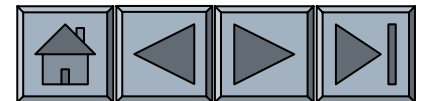




# MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ

---

Bölüm 11-Faz Dönüşümü ile Dispersiyon Sertleştirilmesi  
ve Isıl İşlem



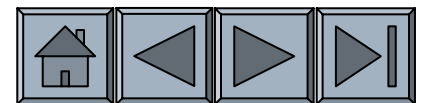
## Hedef

- ❑ Çökeltme, yaşlanma ve ötektoid reaksiyonların oluşturduğu değişik katı hal dönüşüm proseslerini inceleyerek dispersiyonla sertleştirme mekanizmalarını tartışmak,
- ❑ Dengeli olmayan faz dönüşümlerinin özellikle martenzitik reaksiyonun mukavemetlendirmesini incelemek.



# İçerik

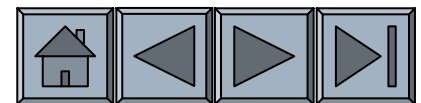
- Katı hal reaksiyonlarında çekirdeklenme ve büyüme
- Eriyik limiti aşıldığında alaşımların mukavemetlenmesi.
- Yaşlanma veya çökeltme sertleşmesi
- Yaşlanmış alaşımların uygulaması
- Yaşlanma veya çökeltme sertleşmesinde mikroyapısal gelişim.
- Yaşlanmaya sıcaklık ve zamanın etkisi.





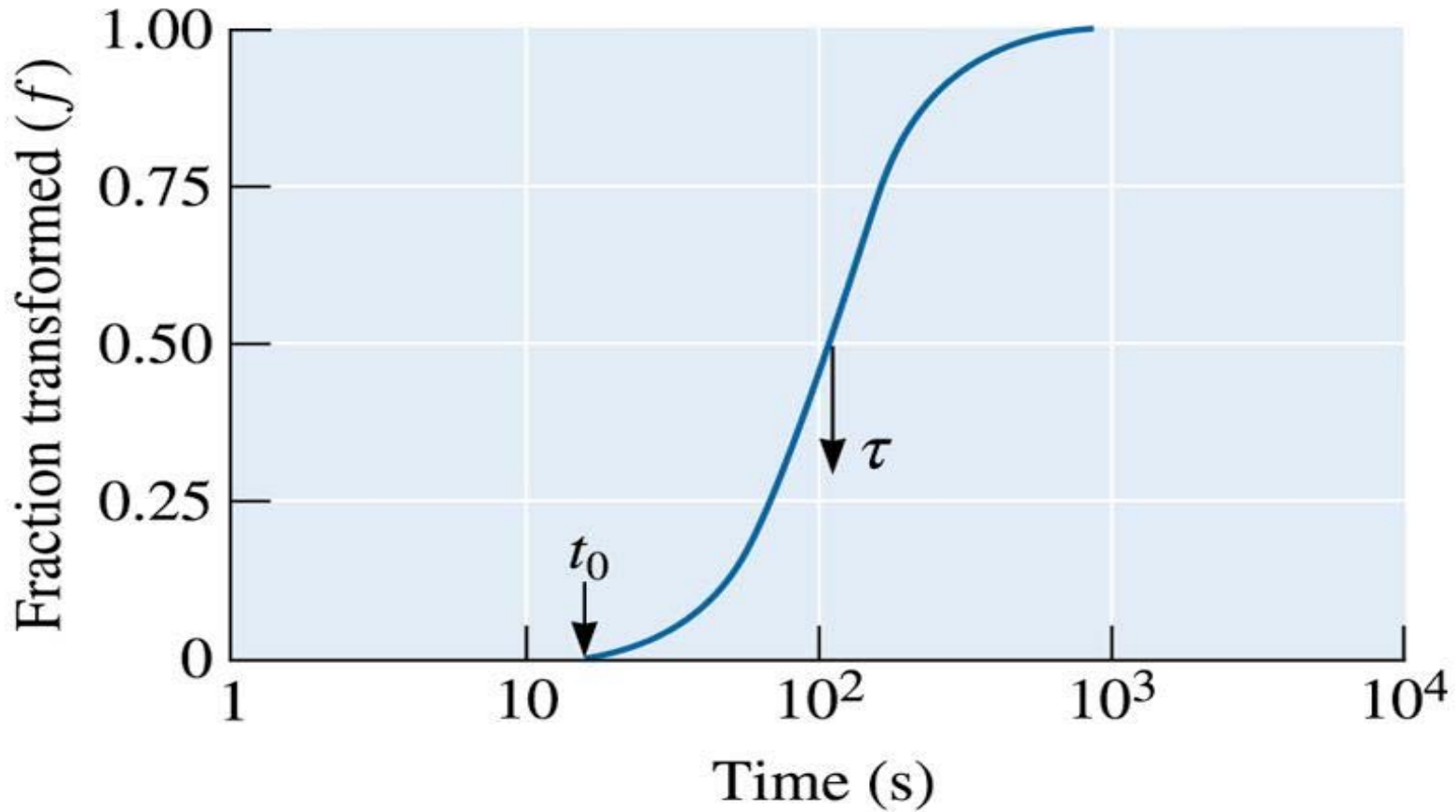
# İçerik

- Yaşlanmanın sağlanabilmesi için gerekler
- Yüksek sıcaklıklarda yaşlanabilir alaşımların kullanımı
- Ötektoid reaksiyon
- Ötektoid reaksiyonun kontrolü
- Martensitik reaksiyon ve temperleme
- Hafızalı alaşımlar



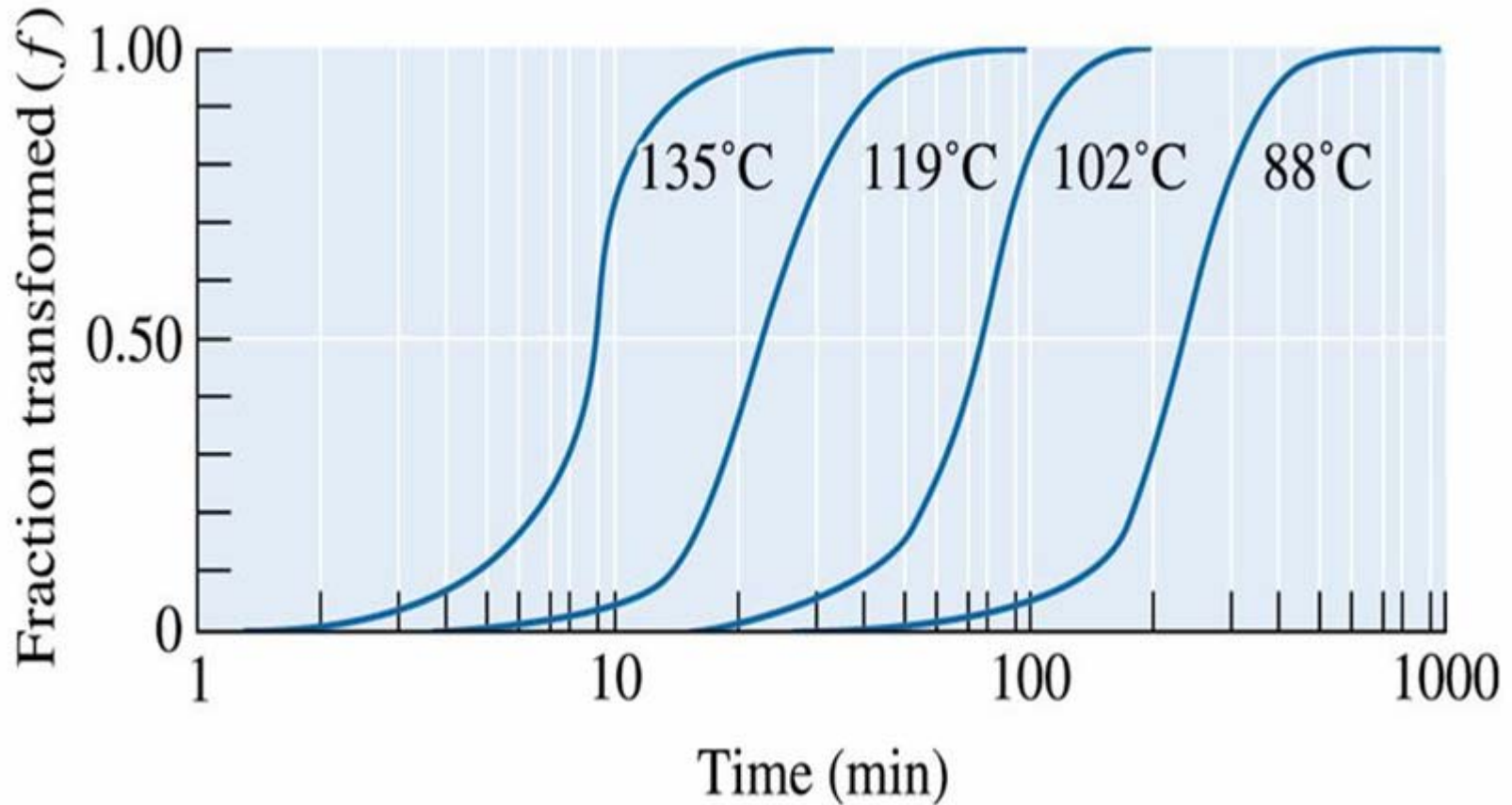
## Bölüm 11.1. Katı Hal Reaksiyonlarında Çekirdeklenme ve Büyüme

- **Deformasyon/gerinim enerjisi** – Çökeltinin çekirdeklenme ve büyümesi esnasında etrafındaki matrisle uyumlu çökmesi için gerekli enerjidir.
- **Avrami ilişkisi** – Zamanın fonksiyonu olarak dönüşümün kesrini tanımlar. Bu difüzyon içeren dönüşümleri kapsadığından martensitik dönüşümleri içermez.

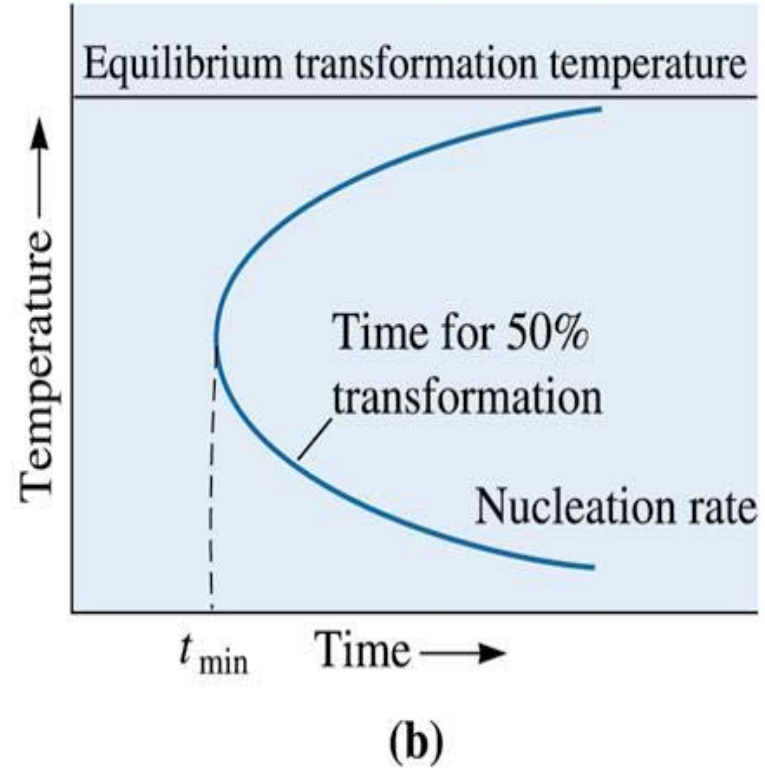
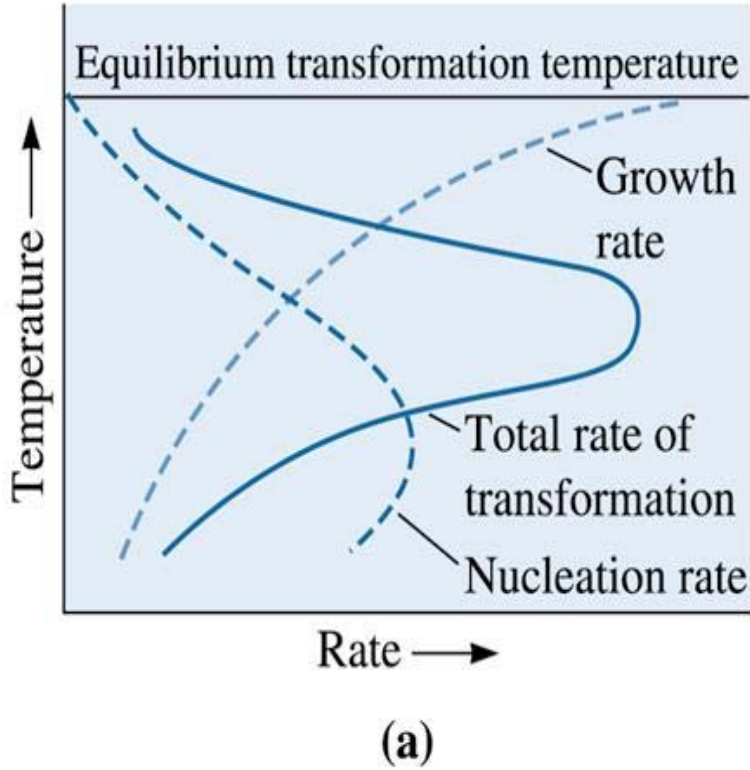


©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning, is a trademark used herein under license.

Sigmoidal eğrisi. Sabit sıcaklıkta YMK demirin dönüşümünü gösterir. Kuluçka zamanı  $t_0$  ve %50 deformasyon için  $\tau$  ile gösterilmiştir.



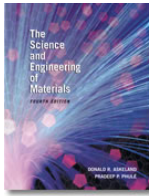
Soğuk işlenmiş bakırın yeniden kristallenme sıcaklığına sıcaklığın etkisi.



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

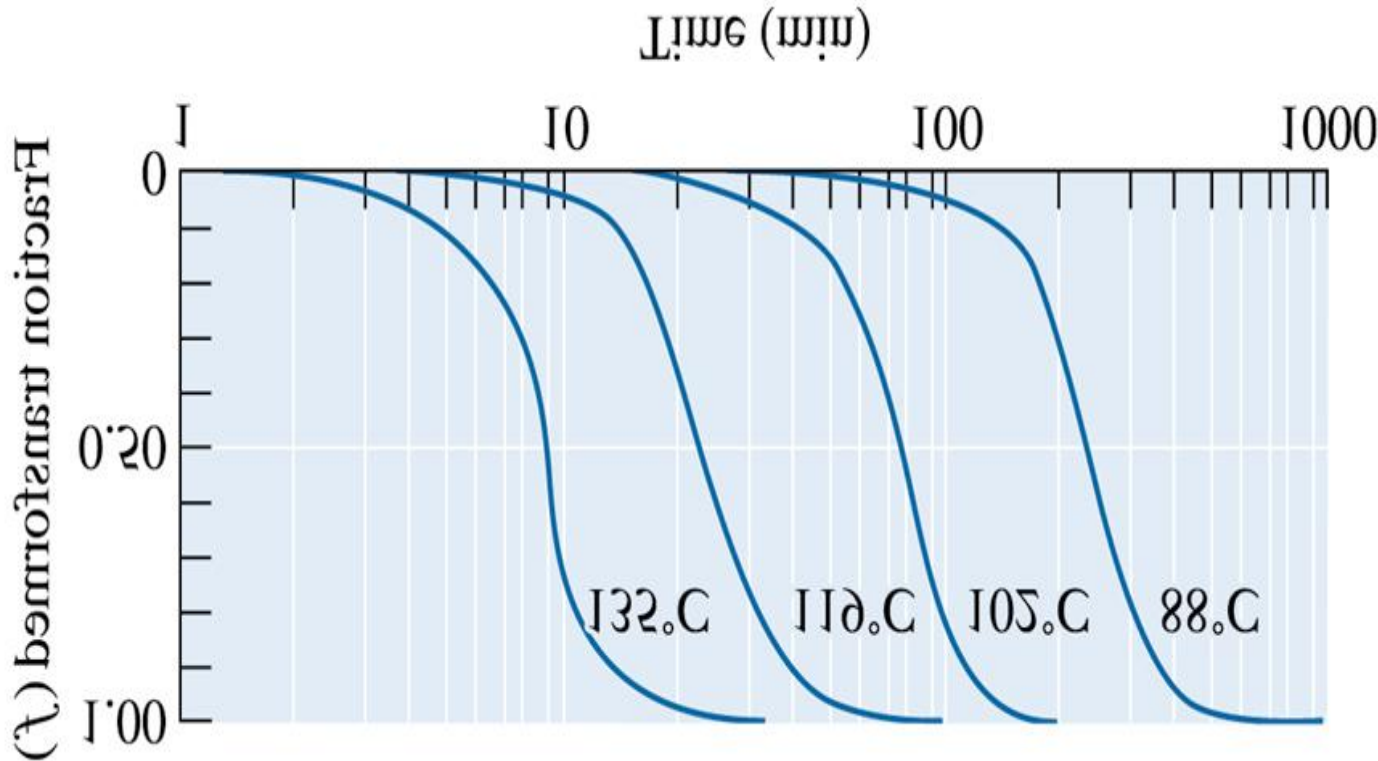
(a) Faz dönüşüm hızı üzerine sıcaklığın etkisi büyüme ve çekirdeklenme hızı katkıları kritik sıcaklıkta maksimum dönüşüm hızı. (b) Sonuç olarak, dönüşüm için gerekli minimum zaman ( $t_{min}$ ) C eğrisinde verilmiştir.





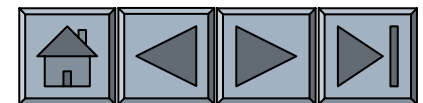
# Örnek 11.1. Bakırın Yeniden Kristallenmesi için Gerekli Aktivasyon Enerjisi

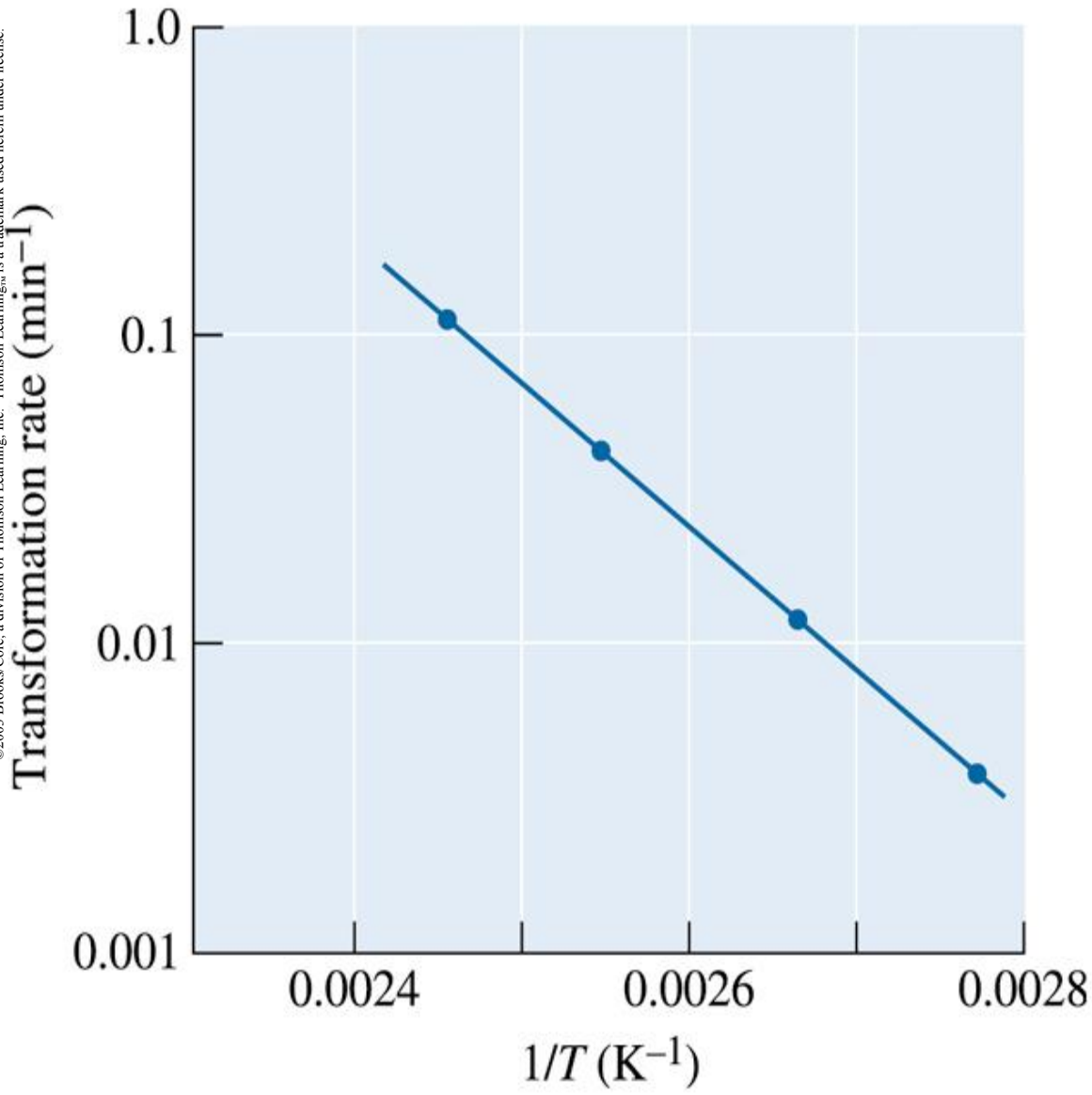
Aşağıda verilen sigmodial eğrilerden bakırın yeniden kristallenmesi için gerekli aktivasyon enerjisini hesaplayınız?



