

KRİSTAL MALZEMELERİN DAYANIMLARININ ARTIRILMASI



Turgut Gülmez

İÇERİK

- Dayanım Artırmanın tanımı
- Dayanım Artırma mekanizmaları
- Tane boyutu küçültme
- Katı çözelti sertleşmesi
- Soğuk Deformasyon (Deformasyon sertleşmesi)
- Üç Tavlama Aşaması: Toparlanma, Yeniden Kristalleşme ve Tane Büyümesi

Giriş

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

Dayanım Artırma

- • Bir metalin plastik olarak deforme olma özelliği, dislokasyonlarının hareket etme yeteneğine bağlıdır.
- • Sertlik ve Mukavemet, bir metalin plastik olarak ne kadar kolay deforme olduğu ile ilgilidir, bu nedenle dislokasyonların hareketini kısıtlayan her etki mekanik dayanımı artırır.
- • Aksine, dislokasyon hareketi kolaysa (engellenmemişse), metal yumuşak, deforme olması kolay olacaktır.

Dayanım Artırma

Kristal malzemelerin dayanımların artırılması için dislokasyon hareketinin (kaymasının) engellenmesi gerekir.

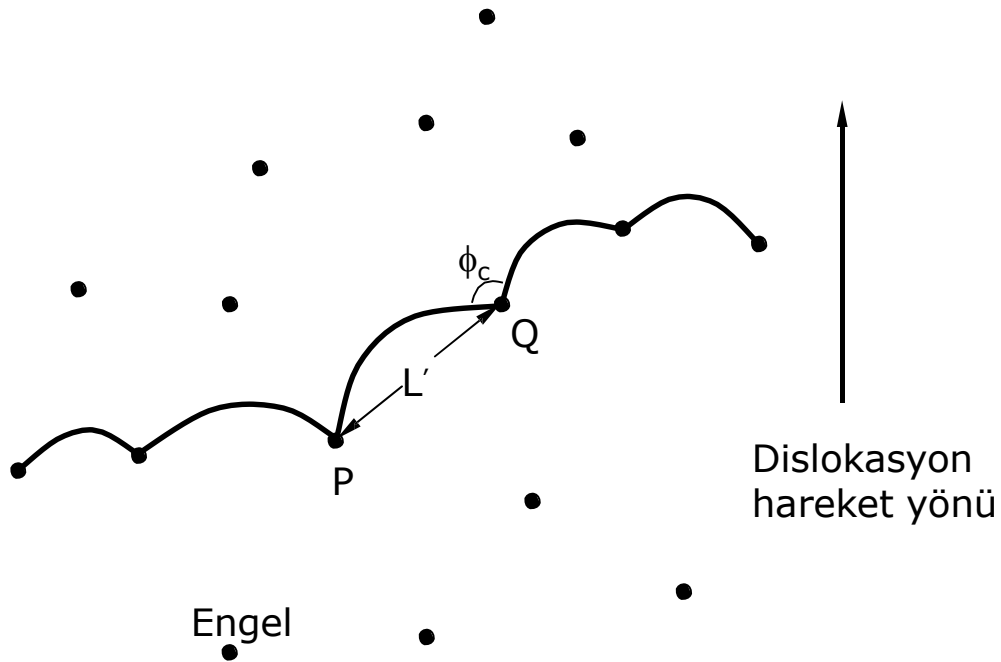
Bu amaçla çeşitli engellerden yararlanılır.

Kullanılan bu engeller:

- diğer dislokasyonlar
- tane sınırları
- Empürite atomları
- ikincil faz taneleri
 - Çökelti halinde
 - dışarıdan eklenen

Çoğu yüksek dayanımlı alaşım bu dayanım artırma mekanizmalarının birden fazlasının katkısıyla sertleştirilir.

ENGELLER

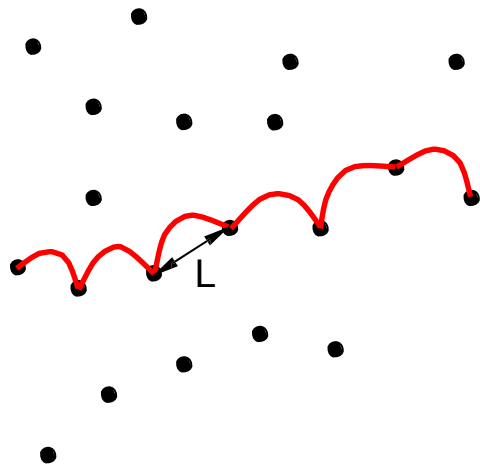


- D Engelleri tanımlayan birincil etken kayma düzleminde aralarındaki ortalama mesafedir(L').
- D Dışarıdan bir kuvvet uygulanması ile, dislokasyon kayma düzlemi üzerinde ve kayma doğrultusunda kaymak ister ve engelle karşılaşınca hareket engeller tarafından durdurulur.
- D Dışarıdan uygulanan kuvvet artırıldıkça dislokasyonlar engeller tarafından yay şeklinde kritik açı ϕ_c değerine ulaşılana kadar gerilir.
- D ϕ_c değerine ulaşılınca dislokasyon engellerden kurtulur ve kayma düzlemindeki hareketine devam eder.
- D Dislokasyon yeniden bir engelle karşılaşana kadar kaymaya devam eder ve engelle karşılaşınca yukarıda bahsedilen proses tekrar oluşur.

ENGELLER

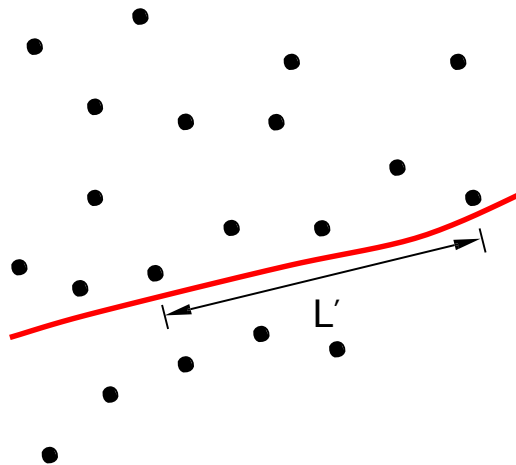
- Engellerin kuvveti dislokasyonların kayma hareketini ve böylece akma dayanımını belirler.
- Kuvvetli engeller dislokasyonların hareketini oldukça zorlaştırır ve bu engeller için ϕ_c açısı sıfıra yaklaşır.

Kuvvetli engeller



$$\tau \cong \frac{Gb}{L} \cos \frac{\phi_c}{2}$$

Zayıf engeller



$$\tau \cong \frac{Gb}{L} \cos \frac{\phi_c}{2}$$

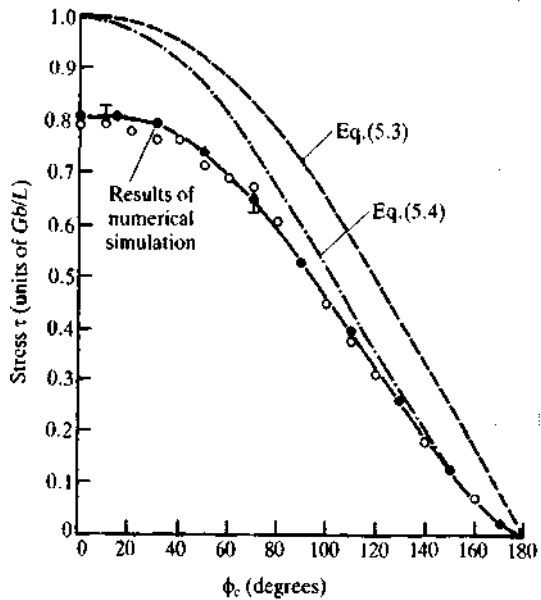
$$\tau = \frac{Gb}{L'} \cos \frac{\phi_c}{2} \quad L': \text{efektif mesafe}$$

kuvvetli engeller için;

$$\phi_c \cong 0 \text{ ve } L' \cong L$$

$$\tau_{\max} = \frac{Gb}{L}$$

ENGELLER



- D Şekilde kuvvetli ve zayıf engeller için verilen bağıntılar ile bilgisayar simülasyonu ile elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.
- D Kuvvetli engeller için elde edilen bağıntı simülasyon sonuçlarından biraz farklı görülmektedir.

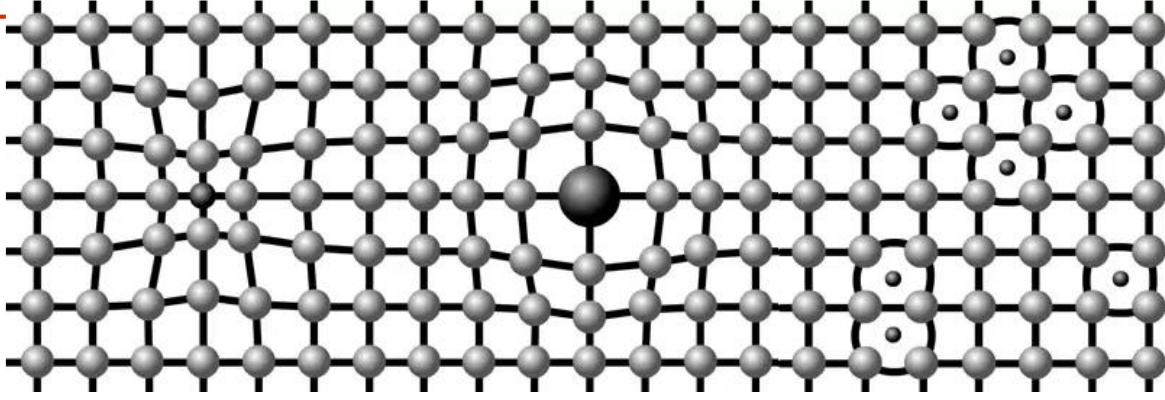
METALLERDE DAYANIMIN ARTIRMA MEKANİZMALARI

- a) Alaşım Sertleşmesi
- b) Çökelme Sertleşmesi
- c) Dispersiyon Sertleşmesi
- d) Deformasyon Sertleşmesi
- e) Tane sınırı azalma Sertleşmesi,
- f) Akma noktası ve Deformasyon Yaşlanması Sertleşmesi,
- g) Karma Malzeme oluşturarak Sertleşmesi,
- h) Martenzitik Dönüşüm Sertleşmesi,
- i) Radyasyon etkisiyle Sertleşmesi,
- j) Tekstür oluşumu ile Sertleşme.

KATI ÇÖZELTİ (ALAŞIMLAMA İLE) SERTLEŞMESİ

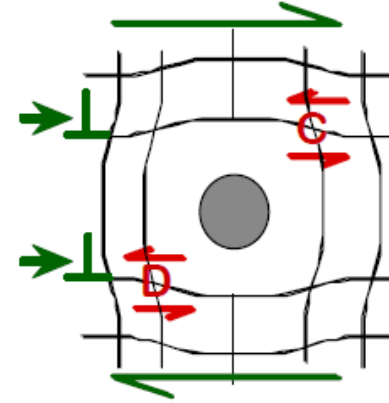
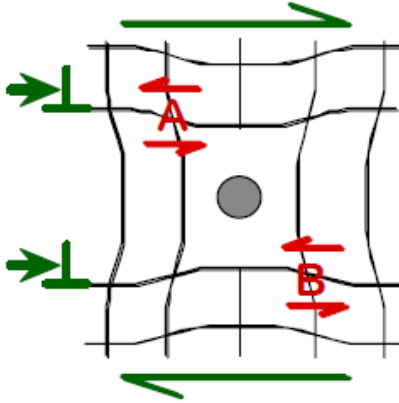
- Belirli bir metalin alaşımları genellikle saf halinden daha yüksek dayanıma sahiptir.
- Bünyede bulunan empürite atomları dayanımı artırıcı rol oynar.
- Empürite atomları kafesleri çarpıtır ve gerilme yaratır. Bu gerilmeler dislokasyon hareketine engel oluşturabilir.
- Kayma düzlemi üzerinde ilerlemekte olan bir dislokasyon bir empürite atomu ile karşılaştığında dislokasyon hareketi zorlaşır ve bu yüzden de malzemenin dayanımı artar
- Yabancı atomların yaptığı katı çözeltiler arayer ve ikame olmak üzere iki çeşittir

KATI ÇÖZELTİ SERTLEŞMESİ



Küçük yer alan empürite atomu

Büyük yer alan empürite atomu



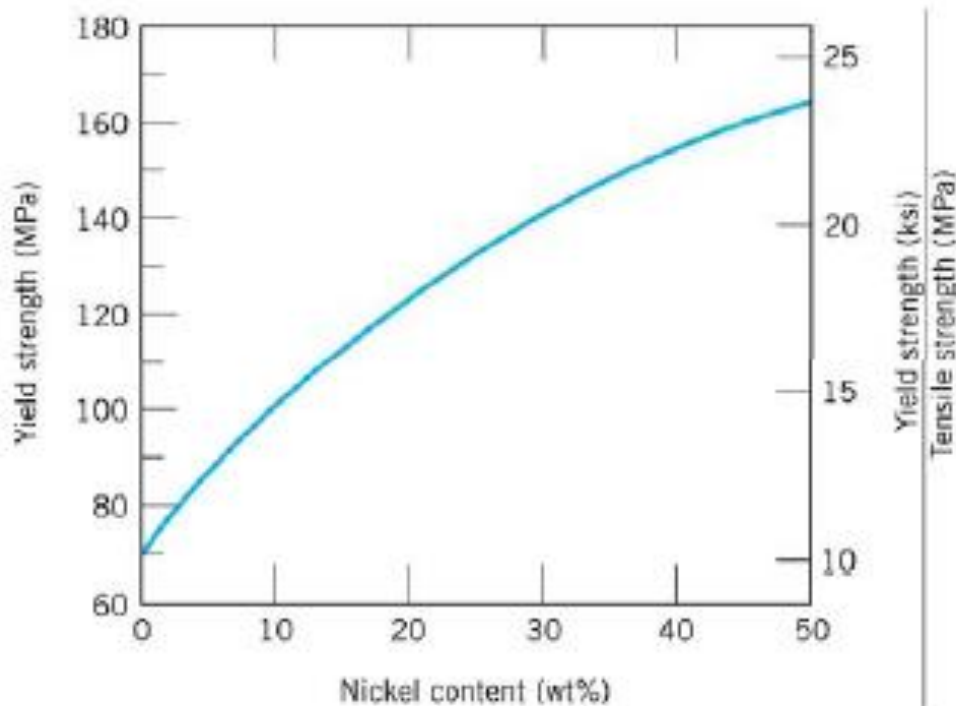
Empürite atomu, A ve B'de olduğu gibi C ve D de sağa doğru olan dislokasyon hareketine karşı yönlü yerel kayma üretir.

KATI ÇÖZELTİ SERTLEŞMESİ

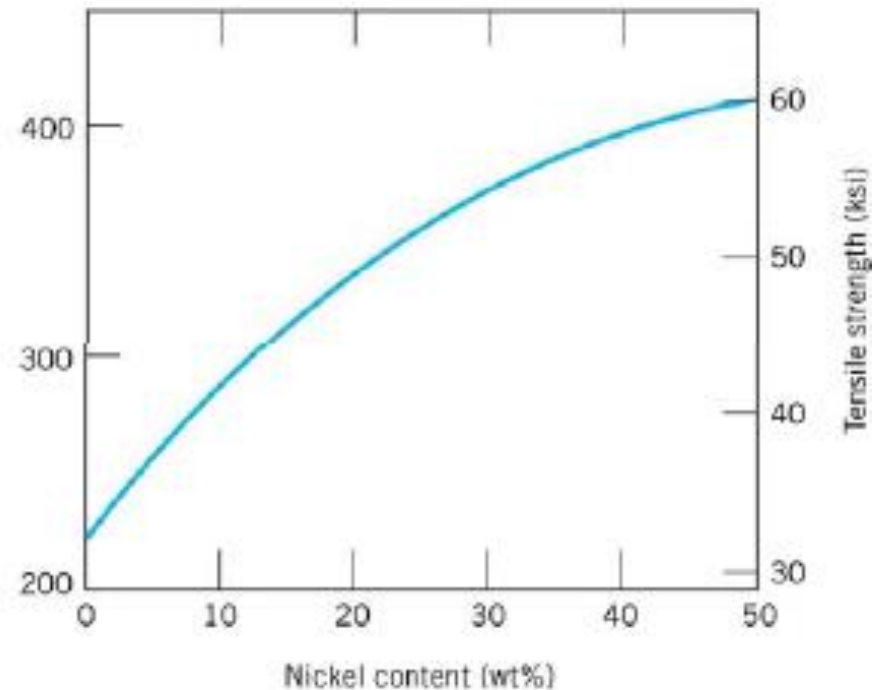
- Bir çözelti içerisindeki arayer ve yeralan yabancı atomlar kafes gerginliğine neden olur. Sonuç olarak, bu impüriteler dislokasyon gerilme alanları ile etkileşime girer ve dislokasyon hareketini engeller.
- İmpürüte atomları, yarıçaplarına daha uygun atomik yerler bulmak için dislokasyon çekirdeği çevresine yayılma ve dağılma eğilimindedir. Bu, genel şekil değiştirme enerjisini azaltır ve dislokasyonu “zincirler” veya “çiviler”.
- dislokasyon hareketi başlatılırsa, dislokasyon çekirdeği, daha büyük lokal kafes çarpılmasının bulunduğu bir bölgeye hareket ettiğinden, toplam kafes gerinimi artacaktır.
- Plastik deformasyonu başlatmak ve devam ettirmek için saf metallere göre daha fazla gerilme uygulanması gereklidir.
- Çözünmüş atomların difüzyonunu gerektirir ve dolayısıyla T bağımlıdır. Yüksek T'de interstisyel atomlar dislokasyonları yakalayabilir ve onları yeniden bağlayabilir.

KATI ÇÖZELTİ SERTLEŞMESİ

Örnek: Katı Çözelti Sertleşmesi



Bakır içinde Nikel



Ampirik ilişki:

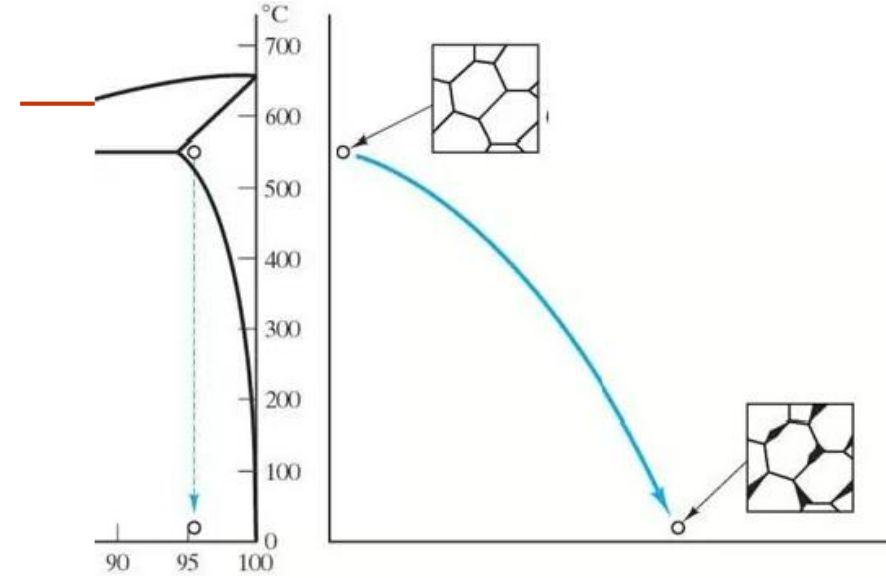
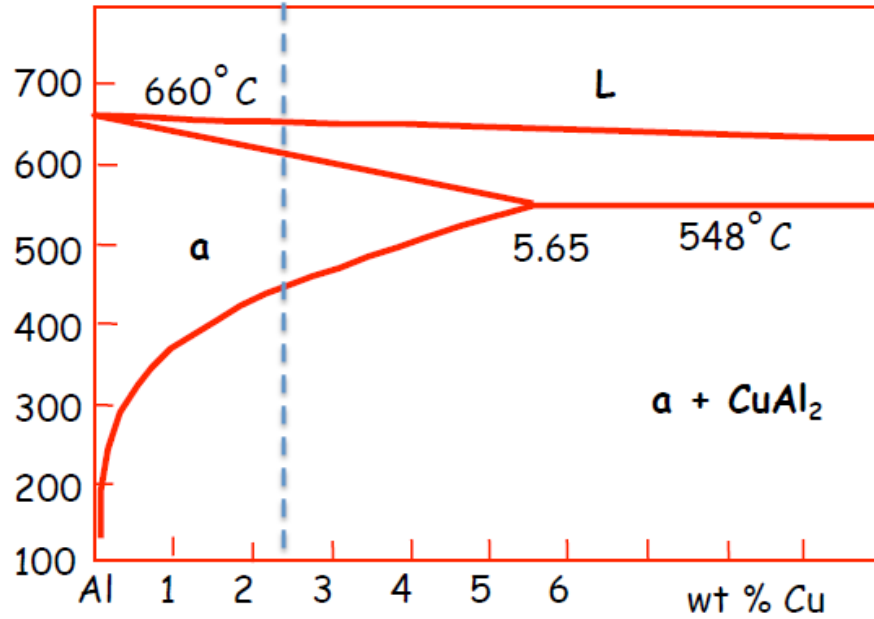
Genel olarak alaşımlama dayanımı ve sertliği artırır.
Normalde, dayanımın artması sünekliği azaltır!

