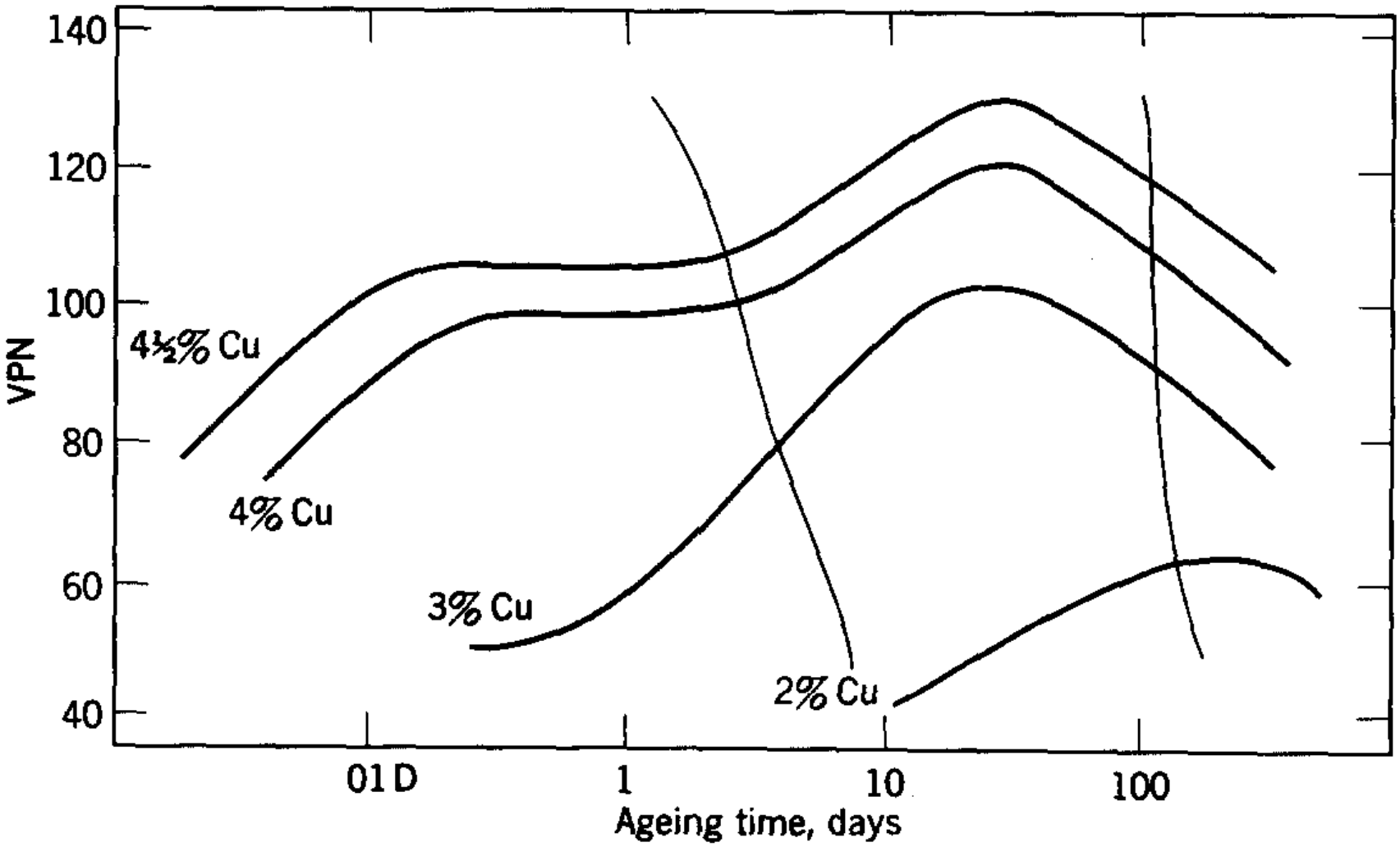


Teta' phase





q phase
(equilibrium)


140
120
100
80
60
40
VPN
4½% Cu
4% Cu
3% Cu
2% Cu
01 D
1
10
100
Ageing time, days

Çökelme ile günümüzde akma mukavemeti 4-5 kat arttırılabilir.

Yüksek mukavemet / ağırlık oranı yanında süneklik değerleri önemli oranda düşmez.

Çökelme Yaşlanmasının Etkisini İncelemek İçin 2024 Alüminyum Alaşımı Verileri:

(% 4.4 Cu, % 1.5 Mg ve % 0.6 Mn kalan Al)

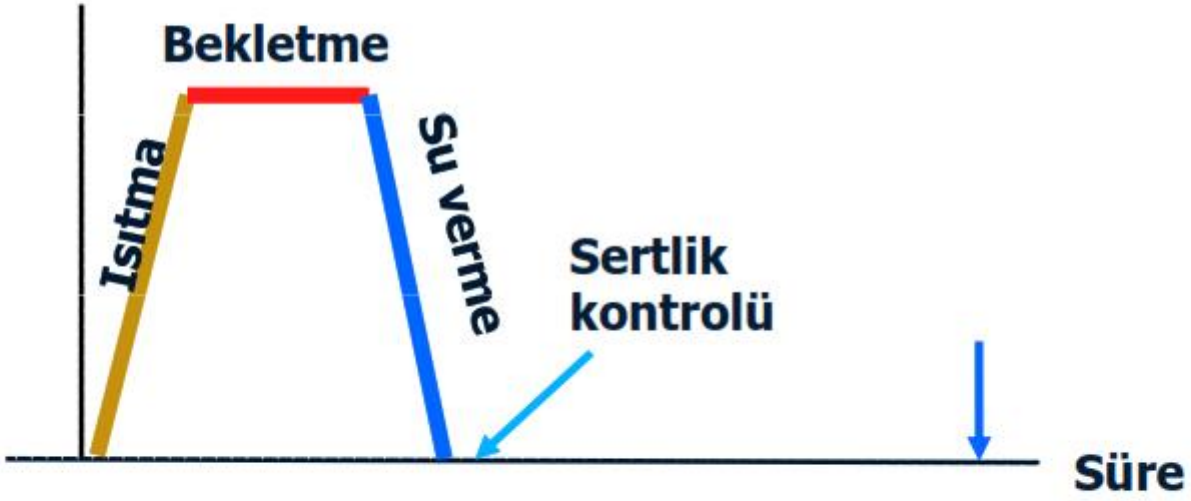
- **Akma Gerilmesi (yaşlanma işlemi olmaksızın) = 138 MPa**
- **Akma Gerilmesi (oda sıcaklığında yaşlanma) = 276 MPa**
- **Akma Gerilmesi (optimum yaşlanma işlemi ile) = 414 MPa**

Alfred Wilm: 1906-1909

Çelikler su vermede sertleşir,

Al alaşımları neden sertleşmesin diye düşünmüş

Wilm, çelik gibi Al-4% Cu alaşımını sertleştirmeye çalışmış, 550ºC ye ısıtma yapmış



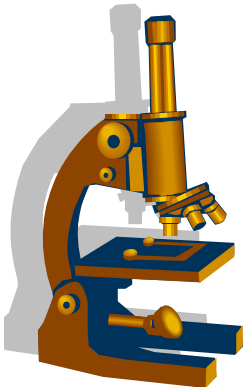
20 yy. ın en önemli teknolojik başarılarından biri

Maalesef! Sertlikte artış yok

Bekletme ile günler sonra sertlik önemli şekilde artmış

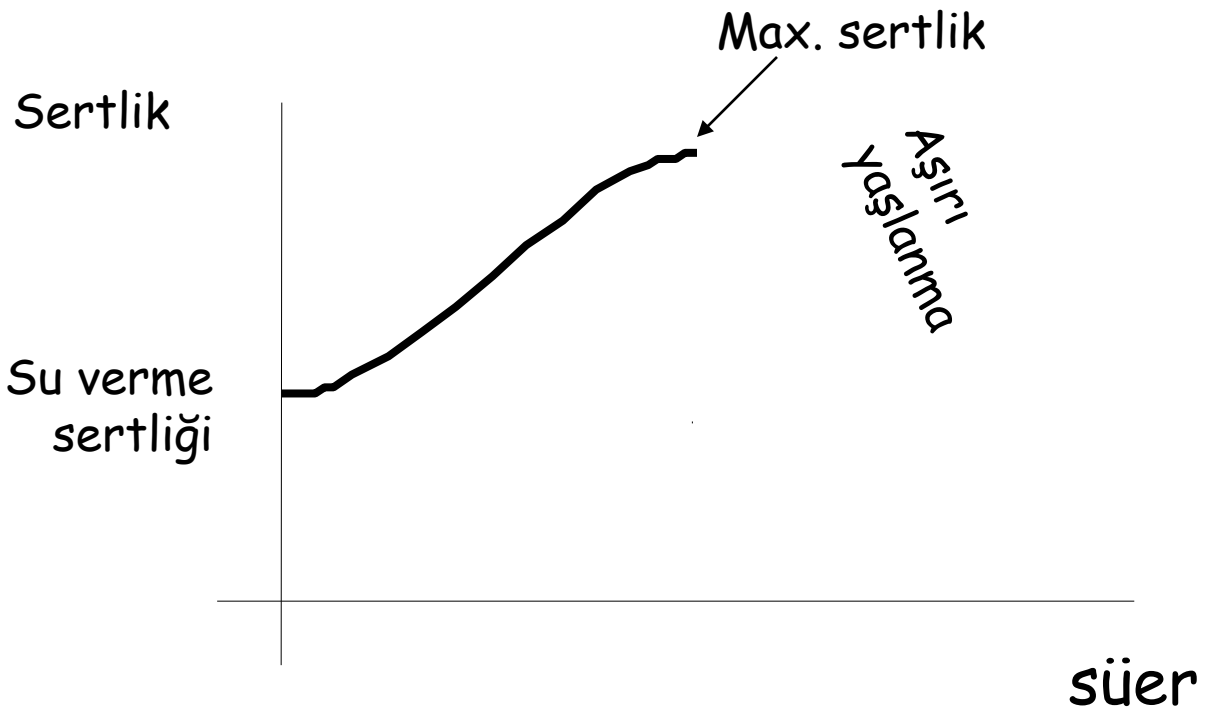
Sertliğin zamanın fonksiyonu olarak artması:
Yaşlanma sertleşmesi

Özellik = *f* (mikroyapı)



Yaşlanmış alaşımın mikroyapısı incelendiğinde,

Sonuç: Mikroyapıda değişim yok!!

