

KRİSTALLERİN PLASTİK DEFORMASYONU



Turgut Gülmez

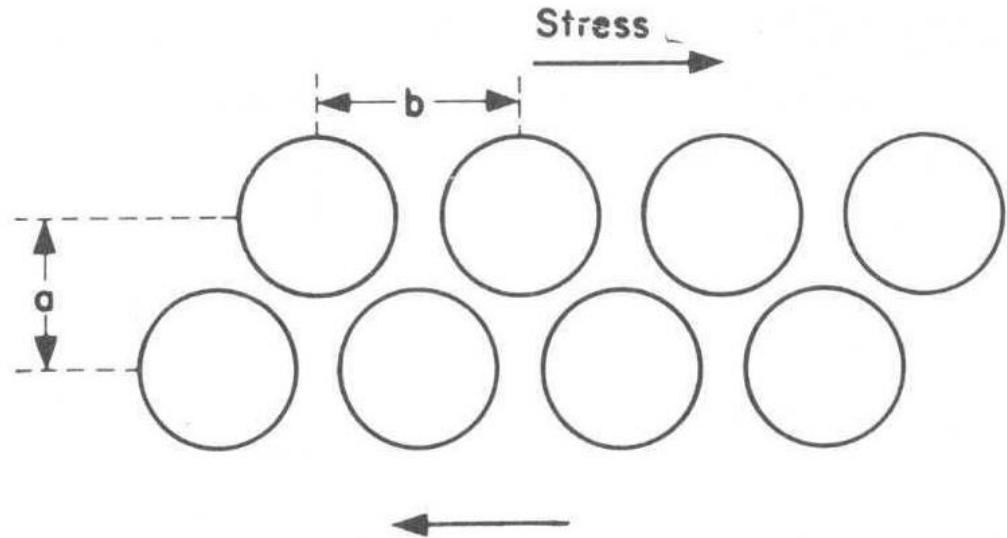
GİRİŞ

- Deformasyonların kökeni
- Deformasyon ve Dislokasyonlar
- Dislokasyon hareketi
- Kayma sistemleri
- Deformasyonla ilgili gerilmeler
- İkizlenme yoluyla deformasyon

Teorik Dayanım

$$\tau = \frac{Gb}{2\pi a} \sin \frac{2\pi x}{b}$$

G: kayma modülü
b: kayma gerilmesi yönünde atomlar arası mesafe
a: Düzlemler arası mesafe
x: kayma şekil değişimi



Theoretical stress (Frenkel in 1926)

Teorik Dayanım

Hook kanunu, varsayım: küçük genleme,

$$\tau = \frac{Gb}{2\pi a} \times \frac{2\pi x}{b} = G \frac{x}{a} = G\gamma$$

Teorik kritik kayma gerilmesi (maksimum gerilme): $\tau_{th} = \frac{b}{a} \frac{G}{2\pi}$

Teorik ve deneysel dayanım arasında çok fazla fark var

Sebepler:

- tüm mükemmel sanılan kristallerde kusurlar bulunur
- Dislokasyonların hareketi plastik deformasyonu Frenkel'in hesaplamasının öngördüğünden çok daha kolay hale getirir.

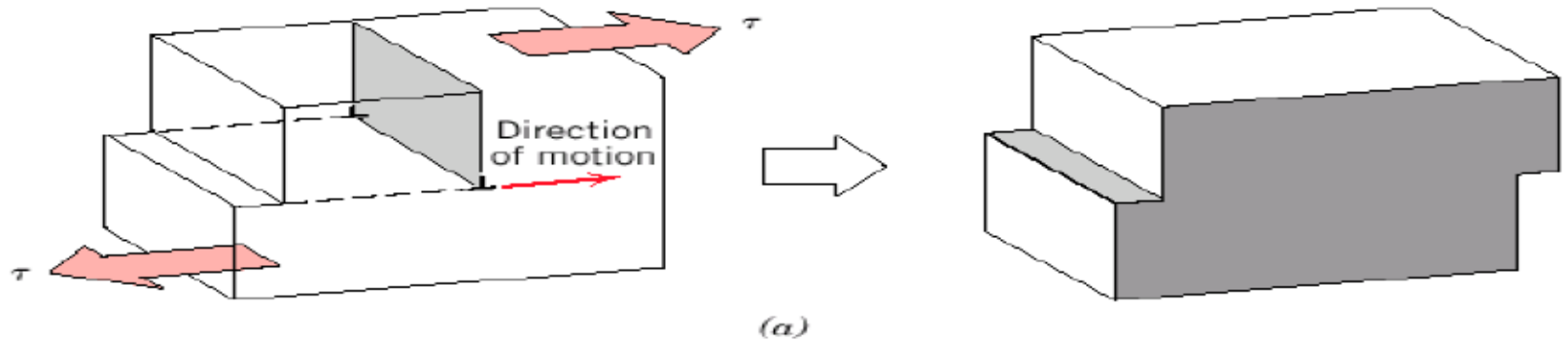
Deformasyonların kökeni

- Mükemmel kristalin teorik dayanımı, gerçekte ölçülenden çok daha yüksektir.
- Mekanik dayanımdaki bu tutarsızlığın dislokasyonlarla açıklanabileceği tespit edilmiştir.
- Makroskopik bir ölçekte plastik deformasyon, uygulanan gerilmeye cevap olarak çok sayıda atomun net hareketine karşılık gelir.
- iki çeşit deformasyon: elastik ve plastik. Plastik deformasyon kalıcıdır:

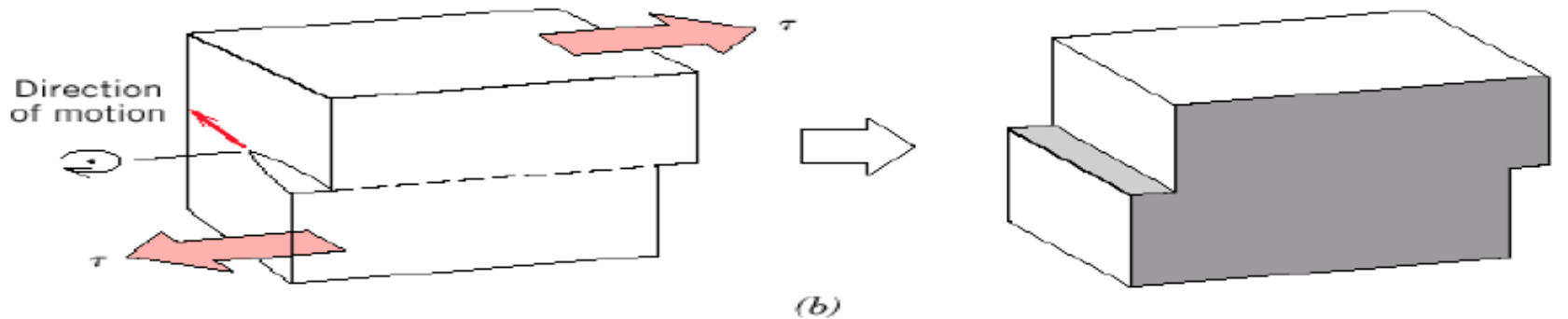
Bunun olması için atomlararası bağlar kopmalı ve sonra yeniden kurulmalıdır.

- Kristal katılarda, plastik deformasyon dislokasyonların hareketi ile gerçekleşir.