$$\sigma_y \sim C^{1/2}$$

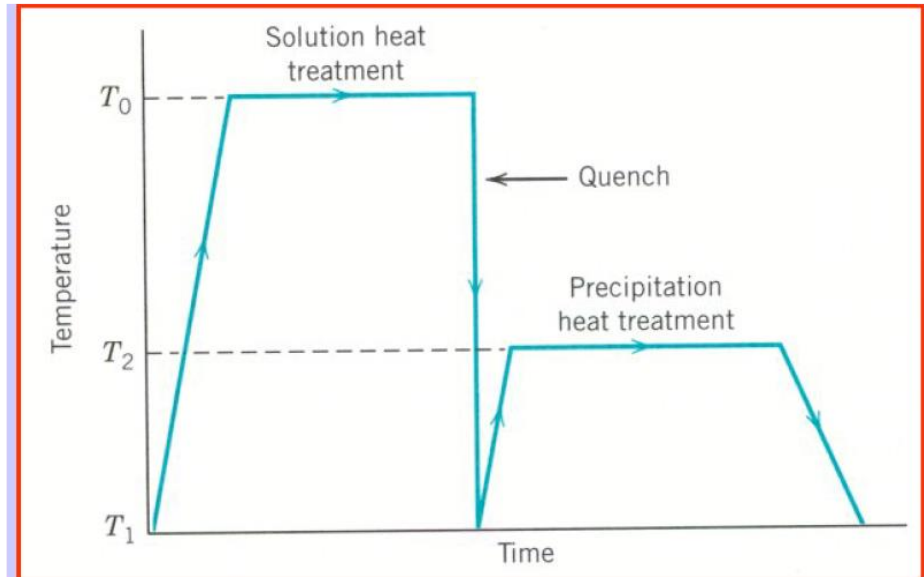
ÇÖKELME SERTLEŞMESİ

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

ÇÖKELME SERTLEŞMESİ

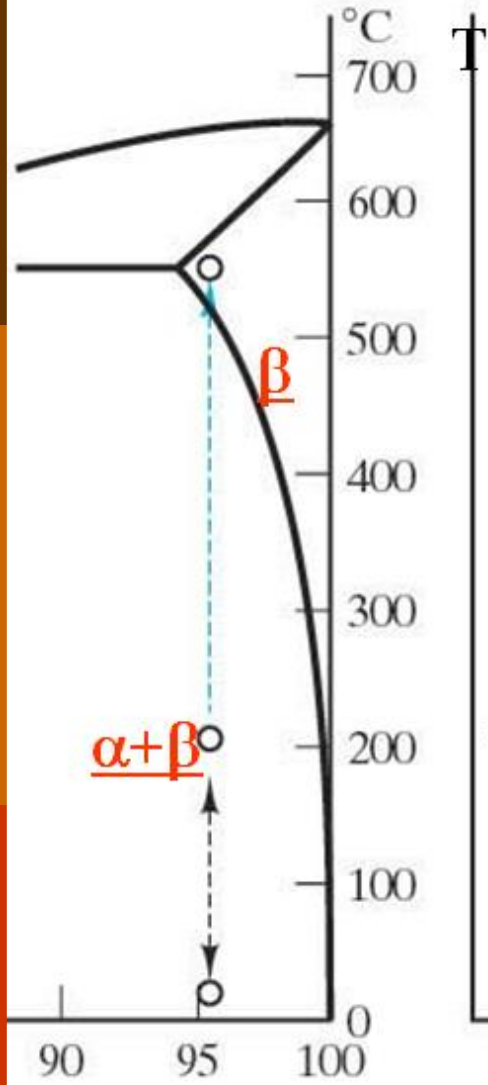


Isıl İşlem Prosedürü

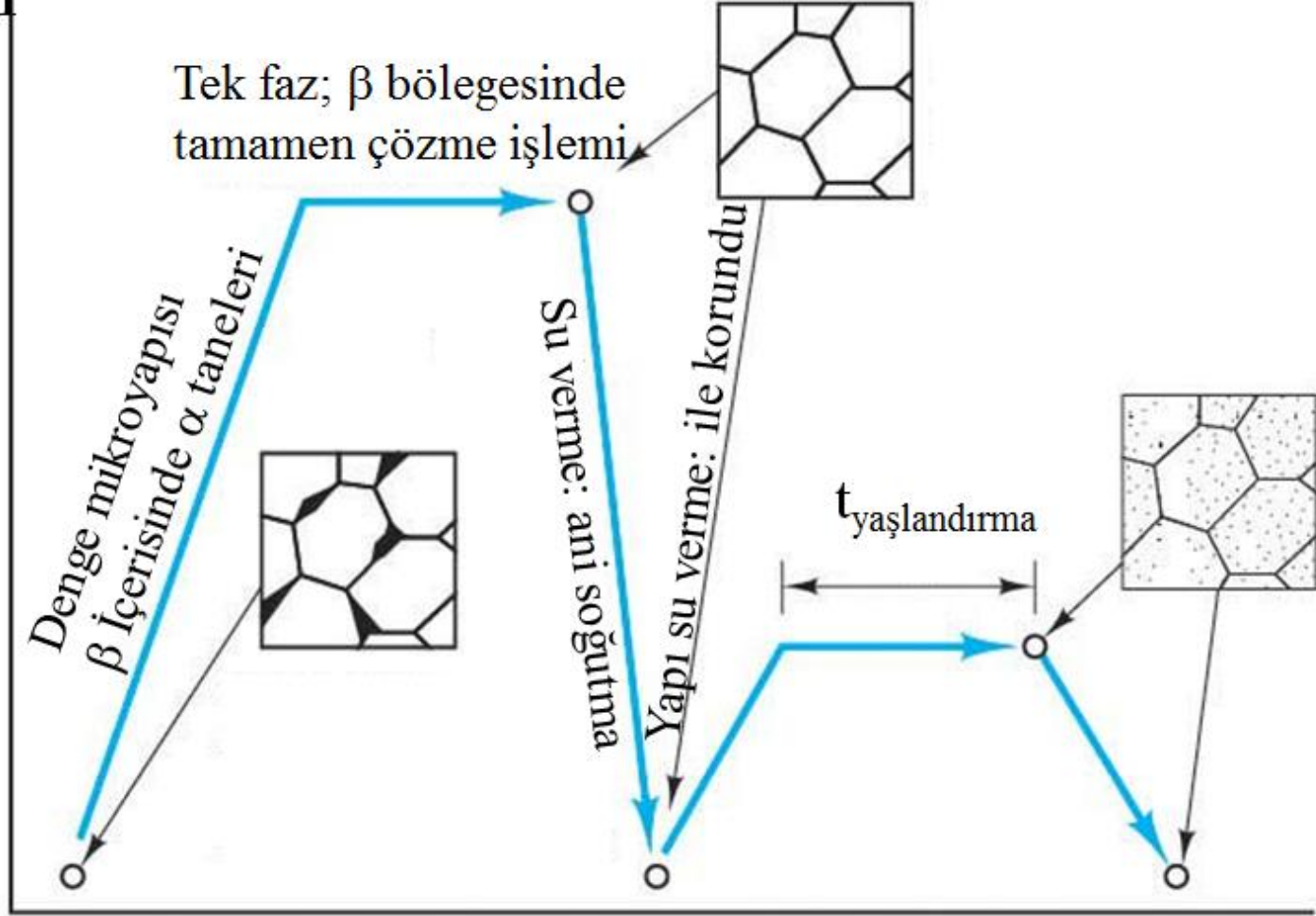


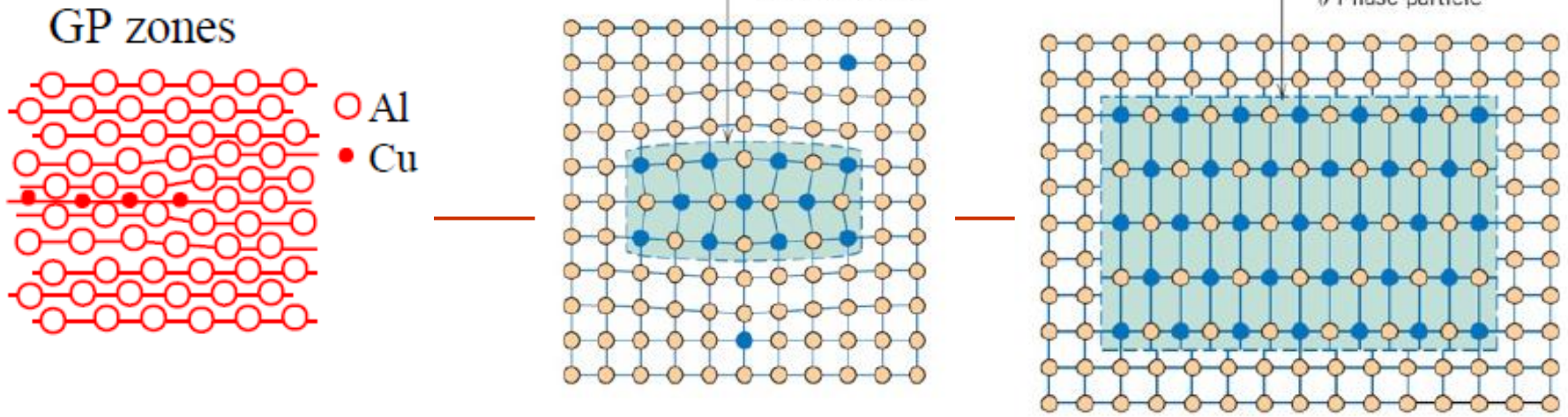
ÇÖKELME SERTLEŞMESİNİN AŞAMALARI

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



Bileşim

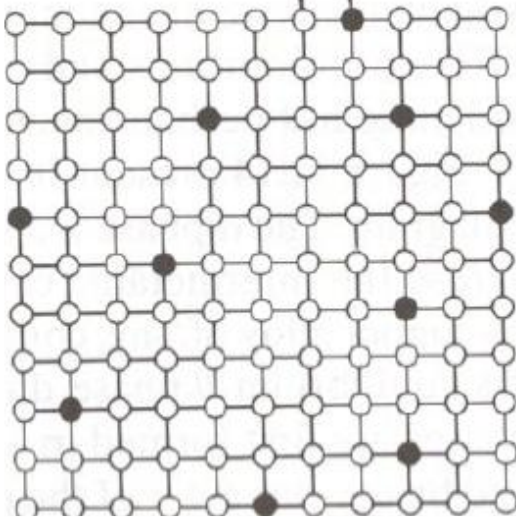




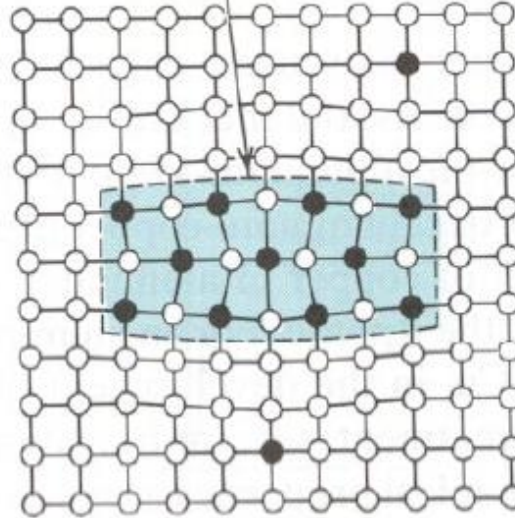
- ❑ Çökeltmenin ilk aşamasında, çok küçük koherent-GP bölgeler (Guinier preston zones) oluşur,
- ❑ GP bölgeleri genelde dislokasyon altındaki boşluklarda çekirdeklenir (sistemin enerjisini düşürmek için) ve dislokasyon hareketlerini engeller.
- ❑ Bu bölgeler, daha büyük bağdaşık (koherent) çökeltilere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

Solvent (Al) Atom

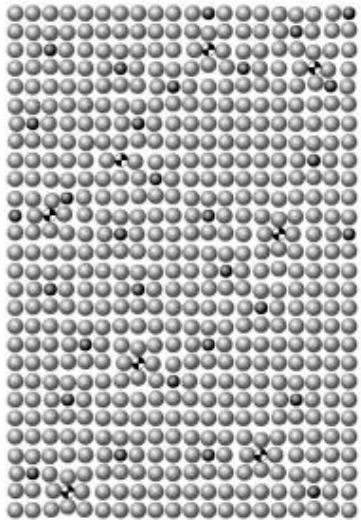
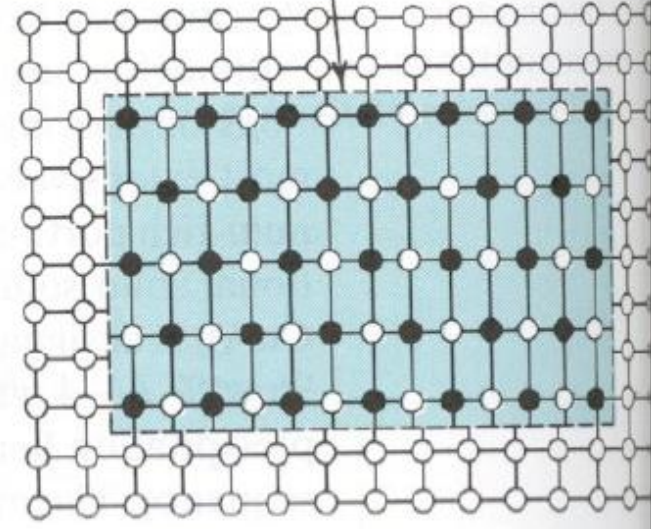
Solute (Cu) atom



θ'' Phase particle



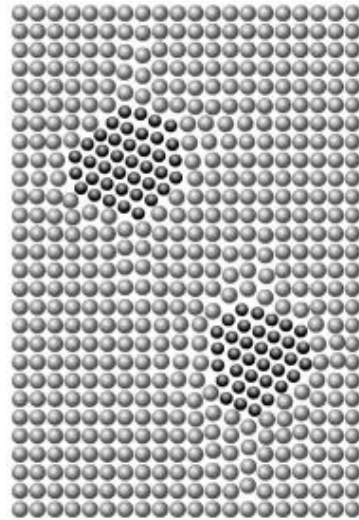
θ Phase particle



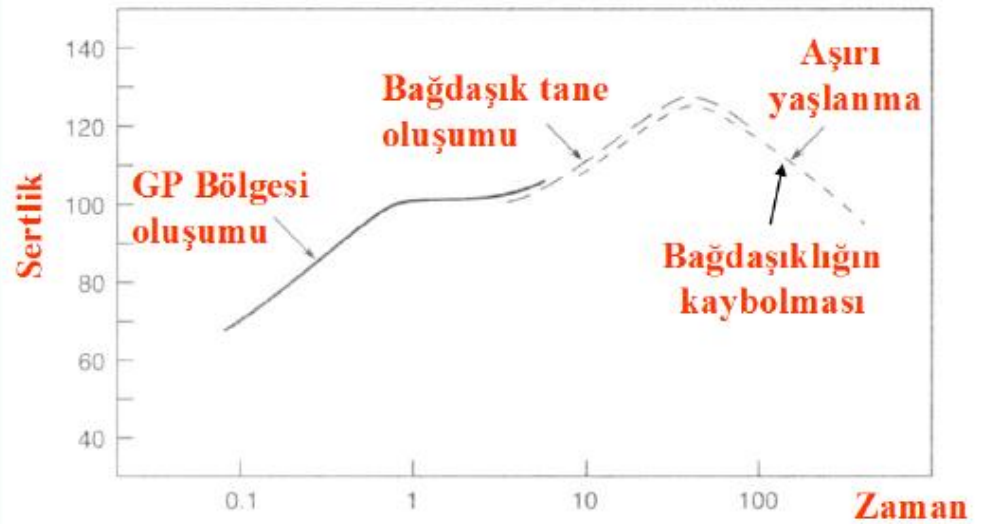
After Quenching



Vacancy



After Aging

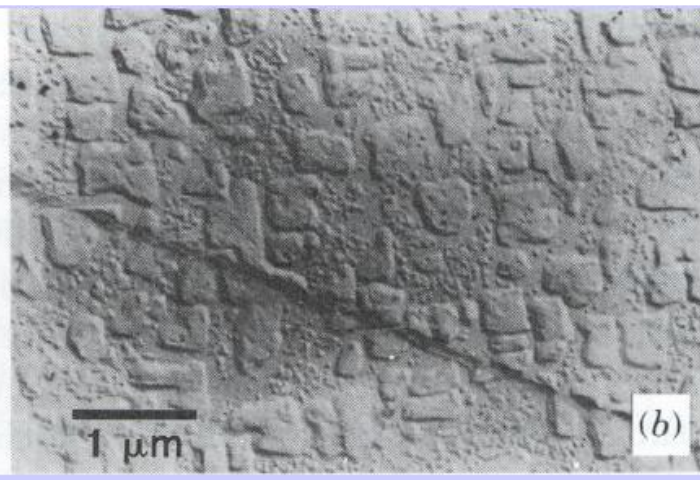
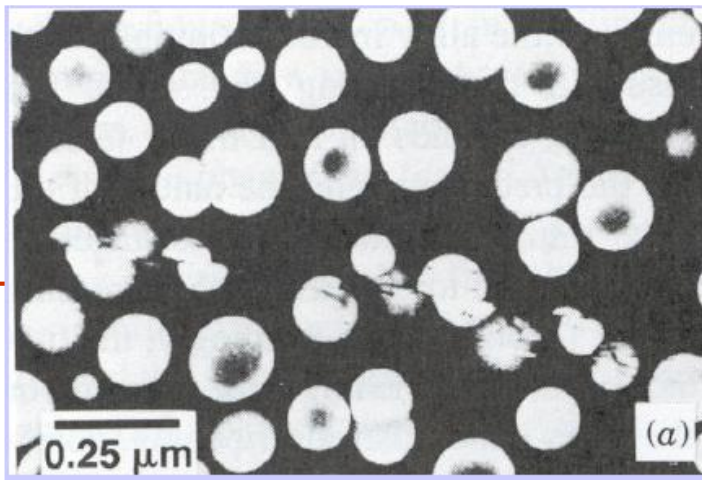


Uyumlu (Cohorent) Çökeltiler

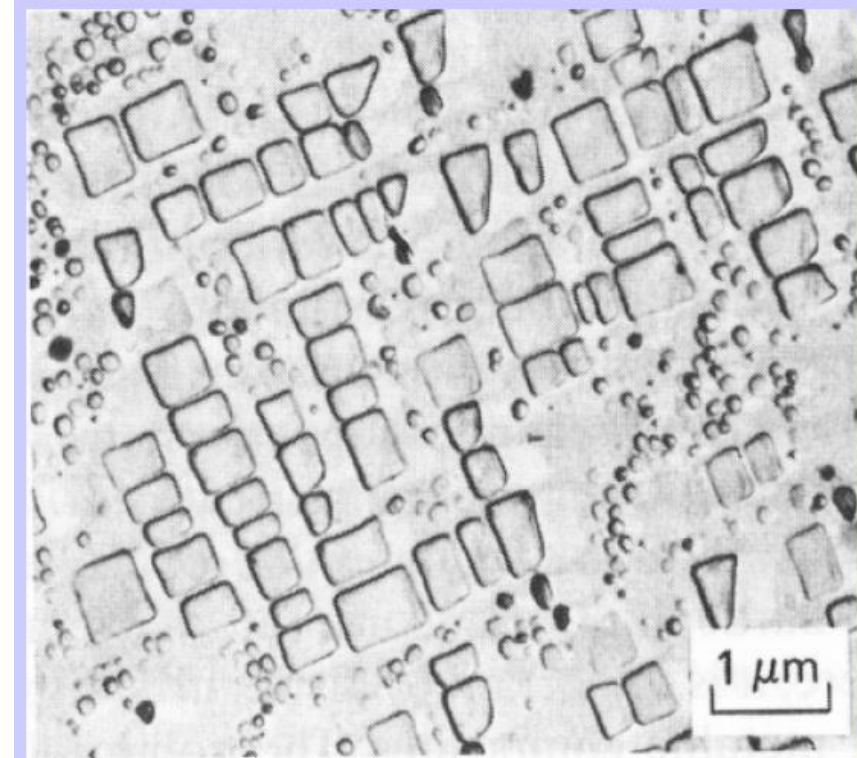
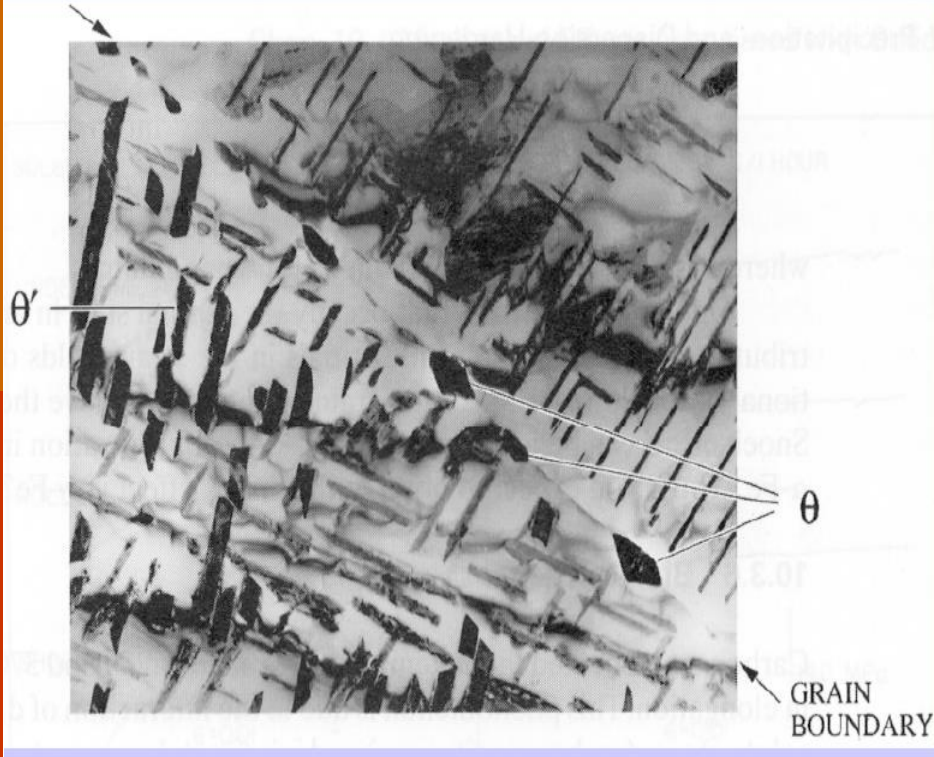
- Dislokasyonlar çökeltileri keserek geçebilir
- Kafes uyumsuzluğu çökeltiyi çevreleyen elastik genleme alanlarına yol açar.
- çökeltinin şekli uyumsuzluk derecesine bağlıdır. Küçük uyumsuzluk küresel parçacıklar, uyumsuzluğun arttırılması, kübik (orta derecede uyumsuzluk), hizalı küpler ve çubuk benzeri parçacıklara yol açar.
- Büyüme kinetiği de şekli etkiler