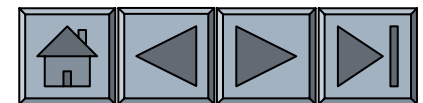
Soğuk işlenmiş bakırın yeniden kristallenmesine sıcaklığın etkisi.

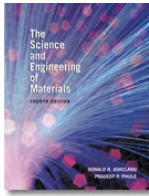
©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning,™ is a trademark used herein under license.





Dönüşüm hızına karşılık yeniden kristallenme sıcaklığının tersinin Arrhenius eğrisi





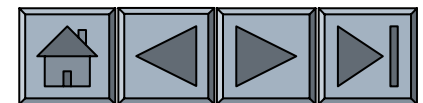
## ÇÖZÜM

Şekilden değişik sıcaklıklar için %50 dönüşüm sıcaklığı belirlenmiştir.

$T(^{\circ}\text{C})$	$T$ (K)	$\tau$ (min)	Rate ( $\text{min}^{-1}$ )
135	408	9	0.111
119	392	22	0.045
102	375	80	0.0125
88	361	250	0.0040

Arrhenius denklemine göre,  $\ln$  (hız) karşılık  $1/T$  eşitlikteki sabitleri hesaplama fırsatı verir. Bunların logaritması alındığında formül:

$$\ln(\text{büyüme hızı}) = \ln A - (Q/RT)$$



## ÇÖZÜM

Grafik  $1/T$ 'nin fonksiyonu ise doğru çizgi elde edilir ve eğimi- $Q/R$ 'dir.

$$\text{slope} = \frac{-Q}{R} = \left[ \frac{\Delta \ln(\text{rate})}{\Delta \left( \frac{1}{T} \right)} \right] = \frac{[(\ln(0.111) - \ln(0.004))]}{\left[ \frac{1}{408} - \frac{1}{361} \right]}$$

$$Q/R = 10,414$$

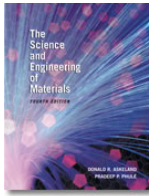
$$Q = 20,693 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}$$

$$\therefore 0.111 = A \exp \left( \frac{-20,693 \text{ cal/mol}}{\left( 1.987 \frac{\text{cal}}{\text{deg} - \text{mol}} \right) \times (408 \text{ deg})} \right)$$

$$A = 0.111 / 8.21 \times 10^{-12} = 1.351 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$$

$$\therefore \text{rate} = 1.351 \times 10^{10} \exp \left( \frac{-20,693}{RT} \right)$$

- Dağılım mukavemetlenmesi
- Yaşlanma
- Ötektoid reaksiyonu içeren katı hal dönüşümleri



# Katı Durum Reaksiyonlarında Çekirdeklenme ve Büyüme

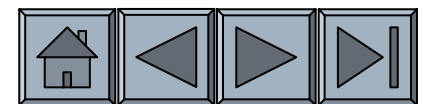
Bir katı matrinden çökelti oluşması için çekirdeklenme ve büyüme gereklidir.

$$\Delta G = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v + 4 \pi r^2 \sigma + \frac{4}{3} \pi r^3 \varepsilon$$

Hacim serbest enerjisi değişimi

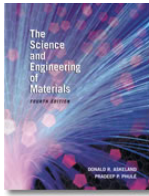
Yüzey enerjisi değişimi

Gerilme enerjisini içermektedir



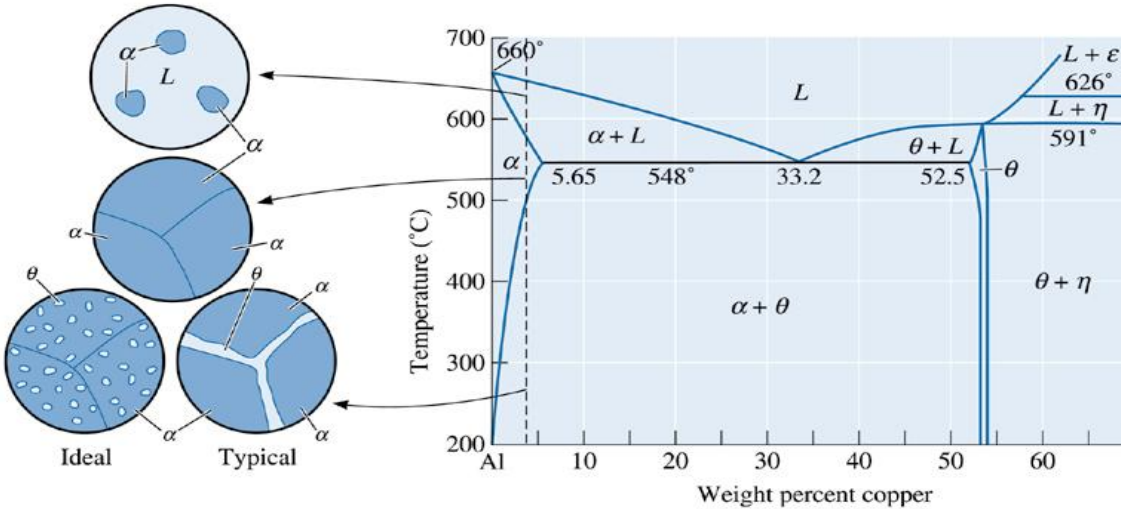
- Çekirdeklenme yapıda halihazırda bulunan yüzeylerde daha kolay meydana gelir  $\rightarrow$  yüzey enerjisi terimi  $\downarrow$
- Çökelti en kolay matris tane sınırlarında veya diğer kafes hatalarında çekirdeklenir ve büyür.

# Eritilebilirlik Sınırını Aşarak Alaşımların Mukavemetlendirilmesi



## Al-Cu Alaşımı

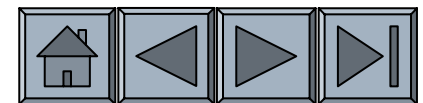
- $T > 500^{\circ}\text{C}$ 'de Al-%4 Cu alaşımı tamamen  $\alpha$  veya Al katı eriyiğidir.



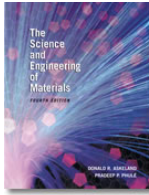
©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning, is a trademark used herein under license.

Alüminyum-bakır faz diyagramı ve Al-%4Cu alaşımının katılaşması esnasında oluşan mikroyapılar.

- $T < \text{solvüs sıcaklığı}$   $\rightarrow$  sert ve kırılgan  $\theta$  (CuAl<sub>2</sub>) fazı oluşur  $\rightarrow$  dağılım mukavemetlenmesini sağlar.

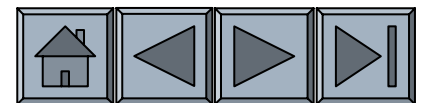






## Bölüm 11.2. Katı Eriyik Limitinin Aşıldığında Alaşımın Mukavemetlenmesi

- **Widmanstätten yapısı** – Çökelti ve matris kristal yapısı arasında belirli kristallografik ilişki varlığında matristen ikinci fazın çökmesidir.
- **Arayüzey Enerjisi** – İki faz arasındaki sınırın enerjisidir.
- **Dihedral açı**- Matriste çöken partikülün şeklini tanımlayan açıdır.
- **Koherent çökelti** – Kristal yapısı ve atomik düzeni matris ile sürekli uyumu olan çökeltidir.

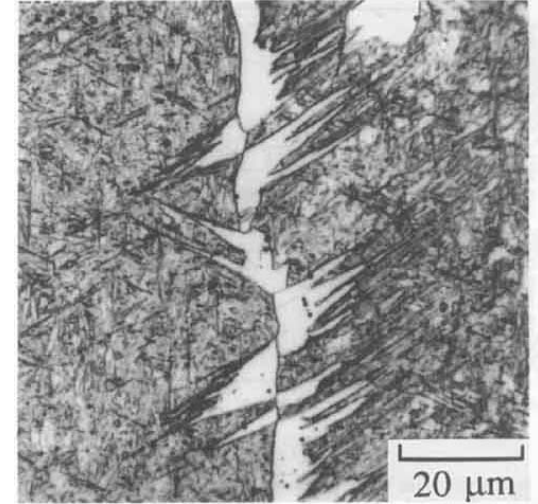


# Çökeltinin Şeklini Etkileyen Faktörler

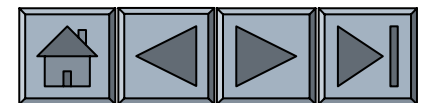


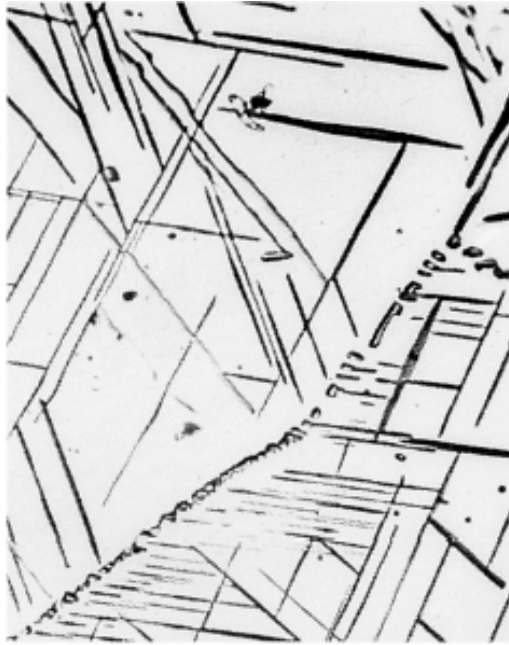
1. Widmanstatten Yapı: Çökeltide belirli düzlem ve doğrultularda büyüeyebilen 2.faz, matriste tercihli düzlem ve doğrultulara paraleldir. Bu büyüme mekanizması gerilim ve yüzey enerjilerini en aza indirir, büyüme hızı artar.

- ❑ Alaşımı kırılganlaştırabilir.
- ❑ Çökelti için levhalar, iğneler, çubuklar gibi karakteristik görüntüler verebilir.



Ferritte Widmanstatten yapısı

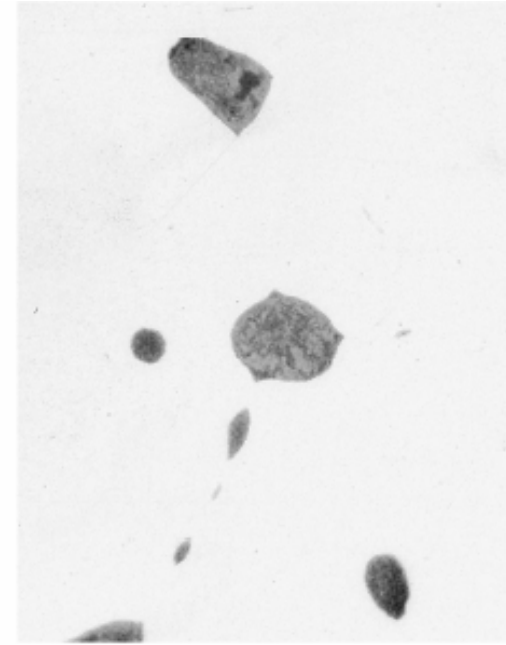




(a)



(b)



(c)

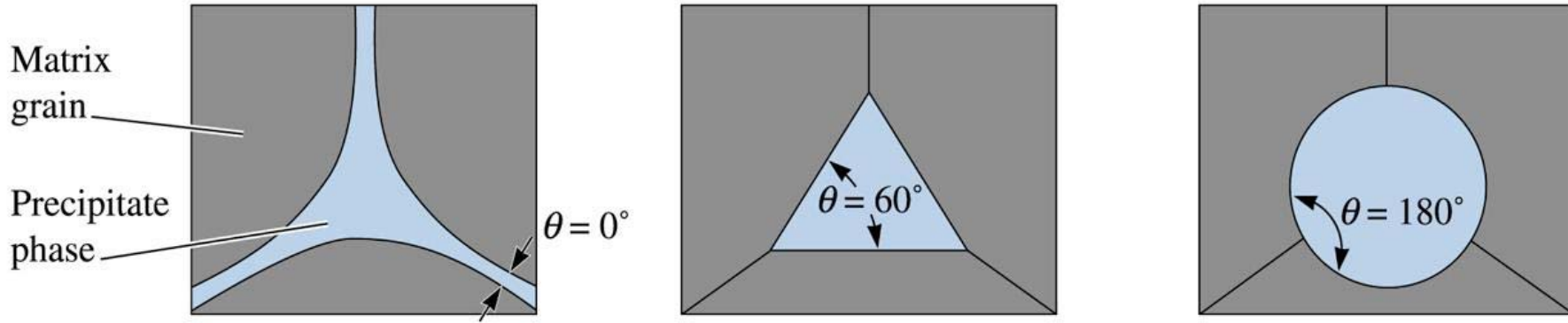
(a) Cu-Ti alaşımında Widmanstatten iğneleri ( $\times 420$ ). (From ASM Handbook, Vol. 9, Metallography and Microstructure (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073.) (b) Al-%4 Cu alaşımında yavaş katılaşma ile oluşan sürekli  $\theta$  okeltisi. ( $\times 500$ ). (c) Bakırda tane sınırlarında kurşun okelmesi. ( $\times 500$ ).

**2. İç Yüzey Enerjisi İlişkileri:** Küresel şekilli çökelti  $\rightarrow$  yüzey enerjisi en az olur.

Matris taneleri arasındaki sınır iç yüzey enerjisi ( $\gamma_m$ ) ve matris-çökelti ( $\gamma_p$ ) arasındaki sınır iç yüzey enerjisi çökeltinin şeklini etkiler.

İç yüzey enerjileri matris-çökelti arayüzeyi arasındaki dihedral açı  $\theta$ 'yı etkiler ve bu açı da çökeltinin şeklini belirler.

$$\gamma_m = 2\gamma_p \cos \frac{\theta}{2}$$



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

## Çökeltinin şekli üzerine dihedral açı ve yüzey enerjisinin etkisi.

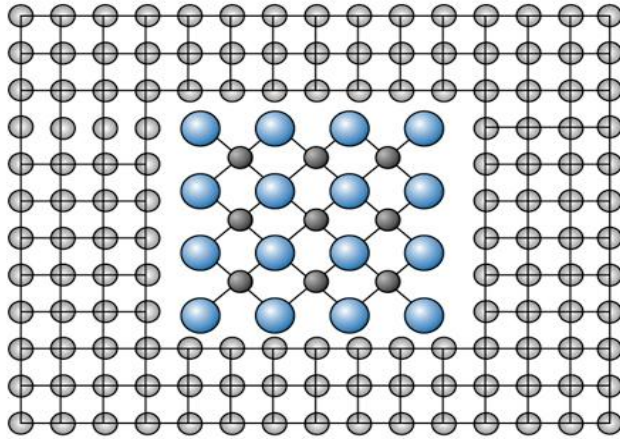
- $\theta$  küçük ise çökelti sürekli olabilir.
- $\theta$  büyük ise süreksiz ve küresel çökelti oluşur.
- Eğer çökelti sert ve kırılkan ise alaşım çok kırılkan hale gelebilir.

**3) Soğuma Hızı:** Alaşımın solvüs çizgisini geçtiği soğuma hızı difüzyon zamanını ve bunun sonucu olan çökelti şeklini doğrudan etkiler.

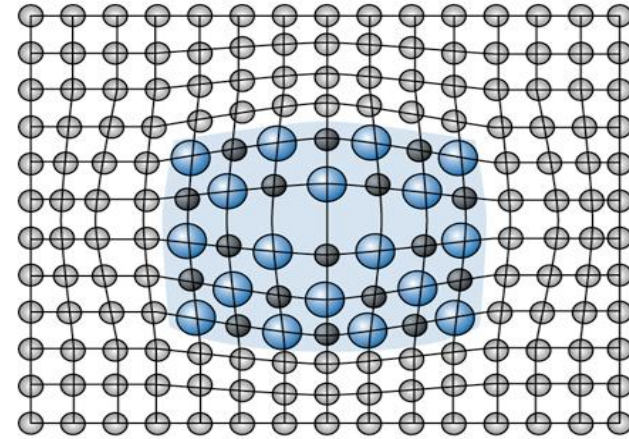
Yüksek soğuma hızı → süreksiz (kesintili) çökelti oluşumu.

Al-%4 Cu alaşımı yavaş soğutulduğunda →  $\alpha$  tane sınırlarında sert ve kırılğan  $\theta$  fazı ince ve sürekli olarak oluşur → istenen mikroyapı elde edilemez.

## 4) Uyumlu Çökelti:



(a)



(b)

**(a) Koherent olmayan çökelti etrafındaki matrisin kristal yapısı ile uyumlu değildir. (b) Koherent partikülde çökelti ile matris kristal yapısı arasında belirli bir uyum vardır.**

### Uyumsuz Çökelti:

Kendisini kuşatan matrisin kristal yapısı ile ilişkide değildir.

### Uyumlu Çökelti:

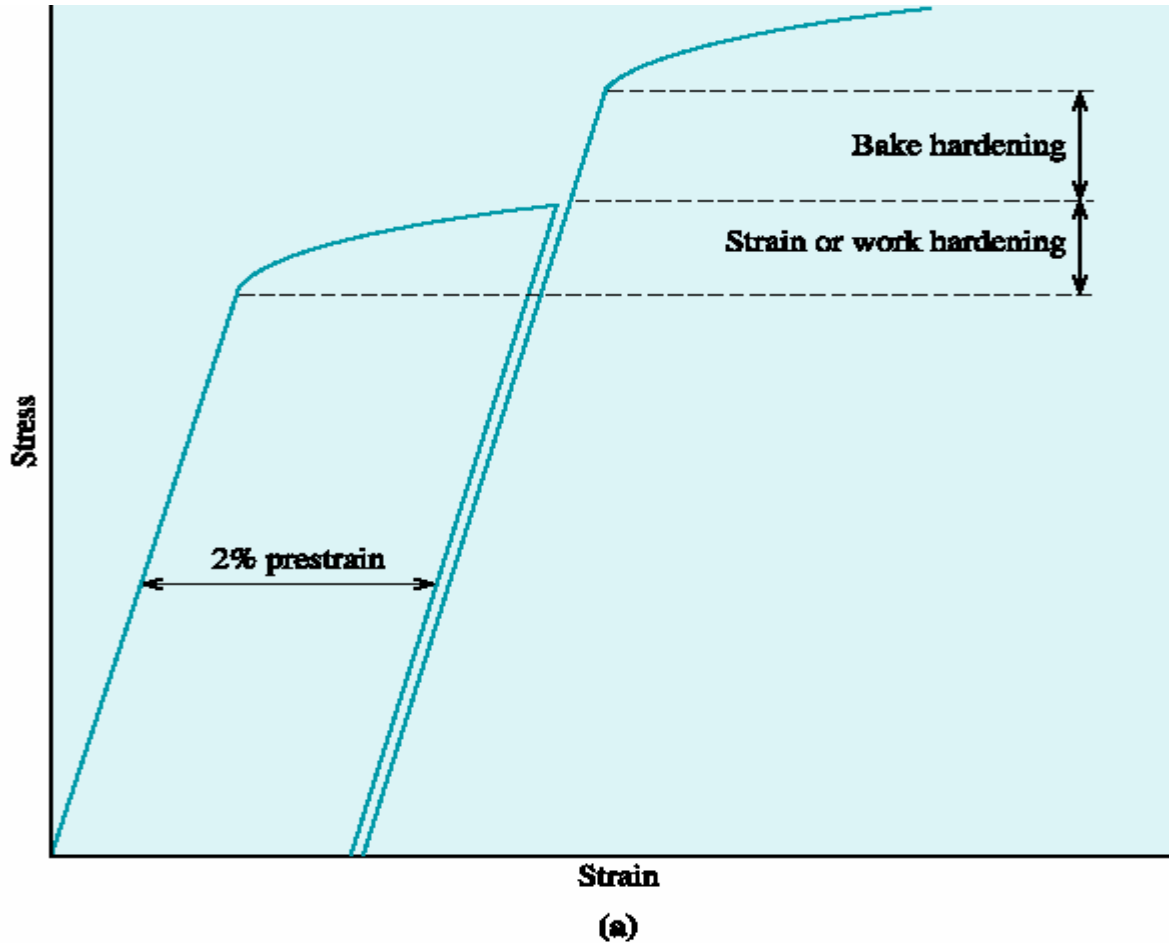
Çökelti ve matrisin kristal yapıları arasında sürekli bir ilişki vardır. Yaşlandırma gerekebilir.