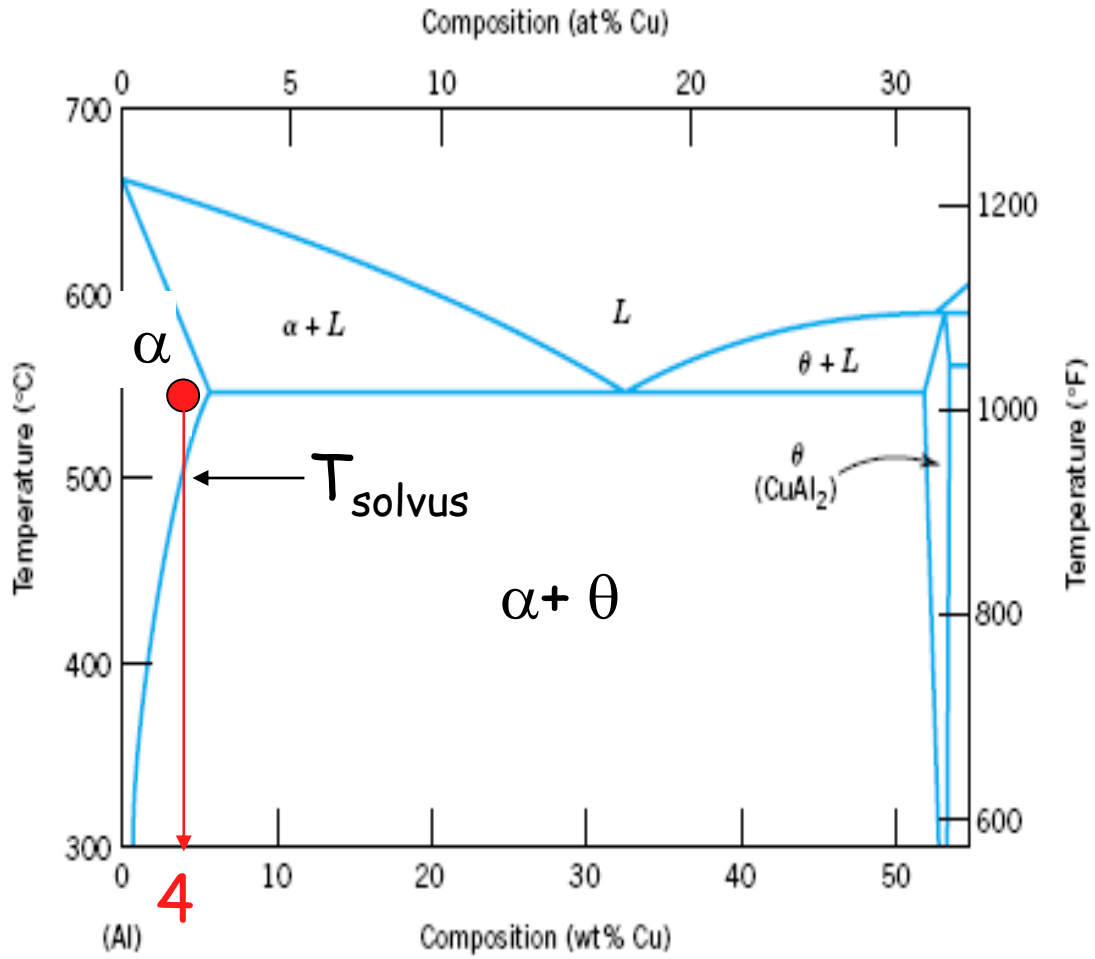


Sertlik ilk olarak artmaya başlar: yaşlandırma sertleşmesi

Maximuma ulaşır

Azalmaya başlar: Aşırı yaşlanma

FIGURE 11.22 The aluminum-rich side of the aluminum–copper phase diagram. (Adapted from J. L. Murray, *International Metals Review*, **30**, 5, 1985. Reprinted by permission of ASM International.)

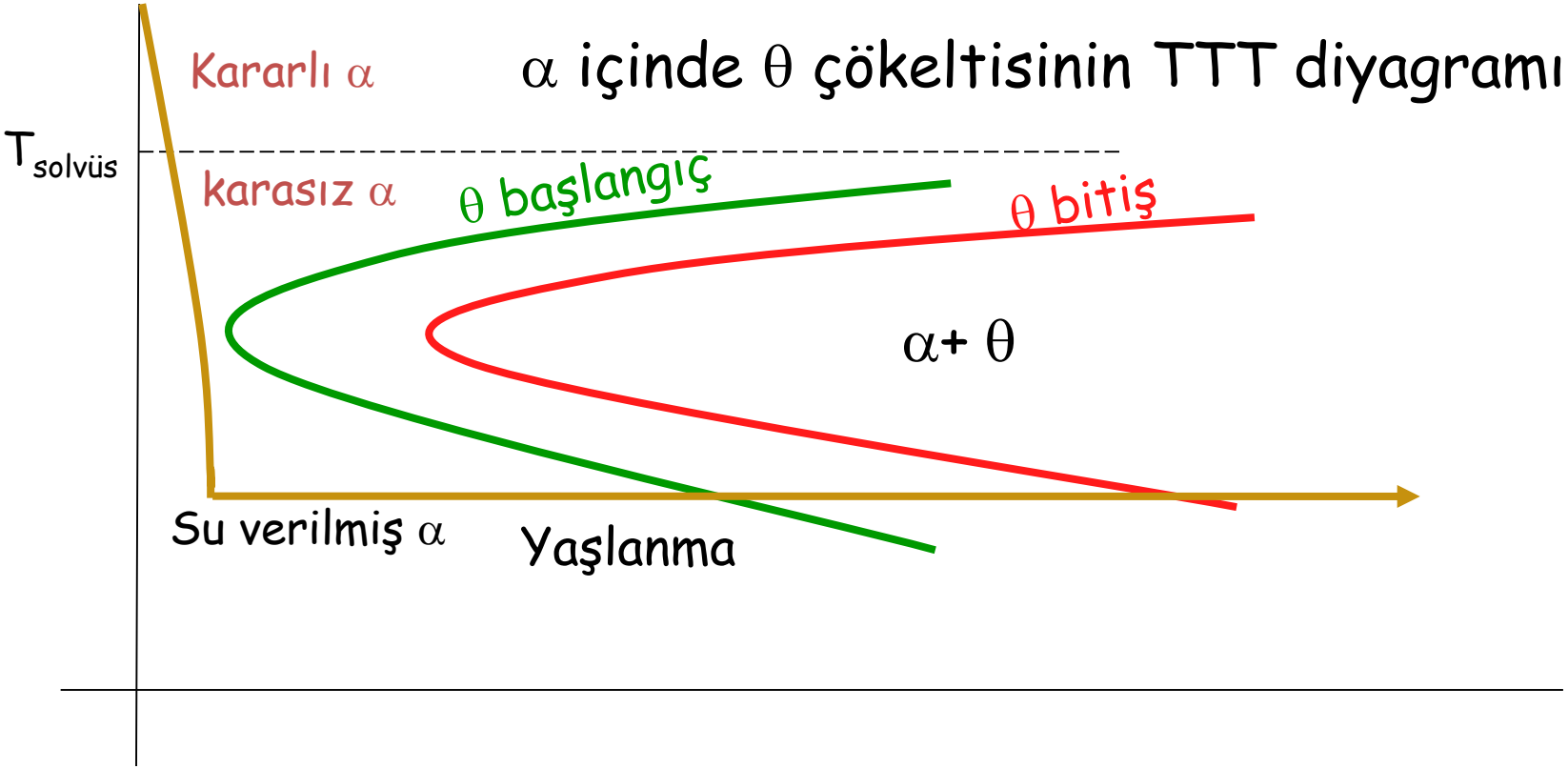


α: YMK Al' de Cu'nun katı çözeltisi

θ: intermetalik bileşik $CuAl_2$

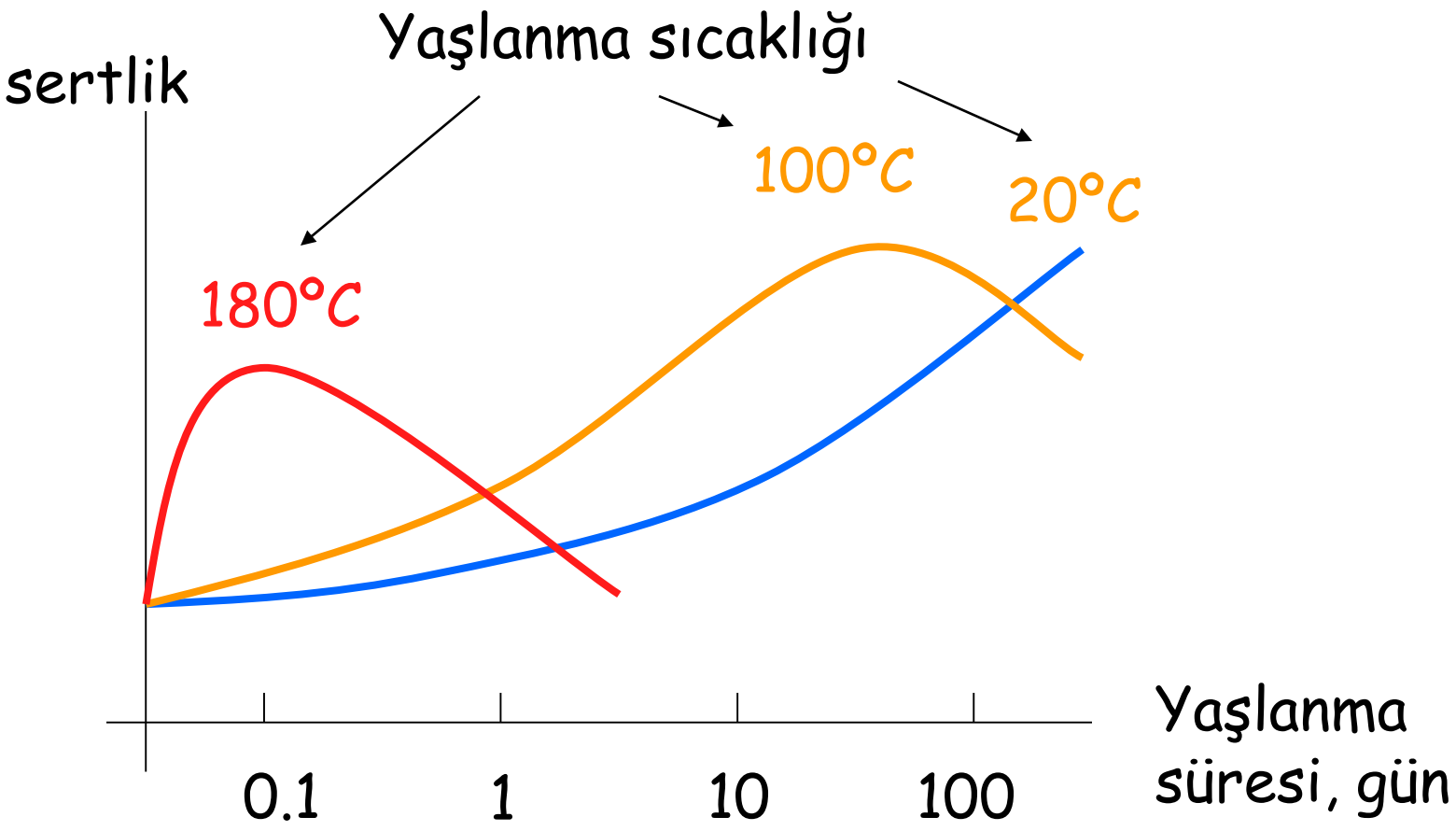
$\alpha_{aşırı\ doymuş}$	→	$\alpha_{doymuş}$	+	θ
YMK		YMK		Tetragonal
4 wt%Cu		0.5 wt%Cu		54 wt%Cu