Al-16% Ag Alaşımda G-P bölgeler





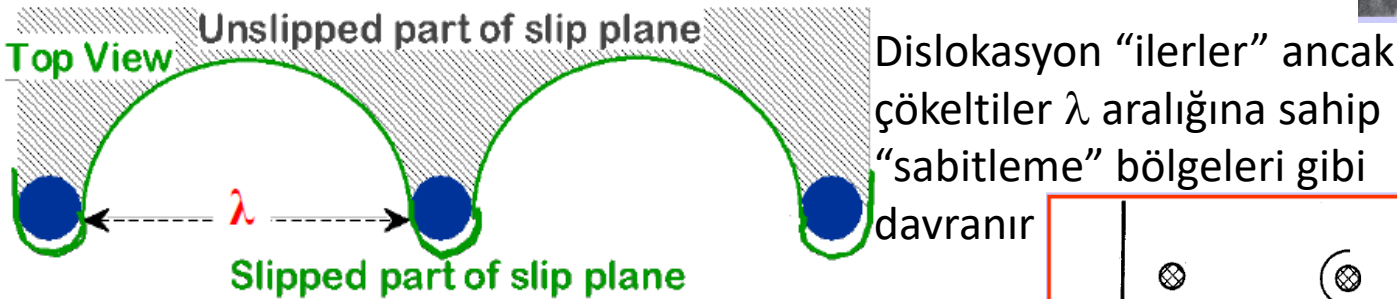
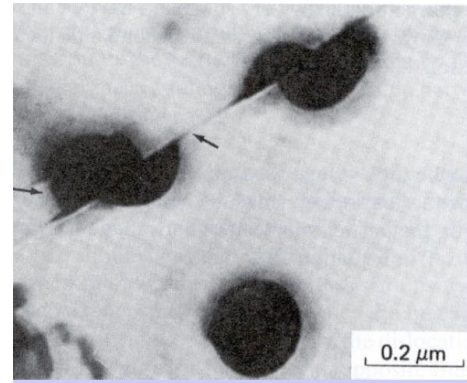
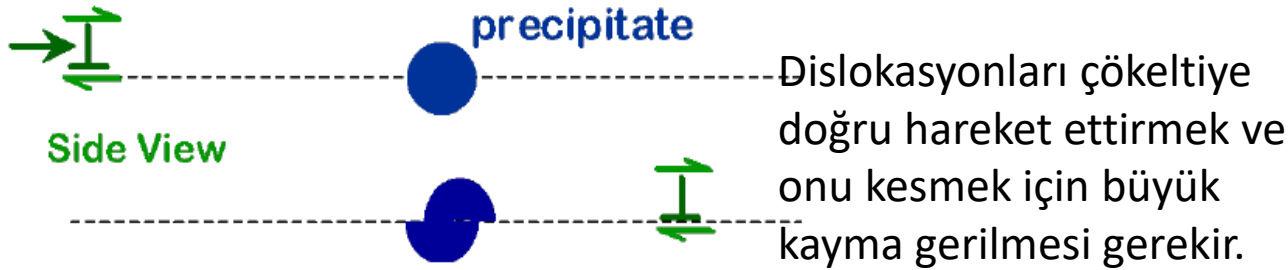
(a) Al-Li alaşımı ve (b) Ni-Al alaşımı iindeki çökeltiler



Al-Cu Alaşımında ökeltiler- Ni Esaslı bir Superalayımında Cuboid (Ni_3Al) ve Karbür çökeltiler

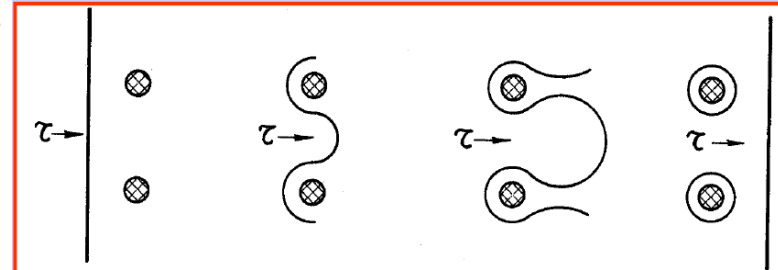
Dislokasyonların Çökeltilerle Etkileşimi

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



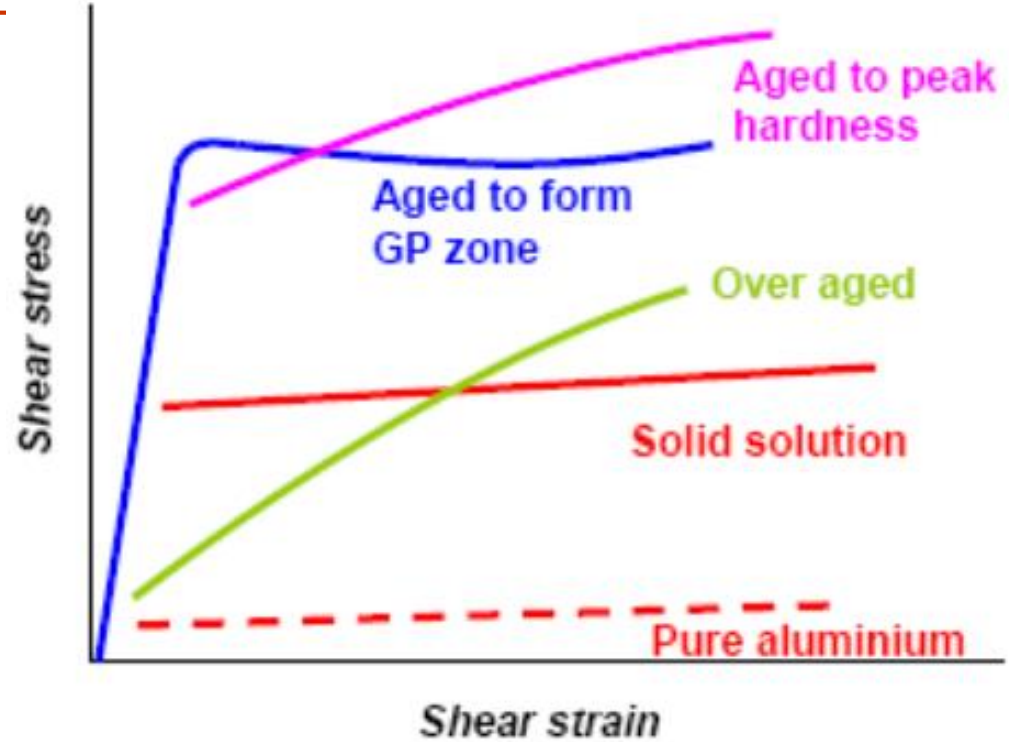
Çökeltiler arasında dislokasyonu zorlamak için gereken gerilme:

$$\tau = \frac{Gb}{\lambda}$$



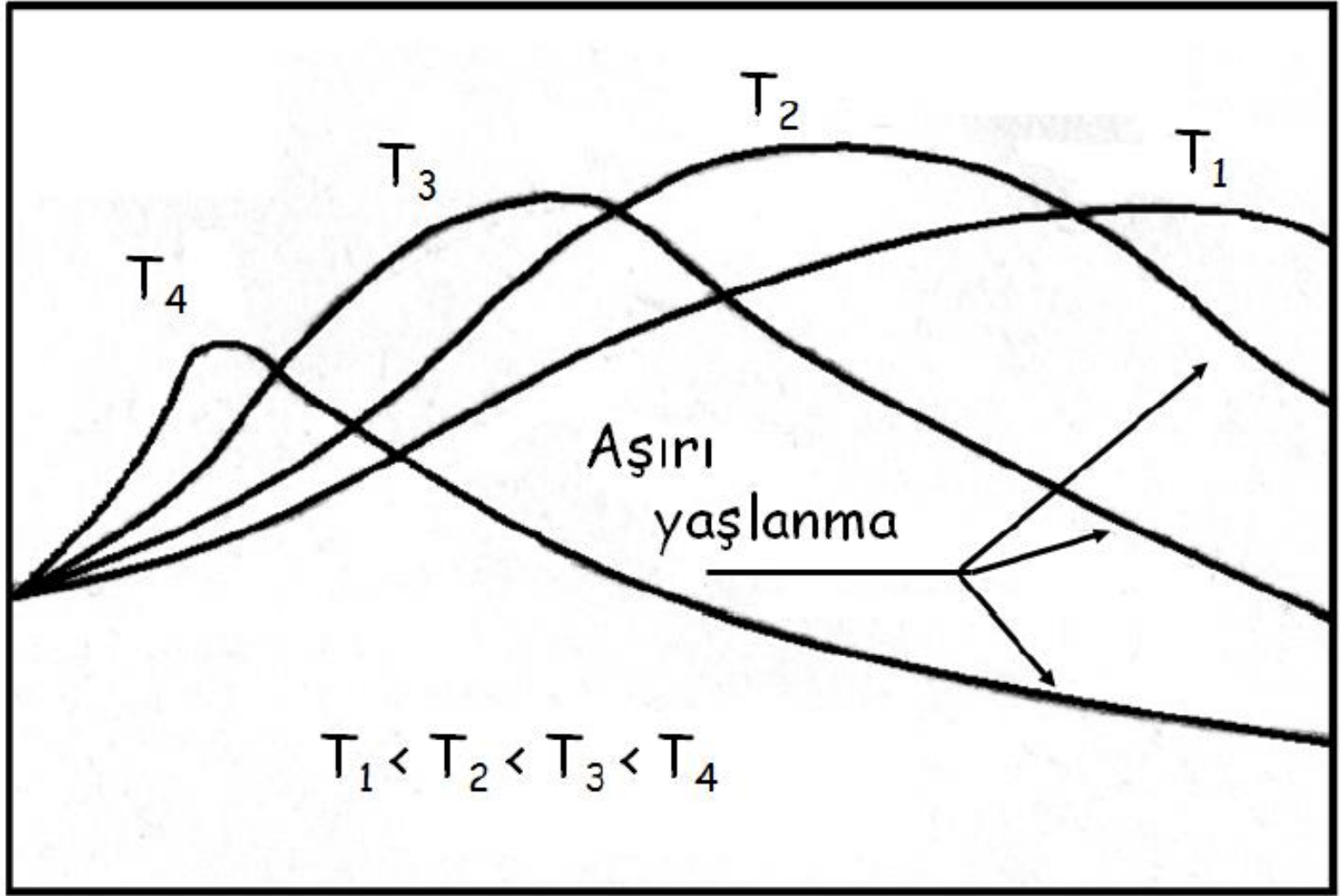
Çökeltme Sertleşmesi

- Kristal, **uyumlu** bir GP bölgesi oluşturmak üzere yaşlandırıldığında akma dayanımı artar. Akmanın düşüşü ve düşük genleme sertleşmesi, stres yeterince yüksek bir değere ulaştığında bölgeyi kesip geçen dislokasyonlar olduğunu gösterir.



- **Deformasyon Sertleşmesi** kristalin en yüksek sertliğe yaşlandığında önemli ölçüde artar. Dislokasyonlar kısa ve çökeltilerin etrafında hareket eder

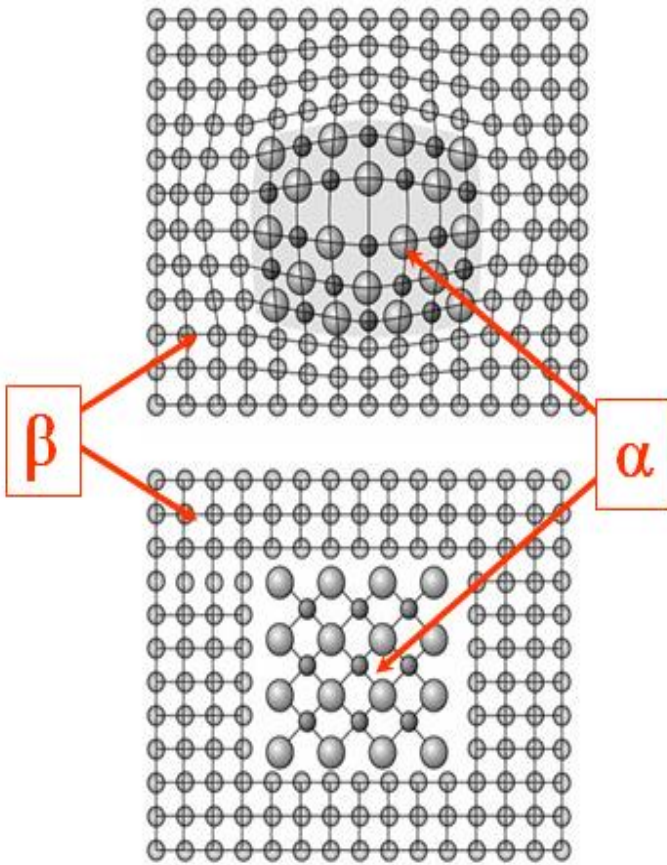
Aşırı yaşlanma durumu, akması düşük yüksek deformasyon sertleşmesi özelliğine sahip kaba ve uyumlu olmayan çökelti oluşturur.



⊕ Zaman

Yaşılandırma ısısal işleminde sürenin iç yapıya ve dolayısıyla malzeme özelliklerine etkisinin şematik gösterimi

Aşırı yaşılanma

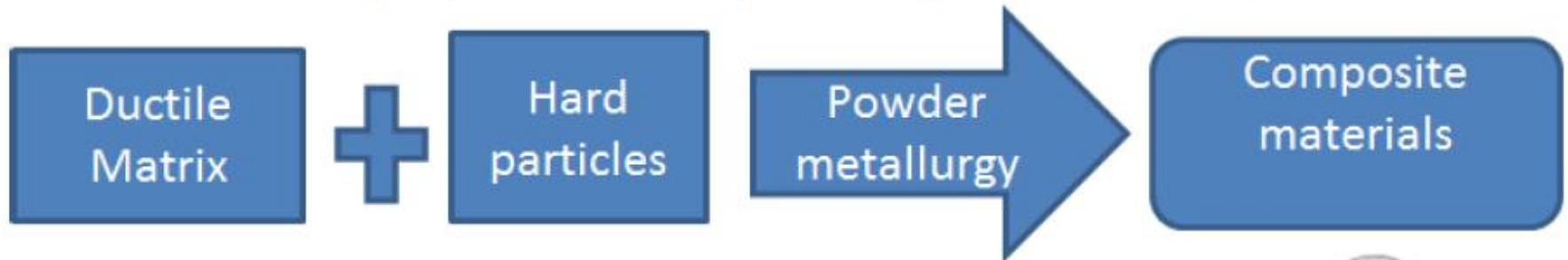


- ❑ Aşırı büyüme: Çökeltilerin çok büyümesi ile oluşan gerilmeler artık taşınamaz ve bağdaşıklık sona erer.
- ❑ Çökeltinin sertleştirme etkisi azalır.
- ❑ Yeterince uzun süre beklendiğinde kararlı ilk yapıya geri döner.

Dispersiyon Sertleşmesi

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

Normalde Sert parçacıkların boyut aralığı (1nm den 1 μ m



Examples:

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

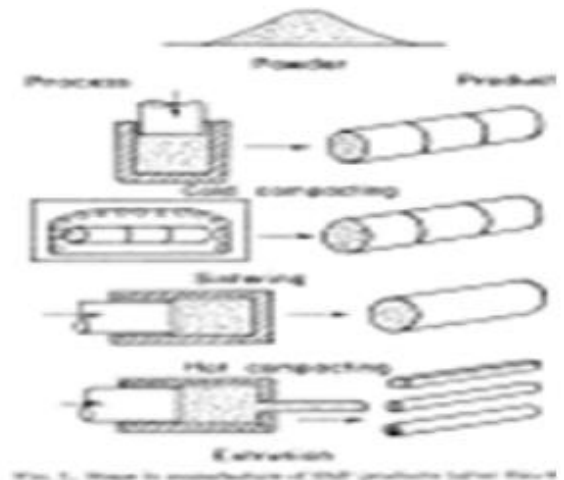
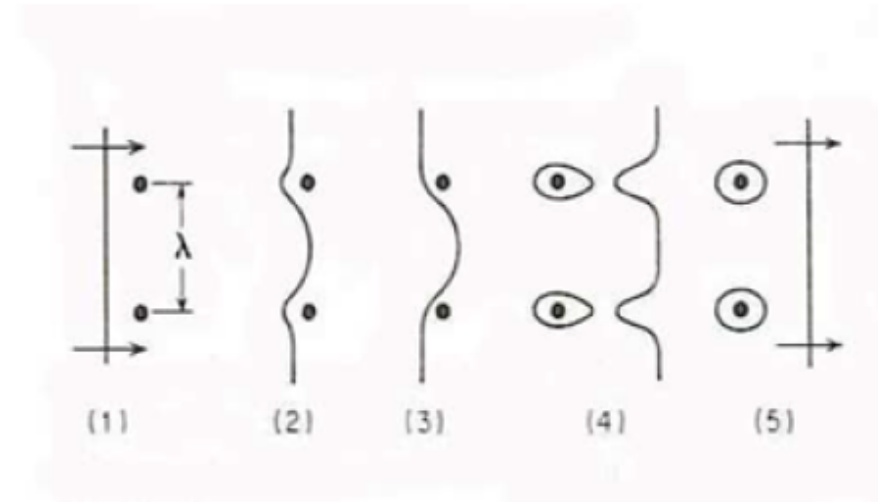


Fig. 1. Steps in manufacture of PM products (after [10])

Mekanizma

Orowan Modeli

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

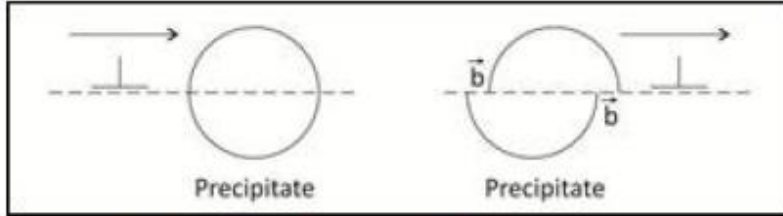
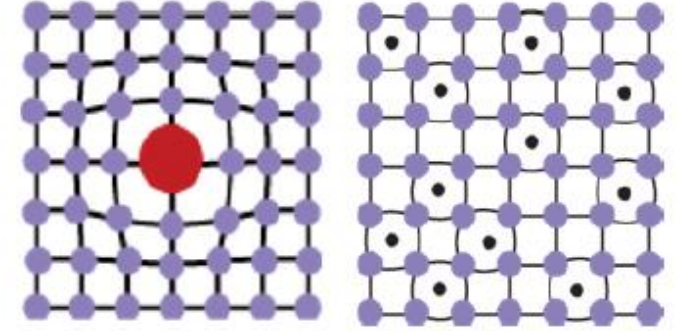


İkinci Faz Parçacıklarla Sertleşmeyi Etkileyen Faktörler

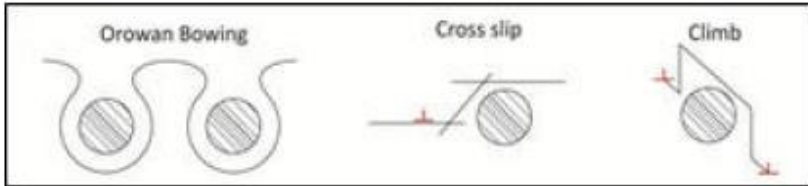
- 1- Parçacık veya Çökeltinin Sertliği
- 2- Parçacık veya Çökeltinin şekli
- 3- Parçacık veya Çökeltinin Büyüklüğü
- 4- Parçacık veya Çökeltilerin Hacimsel Oranı
- 5- Parçacık veya Çökeltilerin yapıdaki dağılımı

Dispersiyon Sertleşmesiyle Çökelme Sertleşmesi Arasındaki Farklar

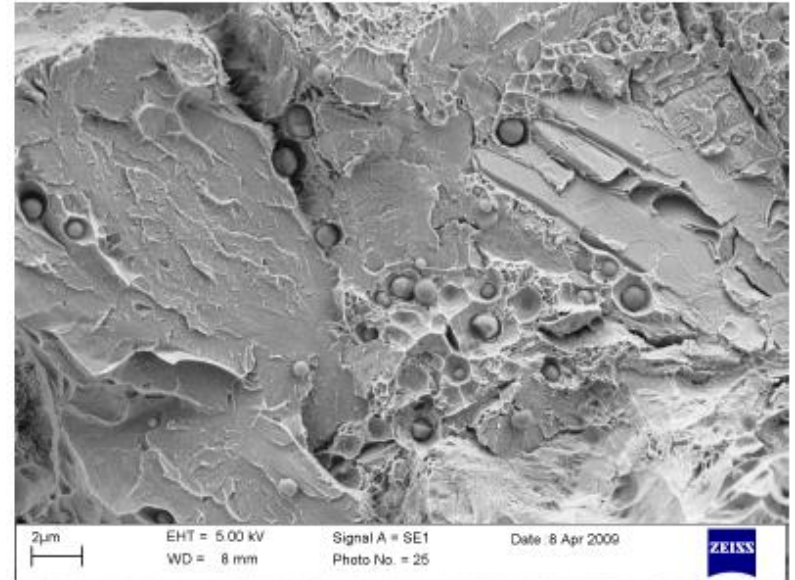
- ♦ ÇS de bağdaşıklık vardır, DS de yok
- ♦ DS tüm sıcaklıklarda kararlı iken ÇS değil
- ♦ DS de zaman faktörü önemli değil
- ♦ DS ile herhangi bir alaşım yapılabilir
- ♦ DS de kimyasal kararlılık daha fazla
- ♦ ÇS izotropik, DS anizotropik



Koherent çökeltiliyi bir kenar dislokasyonunun geçişi.