## Bölüm 11.3. Yaşlanma ve Çökeltme Sertleşmesi

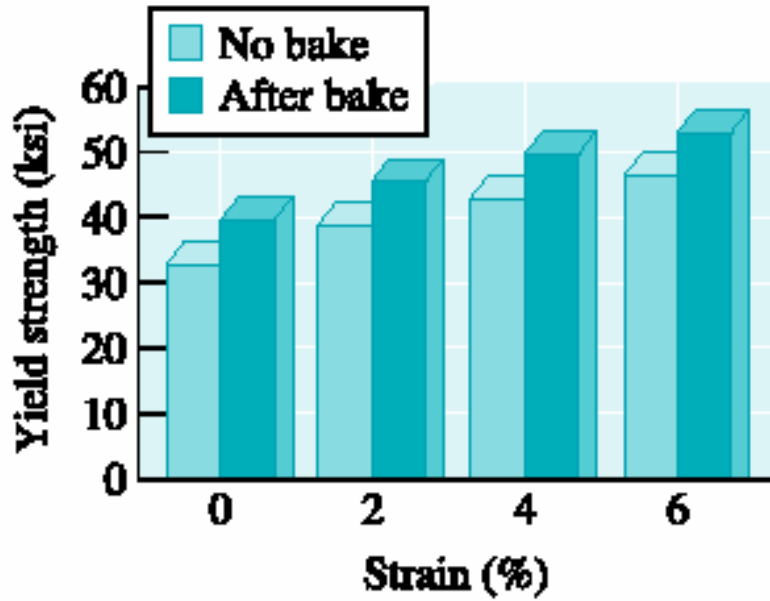
- **Yaşlanma sertleşmesi** – Özel dağılım/dispersiyon sertleşmesi ısıtma işlemidir. Çözeltiyeye alma işlemi, su verme ve yaşlanma ile belirgin mukavemetlenme etkisi veren koherent çökelti oluşur. Bu olay çökeltme sertleşmesi olarak da bilinir, dispersiyon sertleşmesinin bir şeklidir.



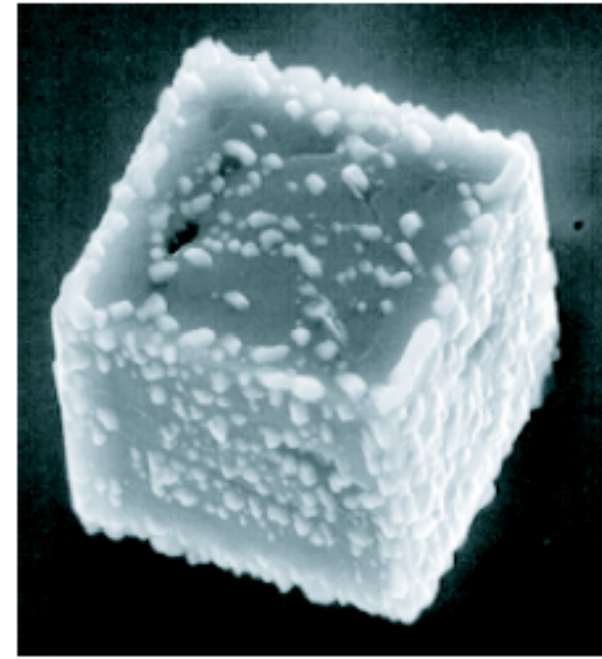
## Bölüm 11.4. Yaşlanabilir Alaşımların Uygulamaları



(a) Isıl işleme sertleşebilen çeliğin deformasyon sertleşmesi ve çökeltme sertleşmesi ile mukavemetteki artışı gösteren gerilim-deformasyon eğrisi. (Source: U.S. Steel Corporation, Pittsburgh, PA.)

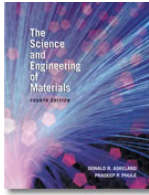


(b)



(c)

(b) Isıl işleme sertleşebilen çeliğin akma dayanımındaki artışı gösteren grafik. (*Source: Bethlehem Steel, PA.*) (c) Niobyum ve mangan içeren çeliğin TEM görüntüsü. Niobyum karbon ile reaksiyona girerek NbC bileşimini oluşturur ve çöken bu bileşik mukavemet artışı sağlar. (*Courtesy of Dr. A.J. Deardo, Dr. I. Garcia, Dr. M. Hua, University of Pittsburgh.*)



## Bölüm 11.5. Yaşlanma veya Çökeltme Sertleşmesinde Mikroyapısal Değişim

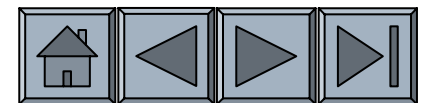
- ❑ Yumuşak ve daha sünek matriste, ince, sert, uyumlu çökeltinin uniform dağılımını sağlamak için uygulanır.
- ❑ Al-%4 Cu alaşımı yaşlandırılabilen bir alaşımdır.
- ❑ Yaşlandırma işlemi 3 aşamadan oluşur

Adım 1: Çözeltiye alma/çözündürme

Adım 2: Su verme

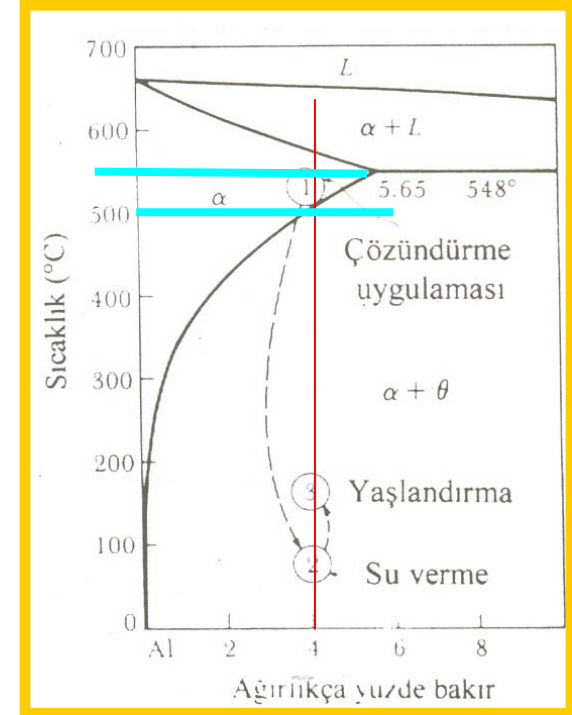
Adım 3: Yaşlanma

- ❑ **Guinier-Preston (GP) zonları** – Yaşlanma prosesinin ilk aşamalarında matristen küçük atom topluluklarının çökeltmesidir.



## 1) Çözündürme Uygulaması:

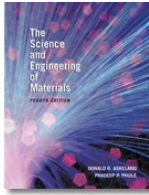
- ❑ Alaşım solvüs sıcaklığının üzerine ısıtılır ve homojen  $\alpha$  katı eriyiği oluşana kadar bekletilir.
- ❑ Bu aşama  $\theta$  çökeltisini çözer
- ❑ Orijinal alaşımda bulunan segregasyonu azaltır.
- ❑ Sıcak yırtılmanın önlenmesi için alaşıma solvüs ve ötektik sıcaklıklar arasında çözündürme uygulanır.
- ❑ Al-%4 Cu alaşımı için 500-548°C arasındadır.



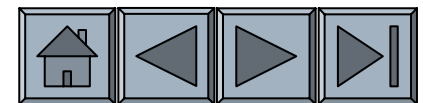
## 2) Su Verme:

- ❑ Çözündürme uygulamasından sonra yapısında yalnızca  $\alpha$  bulunan alaşım hızla soğutulur veya su verilir.
- ❑ Atomlar çekirdeklenme yerlerine difüz edecek zamana sahip değildirler bu nedenle  $\theta$  fazı oluşmaz.
- ❑ Su vermeden sonra yapıda fazla Cu içeren aşırı doymuş  $\alpha$  katı eriyiği vardır, dengeli bir yapı değildir.

# Su Verme Esnasında Oluşan Kalıntı Gerilmeler

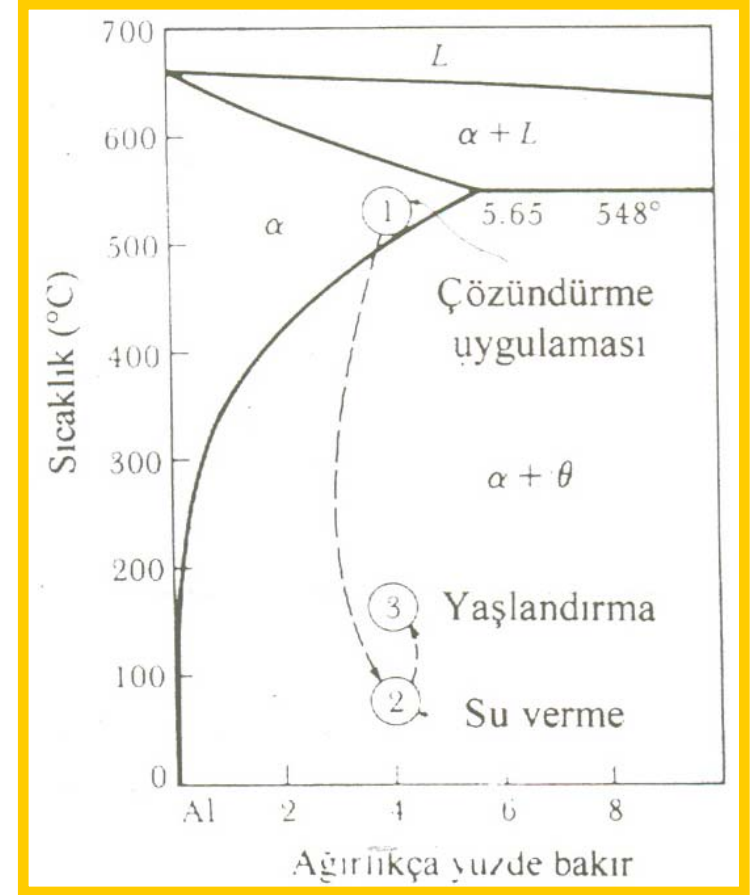


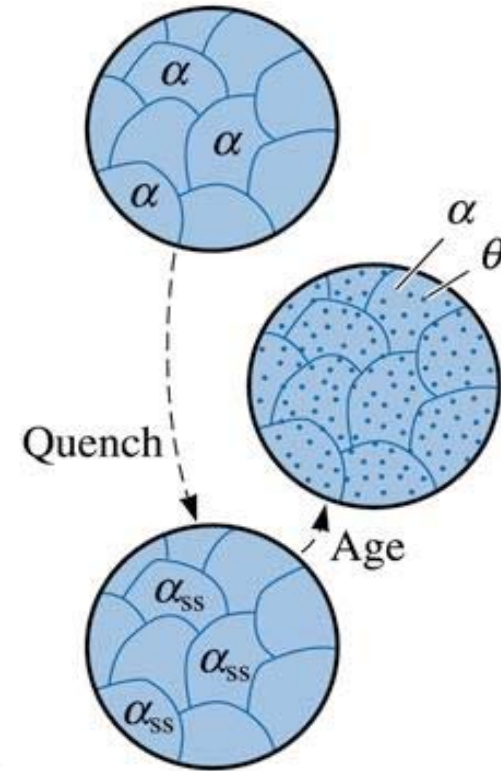
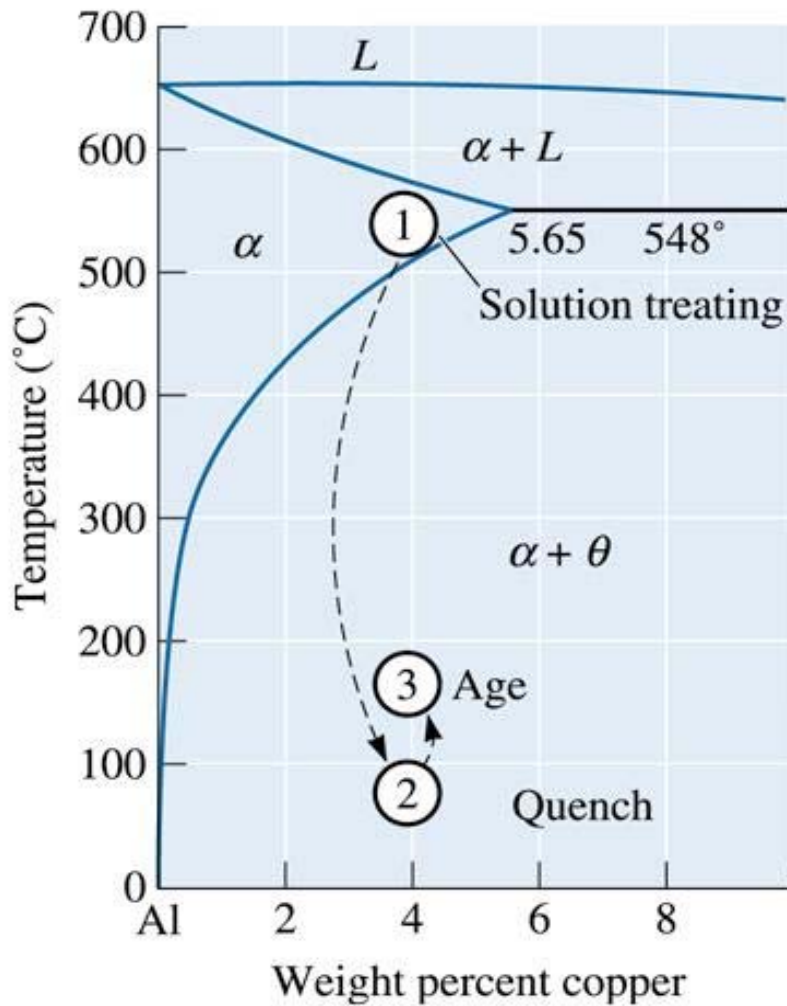
- ❑ Su verildiğinde parçanın merkezi yüzeyden daha yavaş soğur. Hızlı soğumuş yüzey büzülür.
- ❑ Merkez sıcak kaldığı için (sünek ve yumuşak), büzülen yüzey merkeze basma kuvveti uygular.
- ❑ Zamanla merkez soğur, çekilmesi yüzey tarafından engellenir, su verilmiş kısım içerisinde kalıntı gerilme modeli oluşur.
- ❑ Kalıntı gerilmeler, çarpılma, şekil değiştirme, kırılma gibi etkilere neden olur.
- ❑ Kalıntı gerilmelerden doğan problemleri azaltmak için yaşlandırma ile mukavemetlendirilebilen alaşımlar gereğinden hızlı soğutulmazlar.



### 3) Yaşlanma:

- ❑ Aşırı doymuş  $\alpha$  solvüs sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa ısıtılır.
- ❑ Bu yaşlanma sıcaklığında atomlar kısa mesafelere difüz edebilirler.
- ❑ Aşırı doymuş  $\alpha$  dengede olmadığı için fazla Cu atomları çekirdeklenme yerlerine difüz ederler, çökelti oluşur ve büyür.
- ❑ Alaşım yaşlandırma sıcaklığında etkili bir süre bekletilirse dengeli  $\alpha$  ve  $\theta$  yapısı oluşur.





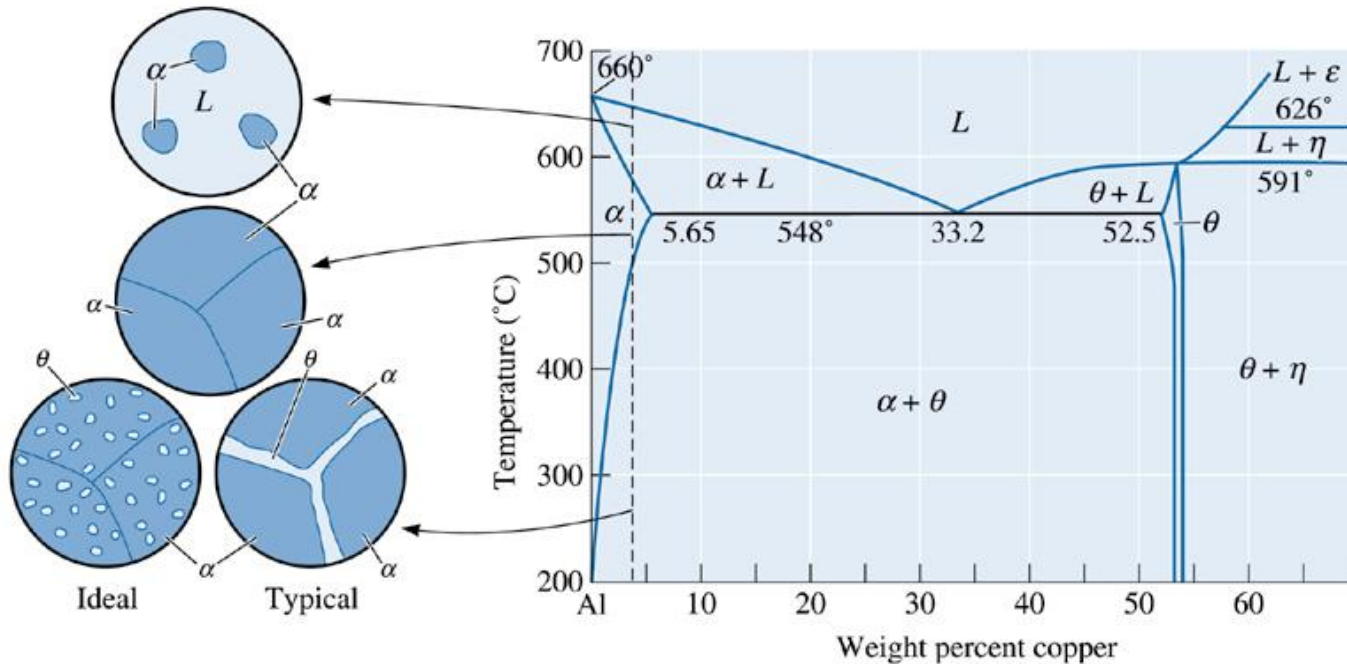
©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning<sub>™</sub> is a trademark used herein under license.

Al-Cu faz diyagramında yaşlanma ısıl işleminin üç adımı ve ortaya çıkan mikroyapılar.



## Örnek 11.2. Al-%4 Cu Alaşım Fazları

Al-%4Cu alaşımının oda sıcaklığına deney koşullarında katılaşması ile alaşıma su verildiği koşulları karşılaştırınız.



Al-Cu faz diyagramı ve katılaşma sırasında ortaya çıkan mikroyapılar.