α' da θ 'nın çökelmesi

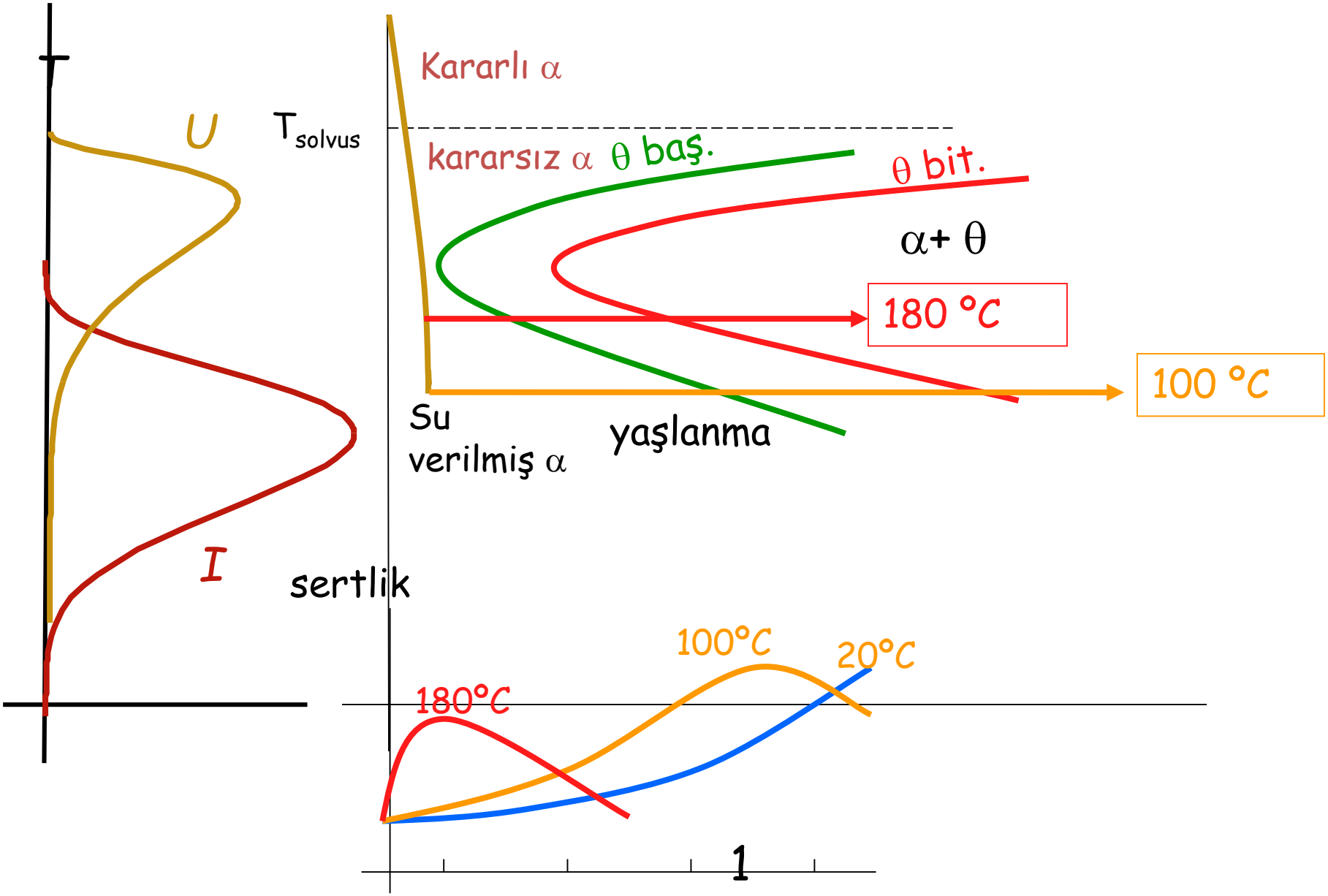


İnce θ çökeltilerinin α matrixinde dağılması sertleşmeye sebep olmaktadır.

Çökelmenin tamamlanmasıyla sertlik max. ulaşır.



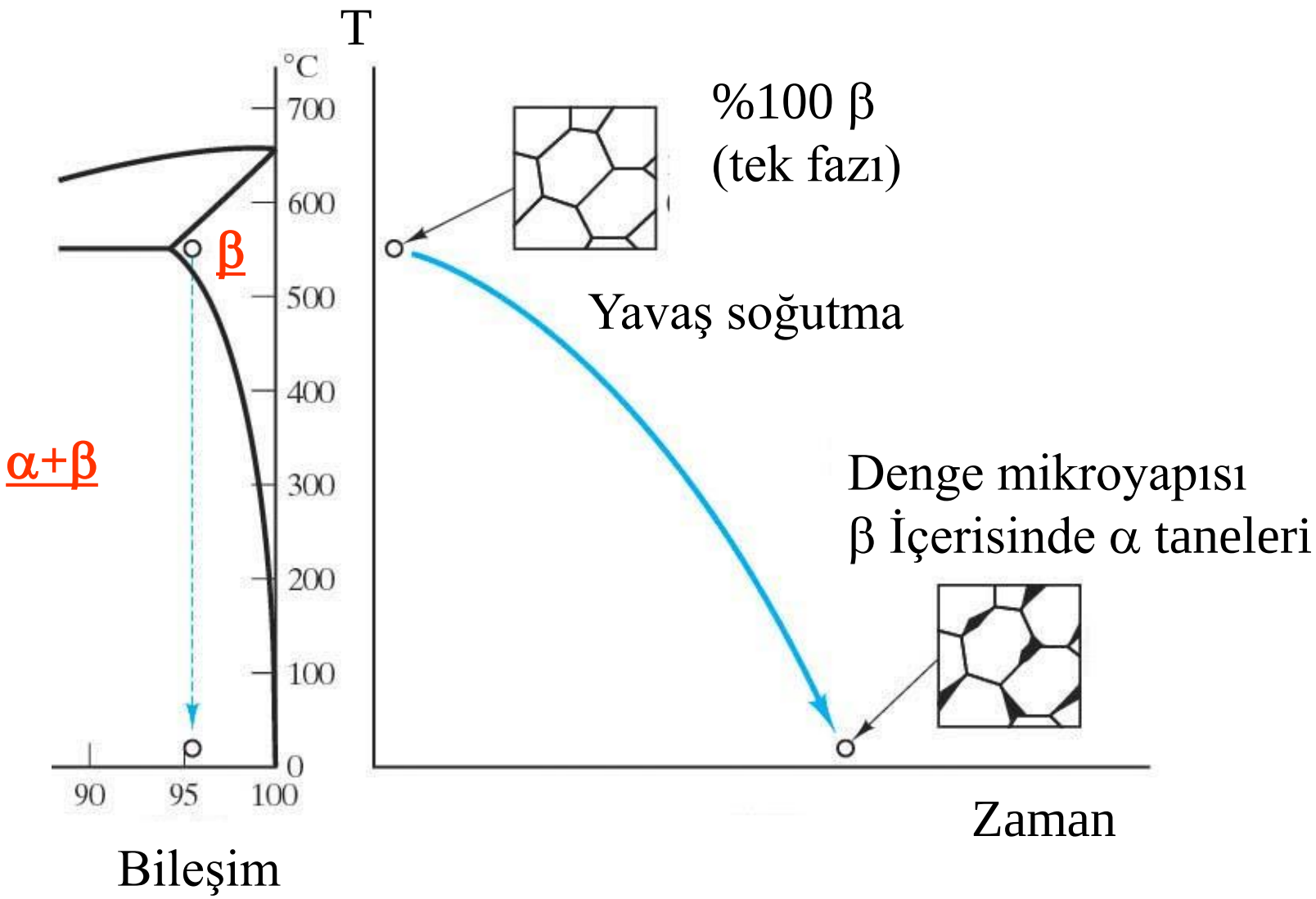
Yüksek sıcaklıktaki sertlik artışı daha az.