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



SOĞUK ŞEKİL DEĞİŞİMİ SERTLEŞMESİ

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

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

τ : Akma dayanımı (kayma)

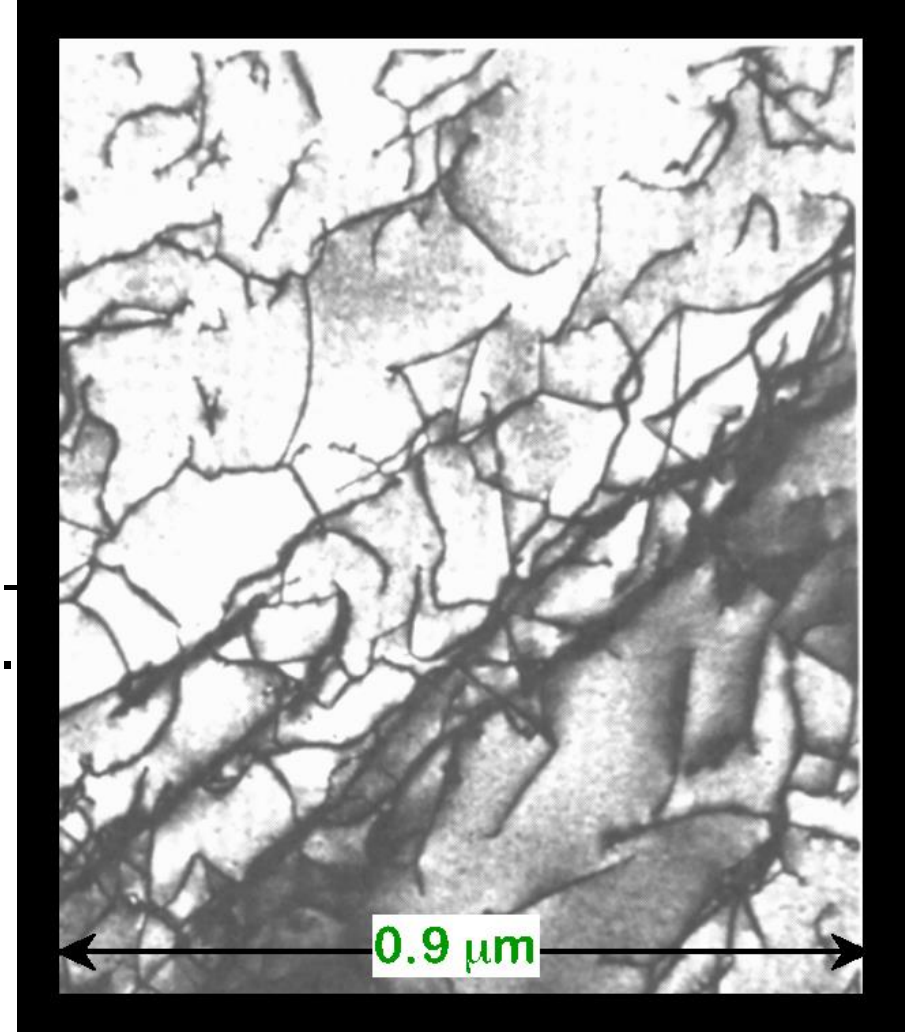
τ_o : Çok düşük dislokasyon yoğunluğundaki akma dayanımı

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

ρ : Dislokasyon yoğunluğu

SOĞUK ŞEKİL DEĞİŞİMİ SERTLEŞMESİ

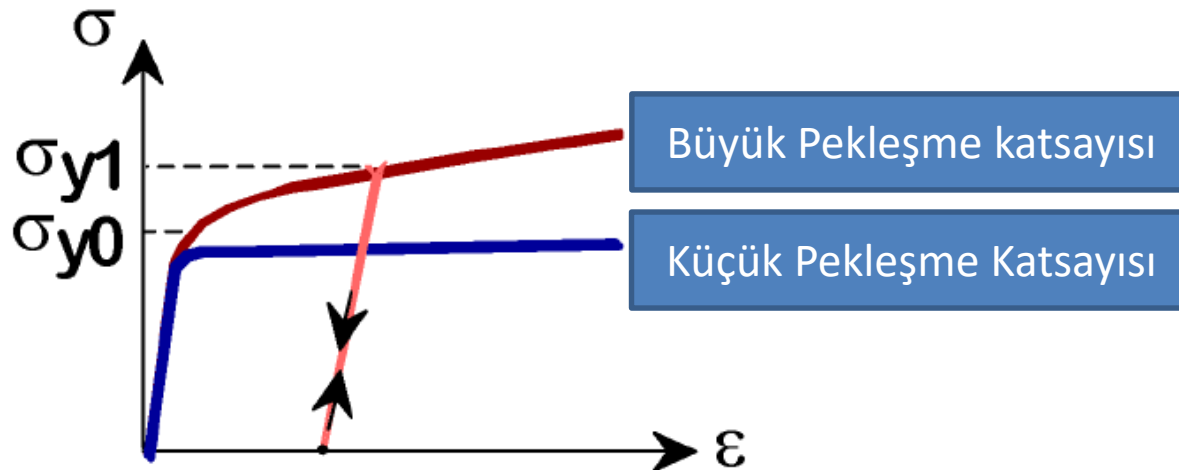
- Soğuk şekil değiştirmiş yapı, deformasyon sertleşmesinin giderilmediği (0,0 - 0,5 Tm) bir sıcaklık bölgesine plastik deformasyon uygulandığında meydana gelir.
- Soğuk şekil değiştirmiş yapı $\sim 10^8$ - 10^{10} mm⁻² dislokasyon içerirken, tavllanmış yapı, $\sim 10^3$ - 10^4 mm⁻² dislokasyona sahiptir.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



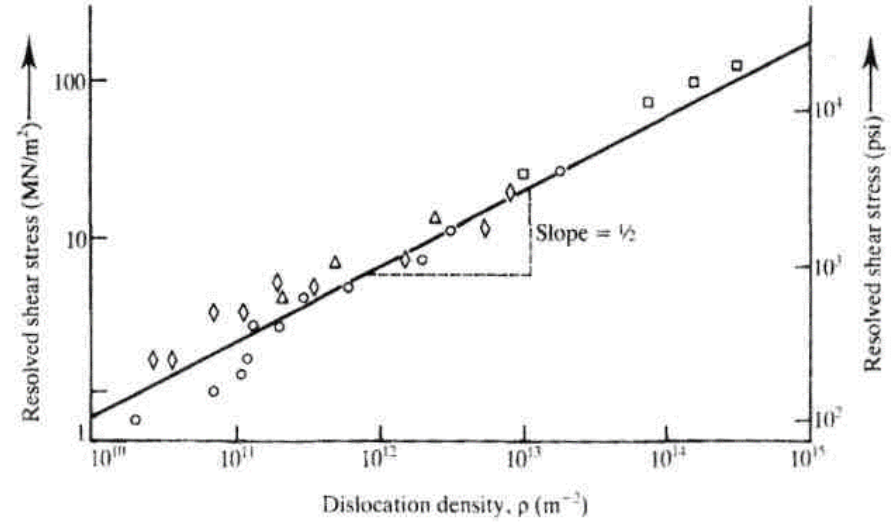
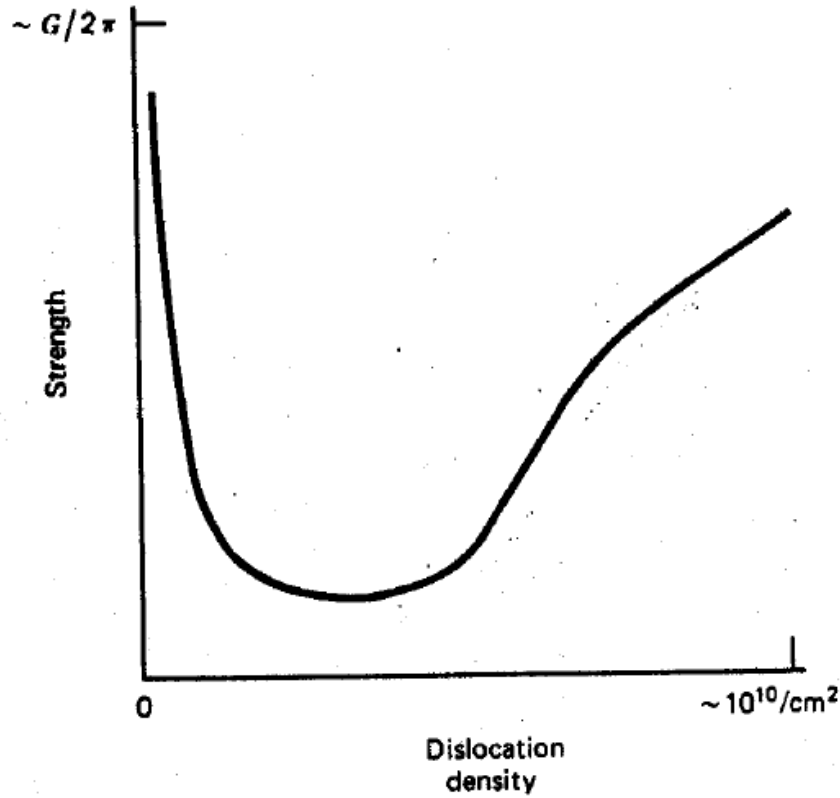
DEFORMASYON SERTLEŞMESİ

Soğuk Şekil Verme Sonucu:

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



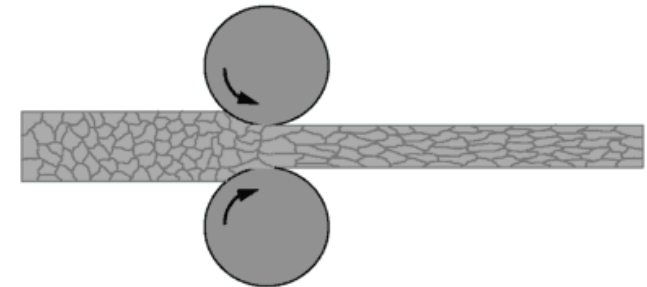
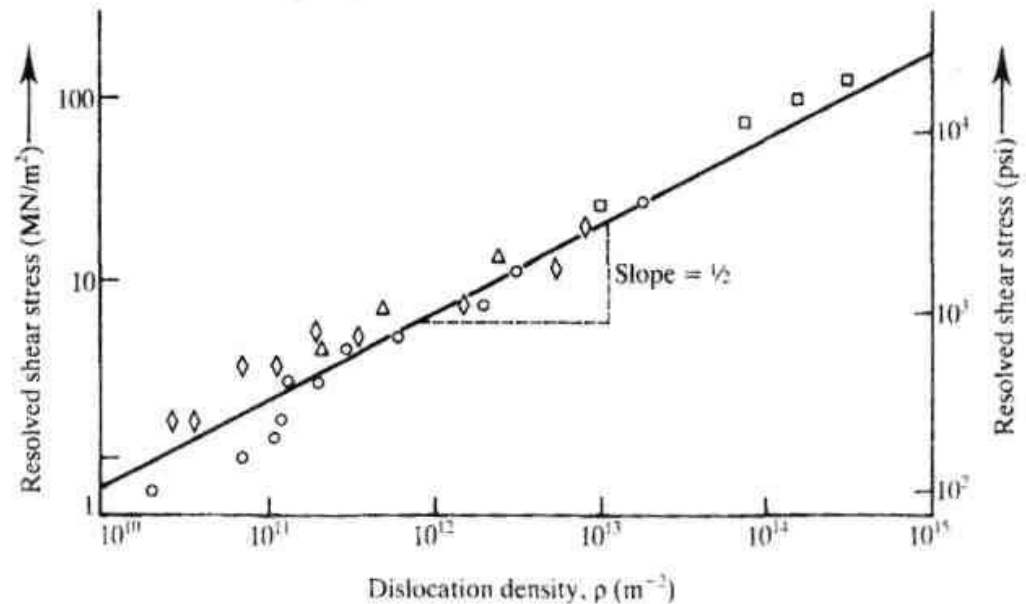
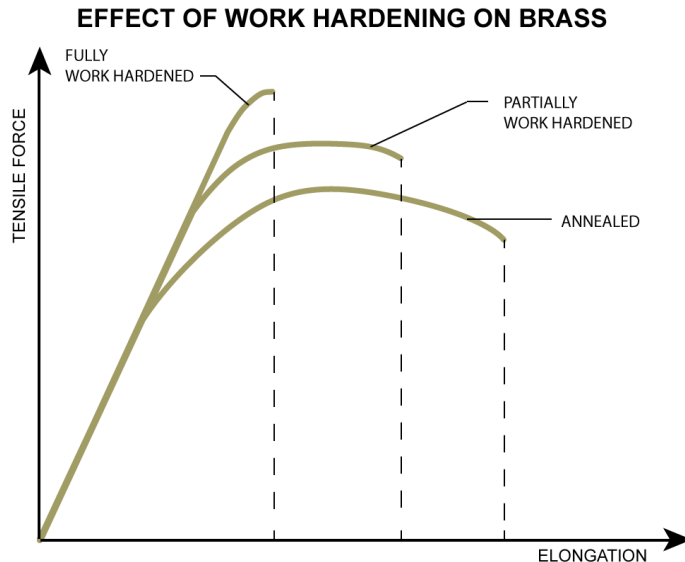
DEFORMASYON SERTLEŞMESİ



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

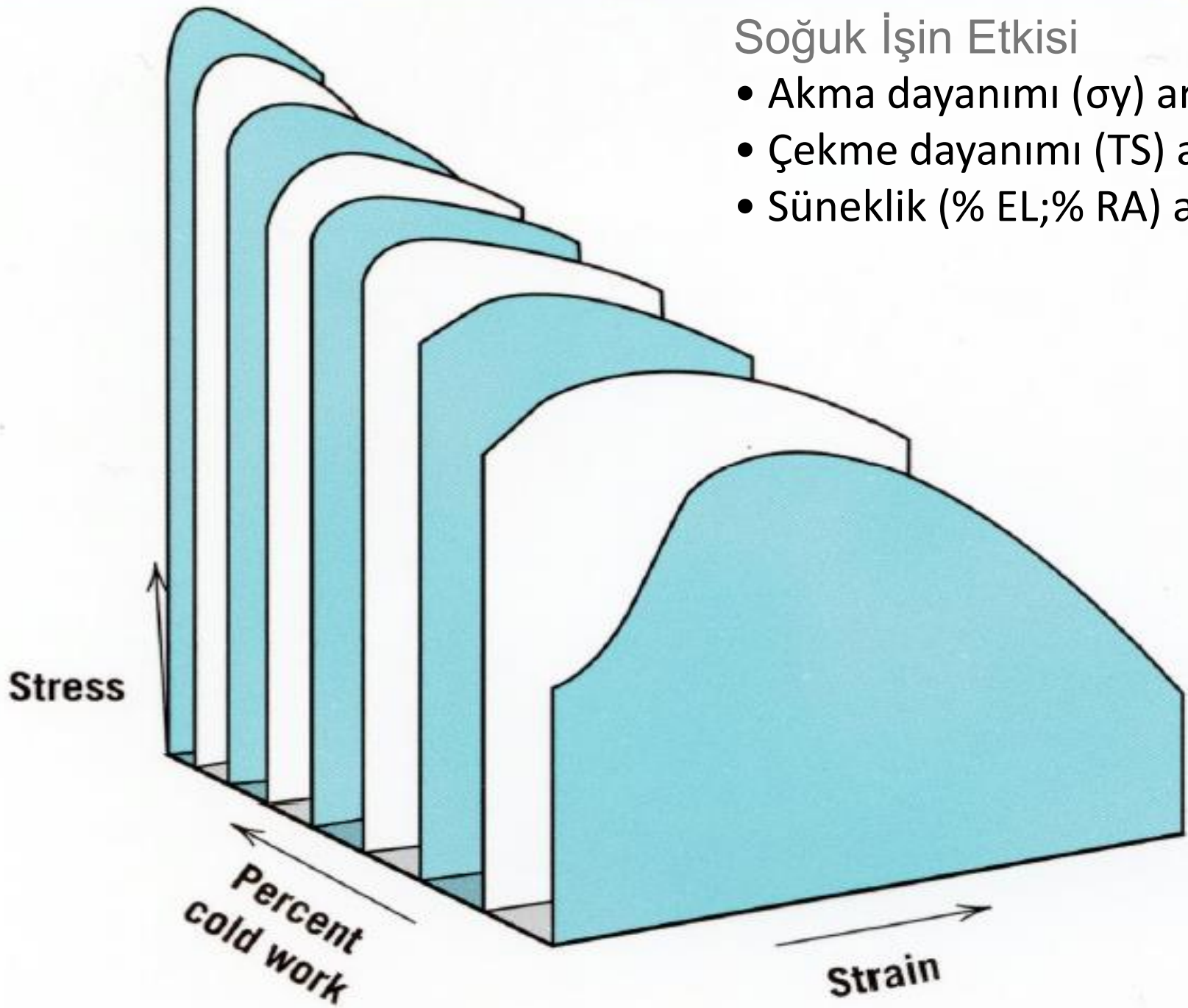
DEFORMASYON SERTLEŞMESİ

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



Soğuk İşin Etkisi

- Akma dayanımı (σ_y) artar
- Çekme dayanımı (TS) artar
- Süneklik (% EL;% RA) azalır



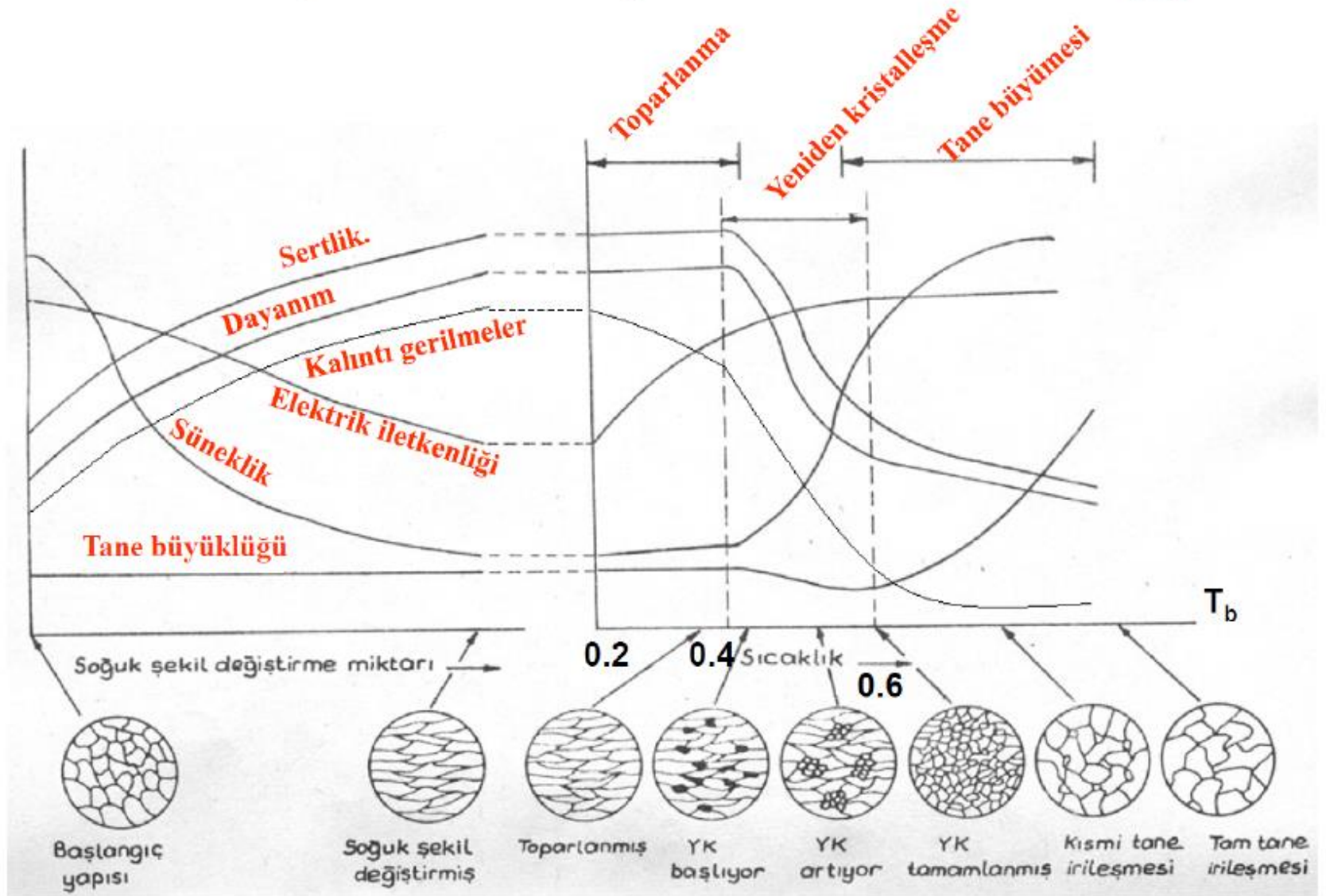
DEFORMASYON SERTLEŞMESİ

Soğuk şekil değiştirme ($T_b < 0.2$) ile dayanımı ve sertliği artmış, sünekliği ve elektrik iletkenliği azalmış bir metalin soğuk şekil değişiminden önceki yapısını tekrar kazandırmak için uygulanan ısıtma işlemi “**yumuşatma tavlaması**” adı verilir.