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

## ÇÖZÜM

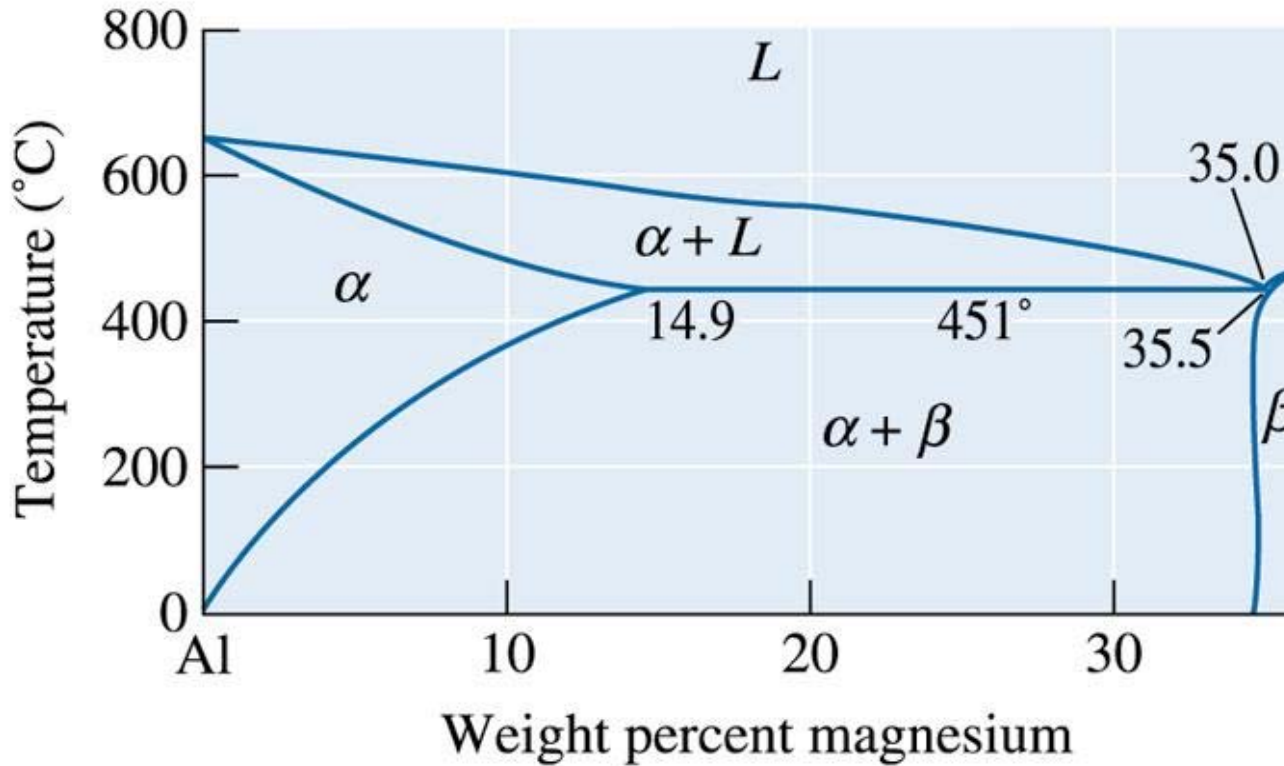
Oda sıcaklığına bağ çizgisi çekildiğinde  $\alpha$  miktarı %0.02 Cu. Ancak, su verme sonrası alfa kompozisyonu yine %4 tür.  $\alpha$  denge bakır içeriğinden daha fazla bakır içerdiği için  $\alpha$  bakır ile aşırı doymuş olarak bulunur.

## Yaşlandırma Sırasında Dengesiz Çökeltme

- ❑ Al-Cu alaşımının yaşlandırılması esnasında dengeli  $\theta$  meydana gelmeden önce seri çökeltiiler oluşur.
- ❑ Yaşlanmanın başlangıcında Cu atomları matriste (100) düzlemlerinde yoğunlaşır ve GP-1 bölgesini oluştururlar.
  - ❑ GP-1 Bölgesi  $\rightarrow$  çok ince Cu kümeleri
- ❑ Yaşlanma devam ettiğinde daha çok Cu atomları difüz eder, GP-2'ler oluşur.
- ❑ GP-2'ler çözünür, dengeli  $\theta'$ ya benzeyen  $\theta'$  oluşur.
- ❑  $\theta'$  çözünür ve dengeli  $\theta$  fazı tamamıyla çökeltir.

# Örnek 11.3. Isıl İşleme Sertleştirme Prosesi Tasarımı

Mg-Al faz diyagramında Mg-%8Al alaşımı ısıtılarak ısıtılarak sertleştirilebilir. Bu alaşım için uygun bir ısıtım işlemi prosedürü tasarlayınız?



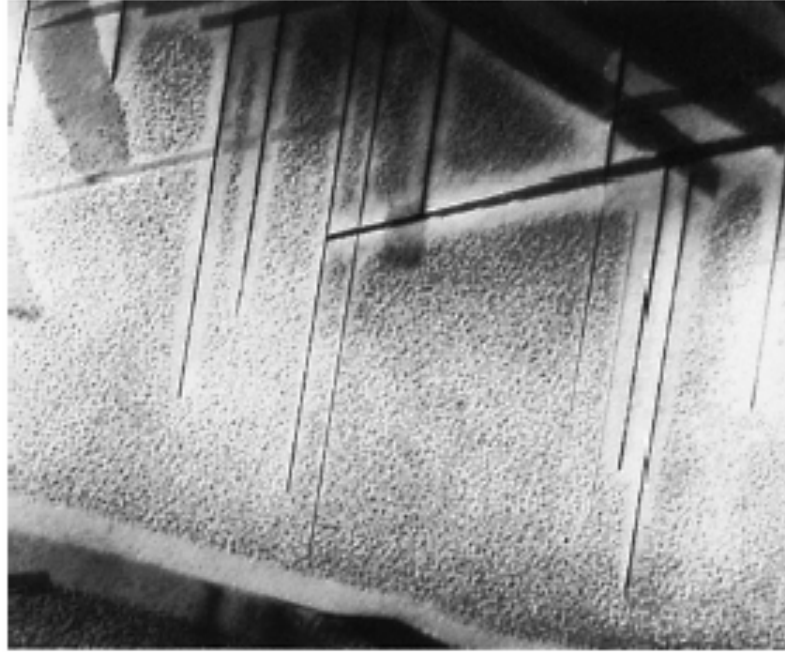
**Al-Mg faz diyagramının bir kısmı.**

## ÇÖZÜM

Adım 1: Solvüs ve ötektik arasındaki sıcaklıkta çözündürme işlemi. 340°C ve 451°C.

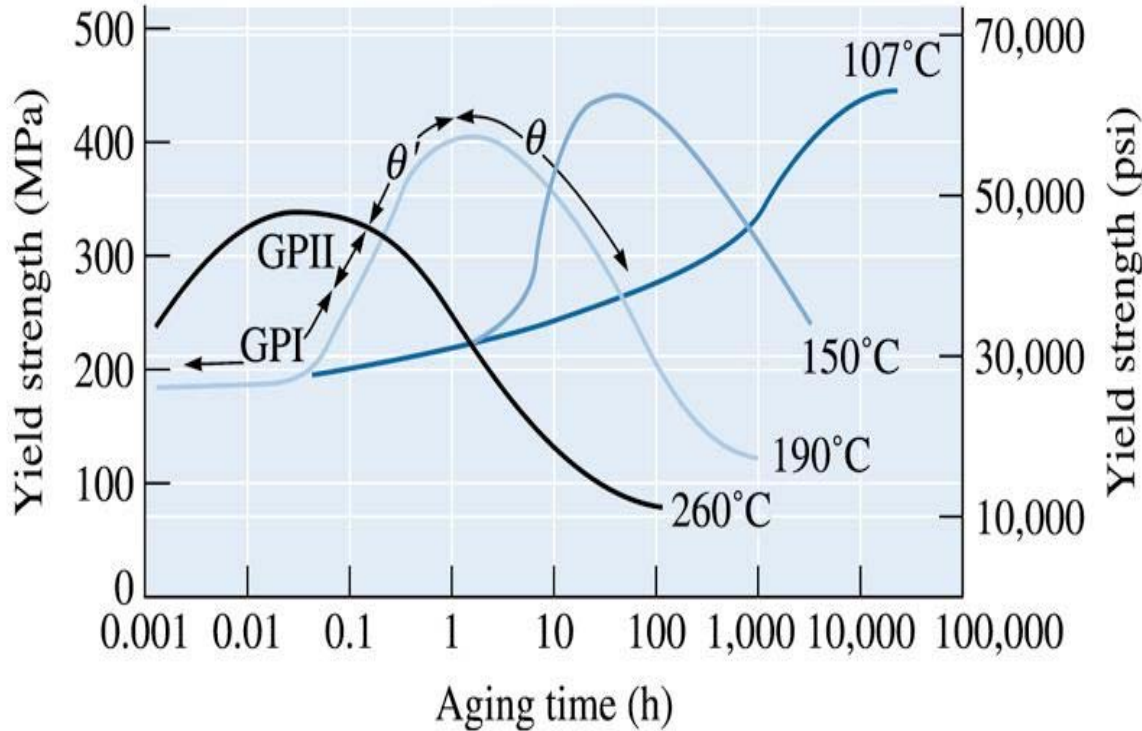
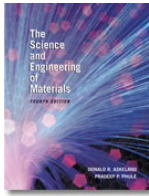
Adım 2: Oda sıcaklığına  $\beta$  fazı oluşumuna fırsat vermeden soğutun.

Step 3: Solvüs altındaki sıcaklıkta yaşlandırın. 340°C altında küçük  $\beta$  faz dağılımını sağlayın.



**Al-%15 Ag içeren alaşımda koherent  $g_0$  plakaları ve yuvarlık GP zonlarının elektron mikroskobu görüntüsü. (40,000). (Courtesy of J.B. Clark.)**

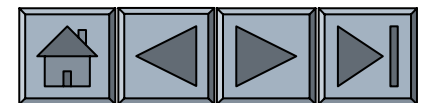
# Bölüm 11.6. Yaşlanma Sıcaklığı ve Süresinin Etkisi



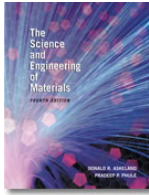
©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning<sup>™</sup> is a trademark used herein under license.

- ❑ Yaşlandırma sıcaklığı düştükçe, maksimum dayanım artar.
- ❑ Elde edilen yüksek dayanım uzun süre korunabilir.
- ❑ Özellikler daha uniformdur.

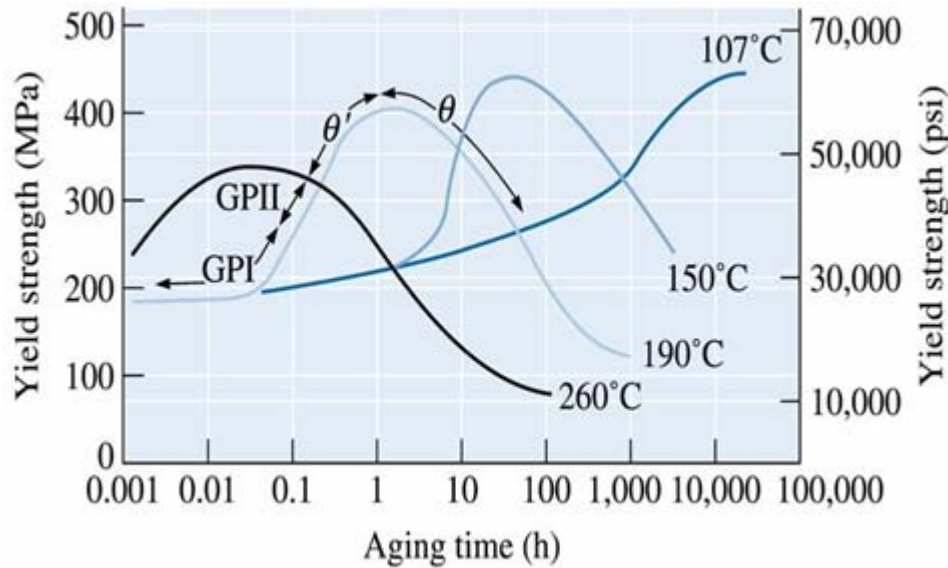
**Al-%4 Cu alaşımının akma dayanımı üzerine yaşlanma sıcaklık ve süresinin etkisi.**



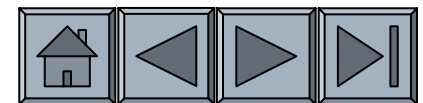
# Örnek 11.4. Alüminyum Alaşımlarının Mukavemetlenmesine Yaşlandırma Isıl İşlem Süresinin Etkisi



Bir saatlik öğle arasında fırın operatörü Al-%4Cu alaşımından olan numuneyi fırından çıkarmadı. 190°C ve 260°C'lerde ekstra bir saat fazla yapılan ısıl işlemlerin etkilerini tartışınız?



Al-%4Cu alaşımının mukavemetine sıcaklık ve sürenin etkisi.





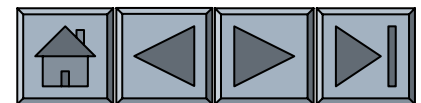


## ÇÖZÜM

190°C'de, en yüksek mukavemete 2 saatte erişilir. 3 saat sonra da akma mukavemeti genel olarak aynıdır: 400 MPa (60,000 psi)

260°C'de en yüksek mukavemete; 340 MPa (50,000 psi) 0,06 saatte ulaşılır. Bir saat sonra, mukavemet 250 MPa'ya (40,000 psi) düşer.

Böylece, yüksek yaşlandırma sıcaklığı daha düşük pik mukavemeti ve mukavemeti yaşlanma süresine karşı daha duyarlı hale getirir.



## Bölüm 11.7. Yaşlanma Mukavemetlenmesi İçin Gereker

- ❑ Faz diyagramı azalan sıcaklık ile birlikte azalan katı eriyebilirlik göstermelidir. Alaşım solvüs sıcaklığının üzerinde tek faz oluşturmalı, soğutma ile 2 faz bölgesine geçmelidir.
- ❑ Matris → yumuşak ve sünek --- Çökelti → sert ve kırılğan olmalıdır.
- ❑ Alaşıma su verilebilmesi zorunludur.
- ❑ Oluşan çökelti matris yapısı ile uyumlu olmalıdır. Çökeltinin şekli ve dağılımı kontrol edilebilmelidir.



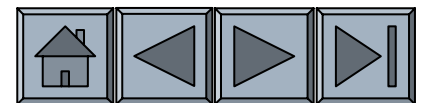
## Bölüm 11.8. Yaşlanabilen Alaşımların Yüksek Sıcaklıklarda Kullanımı

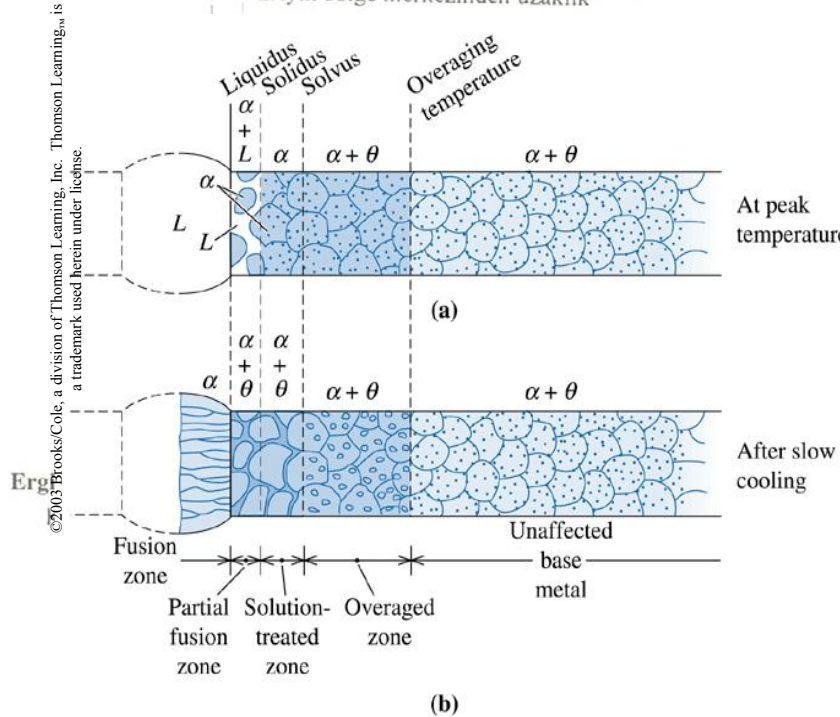
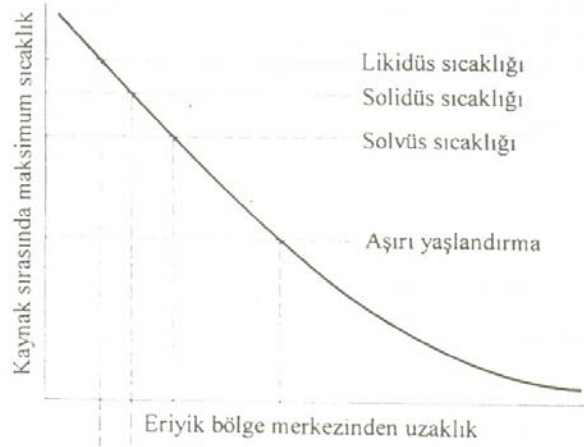
**Al alaşımları** →  $T > 500^{\circ}\text{C}$ 'de 2.faz çözünür ve mukavemetlenme elde edilemez, yüksek sıcaklık için uygun değildir.

**Mg alaşımları** → Dayanımlarını  $250^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar korurlar.

**Bazı Ni alaşımları** →  $1000^{\circ}\text{C}$ 'de bile aşırı yaşlanmaya dirençlidirler.

□ Yaşlandırma ile mukavemetlendirilen alaşımların kaynaklanabilme problemi vardır.





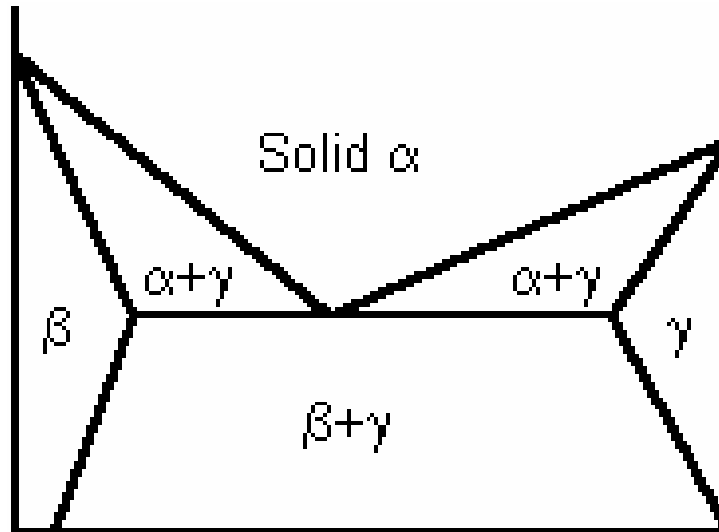
Ergitme kaynağı sırasında yaşlanabilir alaşımlarda mikroyapısal değişimler. (a) pik sıcaklıkta kaynak mikroyapısı (b) kaynağın oda sıcaklığına yavaş yavaş soğutulması ile elde edilen mikroyapı.

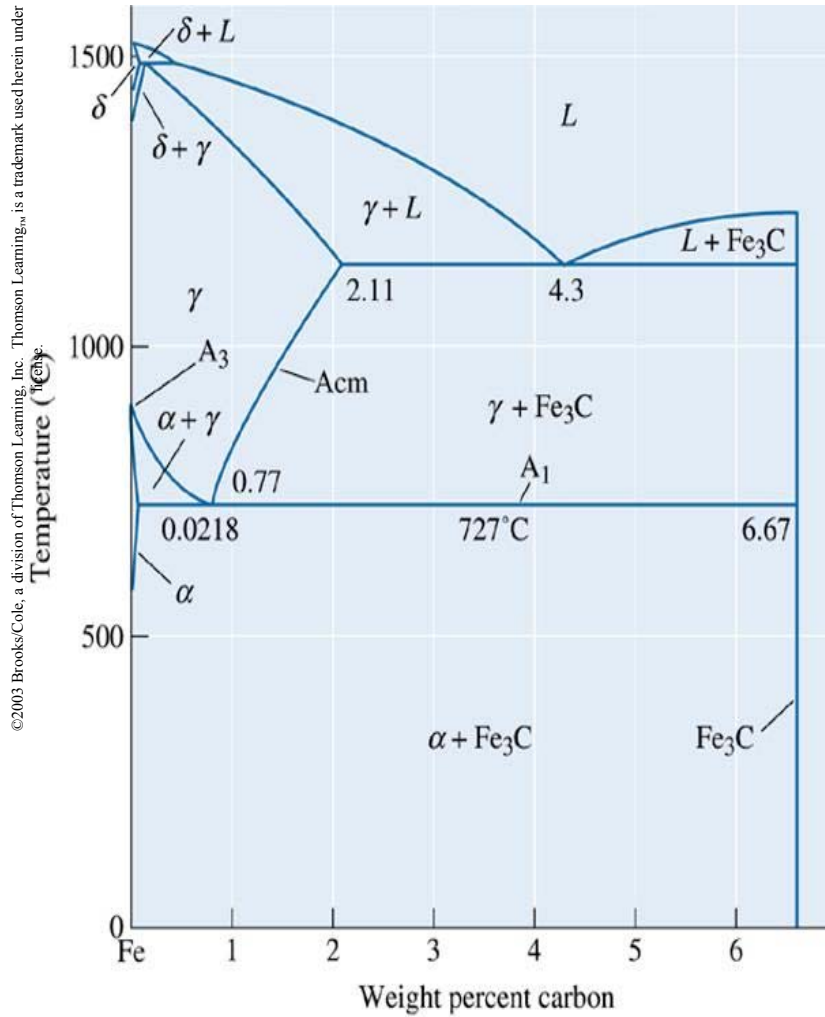
## Bölüm 11.9. Ötektoid Reaksiyon

- **Östenit** – Demirin YMK yapılı kristaline verilen isimdir.
- **Ferrit** – Demirin HMK yapılı kristaline verilen isimdir.  $\alpha$  veya  $\delta$  olarak bulunur..
- **Sementit** – Sert, kırılğan seramik benzeri bir bileşiktir  $Fe_3C$ , uygun olarak dağıldığında çelikte mukavemet artırır.
- **Perlit** – İki fazlı lamelar mikrooluşumlardır. Ferrit ve sementit içerir. Çelik normal olarak katılaştığında /soğutulduğunda veya rölatif olarak yüksek sıcaklıklarda izotermal olarak dönüştüğünde oluşur.