Dislokasyon Hareketinin Yönü

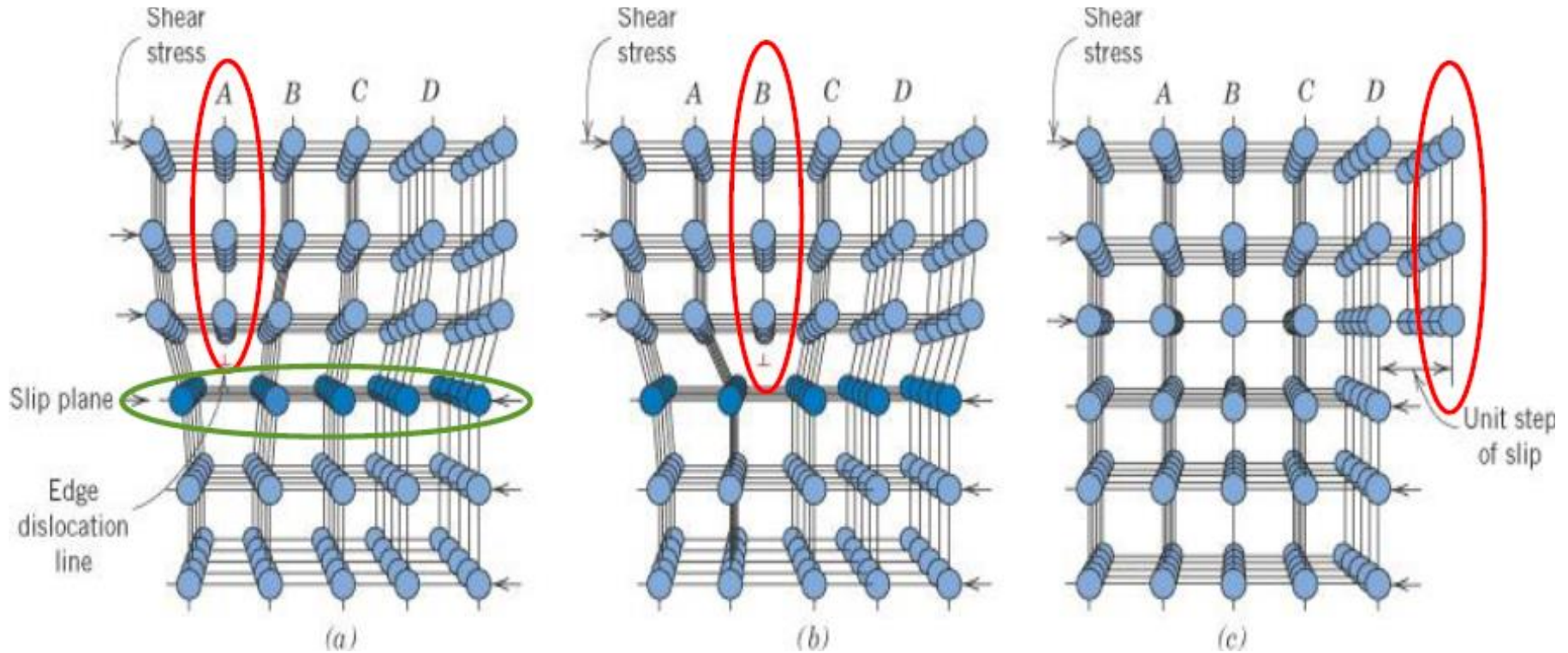


Kenar dislokasyon uygulanan gerilmeye paralel hareket eder



Vida Dislokasyonu (çizgisi) uygulanan gerilme yönüne dik hareket eder

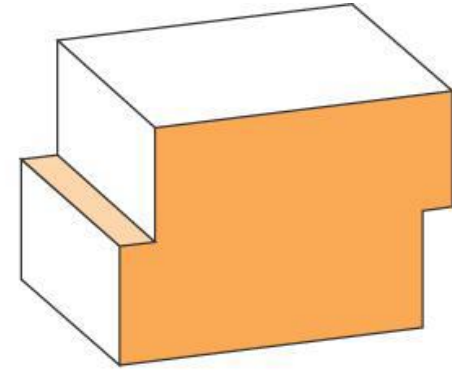
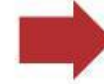
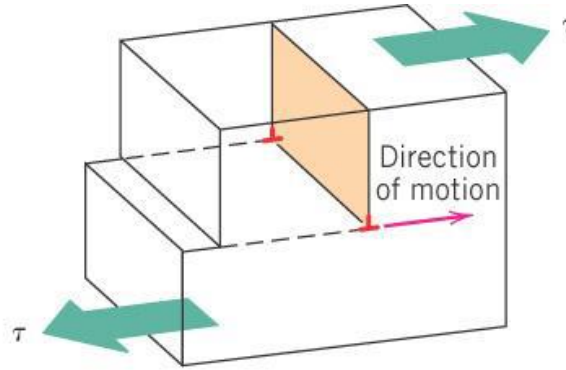
Dislokasyon hareketi



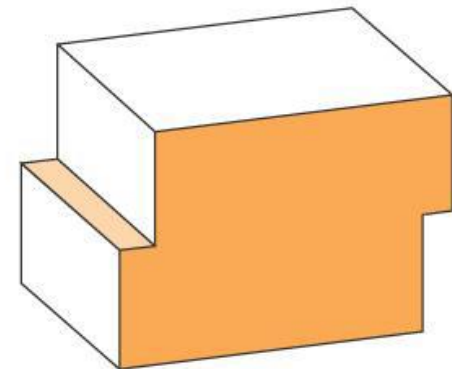
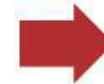
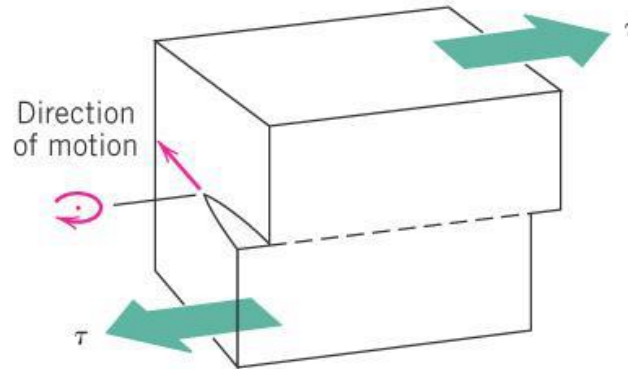
Dislokasyon hareketi plastik deformasyona yol açar.

Dislokasyon hareketi

(a) Bir kenar dislokasyonu ve (b) bir vida dislokasyonu hareketi ile kristalin yüzeyinde bir basamak oluşması.

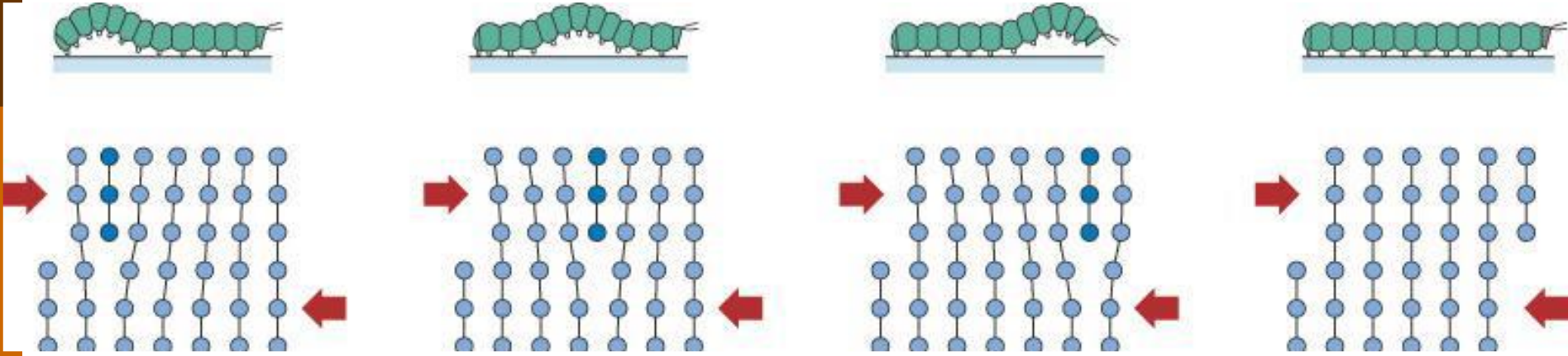


(a)