Yumuşatma Tavlama sırasında tavlama sıcaklıklarına bağlı olarak farklı aşamalar görülebilir:

- ♦ Toparlanma
- ♦ Yeniden Kristallenme
- ♦ Tane İrileşmesi

Yumuşatma tavı (Process Annealing)



TOPARLANMA

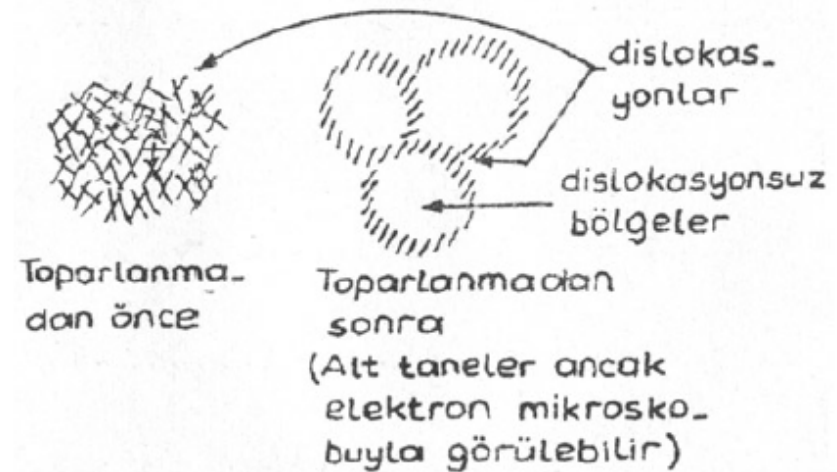
İç yapıda önemli ölçüde değişiklikler olmaz. ($0.2 < T_b < 0.4$)

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.



Yeniden kristalleşme

Sıcaklığın atomsal hareketler için gereken aktivasyonu sağlayacak şekilde olması ile $(0.4 < T_b < 0.6)$ gerçekleşir.

Artan sıcaklık ile **atomlar daha düşük enerjili bölgelere hareket etme** imkanı bulur.

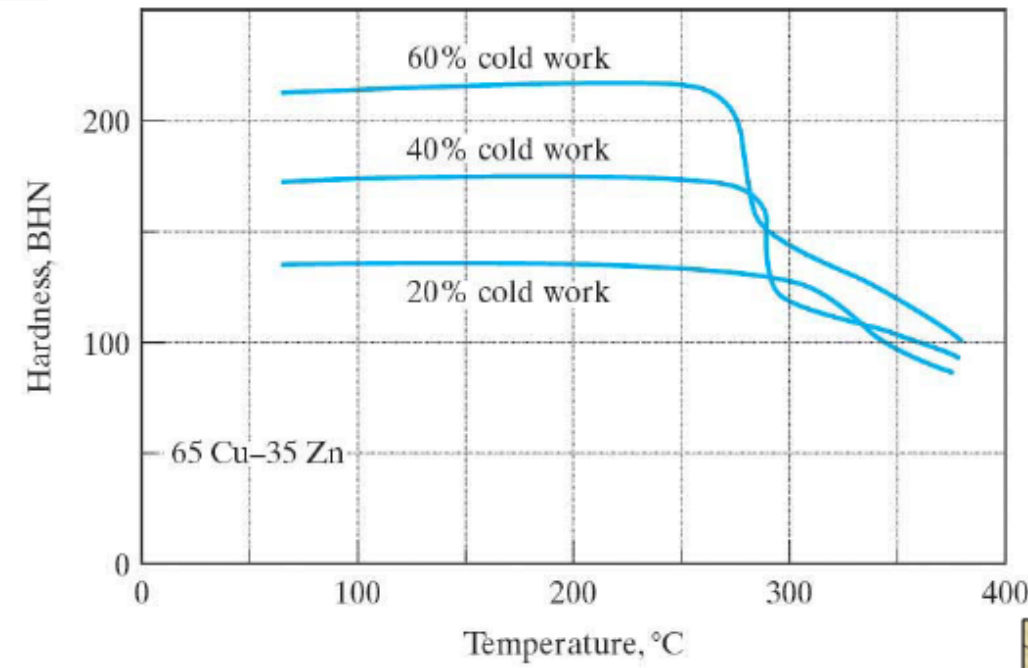
Soğuk ŞD ile oluşan iç yapıda yeni **eş eksenli ve iç gerilmesiz küçük tanelerin çekirdeklenip büyümesi** ile bütün yapı küçük yeni taneler ile kaplanır.

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

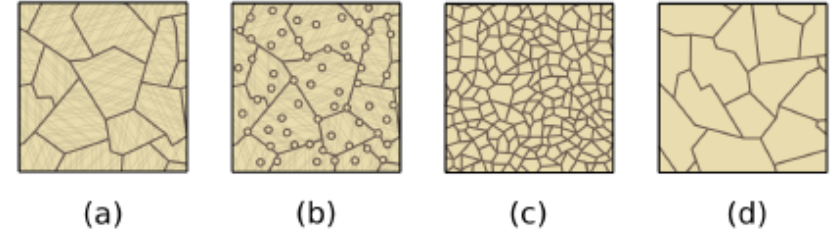
Soğuk Ş.D. miktarı (%CW) arttıkça yeniden kristalleşme ile oluşan **tane boyutu küçülür.**

Soğuk Ş.D. miktarı (%CW) arttıkça yeniden kristalleşme sıcaklığı azalır.

YK nın gerçekleşebilmesi için malzeme kesitinde mutlaka soğuk şekil değiştirmenin bulunması gerekir (%5-10).



Tane büyümesi

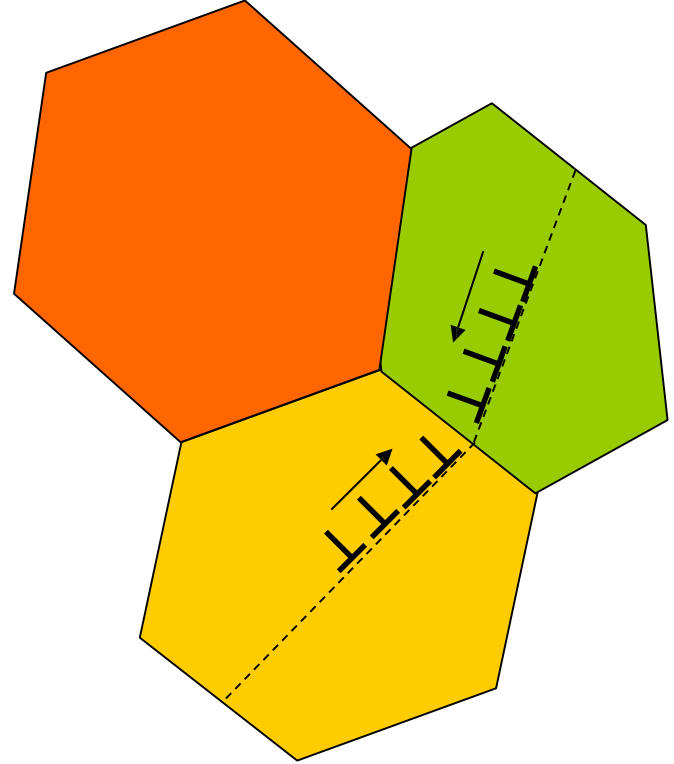


Yeniden kristalleşme ile oluşan ve soğuk Ş.D. ye nazaran daha kararlı (düşük enerjili) iç yapının, yüksek sıcaklıkta tutulmaya devam etmesi tanelerde zamanla büyümesine denir.

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.

TANE SINIRI AZALTMA ETKİSİ

- Tane sınırları da dislokasyon hareketlerini kısıtlayan engellerdendir.
- Tane sınırları, dislokasyonlardan veya empüritelerden daha kuvvetli engellerdir.
- Kristallografik olarak düşünüldüğünde; bir tane (kristal) içinde ilerleyen bir dislokasyon tane sınırına ulaştığında başka oryantasyona sahip tanelerle (kristallerle) karşılaşacağından daha fazla ilerleyemez.
- Böylece dislokasyon hareketi engellenmiş olur.
- Tane boyutunun küçük olması hem dayanımı hem de tokluğu aynı anda artıran bir etkidir.



TANE SINIRI ETKİSİ

- Akma dayanımının tane boyutuna bağlı olarak değişimi:

Hall-Petch Eşitliği

$$\sigma_A = \sigma_0 + \frac{k_a}{d^{1/2}}$$

σ_A : Akma dayanımı

d : Tane boyutu

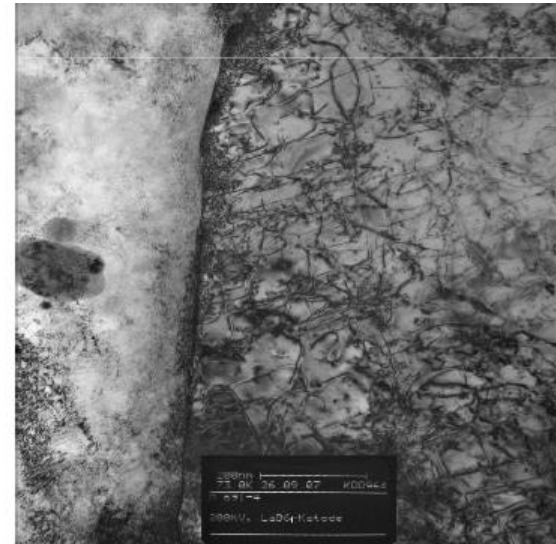
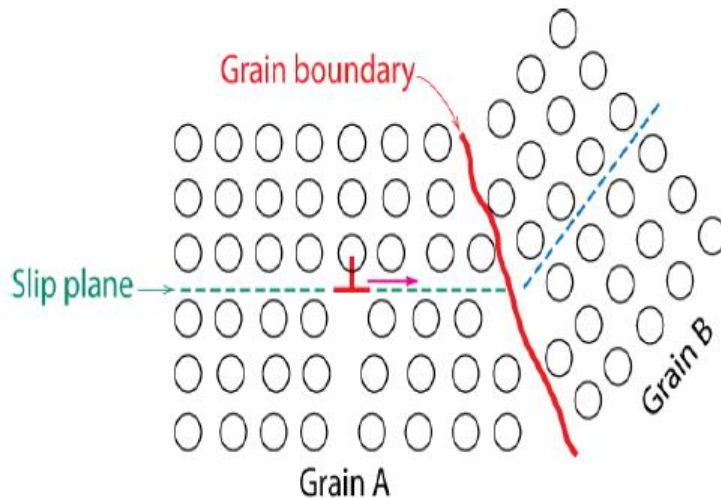
σ_0, k_a : Malzeme sabitleri

Malzeme	Kristal yapı	k_a
Düşük karbonlu çelik	HMK	0.307
Molibden	HMK	1.768
Çinko	HSP	0.220
Magnezyum	HSP	0.279
Titanyum	HSP	0.403
Bakır	YMK	0.112
Alüminyum	YMK	0.068

TANE SINIRI ETKİSİ

- Hall-Petch eşitliğine göre akma dayanımını artırmak için tane boyutunun **küçültülmesi** gerekir.
- Örneğin metalik malzemelerde, çok küçük boyuta sahip ve metalin içinde çözünmeyen ve tane büyümesini engelleyen ikincil fazlar kullanılmaktadır.
- Tane boyutunun etkisinden ciddi anlamda yararlanmak için tane boyutunun 5 mikron dan küçük olması gerekmektedir.

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

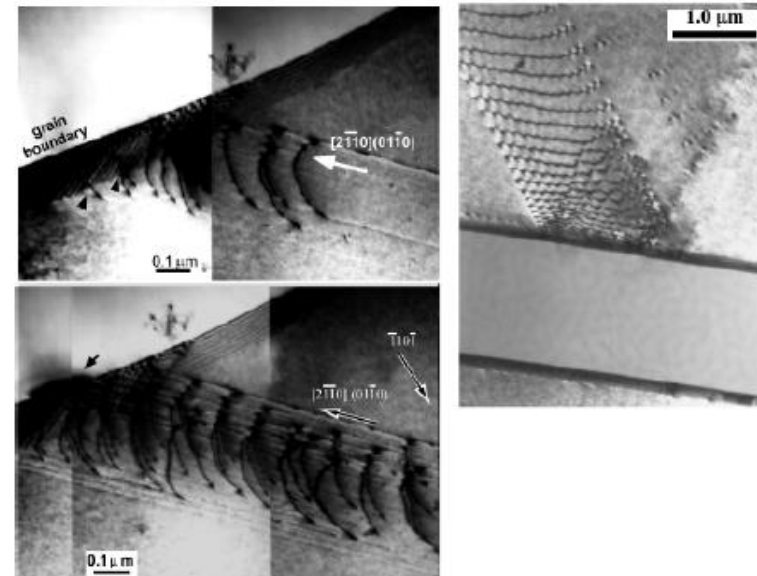
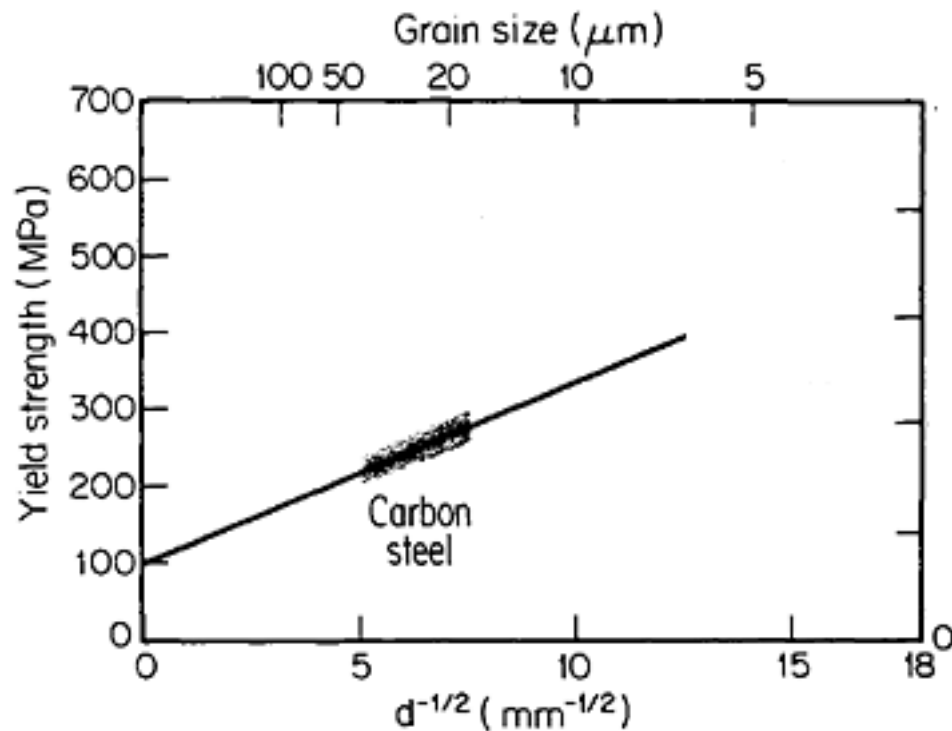


TANE SINIRI SERTLEŞMESİ

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

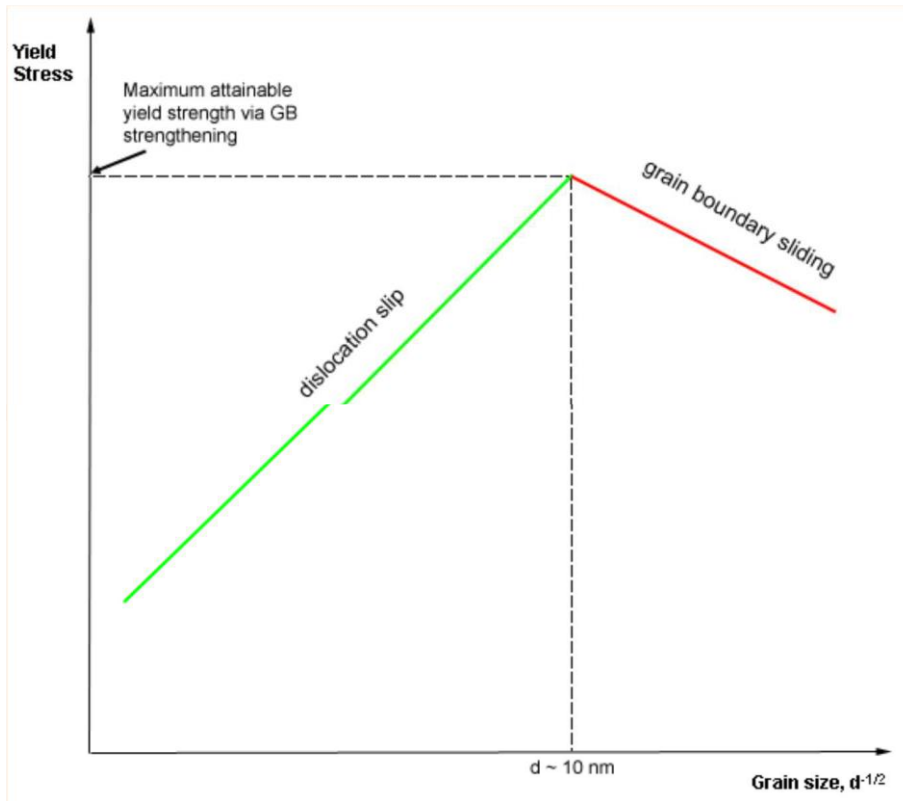
TANE SINIRI ETKİSİ

➤ Karbon çeliğinde Hall-Petch ilişkisi



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

Ters Hall-Petch



Tane büyüklüğü sıvı fazdan katılaşma oranı ve ayrıca plastik bir deformasyon ve ardından uygun bir ısıl işlemle düzenlenebilir

Dayanım artırma, dislokasyonların boyutu ile sınırlıdır. Tane büyüklüğü yaklaşık 10 nm'ye ulaştığında, tane sınırları kaymaya başlar. Tane sınırlarında difüzyon çok kolaylaşır.(Coble creep)

HALL-PETCH STRENGTHENING LIMIT

SORU-1

- Bir karbon çeliği ve alüminyum alaşımından aşağıdaki veriler elde edilmiştir.