# Ötektoid Reaksiyon

$$K_1 = K_2 + K_3$$





- $\alpha$  : ferrit (HMK)
- $\gamma$  : ostenit (YMK)
- $\delta$  : (HMK)
- Katı eriyikler yumuşak ve sünektir, ancak karbonun katı eriyik mukavemetlendirilmesi nedeniyle, katı eriyiklerin mukavemeti, saf demirden daha fazladır.

Fe-Fe<sub>3</sub>C faz diyagramı. (Fe-C faz diyagramının bir bölümü). % 6,67'den geçen dik çizgi Fe<sub>3</sub>C stokiometrik bileşimidir.

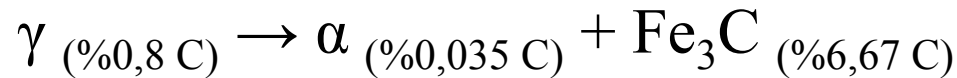
## Metallerarası Bileşikler

- ❑ Katı Fe içinde C'nin eriyebilirlik sınırı aşıldığında  $Fe_3C$  (sementit) oluşur.
- ❑ %6,67 C içeren  $Fe_3C$  çok sert ve kırılgandır.
- ❑ Sementit miktarının boyut ve şekli kontrol edilerek çeliğin özellikleri ve dağılım mukavemetlenmesinin düzeyi kontrol edilebilir.



# Ötektoid Reaksiyon

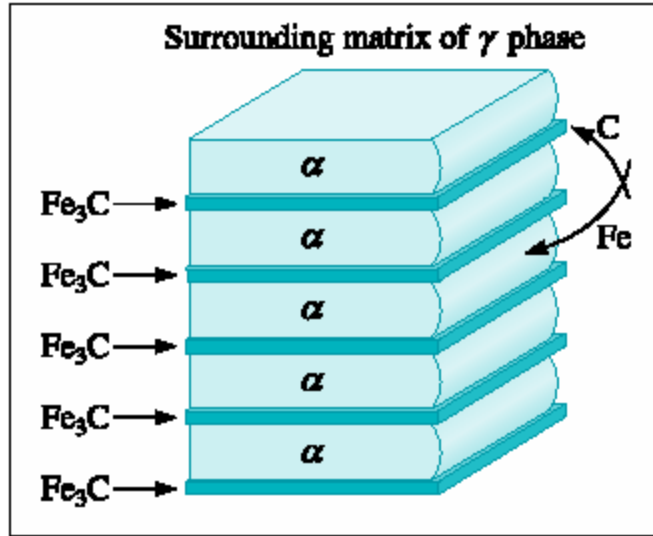
- ❑ %0,8 C içeren ötektoid kompozisyona sahip alaşım 723°C'nin üzerine ısıtılırsa yalnızca  $\gamma$  tanelerini içeren bir yapı oluşur.
- ❑  $\gamma$ , 723 °C'ye soğutulduğunda **ötektoid reaksiyon** başlar;



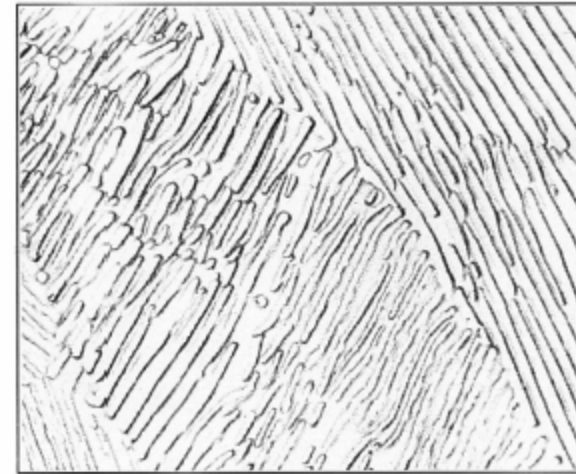
- ❑ Farklı kompozisyona sahip 2 faz oluşur.
- ❑ Reaksiyon sırasında atomlar difüz etmek zorundadır.
- ❑  $\gamma$  içinde C'nin çoğu  $\text{Fe}_3\text{C}$ 'ye difüz ederken Fe atomlarının büyük bir kısmı  $\alpha$ 'ya difüz eder.

C ve Fe'nin yeniden dağılımı

$Fe_3C$  ve  $\alpha$  ince lameller veya plakalar şeklinde büyür.



(a)



(b)

**Perlitin büyümesi ve yapısı: (a) demir ve karbonun tekrar dağılımı (b) perlit lamellerinin mikroyapı fotoğrafı (2000). (From ASM Handbook, Vol. 7, (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073.)**

## Perlit

- ❑  $\alpha$  ve  $Fe_3C$ 'nin lamelli yapısı perlit olarak adlandırılır.
- ❑ Perlitteki lameller ötektik Sn-Pb'deki lamellerden çok daha incedir.
- ❑ Çünkü Fe ve C atomları sıvıya doğru değil, katı  $\gamma$ 'e doğru difüz etmek zorundadırlar.
- ❑  $Fe_3C$  lamelleri  $\alpha$  tarafından kuşatılmıştır.
- ❑ Perlitik yapı etkili dağılım mukavemetlendirmesi oluşturur → kesintisiz ferrit yumuşak ve sünektir, kırılğan ve sert sementit ise dağılmıştır.



## Örnek 11.5. Perlitin Kompozisyonu ve Fazları

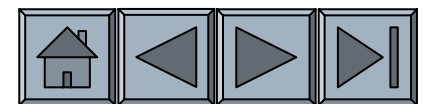
Perlitte mevcut ferrit ve sementit miktarını hesaplayınız?

### ÇÖZÜM

Perlit % 0,77C içermesi gerektiğine göre manivela kuralı uygulanarak:

$$\% \alpha = \frac{6.67 - 0.77}{6.67 - 0.0218} \times 100 = 88.7\%$$

$$\% Fe_3C = \frac{0.77 - 0.0218}{6.67 - 0.0218} \times 100 = 11.3\%$$



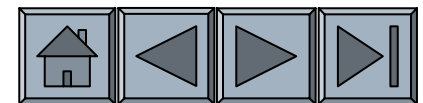
# Örnek 11.6.Tungsten Karbür (WC)-Kobalt (Co) Kompoziti ve Perlit



Tungsten karbür-kobalt kompozitleri sementit karbür veya karbürler olarak bilinir. Matkap uçlarında ve kesici takım uçlarında kullanılırlar. Bu sementit karbürler ve perlitler arasında hangi özellikler benzerdir. Ne gibi büyük farklar vardır?

## ÇÖZÜM

Her malzemedede bir fazın tokluk verme avantajını (ferrit veya kobalt metali) ve diğer fazın sert seramik benzeri faz (WC ve  $Fe_3C$ ) olma avantajını kullanırız. Metalik faz süneklik özelliğine yardımcı olurken sert faz yapıya mukavemet kazandırır.



## ÇÖZÜM (devamı)

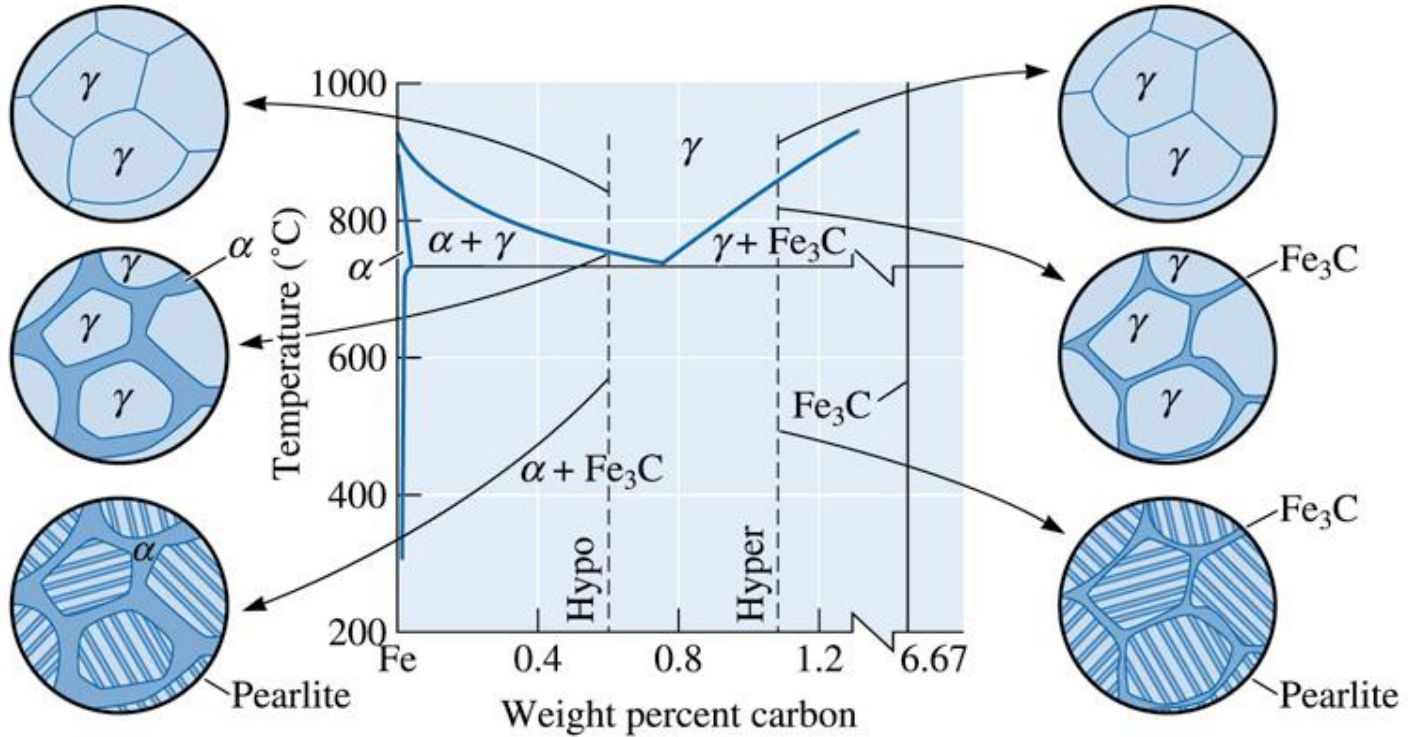
Fark ise; WC ve Co'nun ayrı bileşikler olması ve toz metalurjisi yardımı ile sinterlenerek kullanılmasıdır. Perlit iki fazdan oluşan mikro oluşumdur (Fe-C).

Diğer bir fark ise; perlit fazı ötektoid reaksiyon sonucu oluşurken WC-Co arasında herhangi bir reaksiyon yoktur. Tipik olarak, WC-Co mikroyapısı kobalt taneleri ile yapışık WC tanelerinden oluşur. Perlitte metal benzeri ferrit fazının dominant olduğu faz dominanttır.

## İlk Mikro Oluşumlar

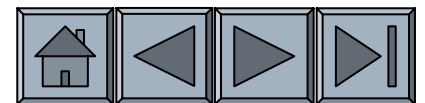
- ❑ Ötektoid altı çelikler  $\rightarrow C < \%0,8$
- ❑ Ötektoid üstü çelikler  $\rightarrow C > \%0,8$
- ❑ Ferrit ( $\alpha$ ) ötektoid altı alaşımda veya ötektoid öncesi ilk mikro oluşumdur.
- ❑  $\%0,6$  C içeren bir ötektoidaltı alaşım  $750^\circ$ 'nin üzerine ısıtılırsa mikroyapıda yalnızca  $\gamma$  kalır.

# Östenitin 750°C'nin Hemen Altına Soğutulduğundaki Durum



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

Çelikte soğuma esnasında hipoötektoid ve hiperötektoid mikroyapının gelişimi.

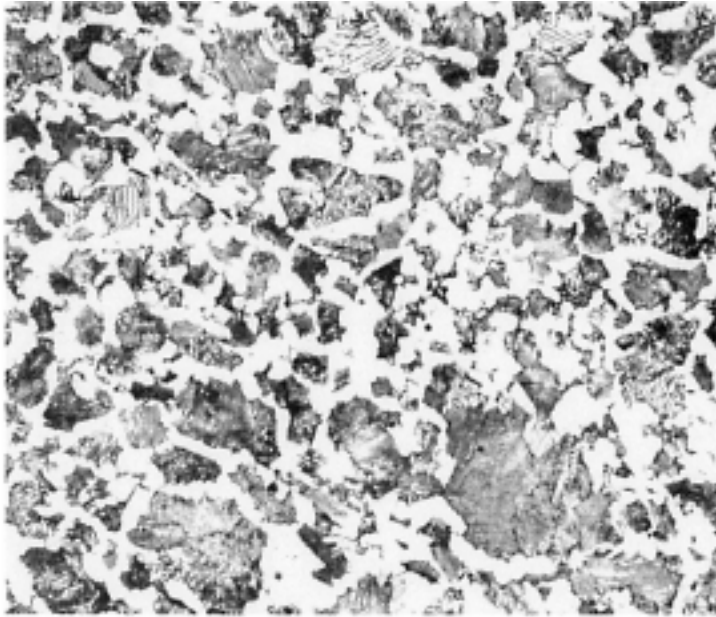




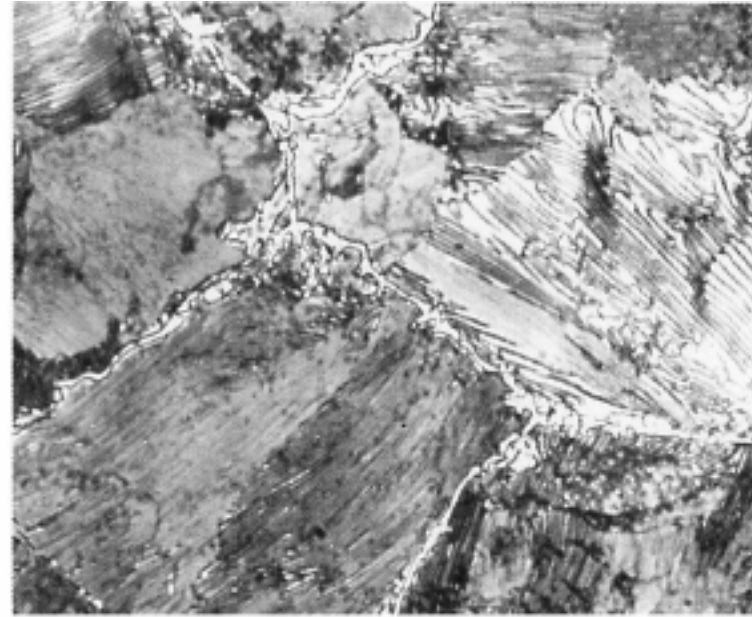
- ❑ Ferrit çökelir ve genellikle  $\gamma$  tane sınırlarında büyür.
- ❑ İlk  $\alpha$  sıcaklık  $723^{\circ}\text{C}$ 'ye düşene kadar büyümeye devam eder.  $723^{\circ}\text{C}$ 'de kalan  $\gamma$ ,  $\alpha$  tarafından kuşatılmıştır, kompozisyon %0,6C'dan %0,8C'ye yükselir.
- ❑  $723^{\circ}\text{C}$ 'nin altına soğuma, ötektoid reaksiyon ile tüm geri kalan  $\gamma$ 'nın perlite dönüşmesine neden olur.
- ❑ Son yapı  $\alpha$  ve  $\text{Fe}_3\text{C}$ 'den oluşan 2 fazı içerir ve ilk ferrit ve perlitin iki mikro oluşumu olarak düzenlenmiştir.

- Son mikroyapı ilk ferrit tarafından kuşatılan perlit adacıklarını içerir.
- Bu yapı perlitin dağılım mukavemetlenmesinden dolayı alaşımın sağlam olmasını sağlar ve sürekli (kesintisiz) ilk ferrit varlığından dolayı da halen sünektir.

Ötektoid üstü alaşımlarda ise ilk çökelen faz olan  $Fe_3C$ , östenit tane sınırlarında oluşur.  $\gamma$  ötektoid reaksiyona doğru soğuduktan sonra, çelik perlit adalarını kuşatan sert-kırılgan sementiti içerir. Bu durumda sert-kırılgan mikro oluşum sürekli olduğundan çelik de serttir. Isıl işlem ile özellikler iyileştirilebilir.

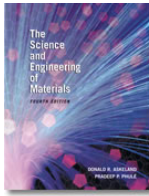


(a)



(b)

(a) Hipoötektoid çelik primer  $\alpha$  (beyaz) ve perlit ( $\times 400$ ). (b) Hiperötektoid çelik primer  $\text{Fe}_3\text{C}$  ve etrafında perlit ( $\times 800$ ). (From ASM Handbook, Vol. 7, (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073.)



## Örnek 11.7. Hypoötektoid Karbon Çeliğinde Fazlar

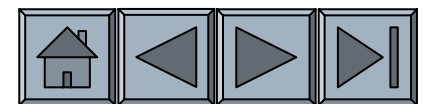
Fe-%0,60C alaşımının 726°C sıcaklıkta fazların ve mikrooluşumların kompozisyonlarını ve miktarlarını hesaplayınız?

### ÇÖZÜM

Fazlar ferrit ve semetit. Bağ çizgisini 726°C de manivela kuralını uygulayarak :

$$\alpha(0.0218\%C)\% \alpha = \left[ \frac{6.67 - 0.60}{6.67 - 0.0218} \right] \times 100 = 91.3\%$$

$$Fe_3C(6.67\%C)\% Fe_3C = \left[ \frac{0.60 - 0.0218}{6.67 - 0.0218} \right] \times 100 = 8.7\%$$





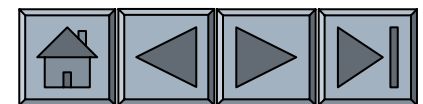
## ÇÖZÜM (devam)

727°C'tüm östenitler %0,77C içeren ötektoid kompozisyona sahiptir ve perlite dönüşür. Tüm proötektoid ferrit primer ferrit olarak kalır.

$$\begin{aligned} \text{Primary } \alpha : 0.0218\% \text{ C} \quad \% \text{ Primary } \alpha &= \left[ \frac{0.77 - 0.60}{6.67 - 0.0218} \right] \times 100 \\ &= 22.7\% \end{aligned}$$

Austenite just above 727°C = Pearlite : 0.77% C

$$\% \text{ Pearlite} = \left[ \frac{0.60 - 0.0218}{6.67 - 0.0218} \right] \times 100 = 77.3\%$$



## Bölüm 11.10. Ötektoid Reaksiyonun Kontrolü

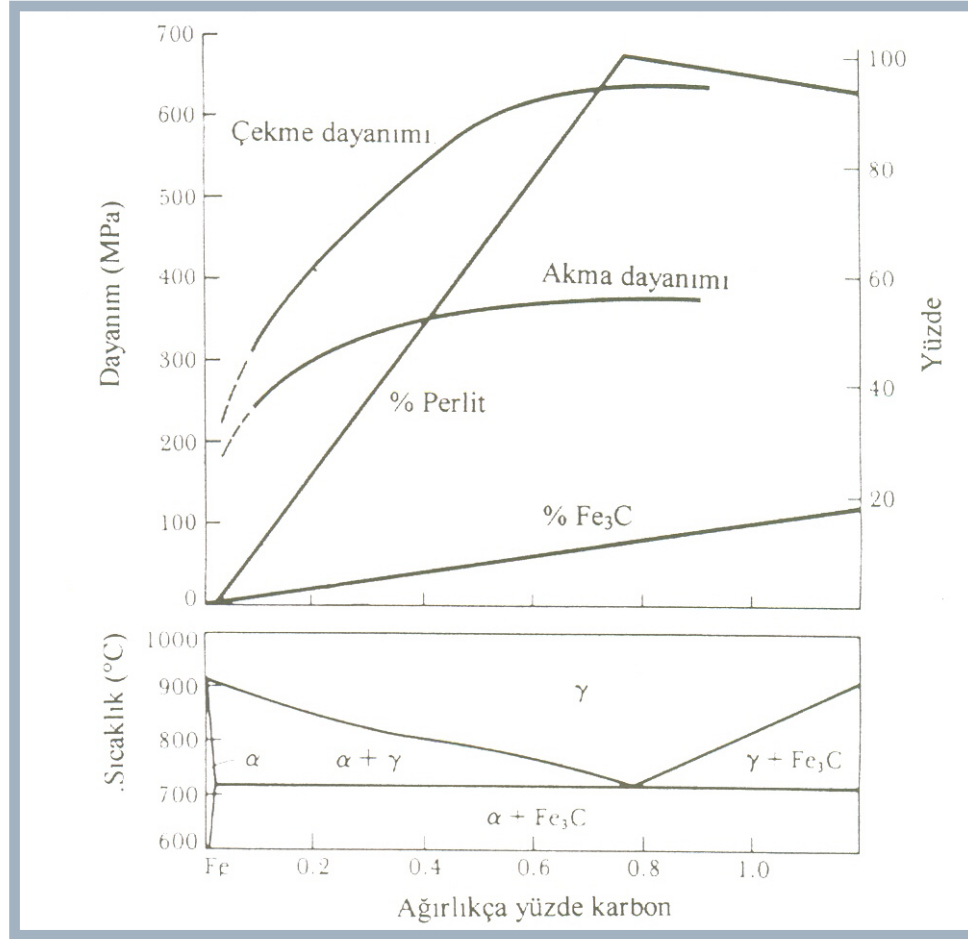
- Ötektoid miktarının kontrolü
- Östenit tane boyutunun kontrolü
- Soğuma hızının kontrolü
- Dönüşüm Sıcaklığının Kontrolü
- **TTT diyagramı** – Süre-Sıcaklık- Dönüşüm diyagramı. Bu diyagram herhangi bir sıcaklıkta faz dönüşümünün başlaması ve bitmesi için gerekli süreyi tanımlar.  
**Izotermal dönüşüm** – Dönüşümün miktarı belirli sıcaklıkta izin verilen zamana bağlı ise dönüşüm izotermaldir.