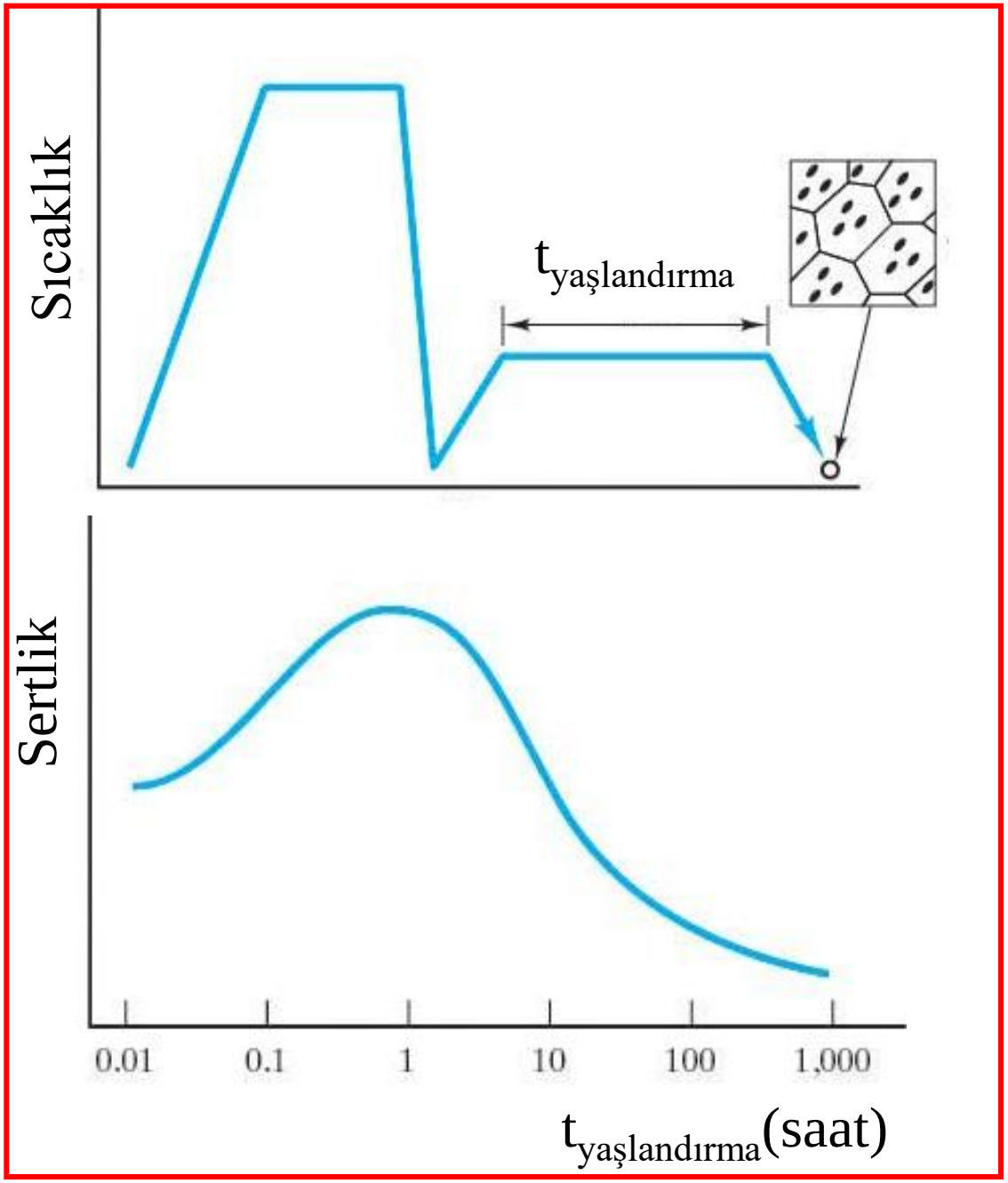

U
I
T_{solvus}
Kararlı α
kararsız α
θ baş.
θ bit.
α+ θ
180 °C
100 °C
Su verilmiş α
yaşlanma
sertlik
180°C
100°C
20°C
1

İç yapı

- Çökeltmenin ilk aşamasında, çok küçük **koherent (uyumlu)–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 **uyumlu (koherent) çökeltilere** dönüşür. Bağdaşık çökeltiler kafesi aşırı gererek dayanım artışı oluştururlar.
- Daha sonra sıcaklığın veya zamanın gerekenden yüksek tutulması halinde **tane büyümesi** gerçekleşir. Dayanım düşmeye başlar.

Yavaş soğutma




Sıcaklık
$t_{yaşlandırma}$
Sertlik
0.01
0.1
1
10
100
1,000
$t_{yaşlandırma}$(saat)

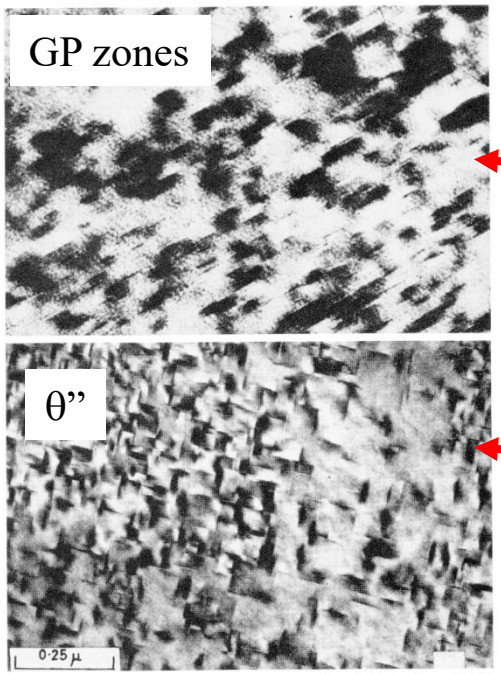


Fig. 5.30 Microstructures at different stages during ageing of Al–Cu alloys. (a) GP zones × 720 000. (b) θ″ × 63 000. (c) θ′ × 18 000. (d) θ × 8000. [(a) After R.B. Nicholson and J. Nutting, *Philosophical Magazine* **3** (1958) 531. (b) R.B. Nicholson, G. Thomas and J. Nutting, *Journal of the Institute of Metals* **87** (1958–1959) 431. (c) G.C. Weatherly and R.B. Nicholson, *Philosophical Magazine* **17** (1968) 813. (d) G.A. Chadwick, *Metallography of Phase Transformations*, Butterworths, London, 1972, from C. Laird.]

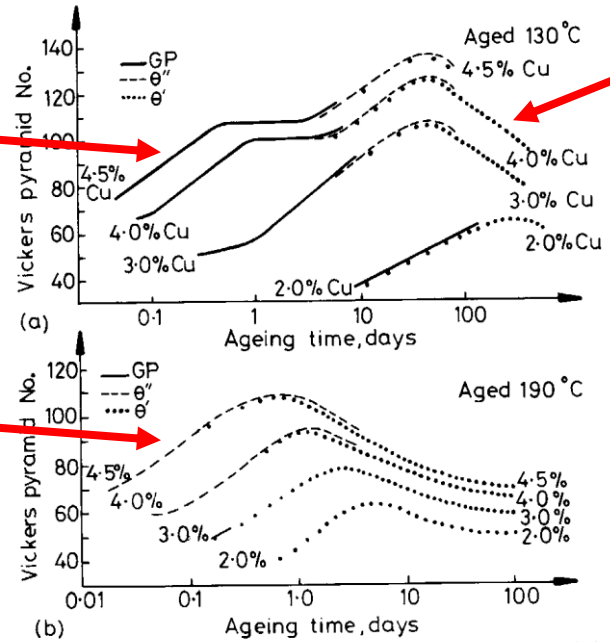
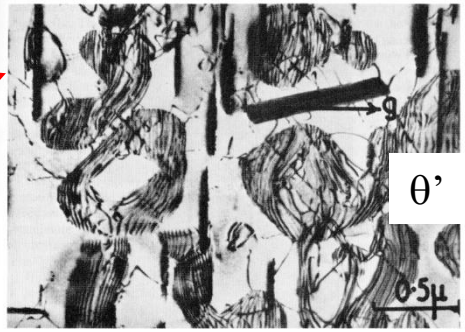
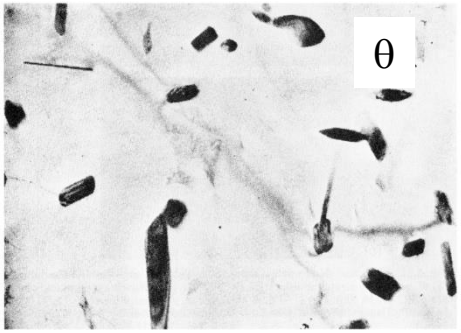
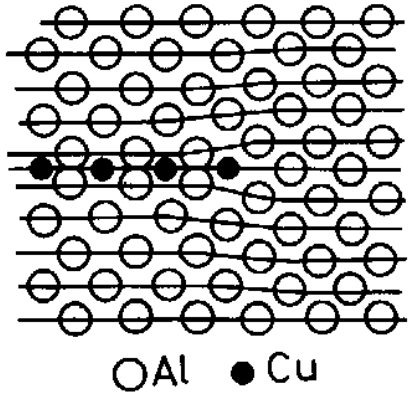


Fig. 5.37 Hardness v. time for various Al–Cu alloys at (a) 130 °C (b) 190 °C. (After J.M. Silcock, T.J. Heal and H.K. Hardy, *Journal of the Institute of Metals* **82** (1953–1954) 239.