Karbon Çeliği		Alüminyum Alaşımı	
$d(\mu\text{m})$	$\sigma_y(\text{MPa})$	$d(\mu\text{m})$	$\sigma_y(\text{MPa})$
406	93	42	223
106	129	16	225
75	145	11	225
43	158	8.5	226
30	189	5.0	231
16	233	3.1	238

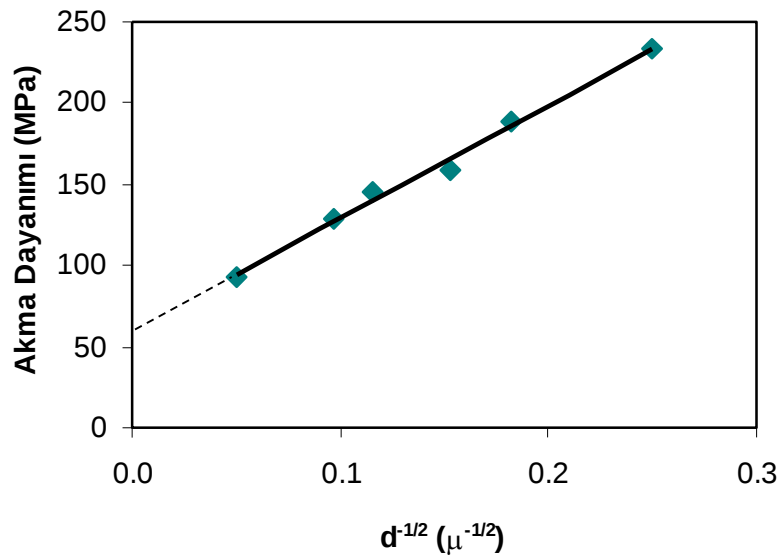
- Karbon çeliğinin ve alüminyum alaşımının akma dayanımlarının Hall-Petch ilişkisini sağlayıp sağlamadığını tespit ediniz.
- Küçük miktarlarda vanadyum veya niobiyum eklenmesi sonucu bazı düşük alaşımlı çeliklerin tane boyutu 2μ değerine kadar düşürülebilir. Benzer şekilde ileri alüminyum alaşımlarında tane boyutu bazı özel taneler kullanılarak 2μ değerine kadar düşürülebilir.
- Buna göre bu örnekteki çeliğin ve alüminyum alaşımlarının tane boyutları 2μ değerine kadar düşürülürse her birinin akma dayanımı ne olur hesaplayınız.

ÇÖZÜM-1

$$\sigma_A = \sigma_0 + \frac{k_a}{d^{1/2}}$$

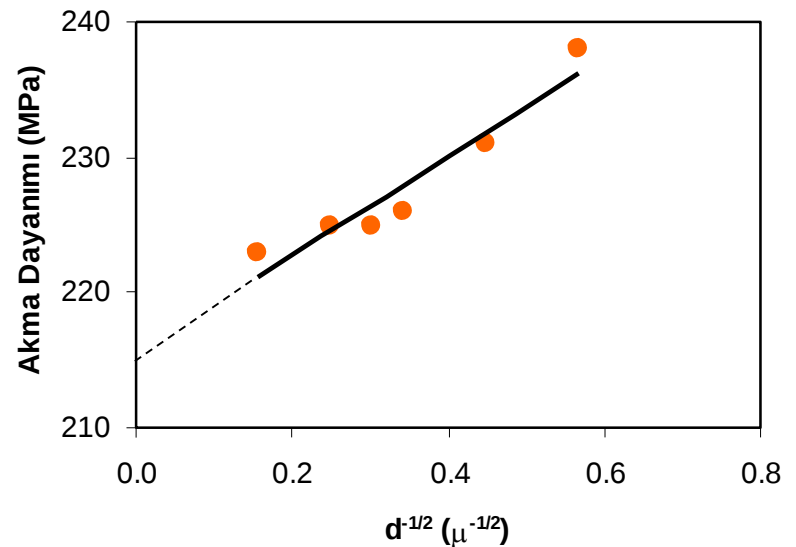
Akma dayanımını $1/d^{1/2}$ fonksiyonu olarak çizersek:

Karbon Çeliği



$$\sigma_A = 60.46 + \frac{689.5}{d^{1/2}}$$

Alüminyum alaşımı



$$\sigma_A = 215.5 + \frac{36.4}{d^{1/2}}$$

ÇÖZÜM-1 devam...

Karbon Çeliği

$$\sigma_A = 60.5 + \frac{689.5}{d^{1/2}}$$

$$d = 2\mu$$

$$\sigma_A = 60.5 + \frac{689.5}{2^{1/2}}$$

$$\sigma_A = 548 \text{ MPa}$$

Alüminyum alaşımı

$$\sigma_A = 215.5 + \frac{36.4}{d^{1/2}}$$

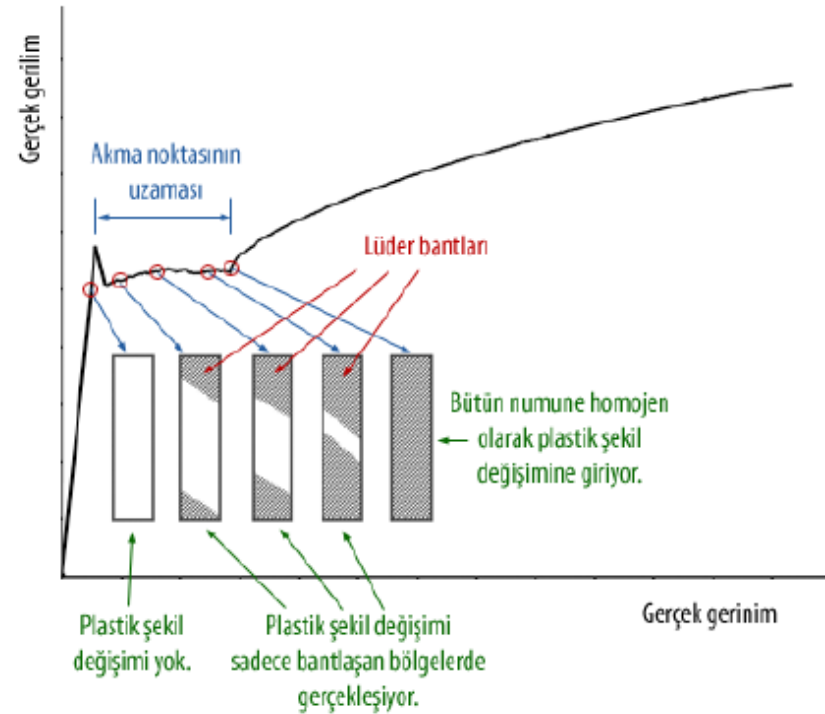
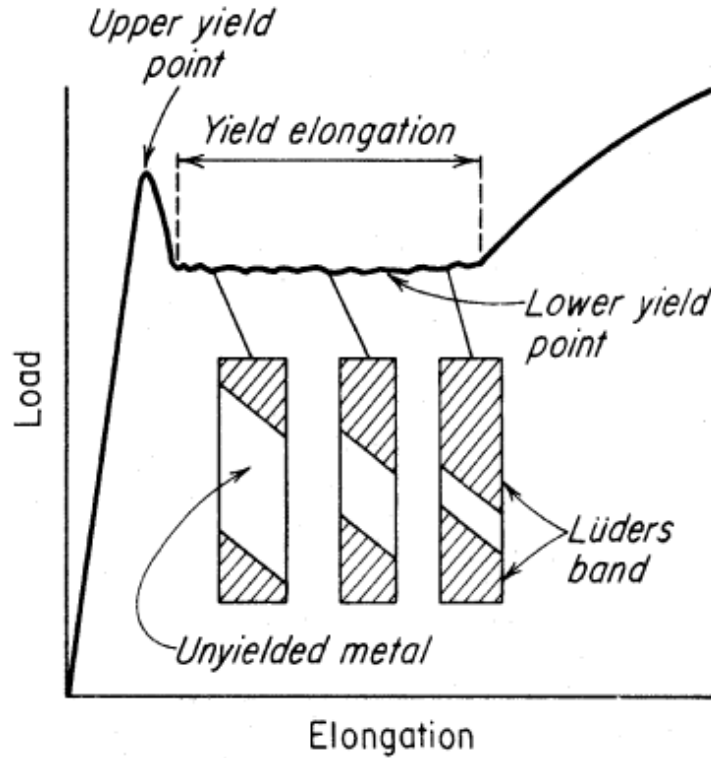
$$d = 2\mu$$

$$\sigma_A = 215.5 + \frac{36.4}{2^{1/2}}$$

$$\sigma_A = 241 \text{ MPa}$$

Belirgin Akma Olayı

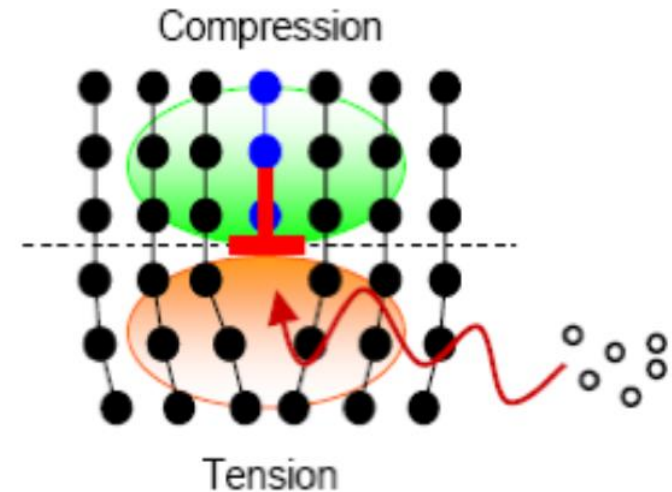
Özellikle düşük karbonlu çeliklerde 'Akma noktası olayı' Cottrell Atmosferi



Çözünmüş atomların neden olduğu üst akma noktası oluşumu: Mekanizma

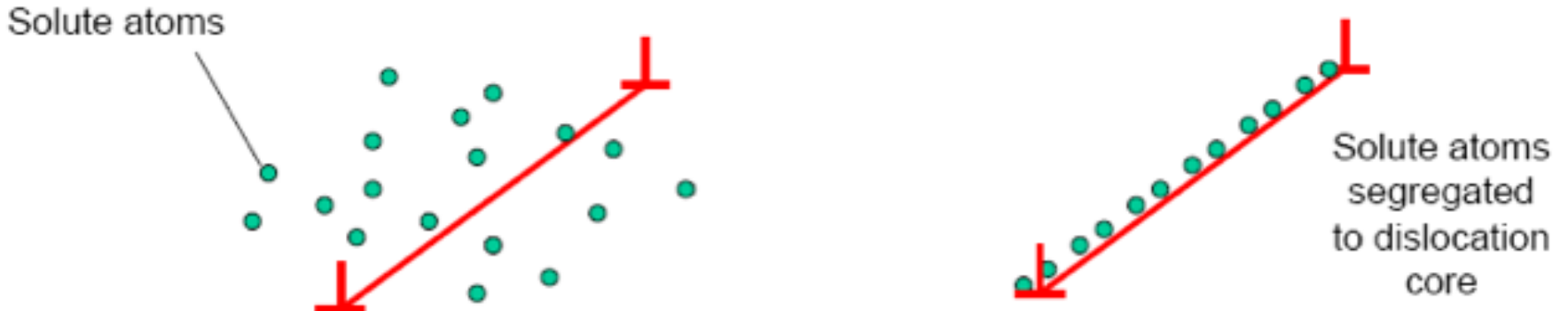
- Çözünmüş atomlar, tercihen toplam elastik genlemenin en az olacağı şekilde, dislokasyonların yakınındaki çarpık bölgelere ayrışarak yerleşirler. (diğer bir deyişle, küçük atomik çaplı çözünen atomlar, varlıklarının neden olduğu kafes çarpılmasını en aza indiren konumlara taşınırlar).
- Bu çözünen madde ayrışması, çözünen atomların dislokasyonların gerilme alanı içinde birikme eğiliminde olacağından, çözünen atom atmosferlerinin oluşumu ile sonuçlanır.

Bu atmosferlere **Cottrell Atmosferi** denir.

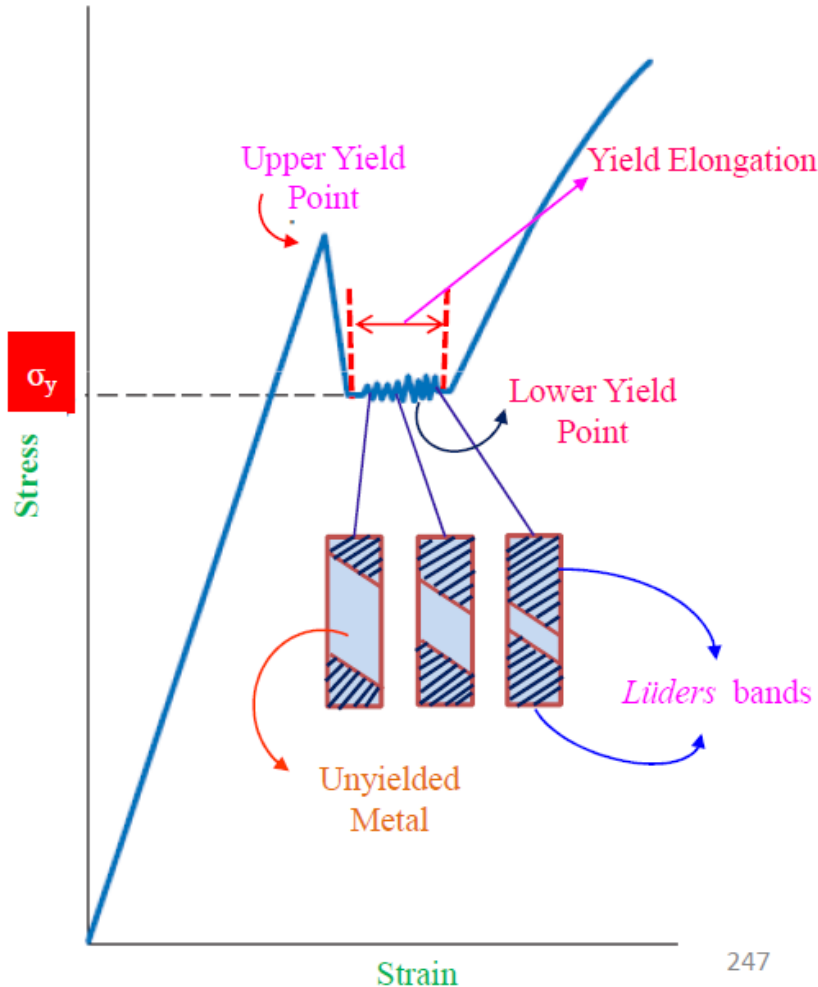


Çözünmüş atomların neden olduğu üst akma noktası oluşumu: Mekanizma

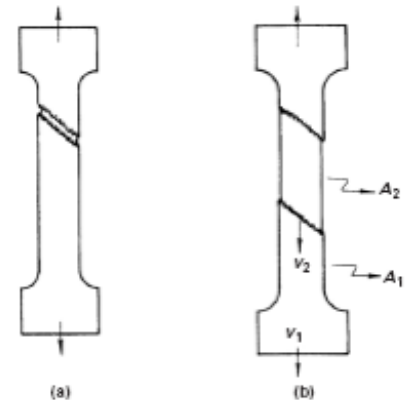
- Yüksek sıcaklıklarda, difüzyon prosesleri çözünen atomlar için hareketliliği arttırır. Çözünen atmosferler minimum enerji durumunu korumak için dislokasyon çizgisiyle birlikte hareket edebilir.
- Solütlerin dağılması, belirli bir sıcaklık-gerilme oranı aralığında, yer değiştirme hareketini sınırlar, çünkü dislokasyonlar, çözünen atmosferleri kendileriyle birlikte "sürüklemelidir".
- Uygulanan gerilme, çözünen atmosferlerden "dislokasyonları serbest bırakmak" için yeterince büyük oluncaya kadar dislokasyon hareketi kısıtlanacaktır.



Çözünmüş atomların neden olduğu üst akma noktası oluşumu: Mekanizma

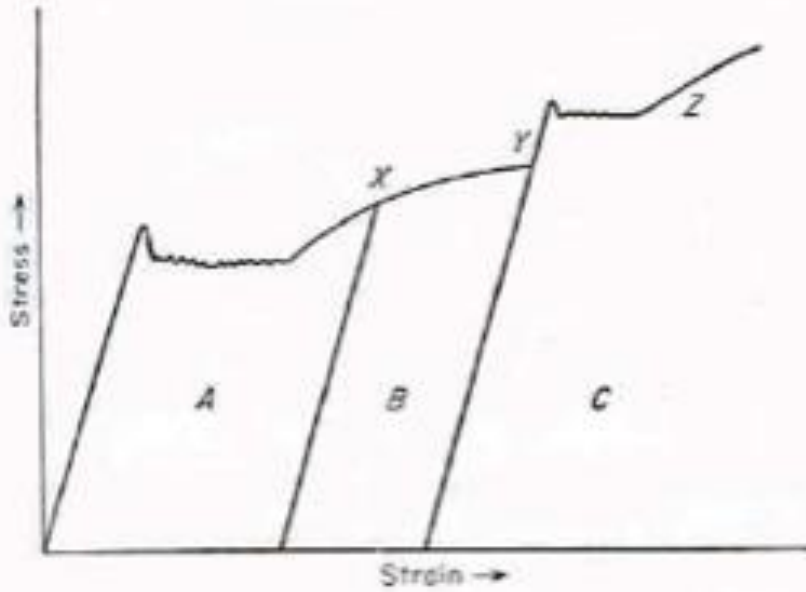


- Üst akma noktasından sonra, dislokasyonların çözünen atmosferler içermediği, alt akma noktası olarak adlandırılan bir plato bölgesi oluşur.
- Bu bölgede Lüders bantları gibi homojen olmayan deformasyon görünür ve örnek boyunca yayılır. Bunlar, gerilme-konsantrasyonunun arttığı bölgeler boyunca, yani çekme yönüne 45 derece boyunca oluşan Lüders bantları olarak bilinir.



Deformasyon Yaşlanması

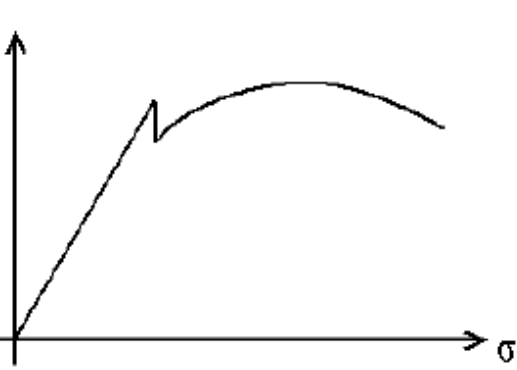
Deformasyon yaşlanması, metalin nispeten düşük sıcaklıkta veya soğuk şekil değiştirmeden sonra süneklikte bir kayıba karşın dayanımının arttırdığı bir fenomendir.



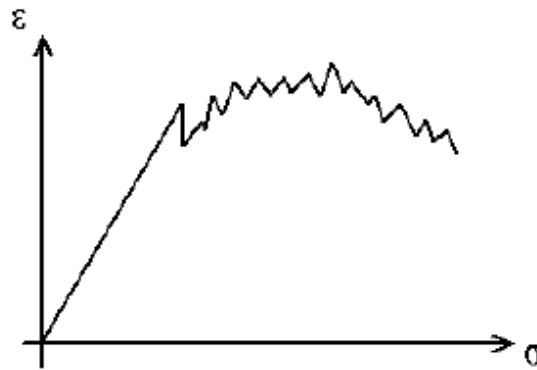
- X'ten yükü boşaltıp hemen yeniden yüklenirse, akma noktası oluşmaz.
- Yük boşaldıktan sonra, örnek bir süre yaşlandırmadan sonra yeniden yüklenirse, akma noktası daha yüksek bir değerde tekrar görünecektir.
- Akma noktasının bu tekrar ortaya çıkması, dislokasyonları bağlamak üzere C ve N atomlarının difüzyonundan kaynaklanmaktadır.
- N, daha yüksek bir çözünürlük ve difüzyon katsayısı nedeniyle demirde C'den daha fazla deformasyon yaşlanma etkisine sahiptir.