# Ötektoid Reaksiyonun Kontrolü

Ötektoid alaşımlarda dağılım mukavemetlenmesi kontrol edilebilir.

## 1) Ötektoid Miktarının Kontrolü

- Alaşımın kompozisyonu değiştirilerek 2.sert fazın miktarı da değiştirilebilir.
- Çeliğin C içeriği %0,8'e arttıkça  $Fe_3C$  ve perlit miktarı artar, dayanım artar. C içeriği çok yükseldiğinde ise mukavemetlenme azalır.



Yavaş soğutulmuş çeliklerde dayanımın %Fe<sub>3</sub>C, % perlit ve karbon miktarı ile ilişkisi

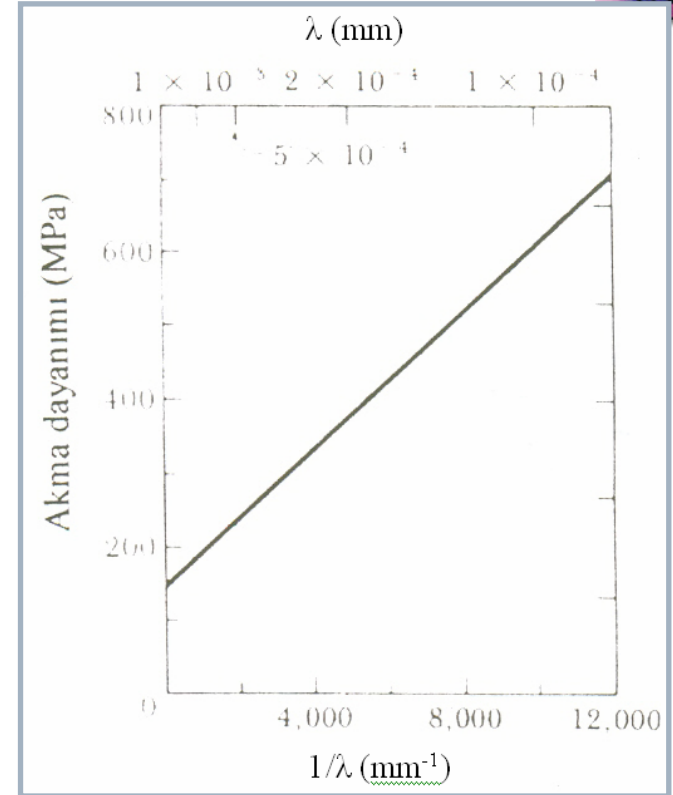


## 2) Östenit Tane Boyutu Kontrolü

- Perlit, taneler veya koloniler halinde büyür. Koloniler içinde lamellerin dizilimi benzerdir. Koloniler orijinal  $\gamma$  tanelerinin tane sınırlarında çekirdeklenir.
- İlk  $\gamma$  tane boyutu ve düşük östenitleme sıcaklığı kullanılarak veya Al ile deokside edilmek suretiyle küçültülerek perlit kolonilerinin sayıları arttırılabilir.
- Kolonilerin tane boyutu azaltılarak veya kolonilerin sayısı arttırılarak alaşımın dayanımı arttırılabilir.

### 3) Soğuma Hızının Kontrolü

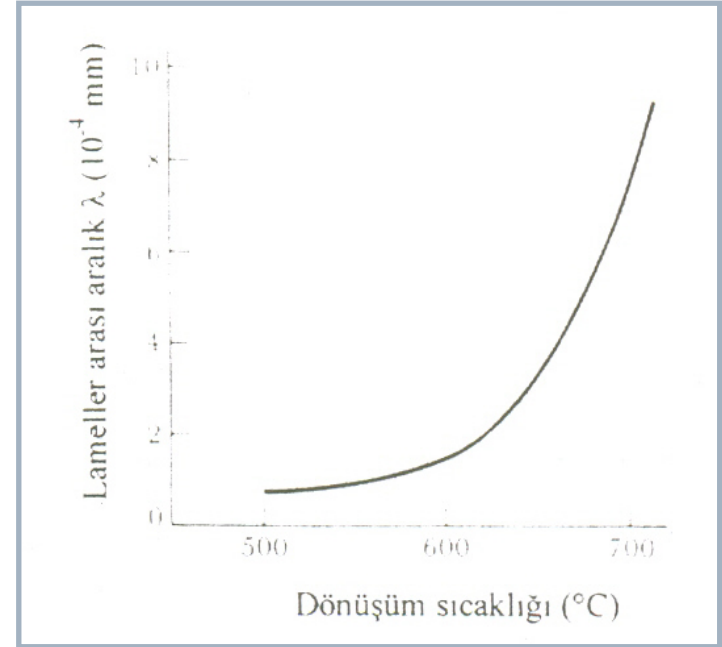
- Ötektoid reaksiyon sırasında soğuma hızı arttığında atomların difüz edebileceği mesafe kısalır.
- Reaksiyon sırasında oluşan lameller ince ve yakın aralıklı olur.
- İnce perlit oluşturmakla alaşımın dayanımı arttırılır.



Lameller arası aralığın perlitin mekanik özellikleri üzerine etkisi

## 4) Dönüşüm Sıcaklığının Kontrolü

- Katı hal ötektoid reaksiyon oldukça yavaştır ve çelik dönüşüm başlamadan önce ötektoid denge sıcaklığının altına soğuyabilir.
- Dönüşüm sıcaklığı yapının inceliğini, dönüşüm için gerekli zamanı ve iki fazın düzenlenmesini etkileyebilir.

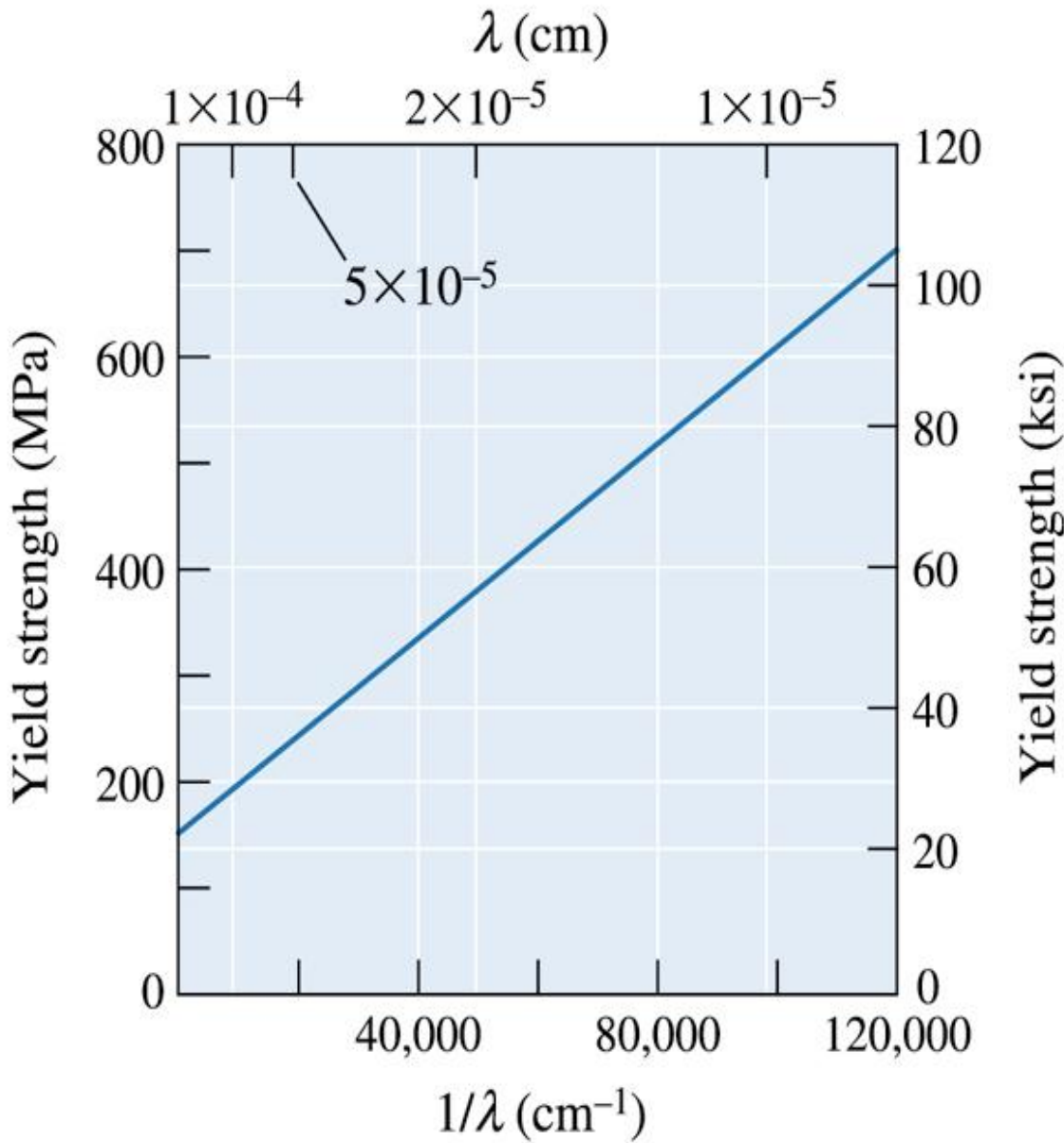
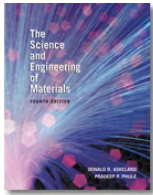


Perlitte lameller arası aralık üzerine  $\gamma$  dönüşüm sıcaklığının etkisi

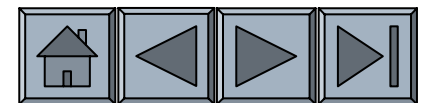
**TABLE 11-1** ■ *The effect of carbon on the strength of steels*

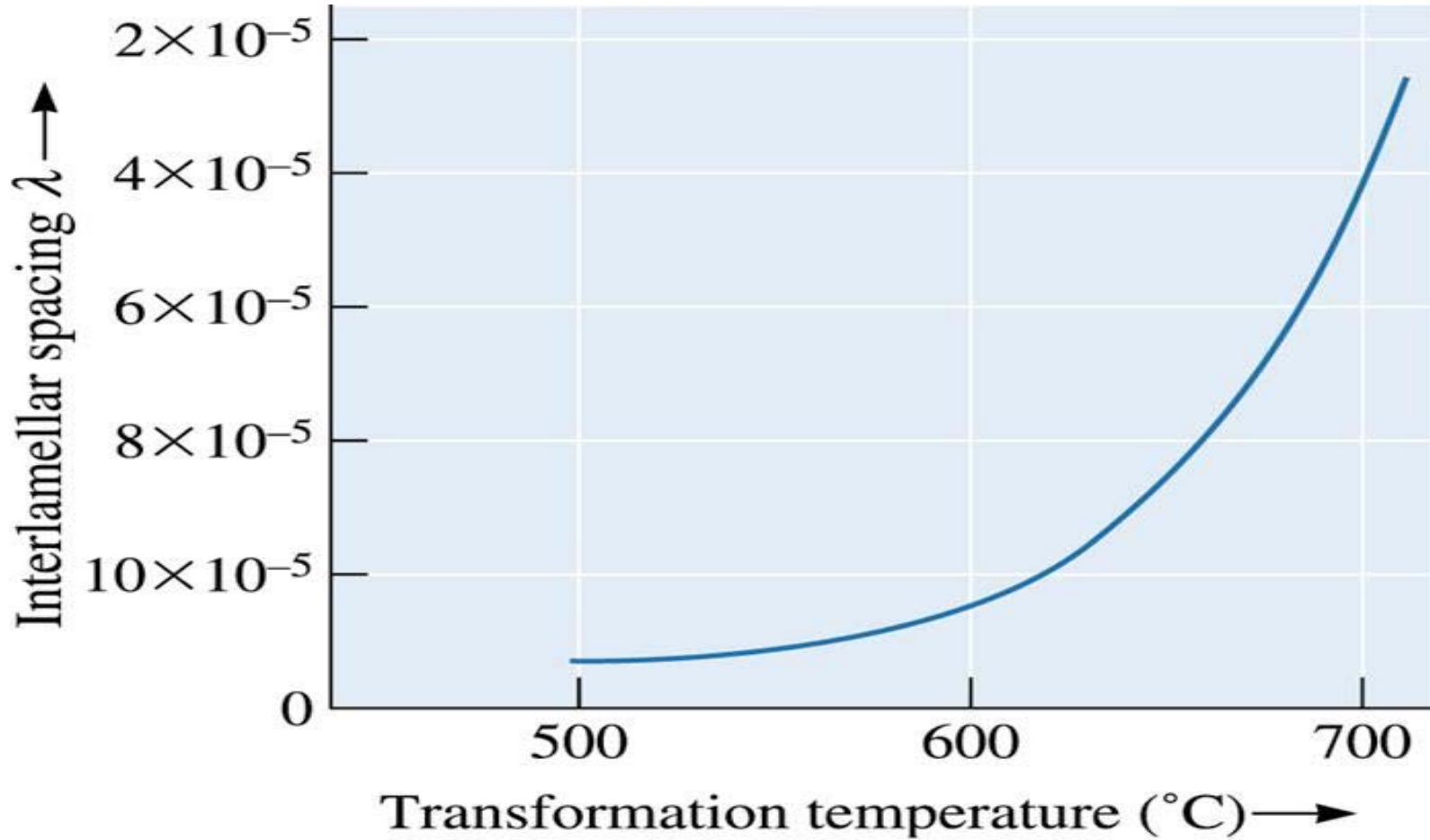
Slow Cooling (Coarse Pearlite)				Fast Cooling (Fine Pearlite)		
Carbon %	Yield Strength (psi)	Tensile Strength (psi)	% Elongation	Yield Strength (psi)	Tensile Strength (psi)	% Elongation
0.20	42,750	57,200	36.5	50,250	64,000	36.0
0.40	51,250	75,250	30.0	54,250	85,500	28.0
0.60	54,000	90,750	23.0	61,000	112,500	18.0
0.80	54,500	89,250	25.0	76,000	146,500	11.0
0.95	55,000	95,250	13.0	72,500	147,000	9.5

After Metals Progress Materials and Processing Databook, 1981.



Perlitin akma dayanımına lamellar arası mesafenin ( $\lambda$ ) etkisi.

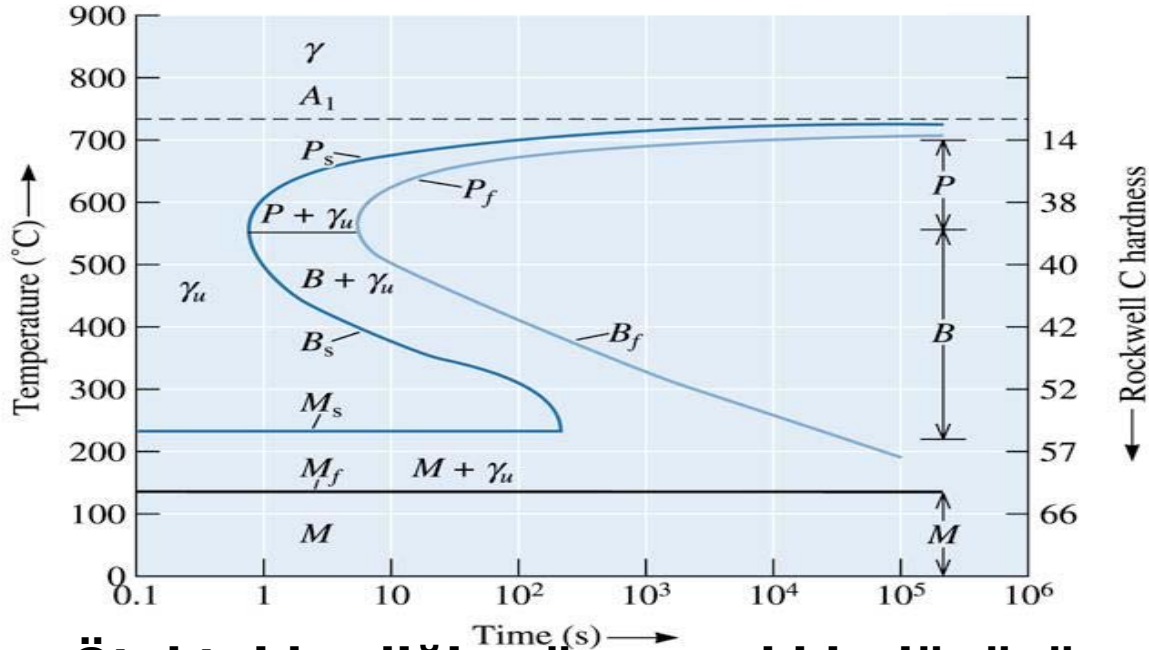




©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning, Inc. is a trademark used herein under license.

Perlitin lamellararası mesafesine östenit dönüşüm sıcaklığının etkisi.

# İzotermal Dönüşüm Diyagramı (TTT veya C Diyagramı)



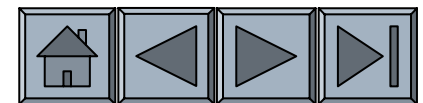
## Ötektoid çeliğin süre-sıcaklık-dönüşüm diyagramı (TTT).

- Çelikte gerekli ısıl işlem özelliklerini ve oluşabilecek yapının tahmin edilmesini sağlar.



# Beyninin Çekirdeklenmesi ve Büyümesi

- ❑ IT diyagramı burnunun hemen altındaki sıcaklıkta çekirdeklenme çok hızlı olurken difüzyon çok yavaştır. Toplam dönüşüm zamanı artar.
- ❑ Düşük dönüşüm sıcaklıklarında perlitteki lameller ince olduğundan ferrit ve sementit arasındaki sınır çok büyük olabilir, arayüzeydeki enerjiden dolayı çeliğin toplam enerjisi çok yükselebilir. Çelik iç enerjisini sementitin ferrit içerisinde ayrı yuvarlanmış parçacıklar halinde çökmesini sağlayarak düşürür. Bu yeni mikroyapı beynit olarak adlandırılır.