GP zone structure

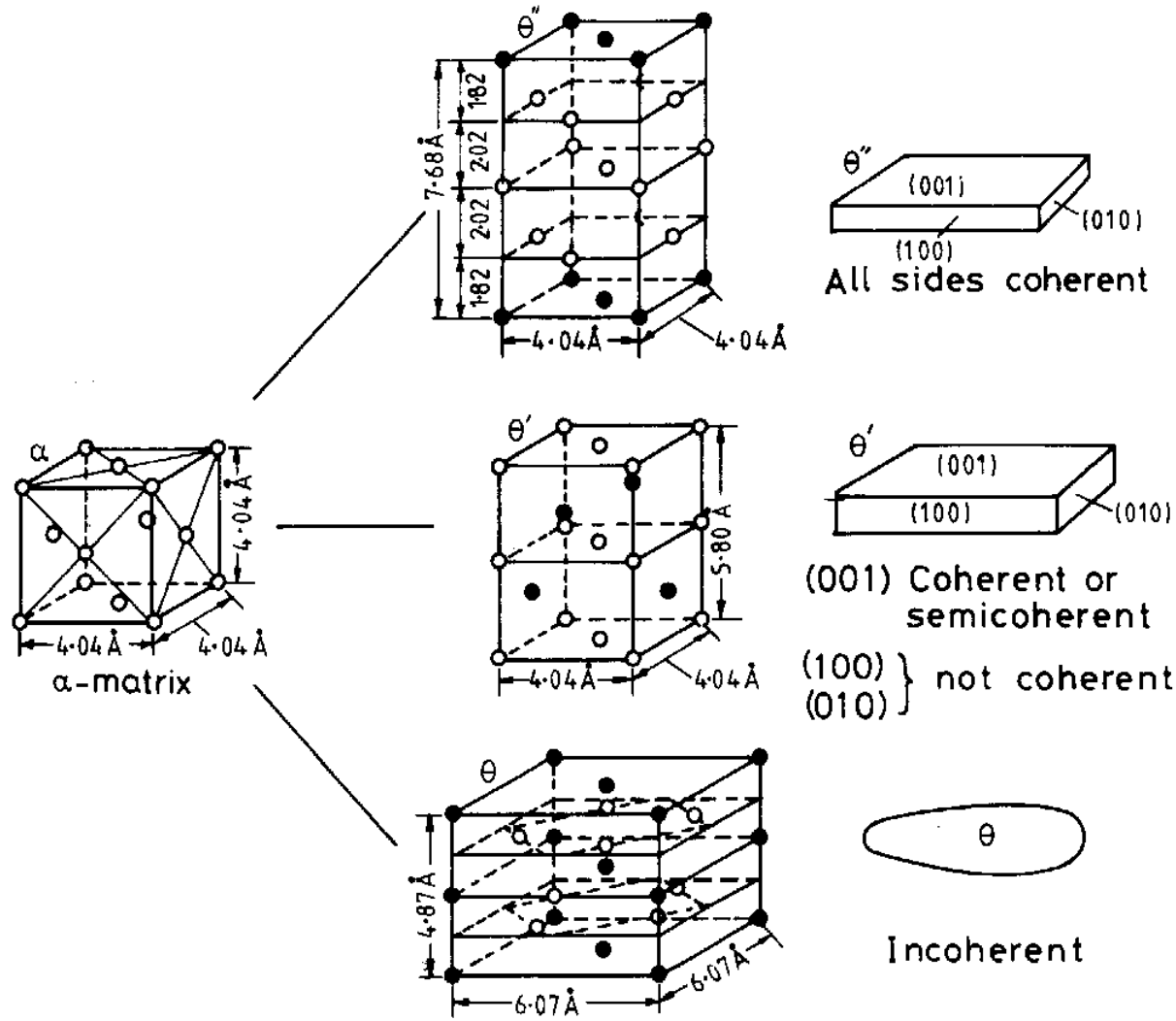
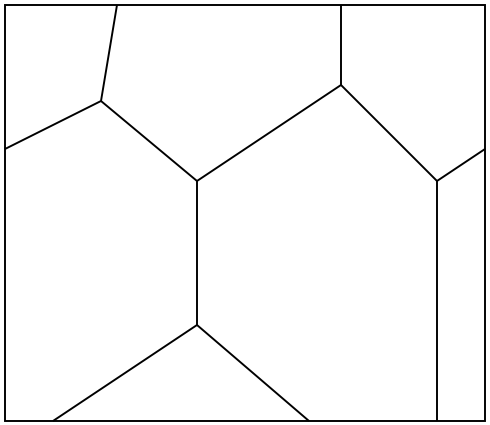


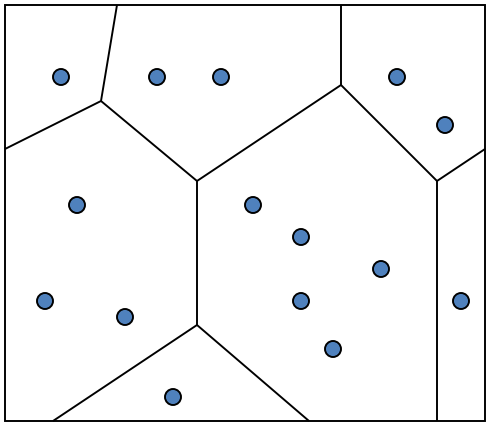
Fig. 5.29 Structure and morphology of θ″, θ′ and θ in Al–Cu (○ Al, ● Cu).

Su verilmiş



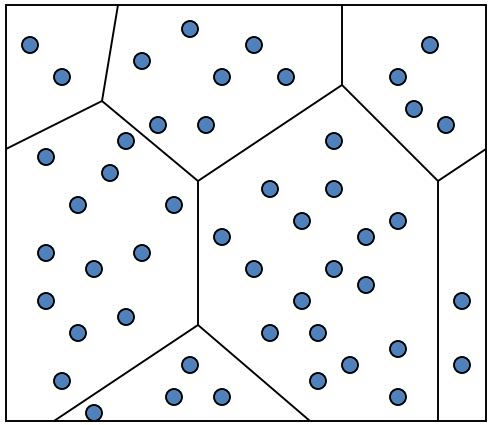
α-taneleri

Yaşlanmış



α-taneleri + θ

Pik yaşlanma



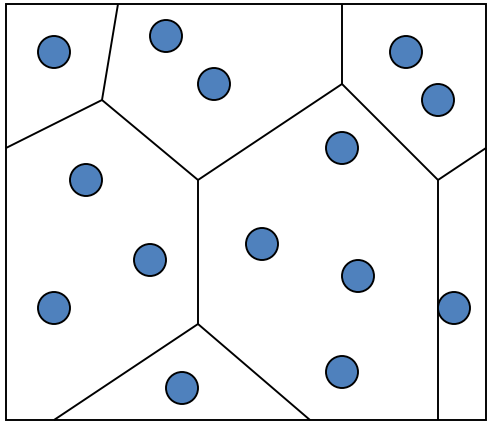
İnce θ' nın yoğun dağılımı

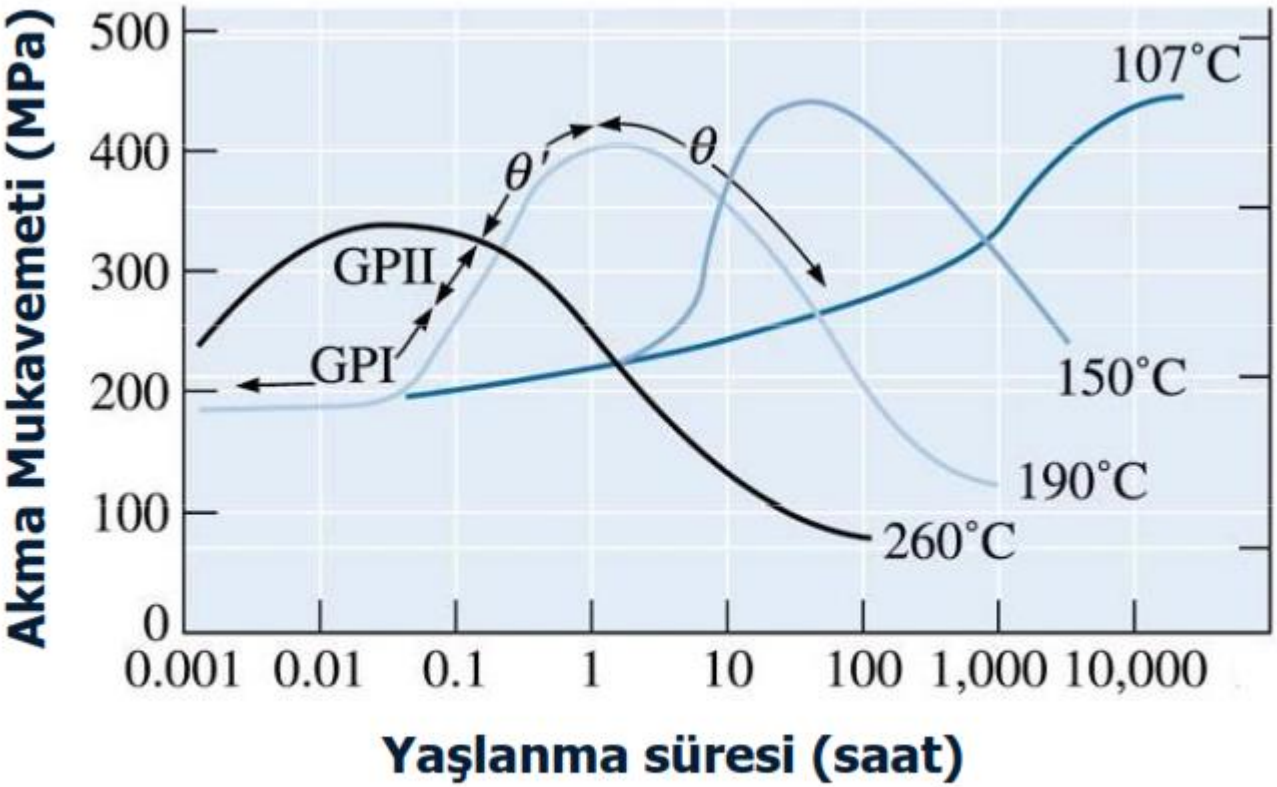
Kabalaşma için itici güç

α/θ arayüzey enerjisi

Aşırı yaşl.