ΔY Change in yield stress due to strain aging
 ΔU Change in UTS due to strain aging
 $\Delta \epsilon$ Change in total elongation due to strain aging

Strain-aged
 lower yield extension
 C
 ΔU
 ΔY
 B
 A
 Initial lower yield extension (Luders strain)
 Prestrain
 Residual ductility
 Total elongation
 Strain



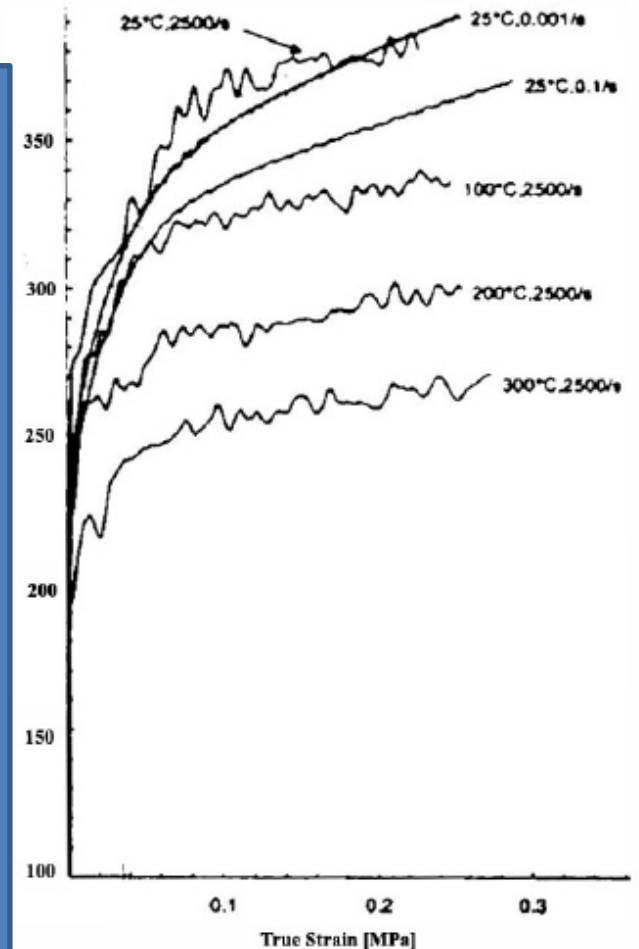
décrochement



effet Portevin-Lechatelier

Al-Mg alloy (5086)

- Görece yüksek sıcaklıklarda Deformasyon yaşlanması nın deformasyon sırasında meydana gelmesi ile ayrıca, dislokasyonları yakalamak ve kilitlemek için yüksek çözünen atom difüzyon hızı nedeniyle tırtıklı gerilme-genleme eğrileri veya tekrarlanan akma olayı görülür.
- Bu dinamik gerilme yaşlanması, veya Portevin-LeChatelier etkisi olarak da adlandırılır.
- Portevin-LeChatelier (PLC) etkisi, çözücüler, deformasyon sırasında sürekli olarak dağılık ve dislokasyonları sabitleyecek kadar hareketli olduğunda meydana gelir.
- Her testere dişi, tekrar tekrar çivilenmeyi ve çözünen *atmosferlerden ayrılmaların* bozulmasını temsil eder.



Suverme (Sertleştirme) Isıl İşlemi ile Dayanım artışı

A3'ün üzerine ısıtma (A3/ Acm) → Ostenitleme → Su verme (kritik soğutma hızından daha yüksek bir hızla soğutma)

- ✓ Yavaş soğuma hızlarında, karbon atomları östenit kafesinden dışarı yayılabilir ve $\gamma \rightarrow \alpha$ dönüşümüne yol açar. Bu işlem çekirdeklenme ve büyümeyi içerir ve zamana bağlıdır.
- ✓ Soğutma hızının artması ile, karbonun çözeltiden yayılması için yeterli zaman kalmaz ve demir atomlarının bir miktar hareketi gerçekleşse de, yapı HMK olamaz. karbon östenit kafes içinde çözelti halde tutulur.
- ✓ Elde edilen yapı Martensit olarak adlandırılır, hacim merkezli tetragonal bir yapıda sıkışmış, karbonca aşırı doymun bir katı çözeltidir ve yarı kararlı bir fazdır.
- ✓ Çok çarpık kafes yapısı martensit sertliğinin yüksek olmasının ana nedenidir.
- ✓ Sert bir şekilde soğuduktan sonra martensit, mikroskobik olarak beyaz iğnegibi veya asiküler/iğnemsî yapı veya mercimek şeklinde görünür, bazen saman yığını olarak tanımlanır.

Martenzitin Özellikleri

- Oluşan Martensit şekli → Lentiküler /disk şeklinde(veya ince paralel plakalar)
- Şekil değişimi ile ilişkili (kesme)
- Bu durum şunları gerektirir:
 - 1) Bain çarpılması → Kafesin homojen saf genişlemeye yol açan belirli kristalografik yönler boyunca genişlemesi veya büzülmesi
 - 2) İkincil Kayma çarpılması → Kayma veya ikizlenme
 - 3) Sert Gövde dönmesi

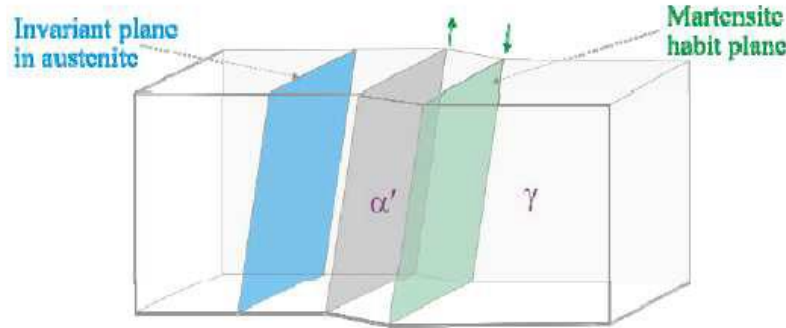
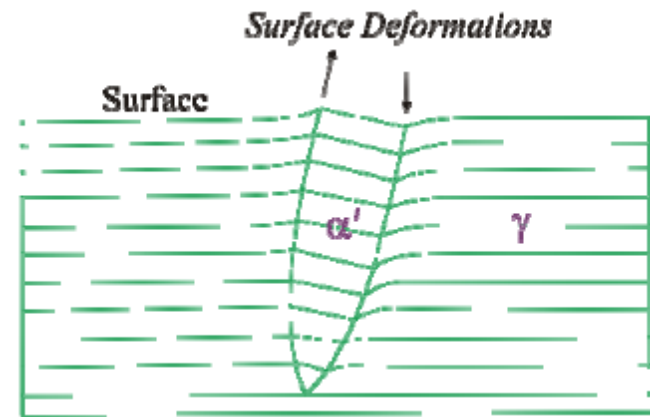
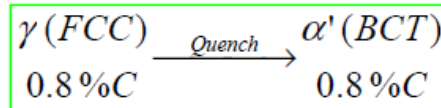


Illustration of the coherence of the martensitic plate with the surrounding austenite



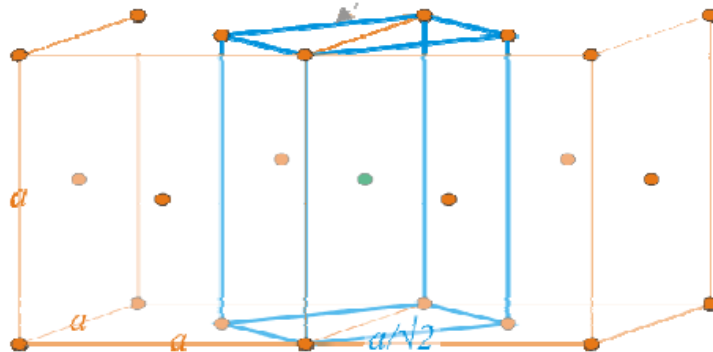
Martenzitin Özellikleri

- ✓ Martensitik dönüşüm ilk önce aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi Östenit fazı için alternatif bir birim hücre düşünülerek anlaşılabilir.
- ✓ Östenitte karbon yoksa (aşağıdaki şekilde olduğu gibi), Martensitik dönüşüm, c eksenı boyunca ~% 20 büzölme ve a ekseninin ~% 12 genişlemesi → hacim değişimi ve sonuçta ortaya çıkan yapı, HMK kafesine sahiptir (normal HMK-Fe) → c / a oranı= 1.0.



FCC Austenite alternate choice of Cell

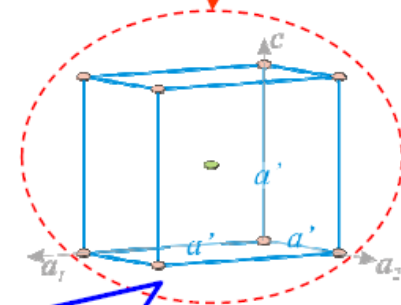
A Body Centred Tetragonal Cell



FCC → BCC

In Pure Fe after the Martensitic transformation

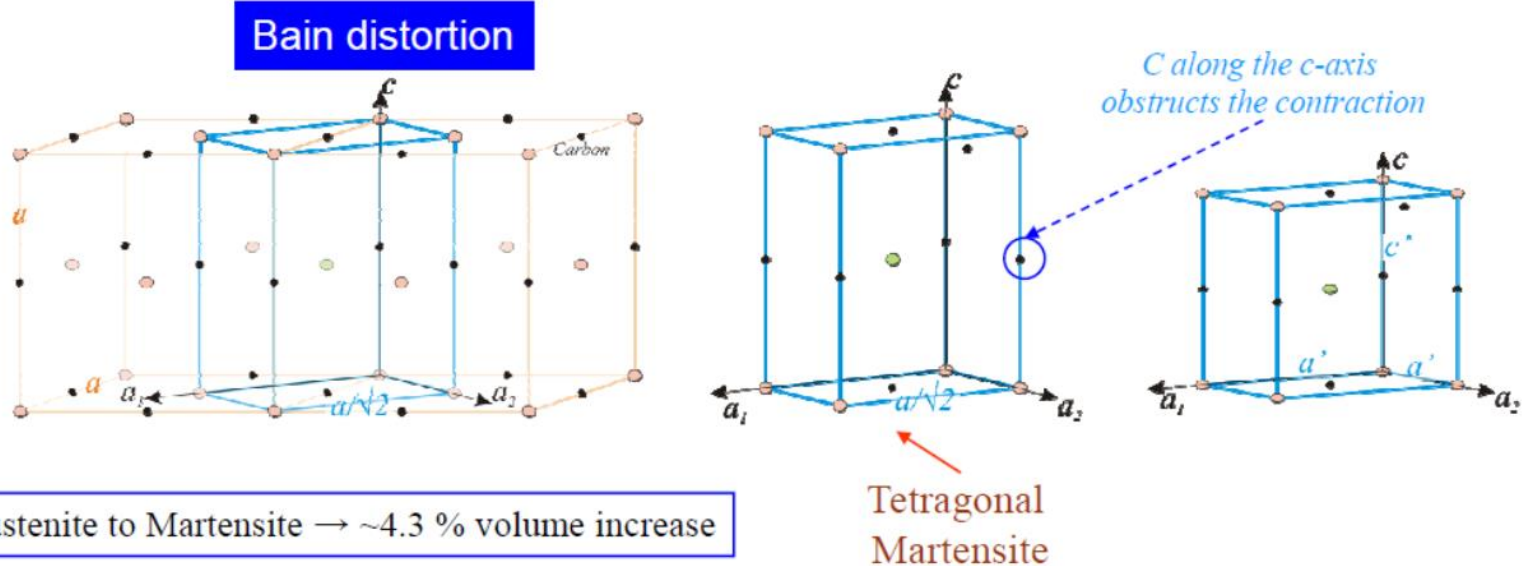
$c = a$



~20% contraction of c -axis
~12% expansion of a -axis

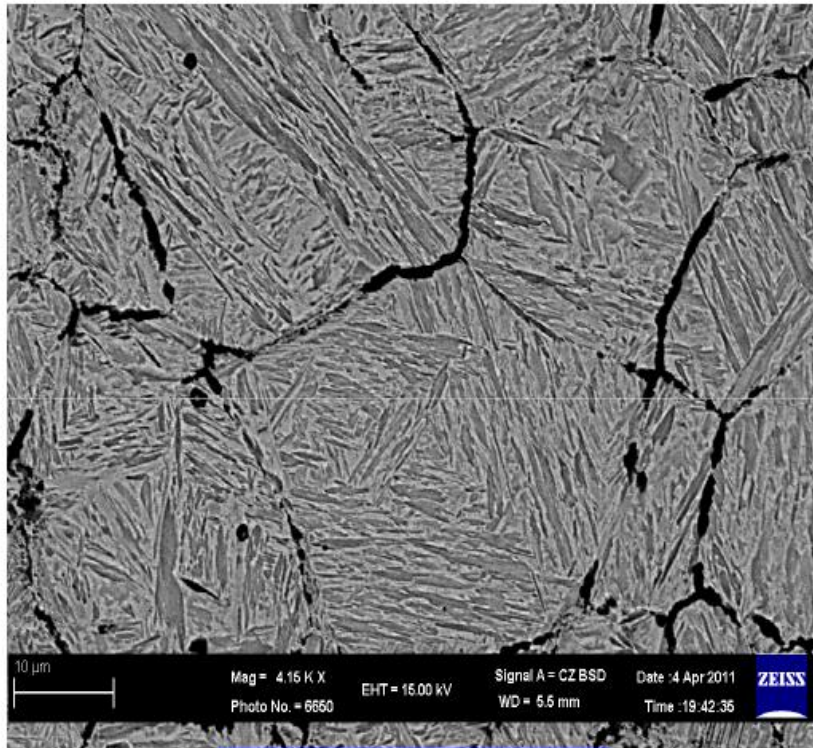
Martenzitin Özellikleri

- ✓ γ -Fe (YMK) 'nin oktahedral boşluklarında karbon varlığında aşağıdaki semada olduğu gibi) $\rightarrow$ c eksenini boyunca büzülme karbon atomları tarafından engellenir. (Fe içindeki C yüzdesi küçük olduğundan, oktahedral boşlukların yalnızca bir kısmının karbon ile doldurulduğunu unutmayın).
- ✓ Ancak a_1 ve a_2 eksenleri serbestçe genişleyebilir. Bu, c/a gibi bir orana sahip bir ürüne yol açar $(c'/a') > 1$
- ✓ Bu durumda, hacimde $\sim\% 4.3$ 'lük bir genel artış vardır (karbon içeriğine bağlıdır) $\rightarrow$ Bain çarpılması *.

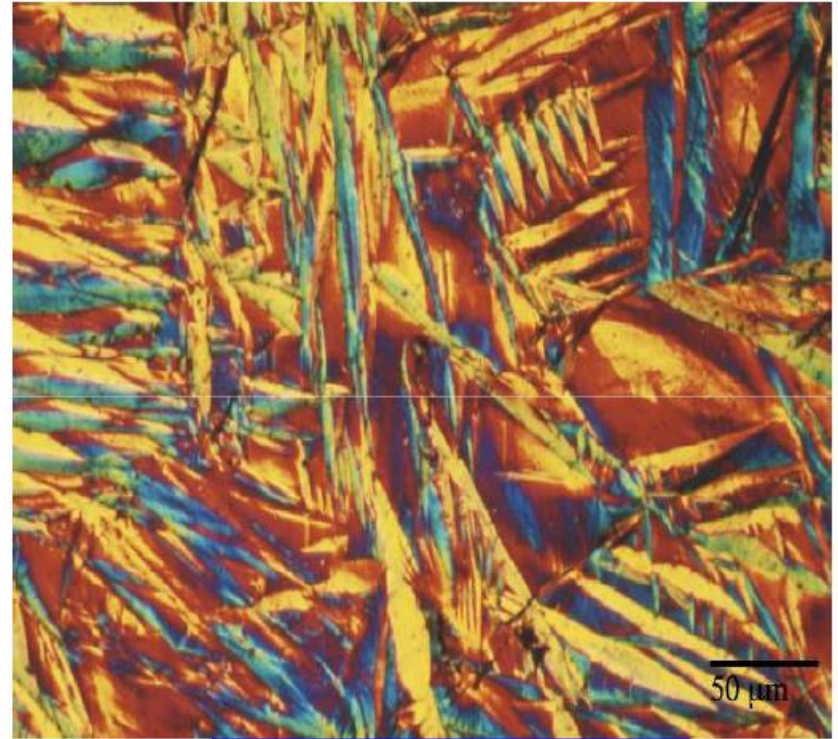


Yeni bir kafesin oluşumuna da yol açan kafesin homojen genişlemesine (kristalografik eksenler boyunca genişleme / daralma) **Bain çarpılması** denir. Bu minimum atom hareketlerini içerir.

Martenzitin Mikroyapısı



Fe-0.6%C steel
Martensite plates

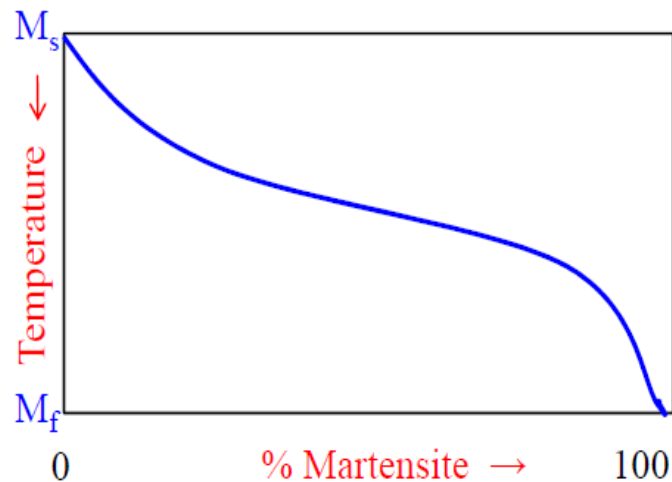


Fe, C 0.8 (Wt%)
Martensite plates

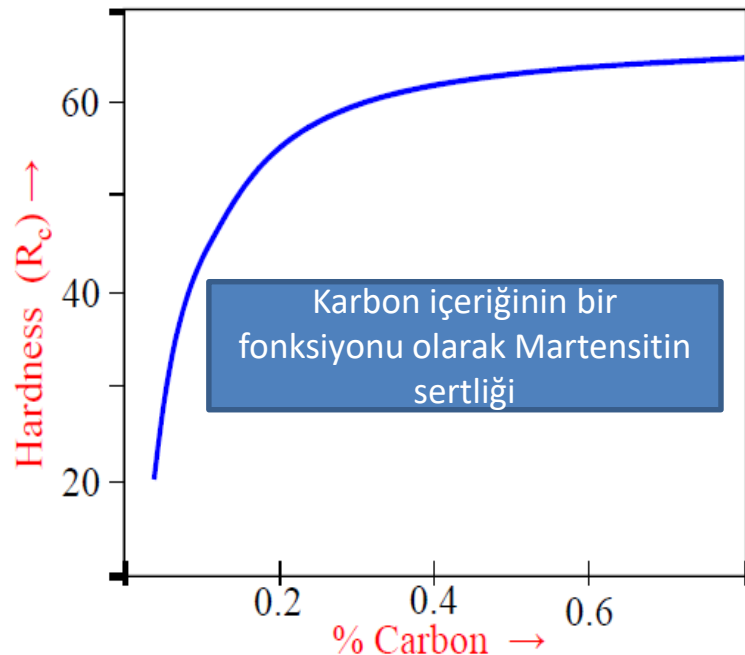
Martenzitin Özellikleri

- Martensitik dönüşüm, kompozisyon değişikliği olmadan gerçekleşir.
- Dönüşüm difüzyona gerek kalmadan, kayma ile gerçekleşir ve **difüzyonsuz dönüşüm** denir,
- Gereken atomik hareketler (kayma) atomik aralığın sadece küçük bir kısmıdır,
- Kayma, dönüşüm bölgesinin şeklini değiştirir
 - önemli miktarda kayma enerjisi sağlar
- - levha şeklindeki martenzit şekli
- Oluşturulan martenzit miktarı, numunenin suverildiği sıcaklığın bir fonksiyonudur, zamanın değildir.
- Martensit sertliği karbon miktarının bir fonksiyonudur
 - ancak martenzit kırılgan olduğu için yüksek sertlikteki çelik çok kırılgandır,
- Çeliğin sünekliğini artırmak için tekrar tavllanır,
 - bu işleme **TEMPERLEME** /**MENEVİŞLEME** denir.