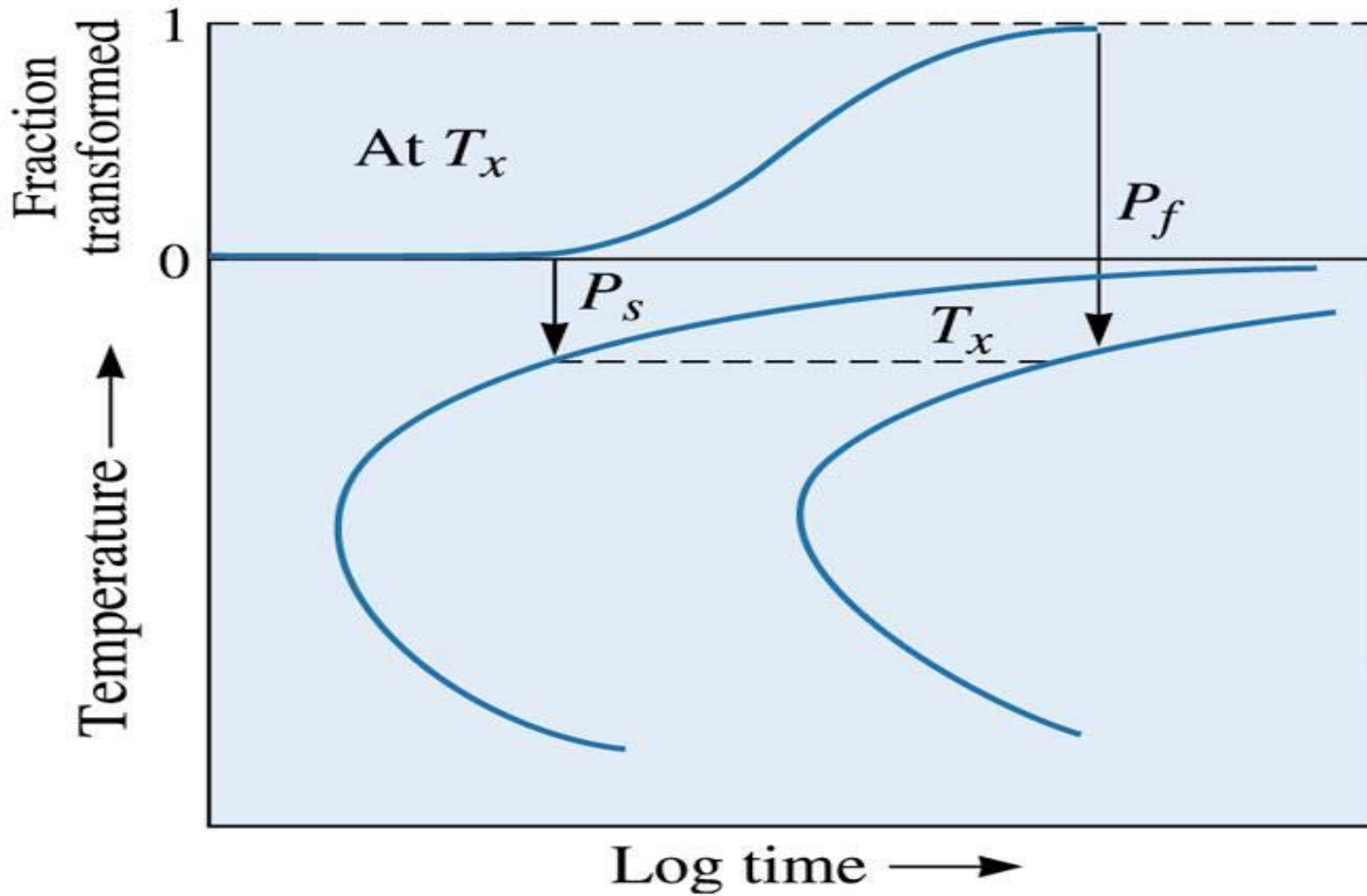




## Perlitin Çekirdeklenmesi ve Büyümesi

- ❑ Çekirdeklenme perlit başlangıç zamanına ( $P_s$ ) kadar başlamaz. Perlit büyümeye başladıktan sonra atomlar hızla difüz eder ve kaba perlit oluşur. Dönüşüm perlit bitiş zamanında ( $P_f$ ) tamamlanır.
- ❑ İzotermal dönüşüm sıcaklığı, IT eğrisinin burnuna yakın  $550^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaştığında ince perlit oluşur.

- ❑ Burnun tam altında oluşan beynit → üst beynit
- ❑ Düşük sıcaklıklarda oluşan beynit → ince beynit veya alt beynit veya iğnesel beynit

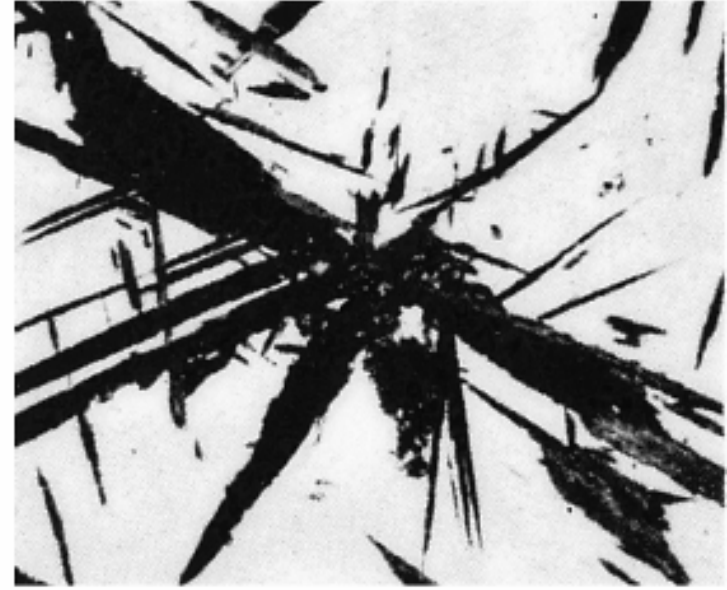


©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning<sub>sm</sub> is a trademark used herein under license.

**Sigmoidal eğri çelikler için başlangıç ve bitiş süreleri ile ilgilidir. Bu durumda, östenit perlite dönüşmektedir.**

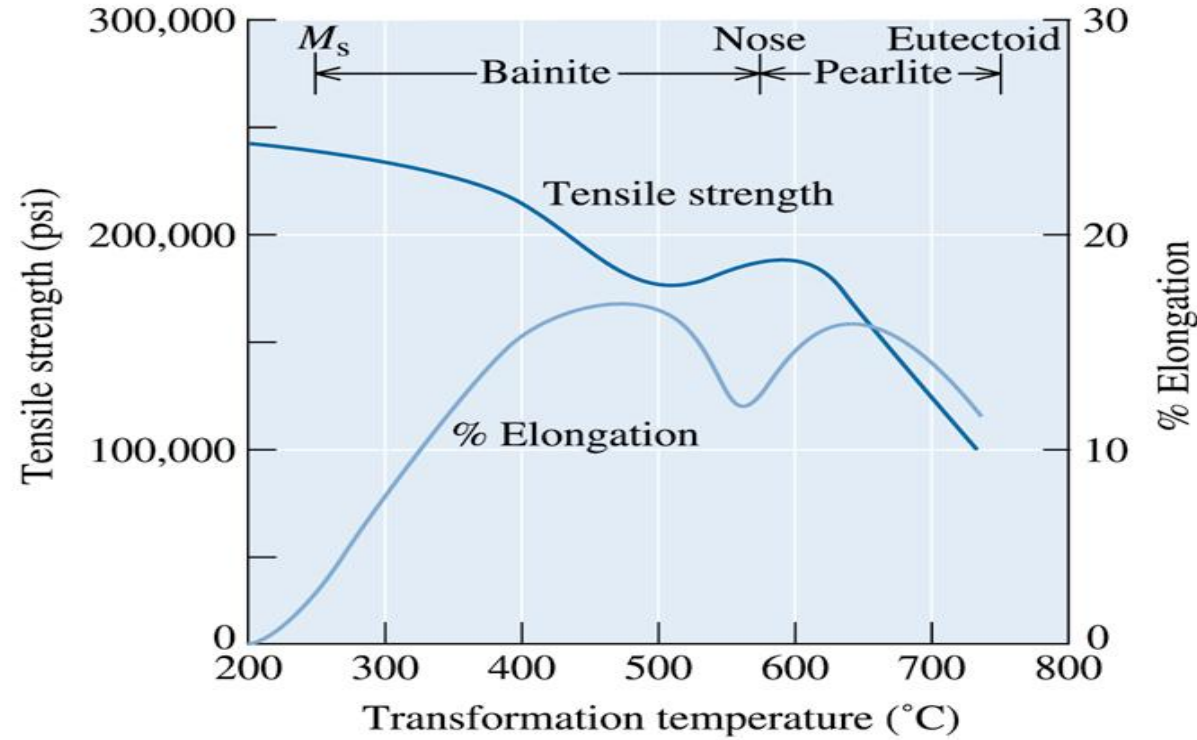


(a)



(b)

**(a) Üst beynit (gri, tüy yapılı plakalar) ( $\times 600$ ). (b) alt beynit (siyah iğneler) ( $\times 400$ ). (From ASM Handbook, Vol. 8, (1973), ASM International, Materials Park, OH 44073.)**



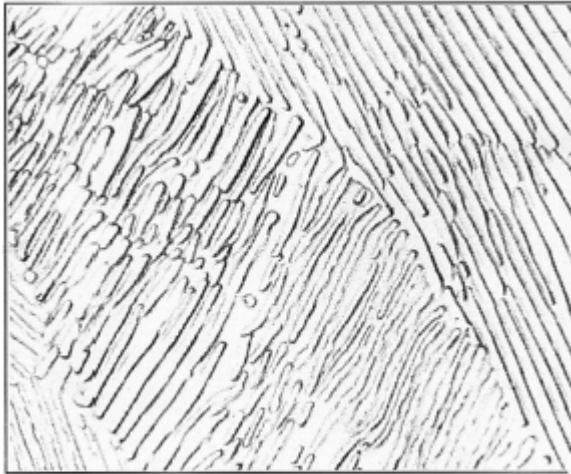
©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning, is a trademark used herein under license.

❑ Sıcaklık düştüğünde oluşan ince mikroyapı nedeniyle yüksek dayanım ve düşük süneklik elde edilir.

**Ötektoid çelik özellikleri üstüne dönüşüm sıcaklığının etkisi.**

## Örnek 11.8. Perlit Mikroyapısı Elde Etmek İçin Isıl İşlem Prosesi Tasarımı

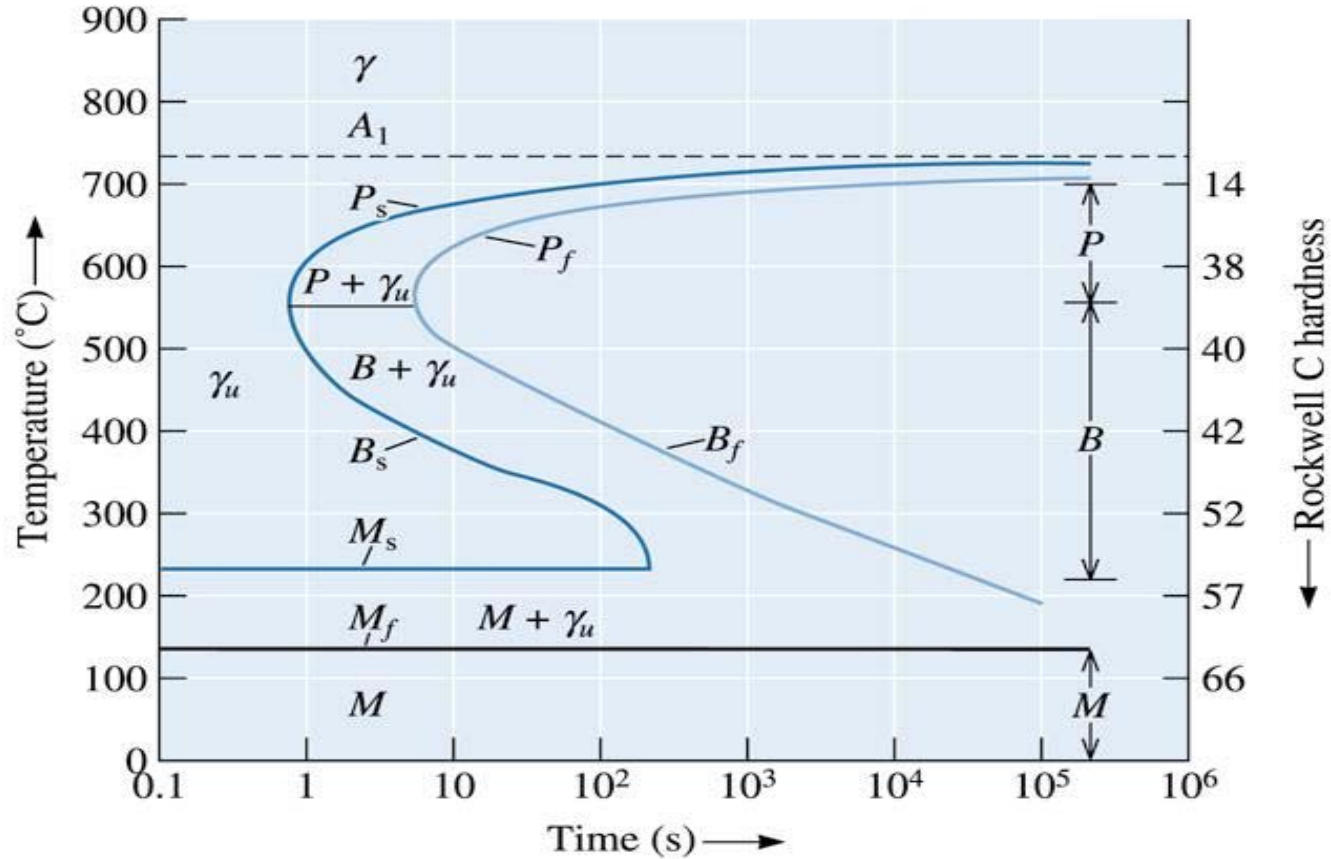
Şekilde gösterildiği biçimde perlit yapısı oluşturmak için ısıl işlemi tasarlayınız?



(b)

**Perlitin yapısı ve büyümesi (b) perlit lamellerinin fotoğrafı ( $\times 2000$ ). (From ASM Handbook, Vol. 7, (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073.)**

# Örnek 11.8 (devamı)



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

## Ötektoid çeliğin süre-sıcılık-dönüşüm diyagramı (TTT).

## ÇÖZÜM

Perlitin lameller arası mesafesi:

$$\lambda = \left[ \frac{0.001 \text{ cm}}{14 \text{ spacings}} \right] = 7.14 \times 10^{-5} \text{ cm}$$

Perlitin izotermal dönüşüm ile oluştuğunu varsayarsak, önceki TTT diyagramından dönüşüm sıcaklığının yaklaşık 700°C olduğun görürüz.

1. Çeliği yaklaşık 750°C ye ısıtıp bir saat tutalım ve tüm yapı östenite dönüşsün. Daha yüksek sıcaklıklarda östenit tanelerinin aşırı büyümesi söz konusu olabilir.
2. Çelik daha sonra 700°C ye soğutulur ve yaklaşık 10<sup>5</sup> s bu sıcaklıkta tutulur. ( $P_f$  süresi).
3. Son aşama oda sıcaklığına soğutmaktır.

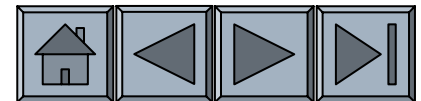


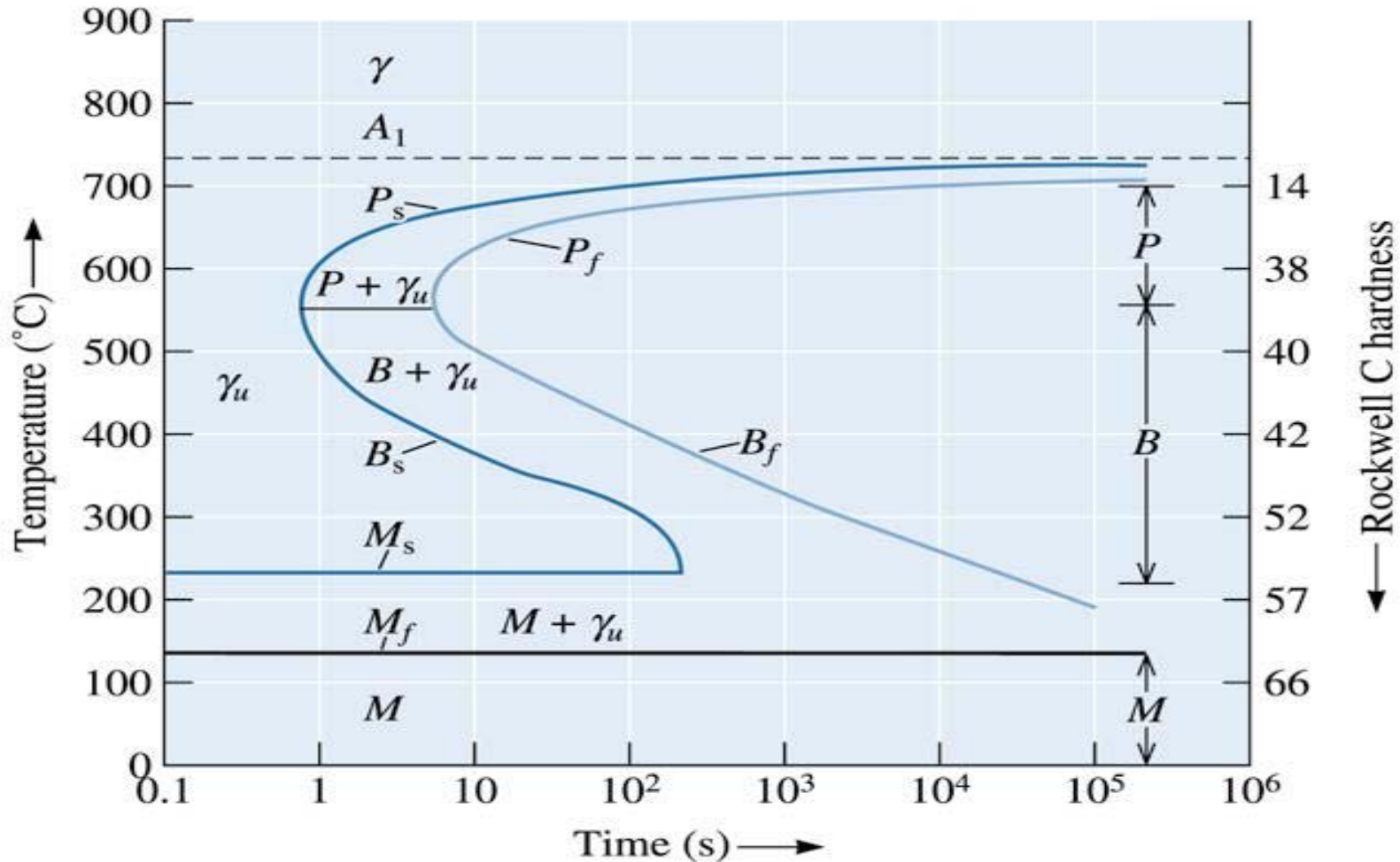


## Örnek 11.9. Beynit Mikroyapısını Oluşturmak İçin Isıl İşlem

Beynitte mükemmel sertlik, mukavemet ve tokluk özellikleri bir araya gelmiştir. Bir ısıl işlem tesisi ötektoid çeliği  $750^{\circ}\text{C}$ 'de östenit fazına getirmiş ve  $250^{\circ}\text{C}$ 'de 15 dakika süre ile tutmuştur ve sonunda çelik oda sıcaklığına soğutulmuştur.

İstenen beynit yapısı oluşturulmuş mudur?





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

## The time-temperature-transformation (TTT) diagram for an eutectoid steel.

## ÇÖZÜM

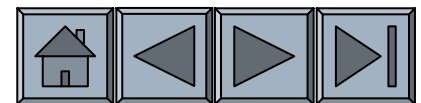
750°C'ye ısıtıldıktan sonra mikroyapı %100 östenittir,  $\gamma$ . 250°C'ye soğutulduğunda kararlı olmayan östenit 100 s fazla sürede kalır ince beynitler büyümeye başlar. 15 dakika yani 900 s, ve %50 ince beynit oluşur ve kalan kısım hala kararlı olmayan östenit içerir.

Isıl işlem başarısızdır. Isıl işlem tesisi çeliği 250°C'de en az  $10^4$  s, veya 3 saat tutmalıdır.