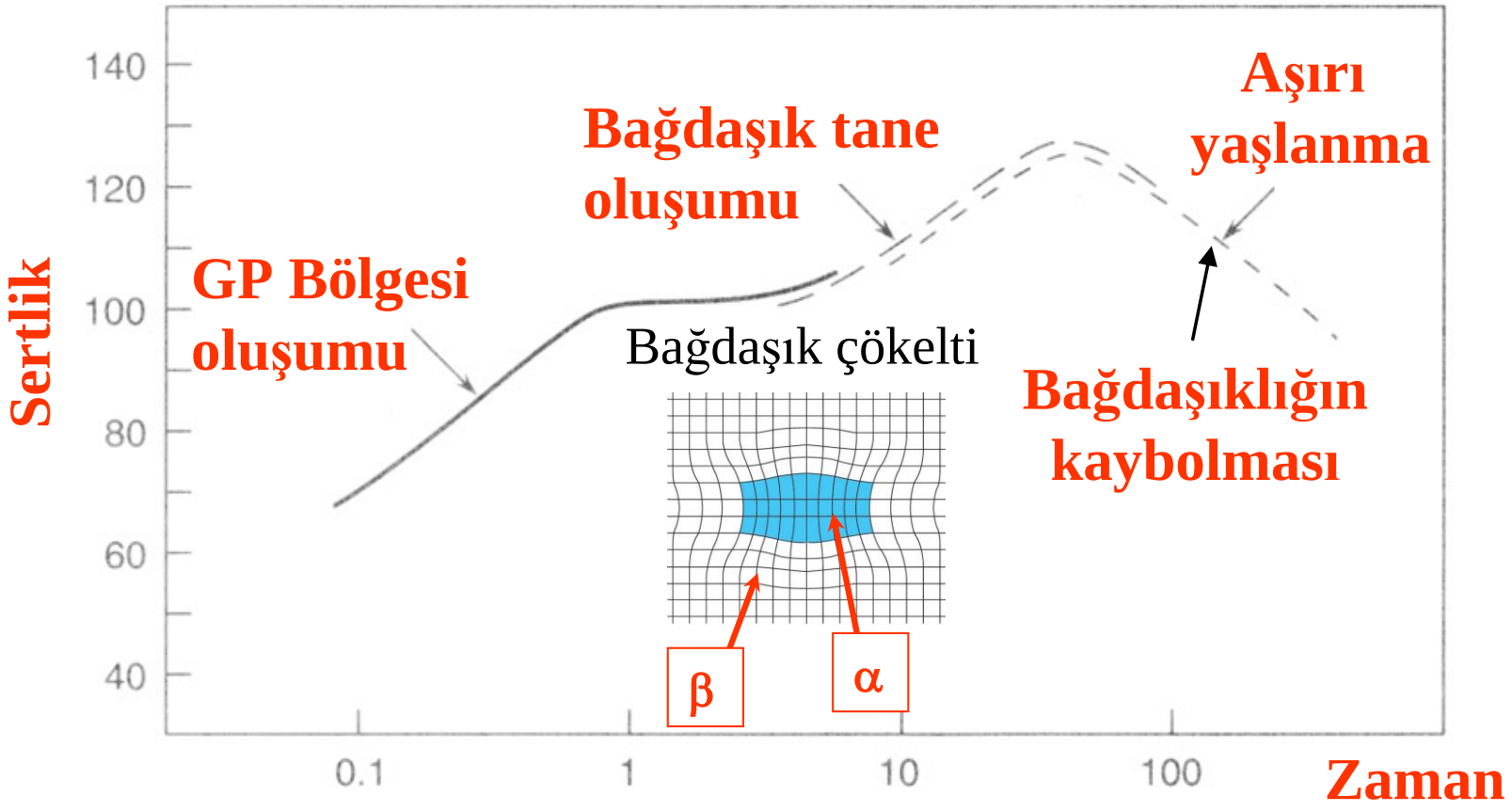
Kaba θ' nın seyrek dağılımı





Al-Cu alaşımlarında akma mukavemetine yaşlandırma sıcaklığı etkisi.

- Yaşlandırma ısıl işleminde sürenin iç yapıya ve dolayısıyla malzeme özelliklerine etkisinin şematik gösterimi.


Sertlik
140
120
100
80
60
40
0.1
1
10
100
Zaman
GP Bölgesi oluşumu
Bağdaşık tane oluşumu
Aşırı yaşlanma
Bağdaşık çökelti
Bağdaşıklığın kaybolması
β
α

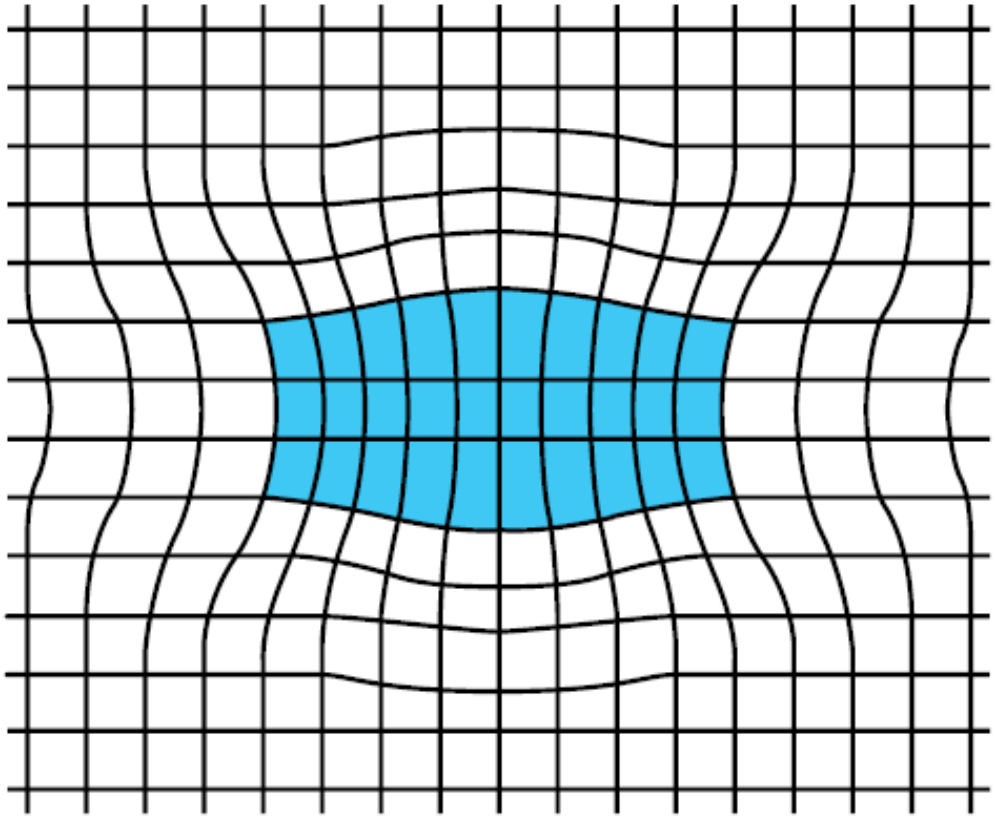
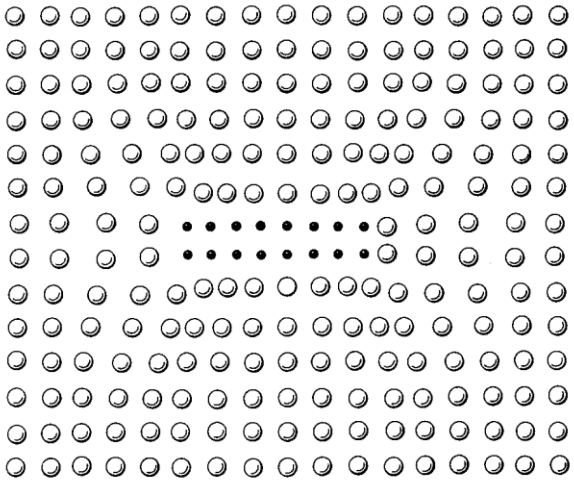
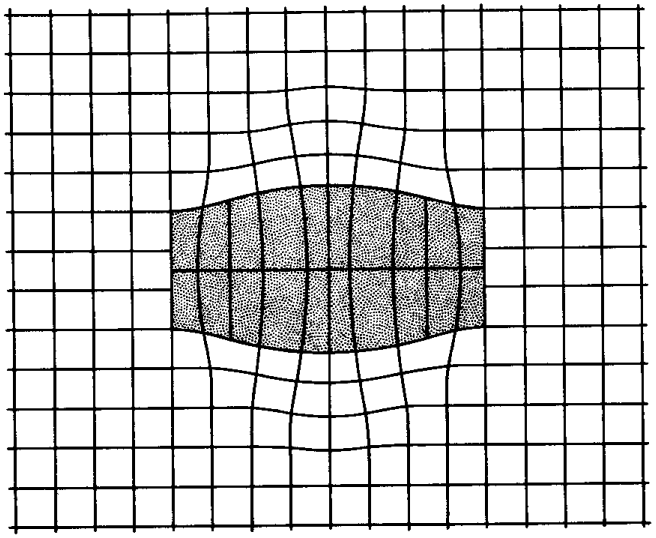


Figure 10-28 *Schematic illustration of the crystalline geometry of a Guinier–Preston (G.P.) zone. This structure is most effective for precipitation hardening, and is the structure developed at the hardness maximum in Figure 10–27b. Note the coherent interfaces lengthwise along the precipitate. The precipitate is approximately 15 nm × 150 nm. (From H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff,* The Structure and Properties of Materials, Vol. 3: Mechanical Behavior, *John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965.)*