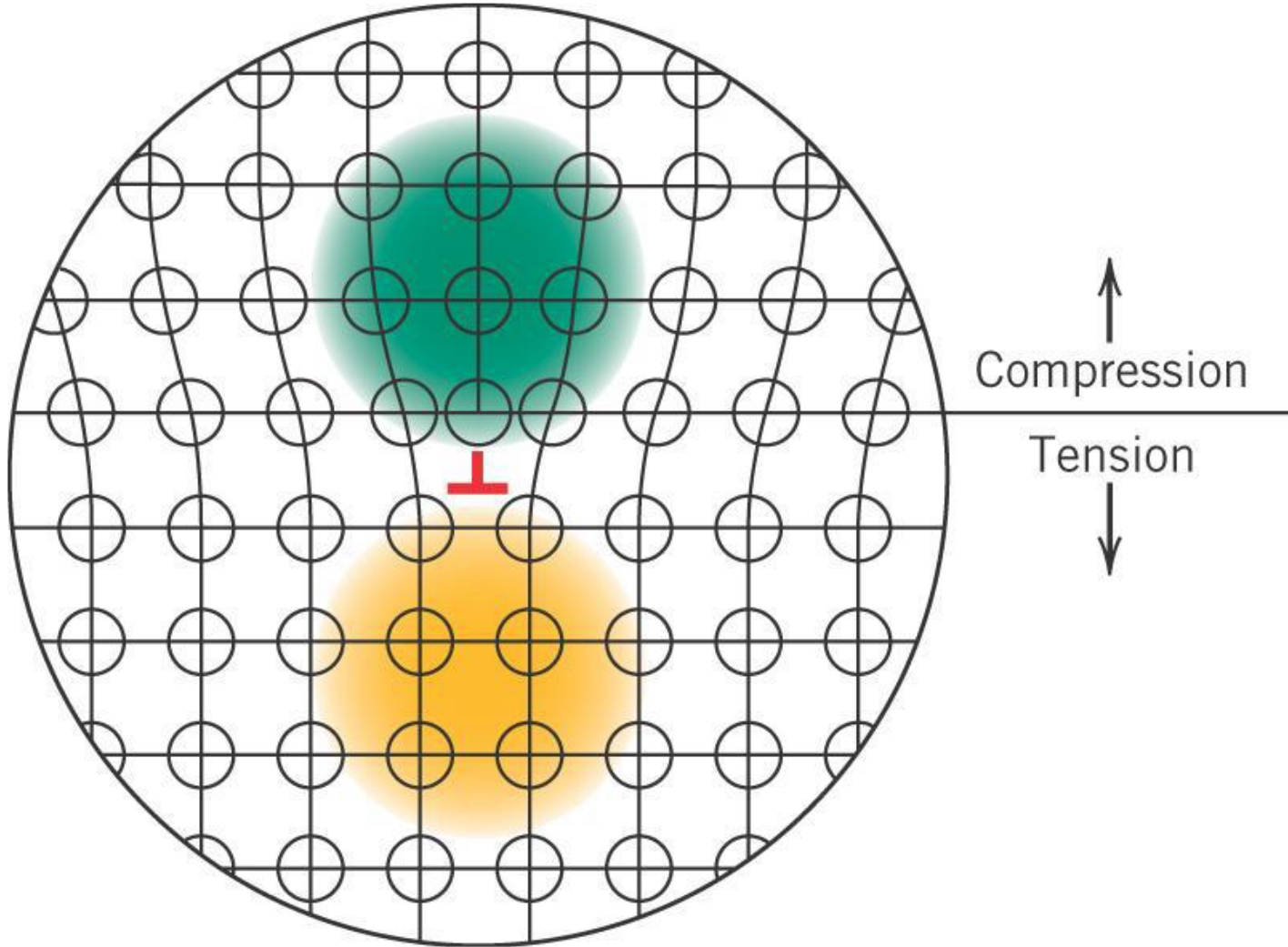
(b)

Kayma



- Dislokasyon hareketi ile plastik deformasyonun üretildiği sürece **kayma** (dislokasyonların hareketi) adı verilir
- Ekstra $1/2$ düzlem kayma düzlemi boyunca hareket eder.
- Dislokasyon hareketi bir tırtılın hareket etme şekline benzer. Tırtıl adımı, ekstra $1/2$ -atom düzlemini temsil eder.

Metaller plastik olarak deforme olduğunda, kullanılan enerjinin bir kısmı (kabaca% 5) dahili olarak tutulurken; kalan kısım ısı olarak etrafa yayılır. Esas olarak, bu enerji, dislokasyonlarla ilişkili şekil değiştirme enerjisi olarak depolanır. Dislokasyon çizgisinin etrafında Kafes çarpıklığı vardır.

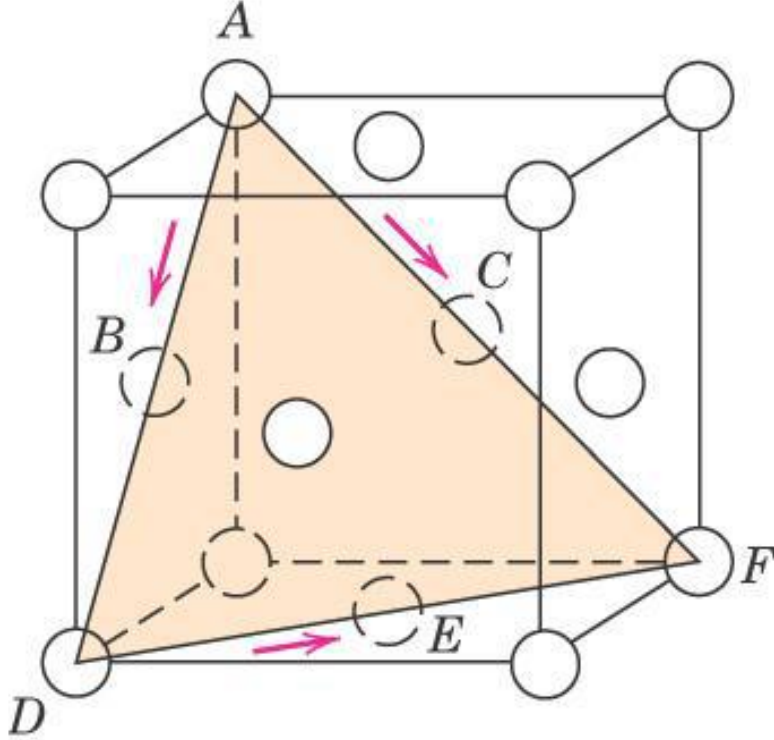


Kayma Sistemleri

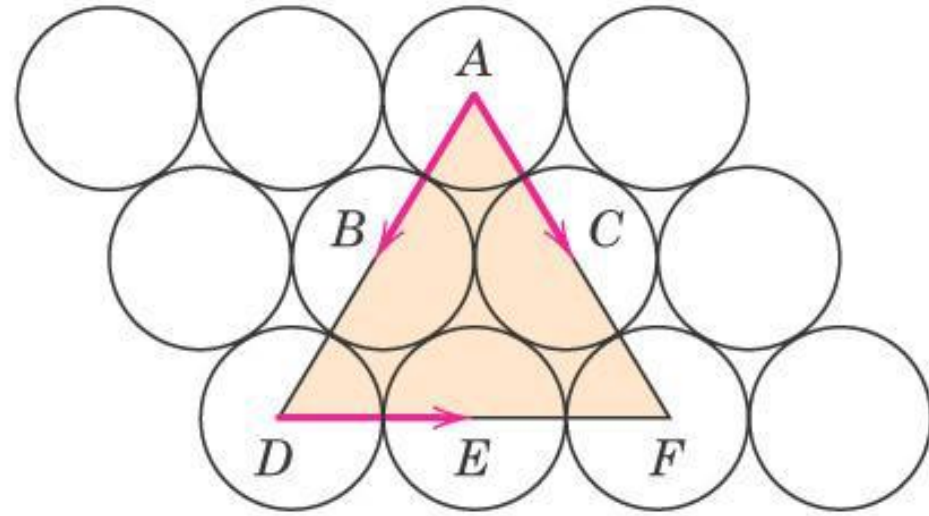
Dislokasyonlar belirli düzlem ve yönlerde daha kolay hareket eder.

- Normalde, dislokasyonların üzerinde hareket ettiği tercih edilen bir düzlem (**kayma düzlemi**) ve bu düzlem üzerinde belirli yönler (**kayma yönü**) vardır.
- Kayma düzlemi ve kayma yönü kombinasyonuna **kayma sistemi** denir.
- Kayma sistemi metalin kristal yapısına bağlıdır.
- Kayma düzlemi, atomların en yoğun doldurduğu (en büyük **düzlemsel atom yoğunluğu**) olan düzlemdir.
- Kayma yönü atomların en yakın şekilde olduğu yöndür (en yüksek **doğrusal atom yoğunluğu**).

Kayma Sistemi – YMK Kafes



(a)



(b)

Kayma Düzlemi $\{111\}$: en yoğun atomik dizilim,

Kayma Yönü $\langle 110 \rangle$: en yüksek doğrusal yoğunluk,
(Pembe oklar)