# Bölüm 11.11. Martenzitik Reaksiyon ve Temperleme



- **Martenzit** – Çelikte ve diğer malzemelerde difüzyonsuz, atermal oluşan yarı kararlı fazdır.
  - Difüzyonsuz katı hal dönüşümünün sonucu oluşan bir fazdır.
  - Difüzyona bağımlı değildir.
  - Reaksiyon zamana değil sıcaklığa bağlıdır.
- **Displacive dönüşüm** – Atomların veya iyonların difüzyon olmaksızın küçük yer değiştirmelerle oluşan faz dönüşümüdür. Atermal veya martenzitik dönüşümle aynıdır.
- **Temperleme** – Martenzitin sertliğini azaltmak için martenzitin denge fazlarına parçalanmasını başlatmak için kullanılan düşük sıcaklık ısıtma işlemidir.

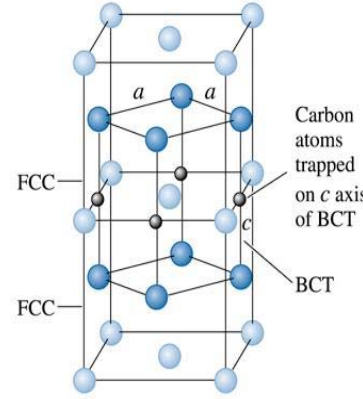


# Çelikte Martenzit

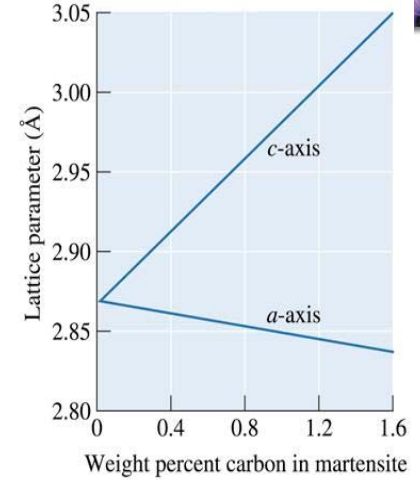


❑ %0,2'den az C içeren çeliklerde YMK- $\gamma$ , HMT (hacim merkezli tetragonal) martenzite dönüştüğünde martenzitik reaksiyon gerçekleşir.

❑ YMK içinde 0,0,1/2 tip iç arayer boşluklarındaki C atomları HMK yapıya dönüşürken sıkışabilir ve tetragonal yapının oluşmasına neden olur. Çelikteki C içeriği arttığında bu iç boşluklarda daha fazla sayıda C atomu sıkışır ve martenzitin a ve c eksenleri arasındaki farkını arttırır.



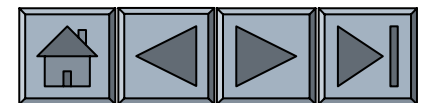
(a)



(b)

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

(a) Martenzitin HMT birim hücresi östenit YMK ile ilgilidir. (b) C konsantrasyonu arttıkça daha fazla arayer bölgeleri karbon atomları ile dolar ve martenzitin tetragonal yapısı daha fazla belirginleşir.



## Çelikte Martenzit

- ❑ Martenzit oluşumu için kararlı  $\gamma$  bölgesinden çok hızlı soğutma yapılmalıdır.
- ❑ Martenzitin kompozisyonu dönüştüğü fazın kompozisyonu ile aynı olmak zorundadır.

## Martenzitin Özellikleri

- ❑ Çelikte martenzit sert ve kırılgandır.
- ❑ HMT kristal yapıda dislokasyonların kolayca hareket edebileceği sıkı paket kayma düzlemleri yoktur.
- ❑ Martenzit C ile aşırı doymuştur.
- ❑ Martenzit çok ince tane boyutu ve tane içinde çok ince alt yapıya sahiptir.
- ❑ Martenzit sünek değildir ve çok sert olduğu için özel takımlarla işlenebilir.

## Örnek 11.10. Çift Fazlı Çeliğin Isıl İşlem Prosesinin Tasarımı

Mikroyapının yarısı ferrit yarısı martensit olan çeliklerde özelliklerin değişik kombinasyonları elde edilebilir. Martenzit sertlik sağlarken ferrit çeliğin süneklik ve tokluk özelliklerini geliştirir. Martenzit kompozisyonu %0,60C olan çift fazlı çelik için gerekli ısıl işlem aşamalarını tasarlayınız?



# ÇÖZÜM

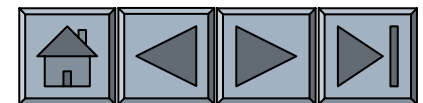


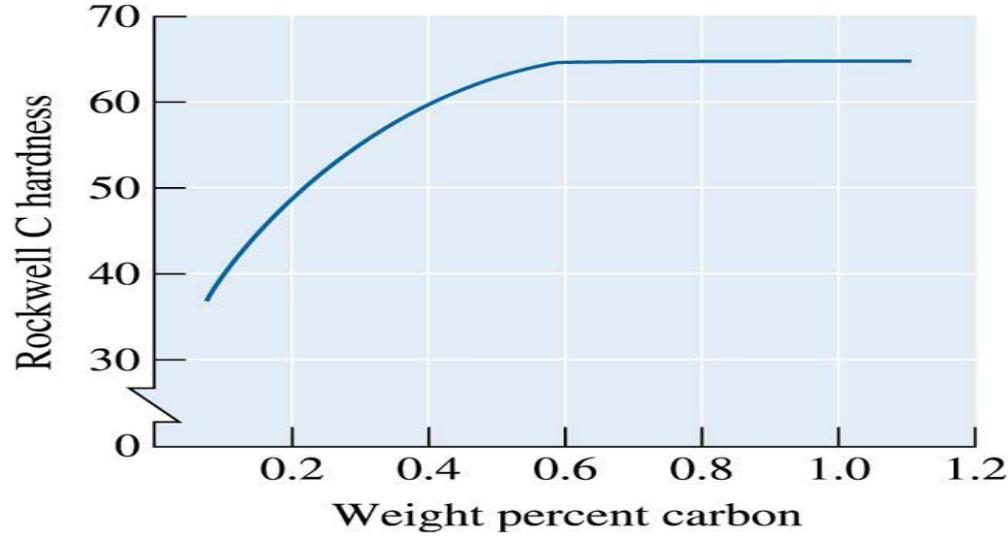
Isıl işlem sıcaklığı martenzitin %0,6C içermesi istendiğinden sabittir.  $\gamma$  ve  $\alpha + \gamma$  bölgelerindeki çözünürlük çizgisinden, östenitte %0,6C sıcaklık  $750^{\circ}\text{C}$  olduğunda elde edilir. %50martenzit elde etmek için, çelik  $750^{\circ}\text{C}$ 'de iken %50 östenit veren çeliği seçmeliyiz. Çeliğin C içeriği  $x$  ise:

$$\% \gamma = \left[ \frac{(x - 0.02)}{(0.60 - 0.02)} \right] \times 100 = 50 \text{ or } x = 0.31\% \text{ C}$$

Tasarım:

1. Hipoötetoid %0.31C içerikli bir çelik seç .
2. %50 ferrit ve %50 östenit, ve östenitte %0.60C içeren yapının üretimi için 1. Adımda belirlenen kompozisyonu  $750^{\circ}\text{C}$  ısıt ve 1 saat beklet, (parçanın kalınlığına bağlı olarak)
3. Çeliği oda sıcaklığına soğut. %0.60 C karbon içeren östenit martenzite dönüşür.

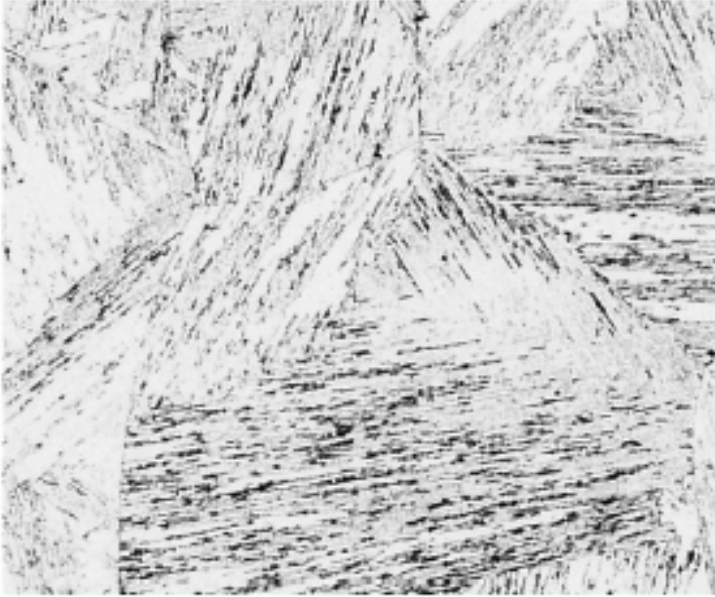




©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

## Çeliklerde martenzit sertliği üzerine karbon içeriğinin etkisi.

- Martensit yüksek C içerdiğinde levha martensit oluşur, sertlik yüksektir. Bu durum kısmen kristal yapının büyük c/a oranından veya büyük miktarda çarpılmasından kaynaklanır.
- Düşük C içerdiğinde ise iğne (lath) şeklinde büyür, çok sert değildir.



(a)



(b)

(a) Düşük karbonlu çelikte (Lath) iğne martenzit ( $\times 80$ ). (b) Yüksek karbonlu çelikte levha martenzit ( $\times 400$ ). (*From ASM Handbook, Vol. 8, (1973), ASM International, Materials Park, OH 44073.*)

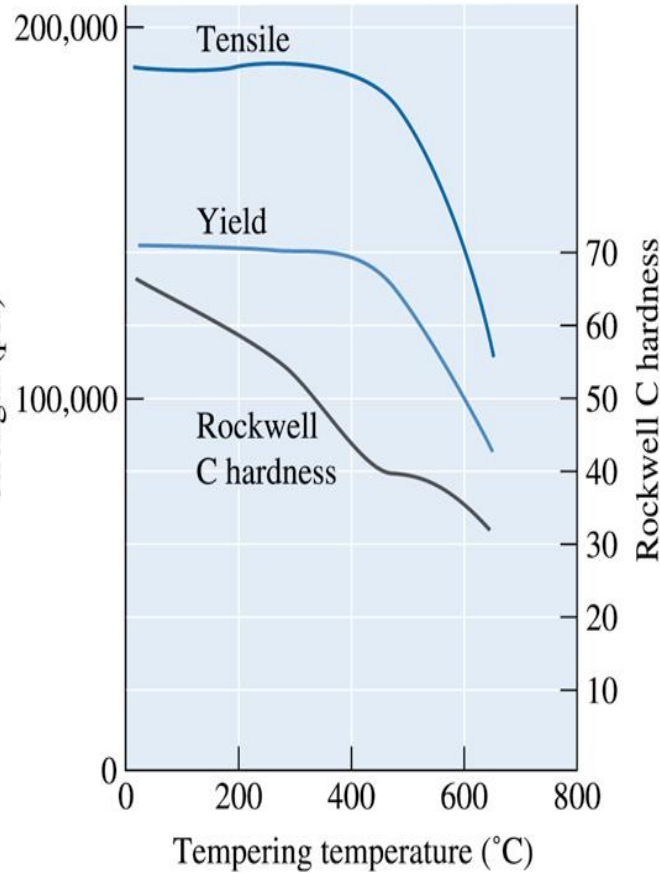
# Martenzitin Temperlenmesi

❑ Martensit dengeli (kararlı) bir yapı değildir.

❑ Çelikteki martensit ötektoid sıcaklığın altına ısıtıldığında dengeli  $\alpha$  ve  $Fe_3C$  çöker → Temperleme

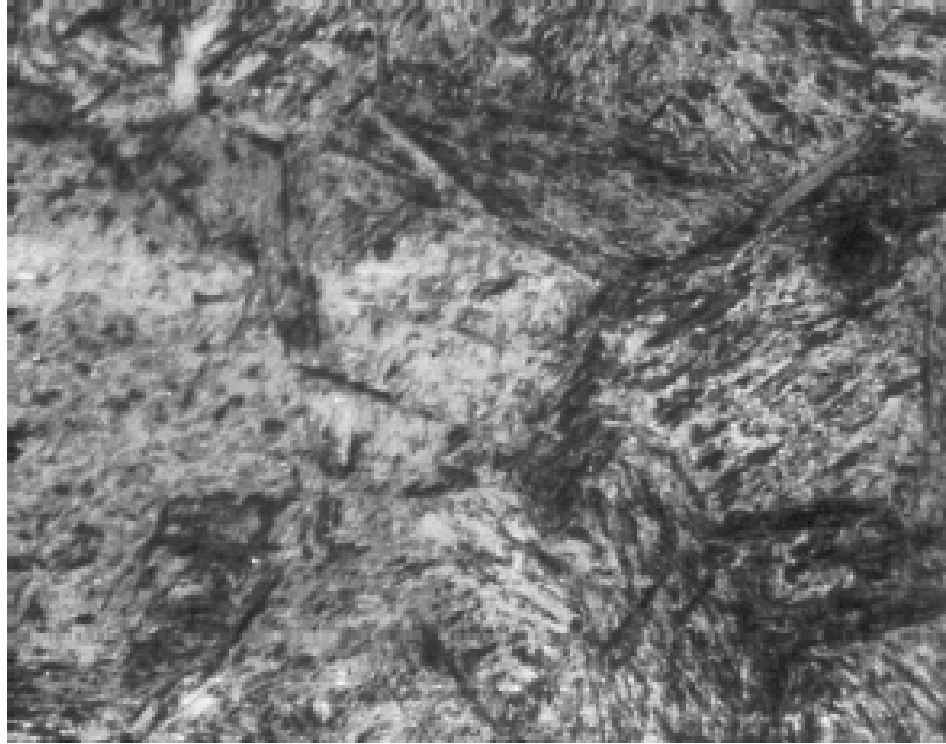
❑ Martensitin bozunması martensitin süneklik ve darbe özelliklerini artırırken, dayanımın ve sertliğin azalmasına neden olur.

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



Ötektoid çeliğin özellikleri üzerine temperleme sıcaklığının etkisi.

- ❑ Düşük temperleme sıcaklıklarında martensit 2 geçiş fazı olan düşük karbon martenzit ve çok ince dengesiz  $\epsilon$ -karbür veya  $Fe_{2.4}C$  oluşturabilir. Bu durumda çelik kırılgan ve temperleme öncesinden bile daha sert olabilir.
- ❑ Yüksek sıcaklıklarda dengeli  $\alpha$  ve  $Fe_3C$  oluşur. Bu durumda çelik yumuşar ve sünekleşir.
- ❑ Çelik ötektoid sıcaklığın hemen altındaki sıcaklıklarda temperlenirse,  $Fe_3C$ 'nin kabalaşması sonucu dağılım mukavemetlenmesi etkisi azalır.



Çelikte temperlenmiş martenzit ( $\times 500$ ).  
(From ASM Handbook, Vol. 9,  
*Metallography and Microstructure*  
(1985), ASM International Materials  
Park, OH 44073.)

## Bölüm 11.12. Hafızalı Alaşımlar (SMAs)

- **Şekil-hafıza etkisi** – Belirli malzemelerin mikroyapı geliştirerek deforme olduktan sonra ısıtıldığında tekrar eski şekline dönebilme kabiliyetidir (Ni-Ti alaşımları).
- **Akıllı malzemeler** – Dış etkileri ( gerilim, sıcaklık değişimi, manyetik alan) sezebilen ve yanıt veren malzemelerdir. Pasif akıllı malzemeler dış etkileri sezen, aktif akıllı malzemeler sezme ve uygulama başlatma yeteneğine sahiptirler.

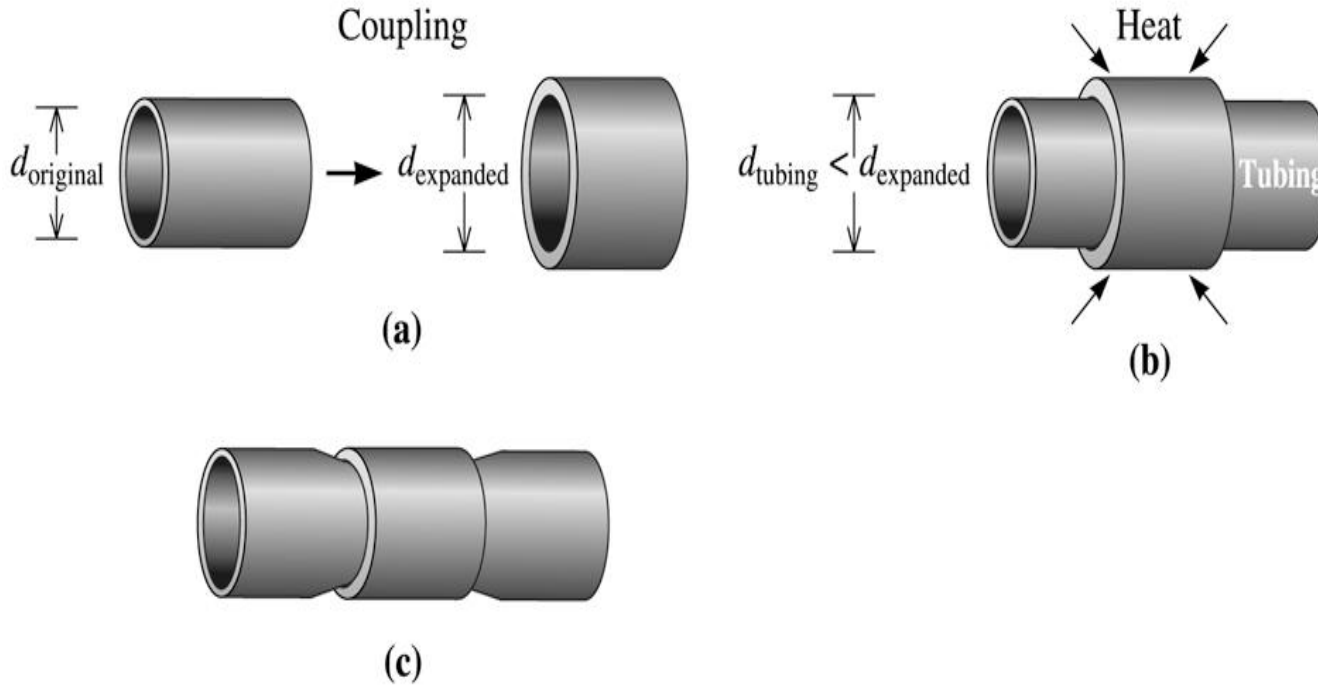
## Hafızalı Martenzitik Alaşımlar

- Ni-%50 Ti alaşımında ve pek çok Cu esaslı alaşımlarda martenzitik bir yapı oluşturmak için karmaşık termomekaniksel uygulamalar gerekmektedir.
- Uygulamanın sonunda metal daha önce kararlaştırılmış şekline deforme edilebilir.
- Sıcaklık yükseldiğinde orijinal şekline geri döner. Ancak daha önce belirlenmiş şeklini hatırlar.
- Boru bağlamaları örnek olarak verilebilir.



# Örnek 11.11. Bağlantı Tasarımı

Bazı zamanlar titanyum boruların birleştirilmesine ihtiyaç olabilir. Bu işi hızlı bir şekilde yapacak bir yöntem tasarlayınız?



Hafızalı alaşımları kullanalım. Bağlantı için kullanılacak alaşım genişletilir. (a) boruyu tamamen sarar. (b) bağlantı tekrar ısıtıldığında, tekrar orjinal çapına geri döner (c) çok sıkı bağlama için borunun sıkıştırılması.

## ÇÖZÜM

Bu uygulama için hafızalı alaşımları kullanıp şekil-hafıza etkisinden faydalanabiliriz.

Ni-Ti bağlantısını küçük çaptan deforme ederek büyük çapa martenzitik hale getiririz. Boru üzerine bu bağlantıyı geçirdikten sonra  $A_f$  sıcaklığının üstüne ısıtırız (titanyum borunun etkilenmesi için yeterince düşük sıcaklığa). Bağlantı deformasyon öncesi küçük çapına büzülür ve boruların birleştirilmesi için güçlü bir mekanik bağ oluşturur.

## Örnek 11.12. Kendi Kendine Genişleyebilen Kardivasküler Stent için Malzeme Seçimi

Dünya üzerindeki yaklaşık yarım milyon insan koroner stent sahibidir. Genelde bu stentler 316 paslanmaz çelikten üretilmekte ama bazıları da platindendir.

Kardivasküler stent için malzeme tasarlamak isterseniz hangi malzemeyi, neden kullanırdınız?

Geleneksel stentler kesik tüp şeklinde olup damara yerleştirilirler. Bu prosedür doktorlar tarafından anjiyoplasti adı verilen operasyon ile gerçekleştirilir.

## ÇÖZÜM

Ni-Ti hafızalı alaşımları düşünebiliriz.

Magnetik olmayan, biyouyumlu, korozyon direnci yüksek, mekanik özellikleri iyi ve uzun ömürlü olması gerekir.

Maliyet de göz ardı edilmemelidir.