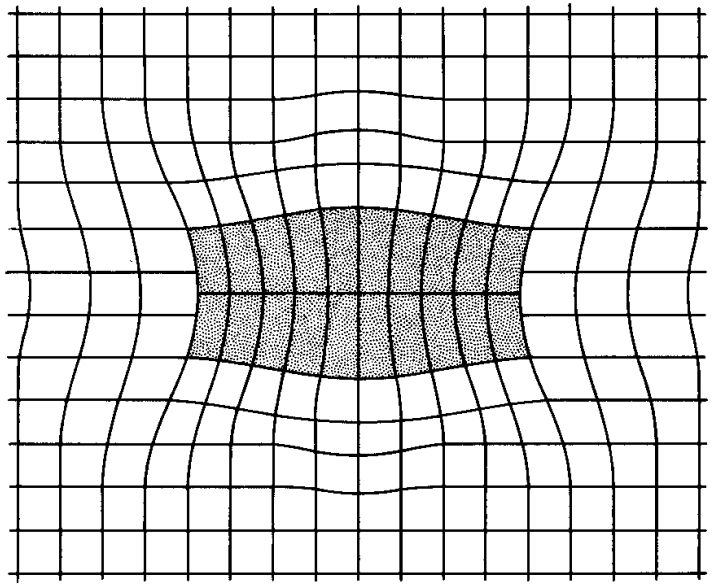
Preston zone

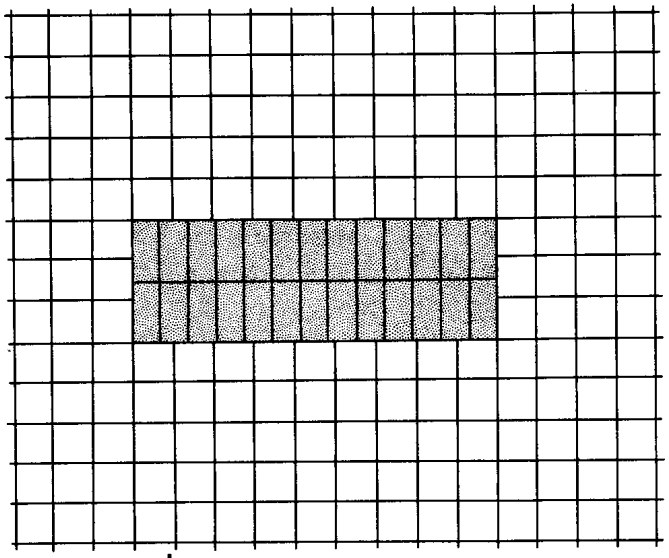


Teta'' phase

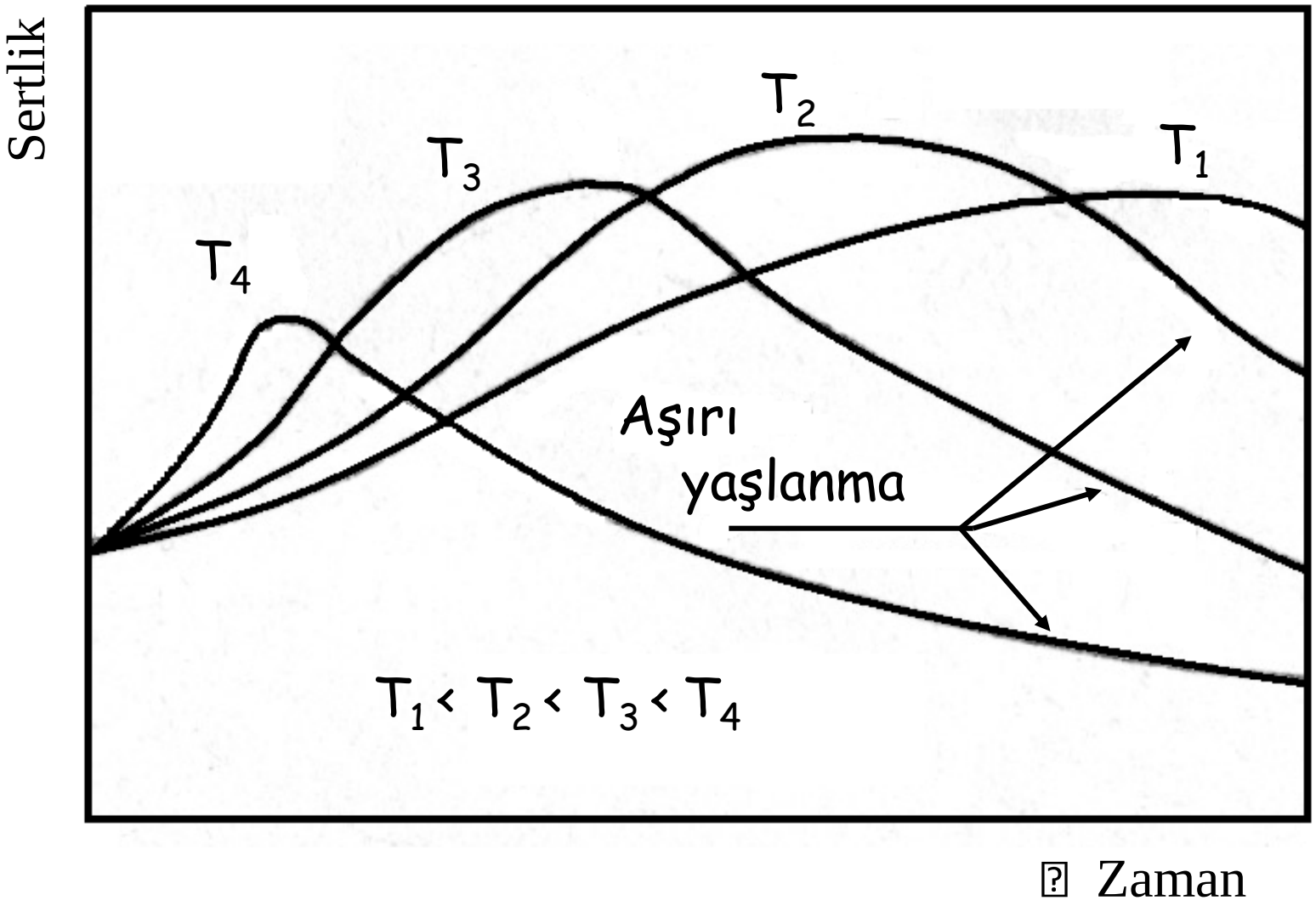


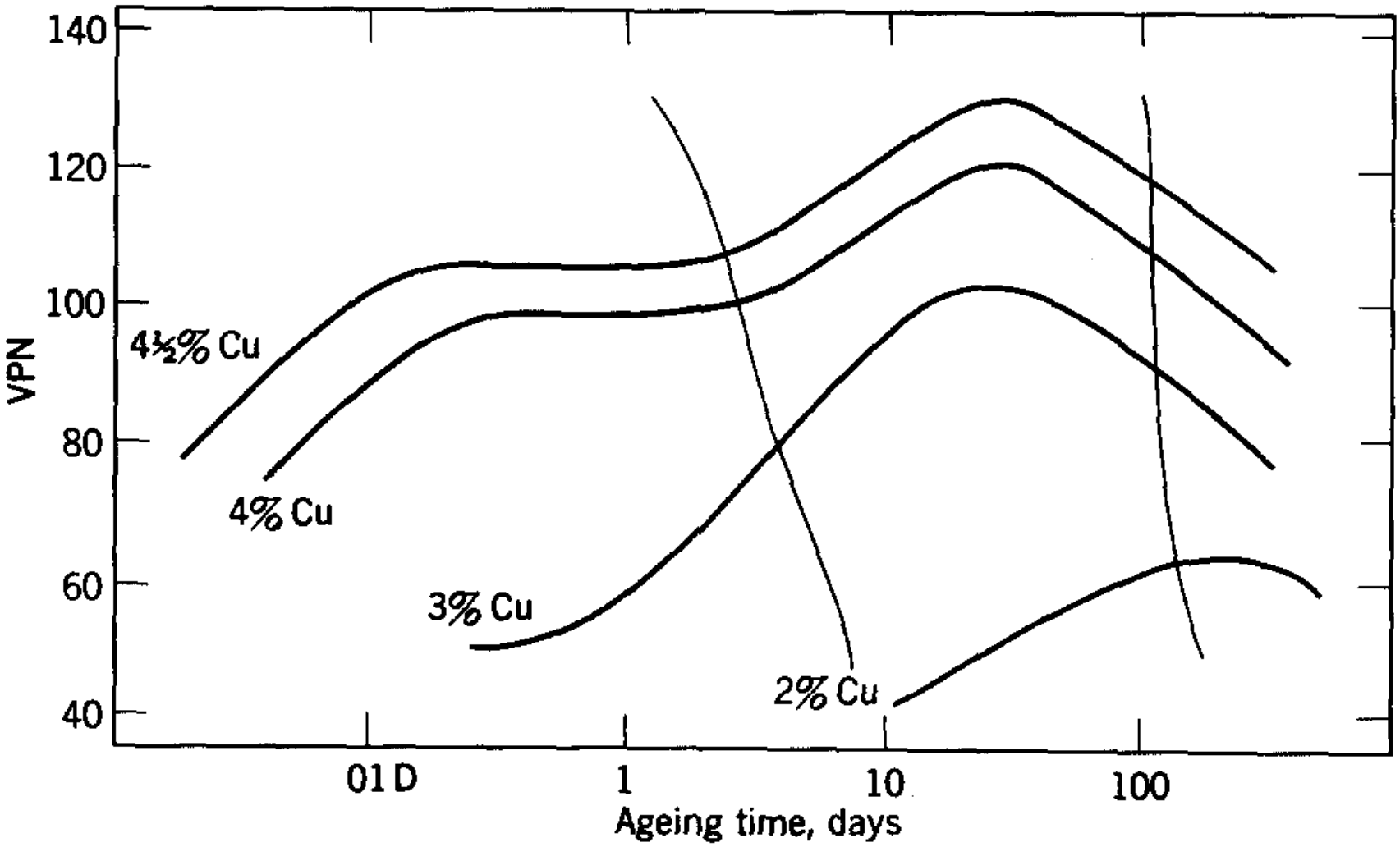
Teta' phase



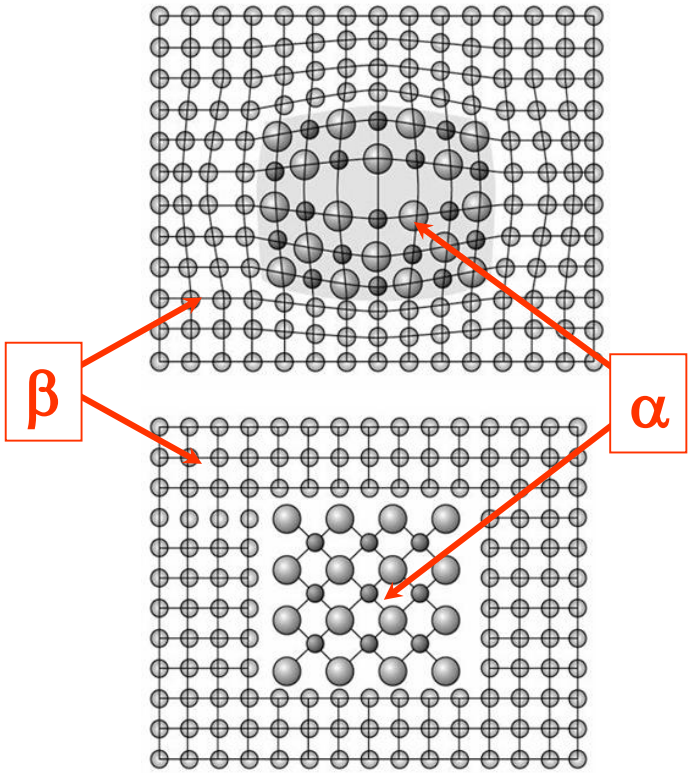


q phase
(equilibrium)