Yaygın kristal yapılar için kayma düzlemleri ve yönleri

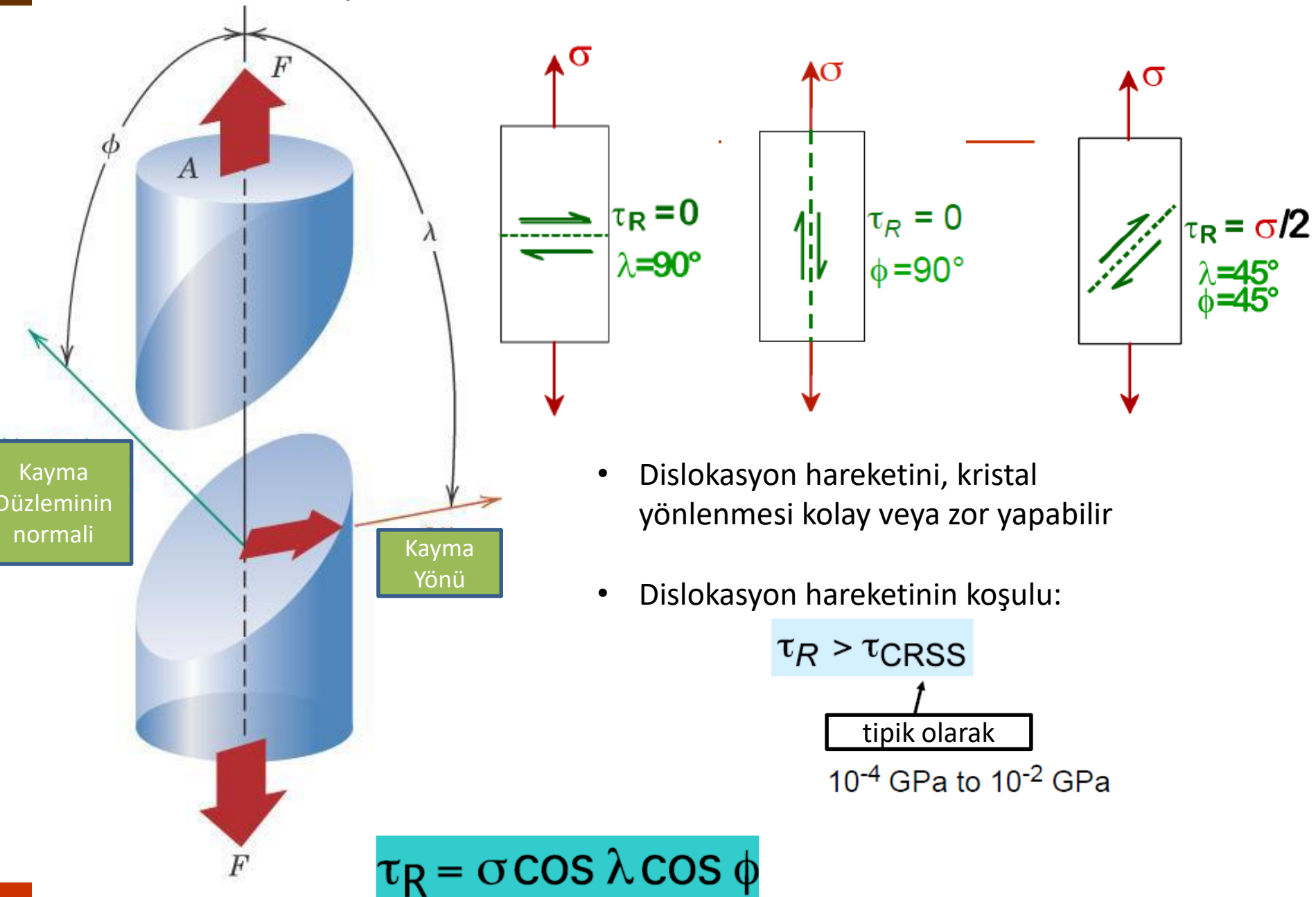
Table 7.1 Slip Systems for Face-Centered Cubic, Body-Centered Cubic, and Hexagonal Close-Packed Metals

<i>Metals</i>	<i>Slip Plane</i>	<i>Slip Direction</i>	<i>Number of Slip Systems</i>
Face-Centered Cubic			
Cu, Al, Ni, Ag, Au	{111}	$\langle 1\bar{1}0 \rangle$	12
Body-Centered Cubic			
α -Fe, W, Mo	{110}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
α -Fe, W	{211}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
α -Fe, K	{321}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	24
Hexagonal Close-Packed			
Cd, Zn, Mg, Ti, Be	{0001}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg, Zr	{10 $\bar{1}0$ }	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg	{10 $\bar{1}1$ }	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	6

Gerilme ve Dislokasyon Hareketi

- Kenar ve vida dislokasyonları, kayma düzlemi boyunca kayma yönünde uygulanan kayma gerilmeleri etkisiyle olarak hareket ederler.
- Uygulanan gerilme bir çekme gerilmesi olsa da, kayma gerilmesi bileşenleri gerilme yönüne paralel veya dik yönlerin dışındaki yönlerde bulunabilir.
- Buna çözülmüş kayma gerilmeleri **resolved shear stresses** (τ_R) denir.

Resolved Shear Stress, τ_R



Kritik Kayma Gerilmesi

(Critical Resolved Shear Stress)

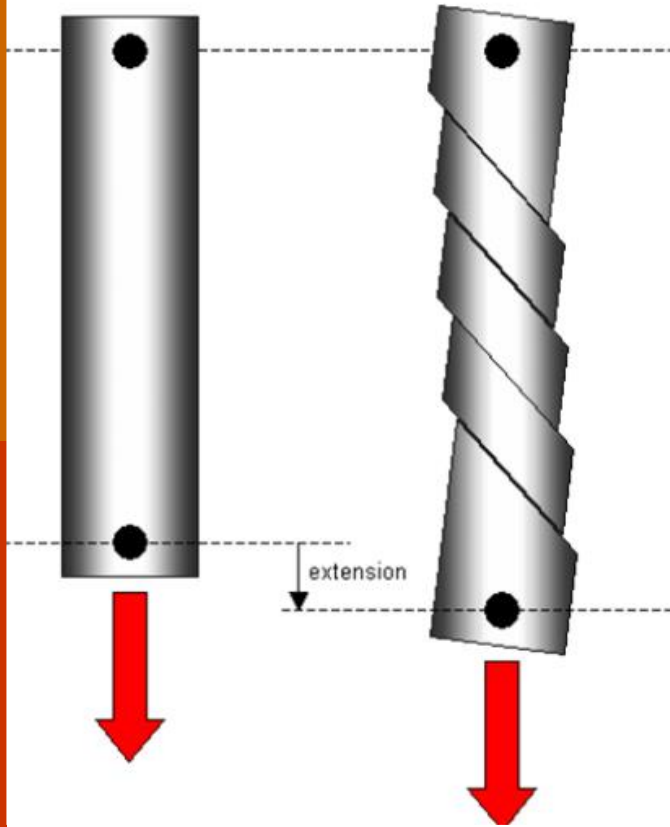
- Kayma düzlemi üzerinde kayma yönünde etki eden kayma gerilmesi kritik bir değere ulaştığında kayma meydana gelir. Bu kritik kayma gerilmesi, dislokasyonların kayma düzlemi boyunca hareket ettirilmesi için gereken gerilme ile ilgilidir.

τ_{crss} .

- Kaymayı başlatmak için gereken minimum kayma gerilmesini temsil eder ve akmanın ne zaman olacağını belirleyen bir malzeme özelliğidir.

$$\sigma_y = \frac{\tau_{crss}}{(\cos \lambda \cos \phi)_{\max}}$$

TEK KRİSTALDE PLASTİK DEFORMASYONUN BAŞLAMASI



- Eğer bir tek kristal çekme gerilmesine maruz bırakılırsa; numune boyunca çeşitli pozisyonlarda birkaç eşdeğer ve en uygun şekilde yönlenmiş düzlem ve yönlerde kayma meydana gelecektir.

- Yanda böyle bir durumda, paralel kristal düzlemlerinde kayma ile plastik deformasyonun meydana geldiği görülmektedir. Kristalin bölümleri, birbirlerine göre kayması sonucunda, numunenin geometrisi yanda gösterildiği gibi değişir.

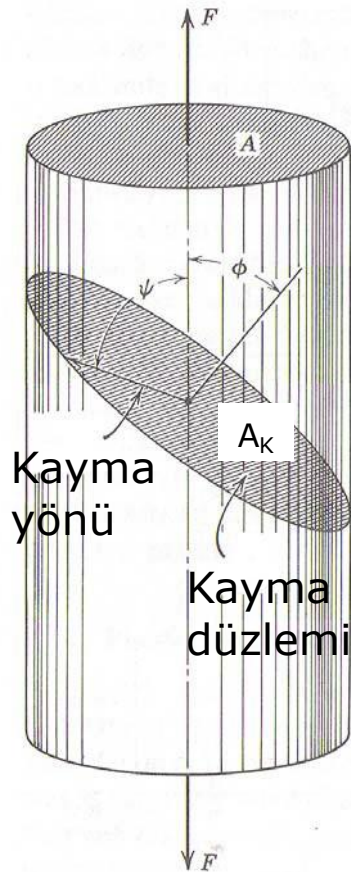
- Her adım, aynı kayma düzlemi boyunca çok sayıda dislokasyon hareketinden kaynaklanır.

Polikristallerde Dislokasyon Hareketi

- Tek kristalin parlatılmış yüzeyinde, bu adımlar çizgiler halinde görünür (kayma çizgileri).
- Daha güçlü - tane sınırları deformasyonları sınırlar.
- Kayma düzlemleri ve yönleri (λ , ϕ) bir kristalden diğerine değişir.
- τ_R bir kristalden diğerine değişecektir.
- En büyük τ_R 'ye sahip olan kristal ilk önce (akar) kayar.
- Diğer (daha az uygun şekilde yönlenmiş) kristaller daha sonra akar.