Characteristics of Martensite

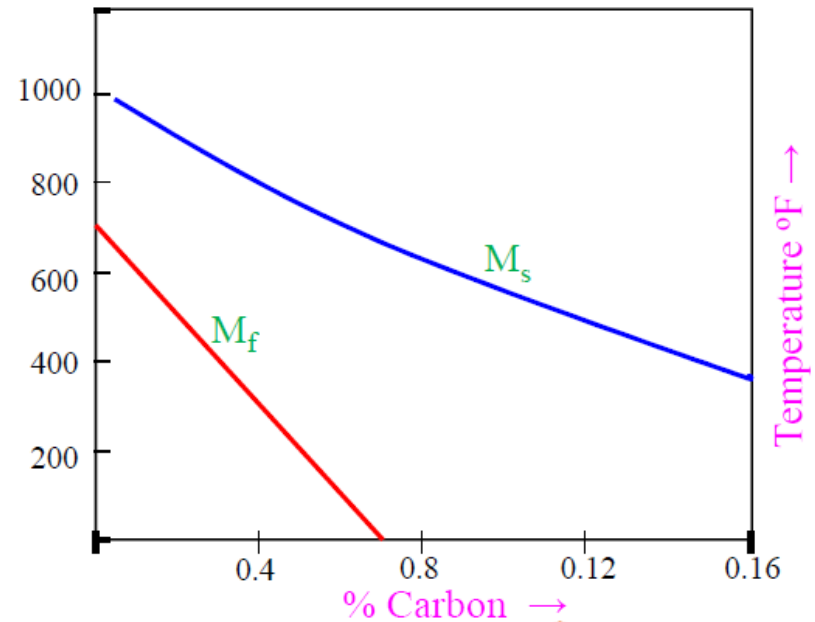
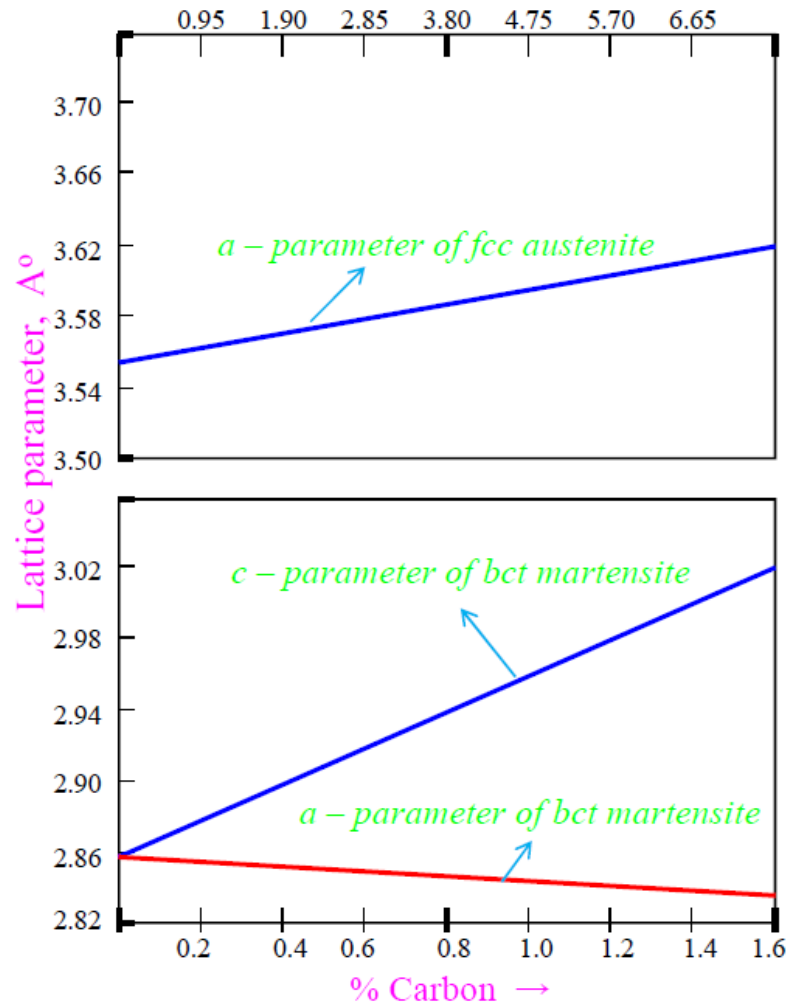


Martensite start - M_s and Martensite finish - M_f



Properties of 0.8% C steel		
Constituent	Hardness (R_c)	Tensile strength (MN / m ²)
Coarse pearlite	16	710
Fine pearlite	30	990
Bainite	45	1470
Martensite	65	-
Martensite tempered at 250 °C	55	1990

Martenzitin Özellikleri

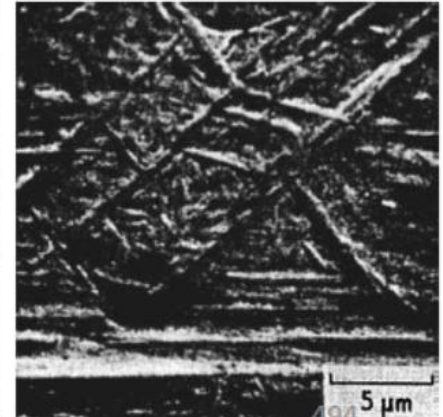
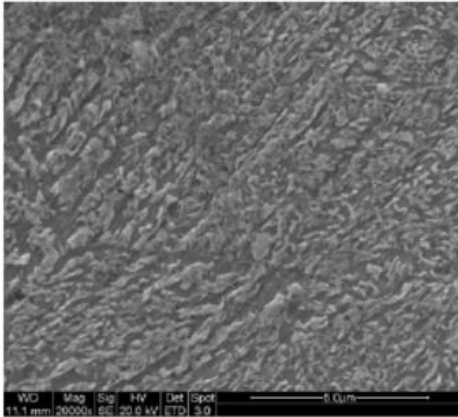


Karbonun martensit aralığına etkisi

Östenit ve martensitin kafes parametrelerine karbonun etkisi

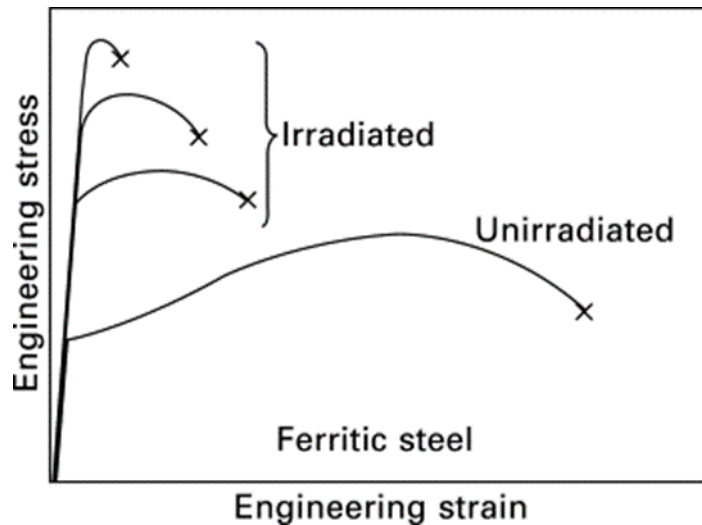
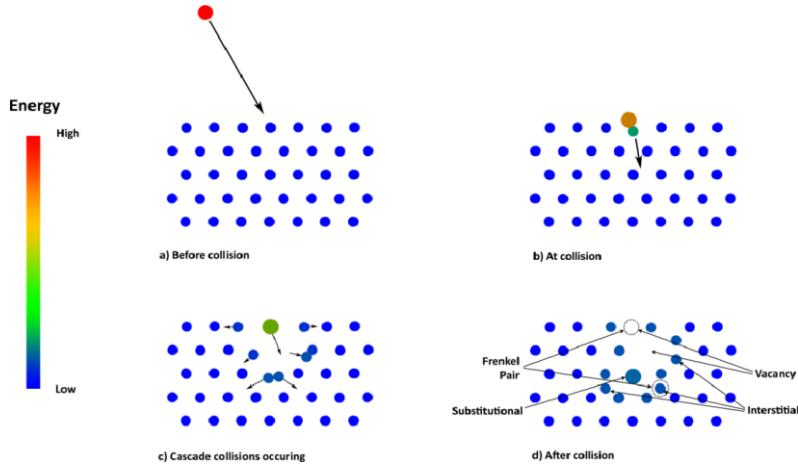
Martenzitin Özellikleri

- ✓ Martensit dönüşümünün uzun yıllar boyunca çelik için eşsiz olduğuna inanılıyordu. Bununla birlikte, son yıllarda, bu martenzitik dönüşüm, demir-nikel, bakır-çinko ve bakır-alüminyum gibi bir dizi başka alaşım sistemlerinde de bulunmuştur.
- ✓ Sertleştirme'nin temel amacı tamamen martenzitik bir yapı oluşturmaktır ve daha yumuşak dönüşüm ürünlerinden herhangi birinin oluşumunu önleyecek minimum soğutma hızı **kritik soğutma hızı** olarak bilinir.
- ✓ Kimyasal bileşim ve ostenit tane büyüklüğü ile değişen kritik soğutma hızı, bir çeliğin sadece martenzit oluşturmak için ne kadar hızlı soğutulması gerektiğini gösterdiğinden çeliğin önemli bir özelliğidir.



More structures of martensitic structure

RADYASYON SERTLEŐTİRMESİ

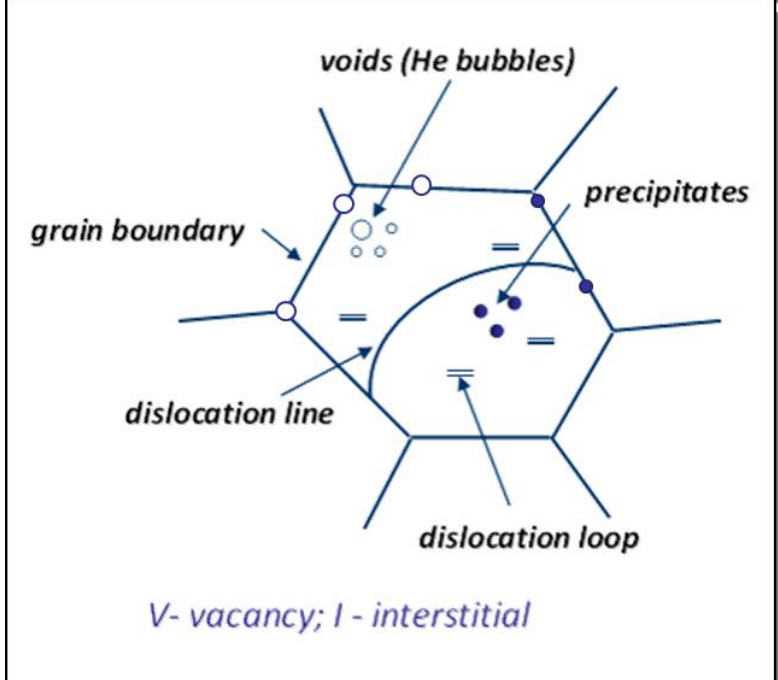
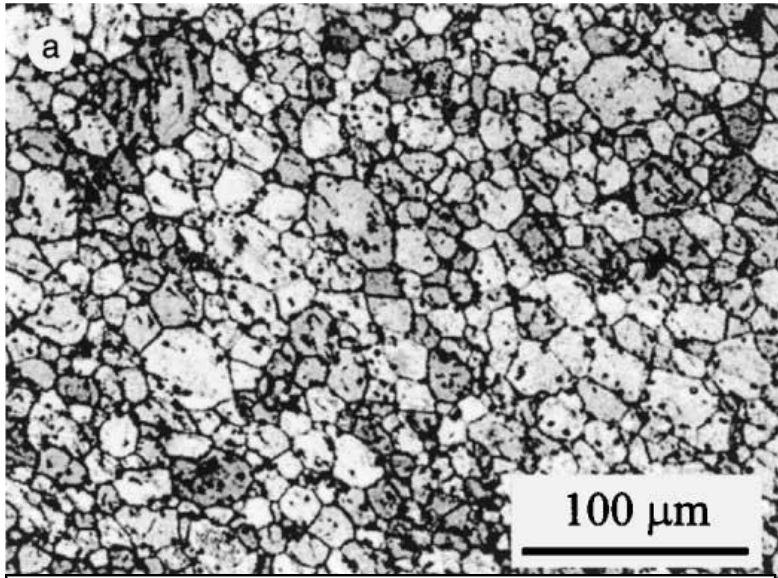


Radyasyon etkisi ile sertleşme, metal yapısında noktasal kusur oluşumu ile ilgilidir. Bu kusurların dislokasyonlar ile etkileşimi ve bunların hareketini zorlaştırması mekanizmanın temelidir. Radyasyon etkisinde, çok hızlı hareket eden atomsal parçacıklar kristal yapıyı oluşturan atomlara çarpar ve bunları dengeli konumlarından uzaklaştırmaya zorlar. Bunun sonucunda kafeste atomsal boşluklar ve ara yer atomları oluşur.

Bu olaya neden olacak radyasyon kaynakları olarak,

- a. Nötron radyasyonu,
- b. α -parçacıkları
- c. β -parçacıkları,
- d. γ -ışınları sayılabilir.

RADYASYON SERTLEŐTİRMESİ



Mikroyapısal tepki:

- nokta kusurlarının oluşması ve topaklanması;
- dönüşüm ürünlerinin yaratılması;
- ayrılma (çökelme) veya nokta kusur çukurlarının derinleşmesi

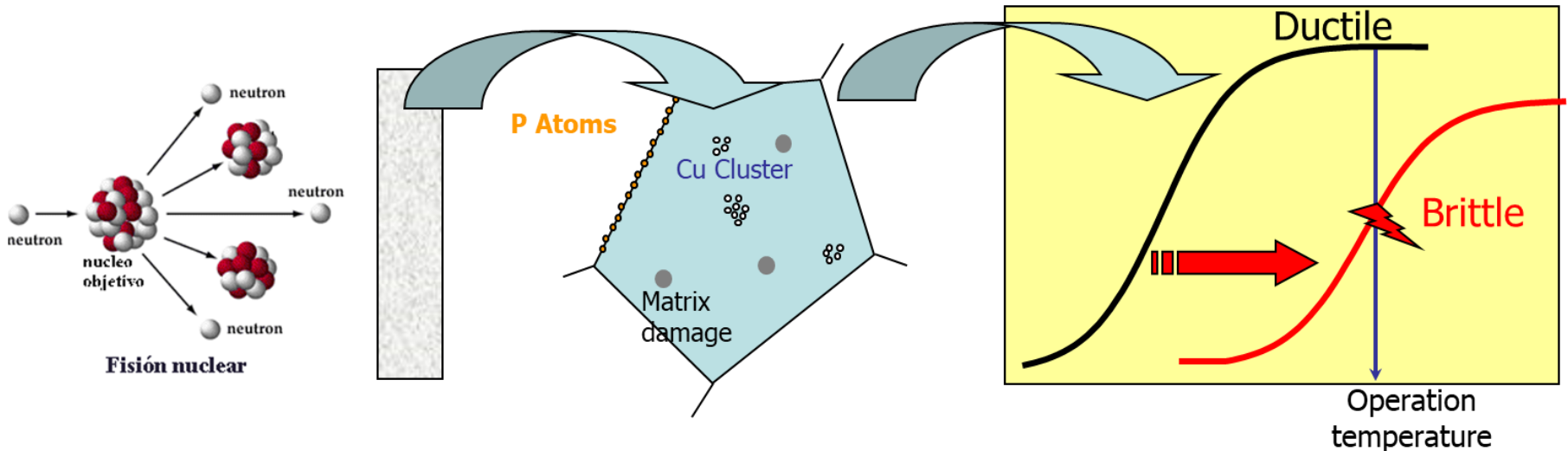
Olası radyasyon etkileri:

- kırılma tokluğunun azalması
- Radyasyon kaynaklı sertleşme
- sünekliğin azalması
- Isı iletkenliğinin azalması

RADYASYON SERTLEŐTİRMESİ

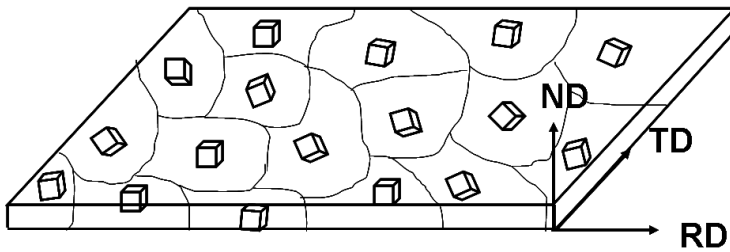
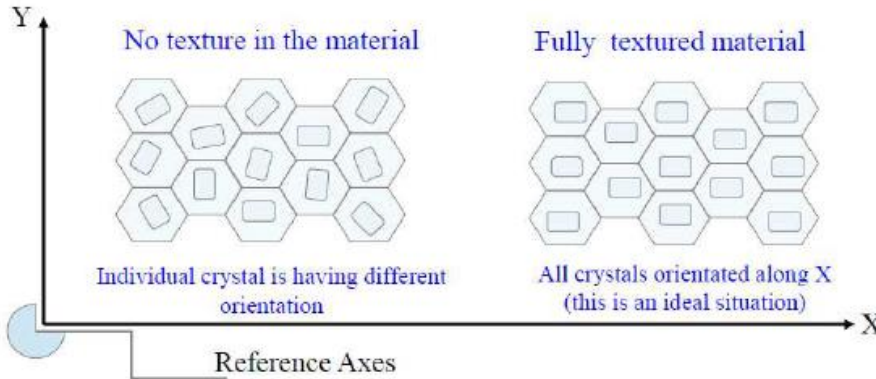
Radyasyon ile karşı karşıya bulunan metallerin aynı zamanda ısı ve elektrik dirençleri de artmakta, radyasyon içermeleri nedeniyle sağlığa zararlı durum oluşturmaktadır.

Radyasyonun mekanik özellikler üzerindeki zararlı etkisi, metale yeniden kristalleşme sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta tav uygulanması ile giderilebilir. Bu sayede oluşan kusurlar, ısıl aktivasyon sayesinde tekrar kristal kafeste olması gereken dengeli duruma dönerek yok olmasına bağlanmaktadır

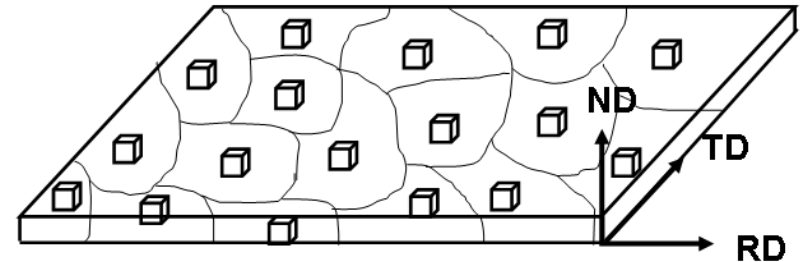


Tercih Edilen Yönlendirme (Doku)

Latince'de, textor dokumacı anlamına gelir ve malzeme biliminde, doku bir çok kristalli malzemenin dokuma şeklidir. Çok kristalli malzeme çok sayıda küçük kristalitlerden(tane) oluşur. Bu kristalitlerin her birinde kristal kafes kendine özgü bir yöne sahiptir.



Doku içermeyen bir levha
(Toz agregası gibi konfigürasyon)



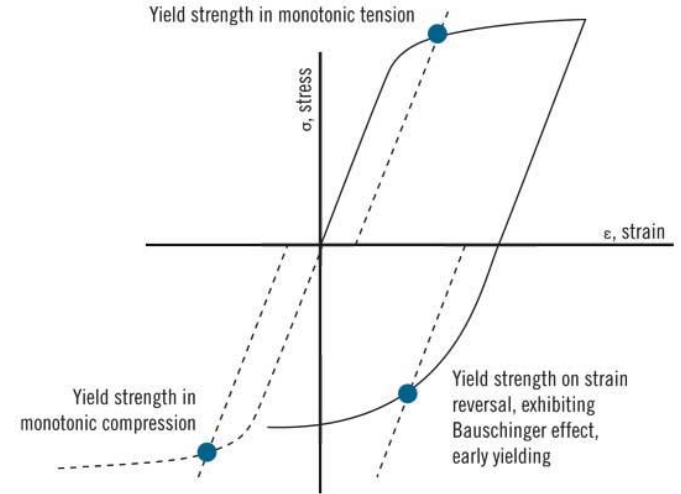
Tamamen dokulu bir levha, Küp doku
 $(001) \parallel ND$ (Normal Levha Yönü)
 $[100] \parallel RD$ (Levha Hadde Yönü)

Tekstür (Doku)Oluşumu

- Bir metal ciddi miktarda deformasyona maruz kaldığında, kristalografik düzlemleri, maksimum genleme yönüne göre tercih edilen bir yönde yönelme eğilimindedir; bu durumda malzemenin bir “dokuya” sahip olduğu söylenir.
- Geliştirilen tercih edilen oryantasyon tipi esas olarak mevcut olan kayma sistemlerinin sayısına ve tipine, ana gerilmelere, deformasyon sıcaklığına ve deformasyondan önce mevcut doku tipine bağlıdır.
- Tek eksenli deformasyon veya diğer işlemler için, doku, aynı zamanda Fiber doku olarak da adlandırılan, numune eksenine boyunca hizalanmış miller yön indeksleri cinsinden ifade edilir.
- Plastik deformasyondan kaynaklanan doku, mevcut kayma ve ikizleme sistemlerine kuvvetle bağlıdır ancak kalıp açısı, yuvarlanma çapı, hız vb.
- Soğuk işlenmiş bir metalin yeniden kristalleştirilmesi, deforme olmuş metalde mevcut olandan farklı ve daha güçlü bir doku üretir. Buna tavlama veya Rekristalizasyon dokusu denir.

Bauschinger etkisi

Metallerin akma özelliklerinde ilk deformasyon yönüne bağımlılıktan kaynaklanan anizotropi söz konusudur. Önce çekme yönünde deformasyona uğratılan metal hemen ters yönde basıldığında, Akma noktası önceki çekme sırasında elde edilen akma dayanımından daha düşük olmaktadır.



Metallik malzemelerde Bauschinger etkisinin oluşumu iki etkiye dayandırılarak açıklanmaktadır.

a. Kısa aralık etkisi (short range effect): hareket eden dislokasyonlar kendisine hareket yönü doğrultusunda kolaylıkla gidip gelecekleri düzenlemeleri yaparlar. İlk hareket sırasında bunun için harcadıkları enerji daha fazla olmaktadır. Dolayısıyla geri dönüşleri daha rahat gerçekleşebilmektedir.

b. Uzun aralık etkisi (long range effects): Dislokasyonların, gerek orman dislokasyonları ve gerekse diğer engelleyici kilitler tarafından hareketlerine engel olunması ve bu engeller de tıpkı sıkışmış bir yay gibi elastik şekilde birikmeleri, geri yüklemeye yay şeklinde biriken dislokasyonların boşalma hareketi yaparak geri yöndeki hareketlerini kolaylaştırmaları nedeniyle yumuşama görülmektedir.

Bu durumun özellikle üretim sırasında istenen mekanik özelliklerin sağlanması için dikkate alınması gerekmektedir