Sertlik
T2
T3
T1
T4
Aşırı
yaşlanma
T1 < T2 < T3 < T4
Zaman

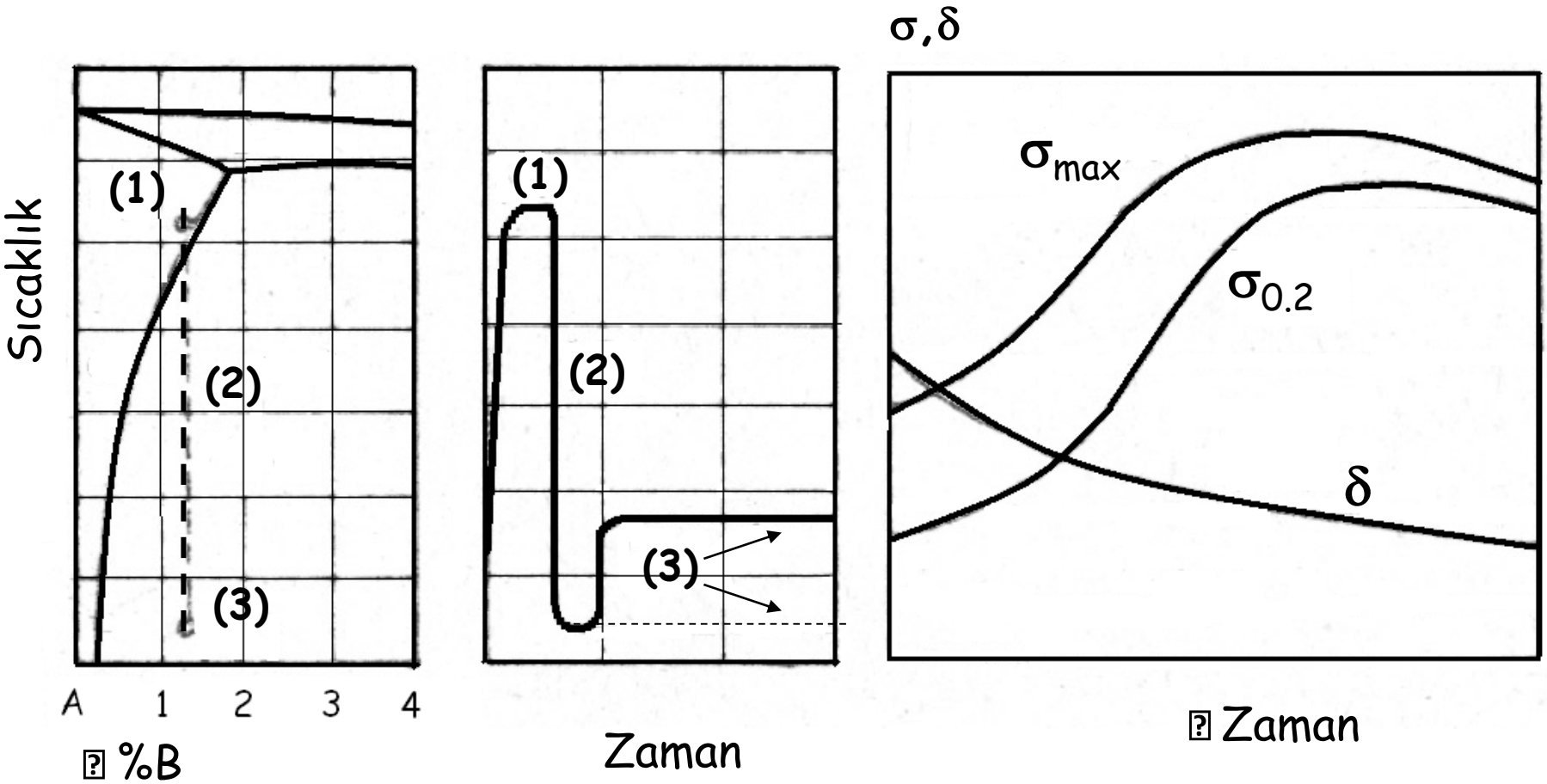

140
120
100
80
60
40
VPN
4½% Cu
4% Cu
3% Cu
2% Cu
01 D
1
10
100
Ageing time, days

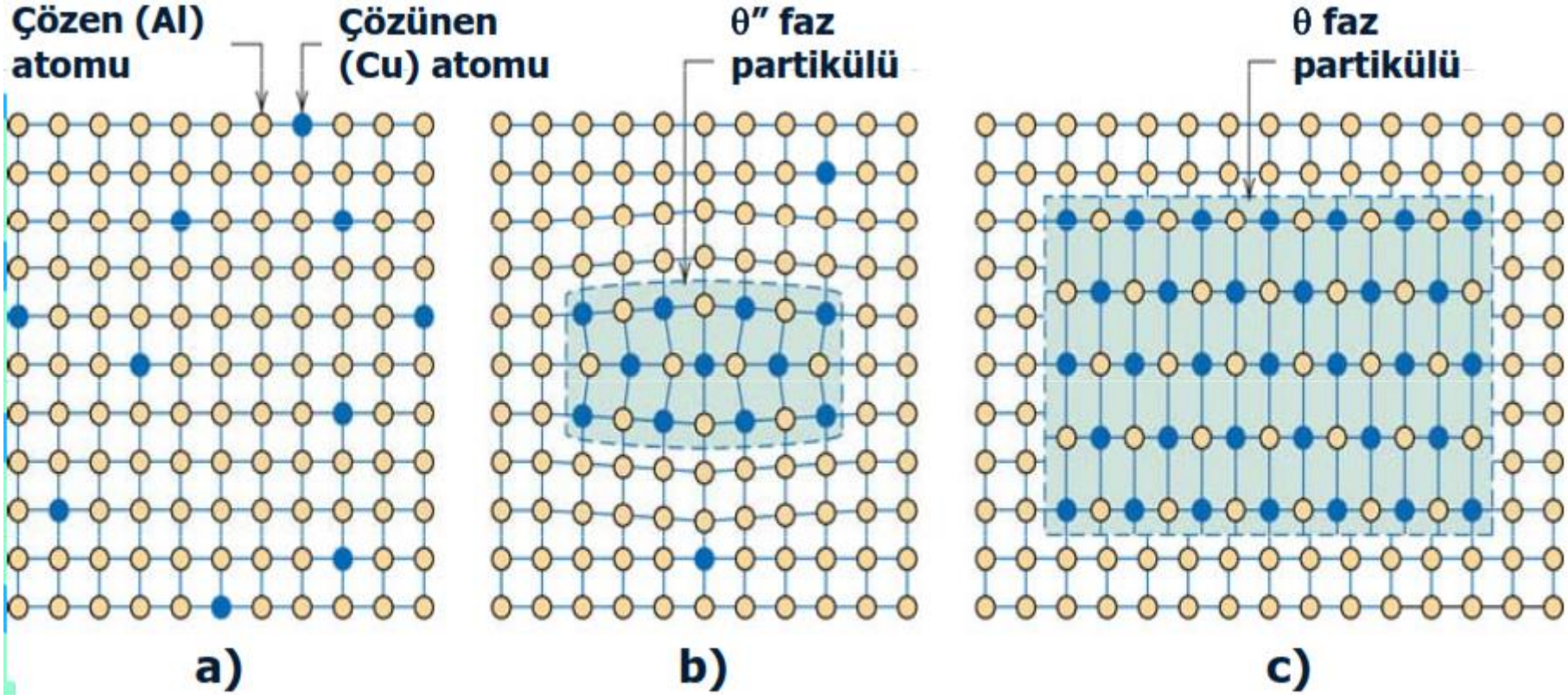
Aşırı yaşlanma



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

- Tipik bir yapay yaşlandırma ısıl işleminin şematik gösterimi.


Sıcaklık
(1)
(2)
(3)
A
1
2
3
4
%B
(1)
(2)
(3)
Zaman
σ,δ
σmax
σ0.2
δ
Zaman



Şekil. a) Çözeltiye alınmış Al-Cu atomik yapısı, b) θ" geçiş çökelti fazı, c) Dengesel çökeltinin oluşması (aşırı yaşlanma).

Ana metal	Alaşım	Çökelme Sıralanması	Dengesel Çökelti
Alüminyum	Al-Ag	Zonlar (küreler) $\rightarrow$ γ' (plaka)	$\gamma(Ag_2Al)$
	Al-Cu	Zonlar (diskler) $\rightarrow$ θ'' (diskler) $\rightarrow$ θ'	$\theta(CuAl_2)$
	Al-Zn-Mg	Zonlar (küreler) $\rightarrow$ M' (plakalar)	$(MgZn_2)$
	Al-Mg-Si	Zonlar (çubuklar) $\rightarrow$ β'	$\beta(Mg_2Si)$
	Al-Mg-Cu	Zonlar (çubuk veya küreler) $\rightarrow$ S'$\rightarrow$	$S(Al_2CuMg)$
Bakır	Cu-Be	Zonlar (diskler) $\rightarrow$ γ' $\longrightarrow$	γ (CuBe)
	Cu-Co	Zonlar (küreler) $\longrightarrow$	β
Demir	Fe-C	ε - karbür (diskler) $\longrightarrow$	Fe_3C (dilimler)
	Fe-N	α'' (diskler) $\longrightarrow$	Fe_4N (dilimler)
Nikel	N-Cr-Ti-Al	γ' (küpler) $\longrightarrow$	γ (Ni_3Ti,Al)

KAYNAKLAR

1. Prof. Dr. Sakin Zeytin, Isıl işlemler ders notları, Sakarya Üniversitesi.
2. Prof. Dr. Hatem Akbulut, Faz Dönüşümleri ders notları, Sakarya Üniversitesi.