SCHMİD YASASI



$$\tau_K = \frac{F \cos \psi}{A_K}$$

$$A_K = \frac{A_o}{\cos \phi} \quad \text{olduğu için}$$

$$\tau_K = \frac{F}{A_o} \cos \psi \cos \phi$$

$$\sigma = \frac{F}{A_o} \quad \text{olduğu için ve} \quad m = 1 / (\cos \psi \cos \phi) \quad \text{denilirse}$$

$$\tau_K = \frac{\sigma}{m} \quad \text{olur}$$

$$\sigma_A = m \tau_{KK}$$

Schmid yasası

σ_A : Akma dayanımı

τ_{KK} : Kritik kayma gerilmesi

m : Schmid faktörü

TEK KRİSTALERDE PLASTİK DEFORMASYONUN BAŞLAMASI

$$\sigma_A = m \tau_{KK}$$

Schmid yasası

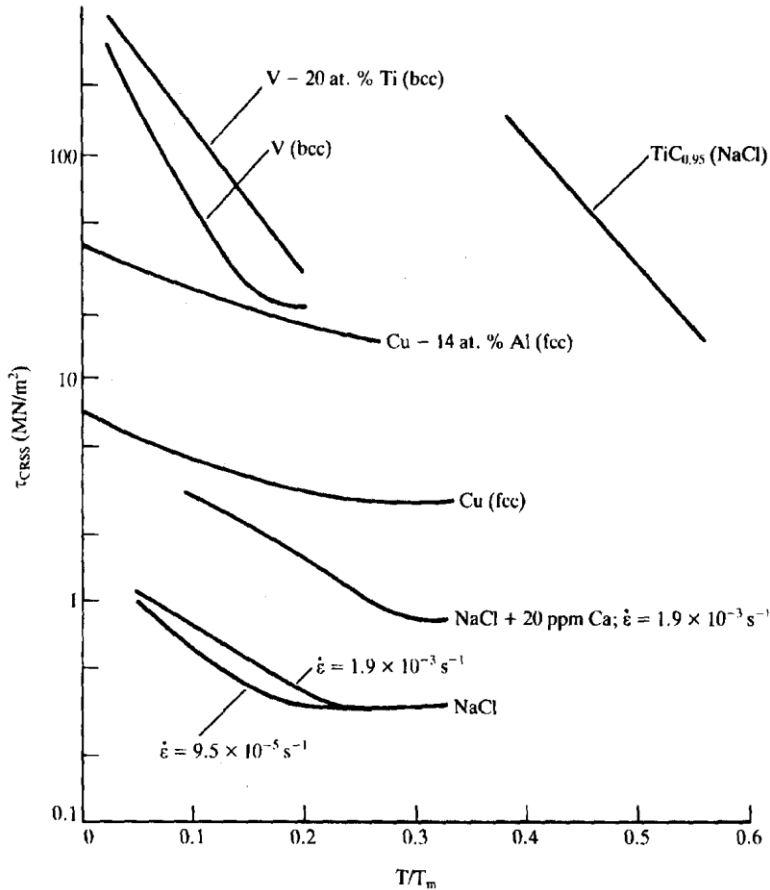
- Tek kristallerde çekme/basma eksenini farklı kristalografik eksenlere paralel olacak şekilde yapılan çekme testleri yukarıda verilen bağıntının doğruluğunu göstermiştir.
- Her testte elde edilen akma dayanımlarının (σ_A) değerlerinin de farklı olduğu görülmüştür.
- Testlerde elde edilen akma dayanımı (σ_A) değerleri o testlerin Schmid faktörlerine (m) oranlandığında kritik kayma gerilmesi değerlerinin (τ_{KK}) sabit olduğu görülmüştür.
- Hacim merkezli kübik yapıya sahip olan geçiş metalleri istisnai bir durum oluşturmaktadır.

TEK KRİSTALERDE PLASTİK DEFORMASYONUN BAŞLAMASI

- Belirli bir kristalde birçok uygun kayma sistemi olabilir. Çekme yükü arttıkça, her bir sistemdeki çözülmüş kayma gerilmesi, bir sistemde nihayetinde τ_R 'ye ulaşılana kadar artar.
- Kristal, **birincil kayma sistemi** olarak bilinen bu sistem üzerinde kayma yoluyla plastik olarak deforme olmaya başlar. Birincil kayma sisteminde kaymaya neden olmak için gereken gerilme, tek kristalin akma gerilmesidir. Yük daha da arttıkça, diğer kayma sistemlerinde τ_R 'ye ulaşılabilir; bunlar daha sonra çalışmaya başlar.
- Schmid Yasası'ndan, birincil kayma sisteminin en büyük Schmid faktörü (M) olan sistem olacağı açıktır.

$$\tau_C = \sigma_Y M$$

TEKİL KRİSTALERDE PLASTİK DEFORMASYONUN BAŞLAMASI



- HMK kristallerin τ_{KK} değerleri YMK kristallere göre daha yüksektir.
- Ayrıca HMK kristallerin τ_{KK} değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi YMK kristallere göre daha yüksektir.
- Cu ve Cu-14Al alaşımları kıyaslandığında empüritelerin varlığının τ_{KK} değerine olan etkisi açık bir şekilde görülmektedir.
- Kovalent bağlı olan TiC ün τ_{KK} değeride oldukça yüksektir ve sıcaklığa bağlılığında da YMK kristallere göre oldukça yüksektir.

ÖRNEK-1

- Bir tek kristal, kayma düzleminin normali çekme eksenine 60° açı yapacak şekilde çekme testine tabi tutulmaktadır. Kayma düzlemi üzerindeki kayma doğrultuları çekme eksenini ile 38° , 45° ve 84° açı yapmaktadır.
- Ayrıca bu kristalin kritik kayma gerilmesi 2.3MPa dır.
- Buna göre bu kristalde plastik deformasyonun meydana gelmesi için gerekli minimum çekme gerilmesi nedir? Hesaplayınız.

ÇÖZÜM-1

$$\sigma_A = m \tau_{KK}$$

Schmid yasası

$$m = 1/(\cos \psi \cos \phi)$$

$$\sigma_A = \frac{\tau_K}{\cos \psi \cos \phi}$$

$$\phi = 60^\circ \quad \psi = 38^\circ \quad \tau_K = 2.3 \text{MPa}$$

$$\psi = 45^\circ$$

$$\psi = 84^\circ$$

Plastik deformasyonun oluşması için bu üç kayma doğrultusundan herhangi bir tanesinde kaymanın başlaması yeterlidir. Bu üç kayma yönünden **minimum** çekme gerilmesine ihtiyaç duyanı göz önüne alınmalıdır.

$$\text{Böylece: } \sigma_A = \frac{2.3 \text{MPa}}{\cos 38 \cos 60} =$$

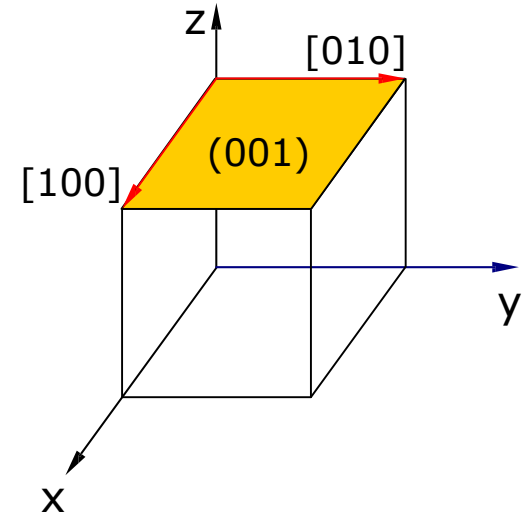
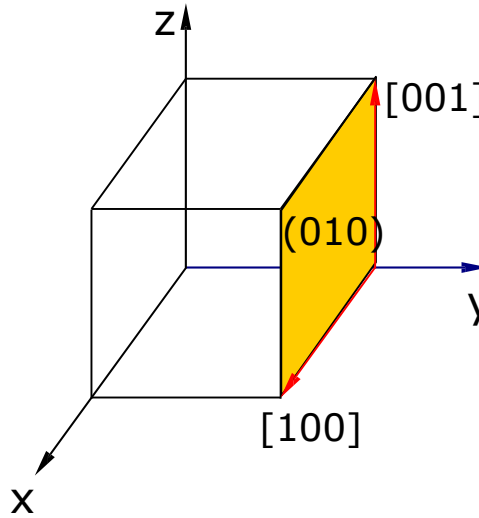
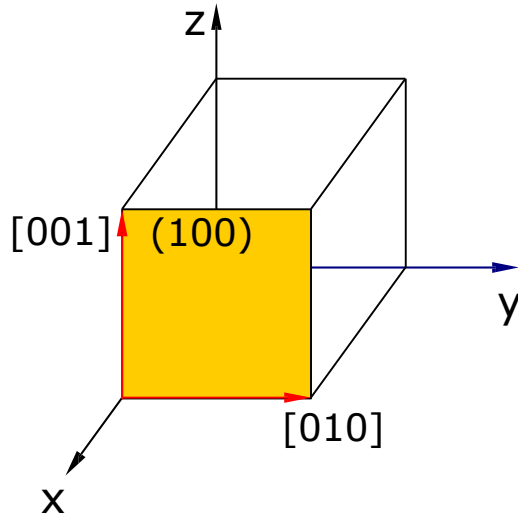
$$= 5.84 \text{MPa}$$

bulunur

ÖRNEK-2

- Basit kübik yapıya sahip bir tek kristalde kayma düzlemi $\{100\}$ ve kayma doğrultusu $\langle 100 \rangle$ dir. Bu tek kristal çekme eksenine $[010]$ eksenine paralel olacak şekilde yerleştirilmiştir.
- Buna göre kayma sistemlerini listeleyiniz ve her bir kayma sistemi için Schmid faktörünü hesaplayınız.

ÇÖZÜM-2



Kayma düzlemi	$\phi(^{\circ})-\cos\phi$	Kayma doğrultusu	$\psi(^{\circ})-\cos\psi$	Schmid faktörü
(100)	90-0	[010]	0-1	∞
		[001]	90-0	∞
(010)	0-1	[100]	90-0	∞
		[001]	90-0	∞
(001)	90-0	[100]	90-0	∞
		[010]	0-1	∞

ÇÖZÜM-2 (devam...)

- Bu sonuçların anlamı:
 - Eğer kristal bahsedilen şekilde yüke maruz bırakılırsa herhangi bir plastik deformasyon meydana gelmeyecektir.
 - Uygulanan çekme gerilmesi yeterince yüksek olduğunda **kırılma** meydana gelecektir.

POLİKİSTALLERDE PLASTİK DEFORMASYON

- Tek ve çok kristalli malzemelerde dislokasyonların kayma düzlemleri üzerinde kayması tamamen aynıdır.
- Ancak tek ve çok kristallerin gerilme-şekil değiştirme davranışları tamamen farklıdır.
- Bu farklılığının ana sebebi çok kristalli malzemelerde var olan kristaller arası yüzeylerdir (tane sınırları).
- Çok kristalli malzemelerde tane sınırlarının deformasyon üzerindeki sınırlayıcı etkisi iki kristalli malzemelere göre daha fazla olacaktır.
- Bundan dolayı çok kristalli malzemelerin gerilme-şekil değiştirme eğrisi iki kristalli malzemelere göre daha yukarıda olacaktır.

POLİKRİSTALERDE PLASTİK DEFORMASYON

Tekkristaller

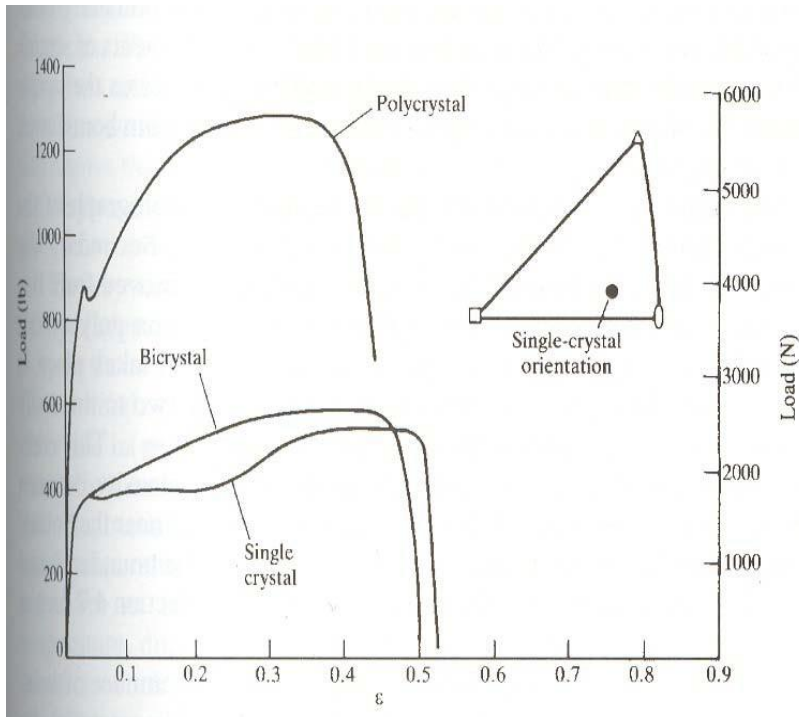
Elastik ve plastik olarak anizotropiktirler. Tek bir kayma sisteminde deforme olabilirler.

Çok kristaller

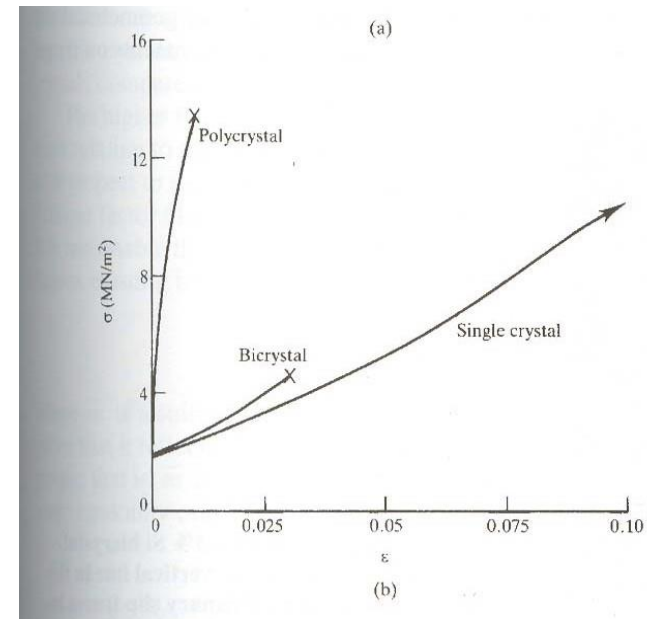
Belirgin bir doku oluşumu yok ise izotropik malzeme olarak muamele edilebilir. Sadece bir kayma sisteminde deformasyon mümkün değildir, çünkü çeşitli tanelerin uyumlu olması olasılığı söz konusudur. Doğası gereği homojen değildir (taneden taneye değişebilir. Dislokasyon hareketi engellenir çünkü bir taneyle sınırlıdır. Bir kristal farklı kristalografik yönelimli başka kristallerle çevriliyken, kristalin deformasyonu pirimer sistemde başlayamaz, çünkü oluşacak şekil değiştirmelerin diğer kristallerdeki tane sınırlarıyla uyumlu olması gerekir (tane sınırı boyunca süreksizlik yoktur)

ÇOK KRİSTALLİ MALZEMELERDE PLASTİK DEFORMASYON

Nb



NaCl



ÇOK KRİSTALLİ MALZEMELERDE PLASTİK DEFORMASYON

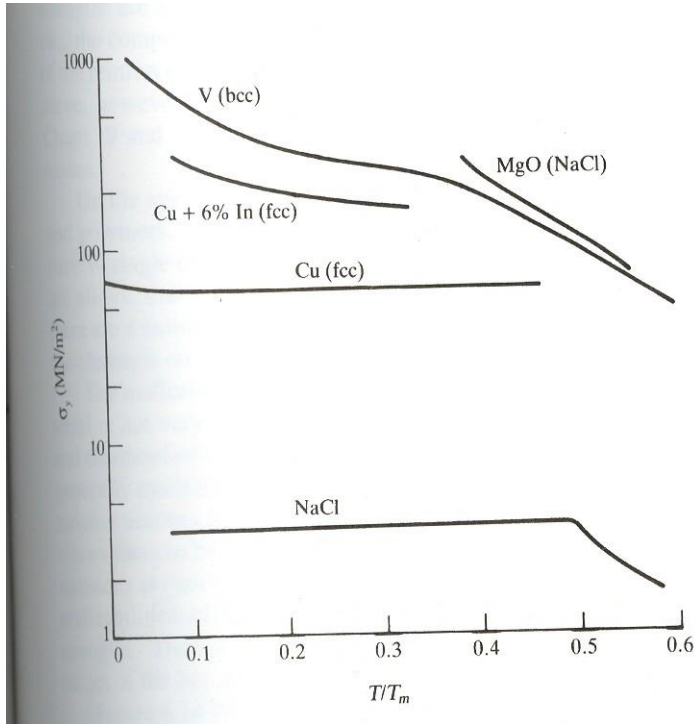
- Çok kristalli malzemelerde Schmid faktörü gelişi güzel yerleşmiş kristallerin ortalaması olarak alınır.

$$\sigma_A = \bar{m} \tau_{KK}$$

Schmid yasası

- YMK kristaller için: $\bar{m} = 3.06$
- HMK kristaller için: $\bar{m} = 2.75$
- Ayrıca çok kristalli malzemelerin dayanımları tane boyutuna bağlı olarak da değişmektedir.

ÇOK KRİSTALLİ MALZEMELERİN DAYANIMLARININ SICAKLIĞA BAĞLI DEĞİŞİMİ



- Çok kristalli malzemelerin dayanımlarının sıcaklığa bağlı değişim τ_{KK} (kritik kayma gerilmesi) değerinin sıcaklığa bağlı değişimi ile paralellik göstermektedir.
- Vanadyumun (HMK) akma dayanımı bakıra (YMK) göre dayanımı bütün sıcaklıklarda daha yüksektir.
- MgO in dayanımının daha yüksek olmasının sebebi sahip olduğu güçlü polar kovalent bağıdır.
- NaCl kristalinin kristal yapısı MgO ile aynı olmakla beraber dayanımının düşük olmasının sebebi iyonik bağa sahip olmasıdır.

MgO yapısında bulunan bağ nedir?

PLASTİK DEFORMASYON VE MALZEME ÇEŞİTLERİ

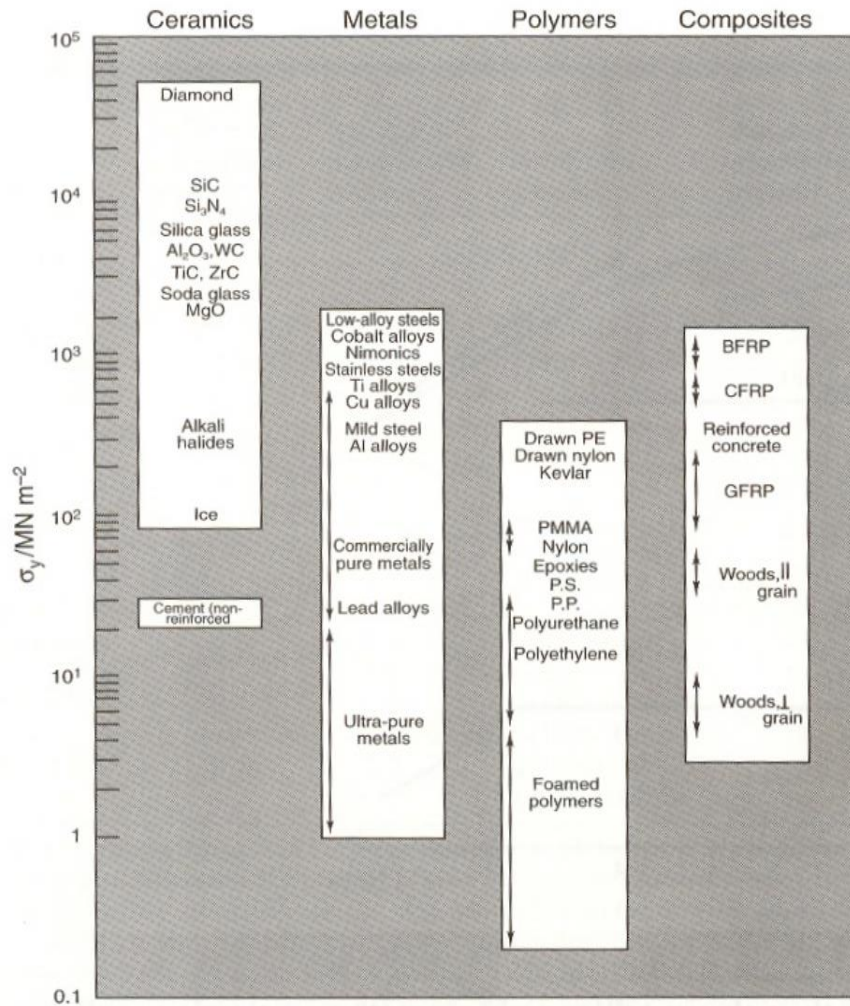


Figure 4.19

- Akma dayanımı en yüksek olan malzeme sınıfı seramiklerdir.
 - Ancak seramik malzemelerde bulunan çatlak/boşluklar yüzünden hemen her zaman akma dayanımlarının çok altındaki değerlerde kırılırlar.
- Plastik deformasyon değeri en yüksek olan malzeme grubu polimer malzemelerdir.
- Metalik malzemelerin dayanımları seramikler ile polimer arasında bir yerde bulunmaktadır.
- Saf metaller oldukça yumuşaktır. Çoğu yüksek dayanımlı mühendislik metali alaşımdır (birden fazla element içermektedir).

ÖRNEK-3

- Bir magnezyum tek kristalinin oda sıcaklığında test edilmesi sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.
- Buna göre magnezyum tek kristali için Schmid yasasının doğruluğunu gösteriniz.
- Magnezyum tek kristali için kritik kayma gerilmesini (τ_{KK}) hesaplayınız

$\phi(^{\circ})$	$\psi(^{\circ})$	Akma dayanımı (MPa)
82	11	2.78
63	36	1.07
52	41	0.84
35	55	0.69
27	63	1.02
14	77	1.79

ÇÖZÜM-3

$$\sigma_A = m \tau_{KK}$$

Schmid yasası

$$\tau_K = \frac{\sigma_A}{m}$$

$$m = 1/(\cos \psi \cos \phi)$$

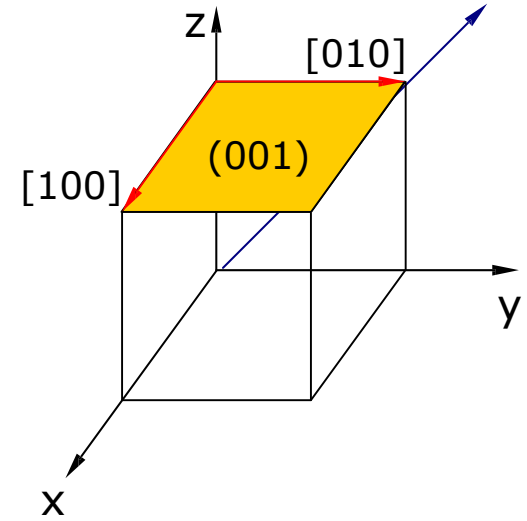
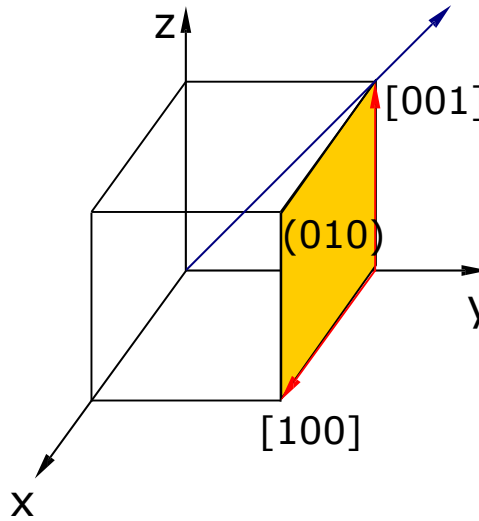
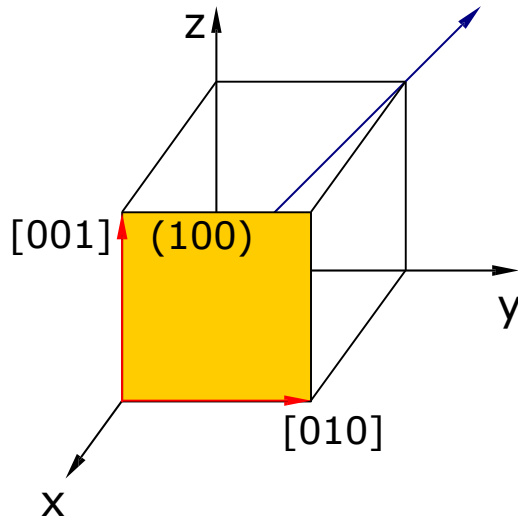
$$\tau_K = \sigma_A \cos \psi \cos \phi$$

$\phi(^{\circ})$	$\psi(^{\circ})$	Akma dayanımı (σ_A) (MPa)	m	Kritik Kayma Gerilmesi (τ_{KK}) (MPa)
82	11	2.78	7.32	0.38
63	36	1.07	2.72	0.39
52	41	0.84	2.15	0.39
35	55	0.69	2.13	0.33
27	63	1.02	2.47	0.41
14	77	1.79	4.58	0.39

ÖRNEK-2

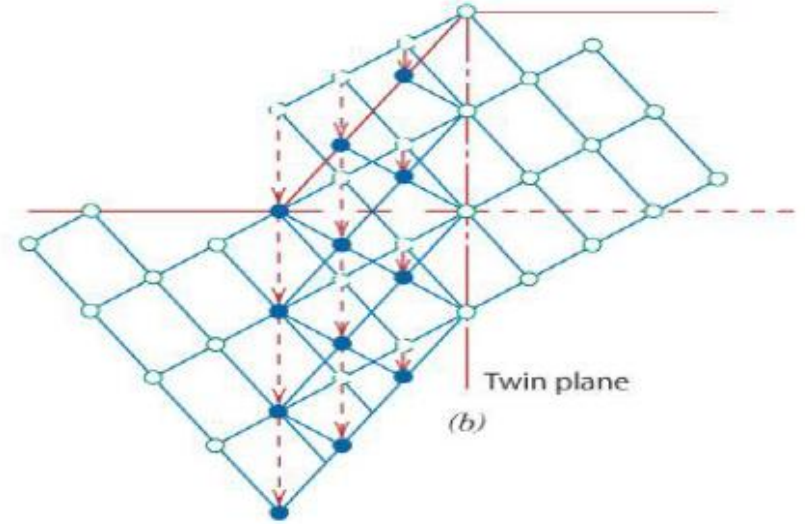
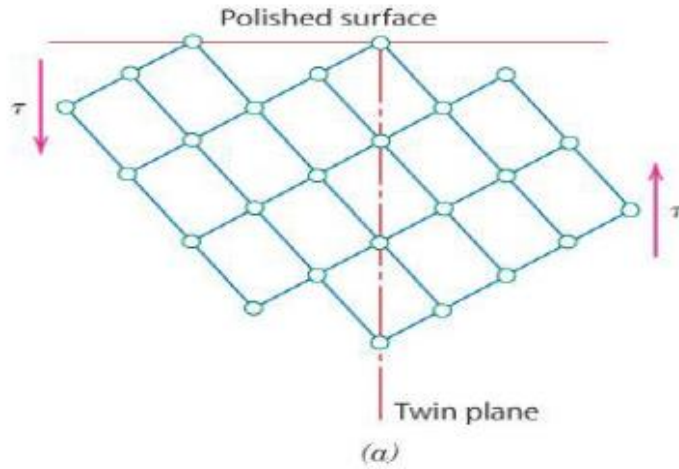
- Basit kübik yapıya sahip bir tek kristalde kayma düzlemi $\{100\}$ ve kayma doğrultusu $\langle 100 \rangle$ dir. Bu tek kristal çekme eksenini $[011]$ eksenine paralel olacak şekilde yerleştirilmiştir. Buna göre kayma sistemlerini listeleyiniz ve her bir kayma sistemi için Schmid faktörünü hesaplayınız.

ÇÖZÜM-2



Kayma düzlemi	$\phi(^{\circ})-\cos\phi$	Kayma doğrultusu	$\psi(^{\circ})-\cos\psi$	Schmid faktörü
(100)	90-0	[010]	45-0.71	∞
		[001]	45-0.71	∞
(010)	45-0.71	[100]	90-0	∞
		[001]	45-0.71	2
(001)	45-0.71	[100]	90-0	∞
		[010]	45-0.71	2

İkizlenme ile Deformasyon

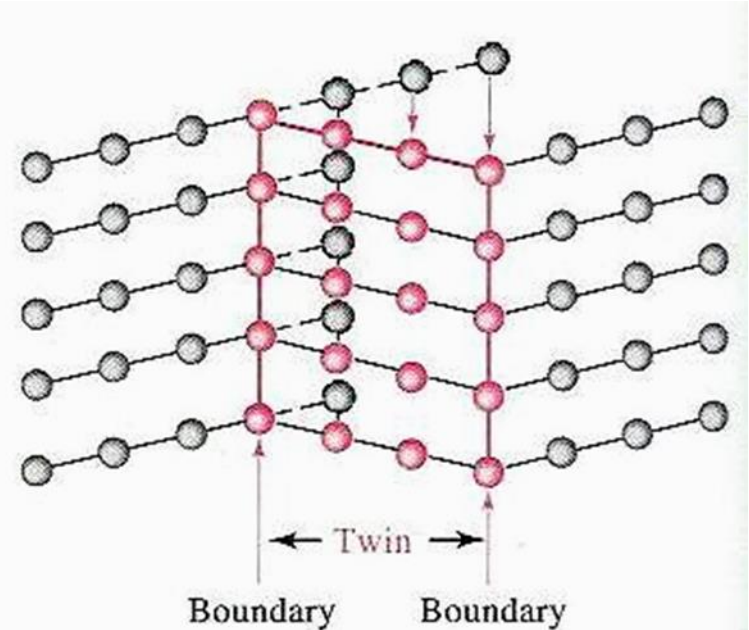
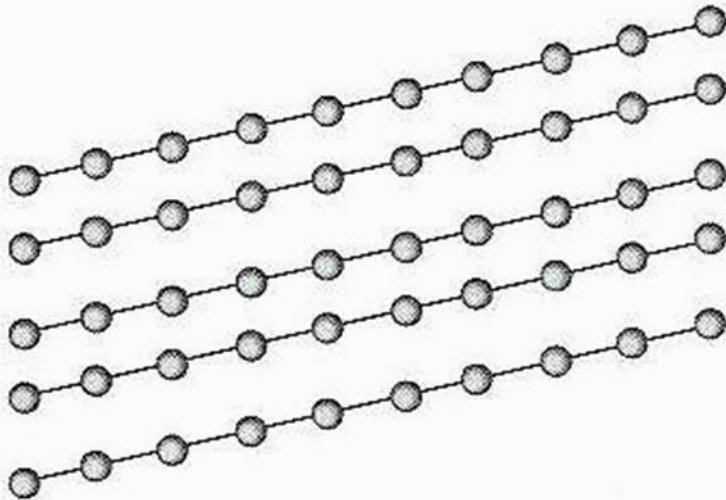


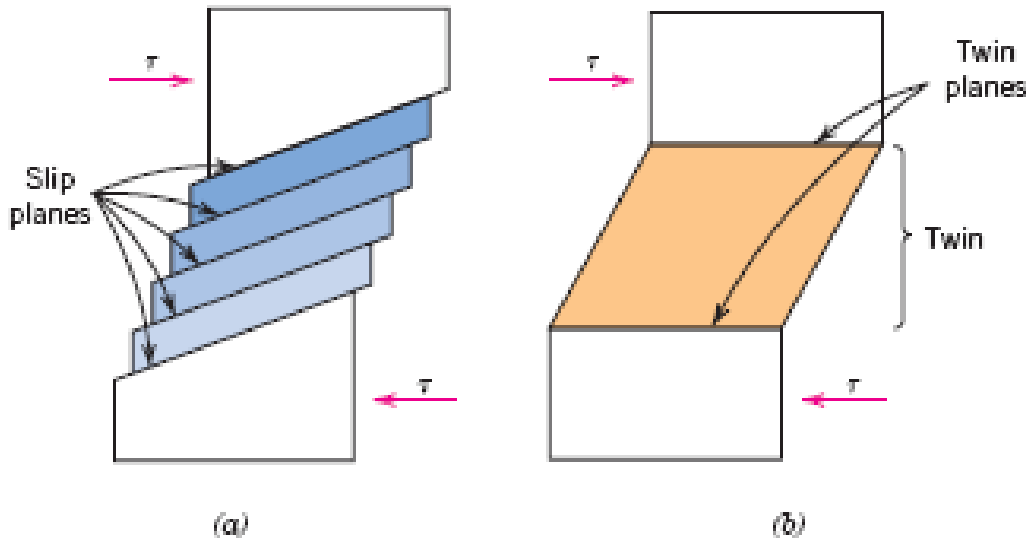
- Kaymaya ek olarak, ikizlenme ile plastik deformasyon oluşabilir.
- Bir kayma kuvveti atomlarda yer değiştirmeler üretebilir, böylece düzlemi bir tarafındaki (ikiz sınırı), atomlar diğer taraftaki atomlara ayna görüntüsü pozisyonlarında yerleşebilir.

İKİZLENME

İkizlenme: atomik aralıklardan daha az, düşük sıcaklıklarda BCC ve HCP kristal yapılarına sahip metallerde meydana gelir; ve yüksek ani yükleme oranlarında (darbe), kayma işleminin kısıtlandığı koşullar (az sayıda çalışan kayma sistemi).

Kayma: atomik aralıkların katları kadar olur. Mekanik ikizlenme plastik deformasyon sonucunda gerçekleşir. Atom düzlemleri aynı anda hareket etmelidir. Sonuç olarak, büyük yerel stres gerektirir.





(a) Kayma ile deformasyon
(b) İkizlenmeyle deformasyon

- Bazı metalik malzemelerde düşük miktarda plastik deformasyon, ikizlenme ile de oluşabilir.
- Kesme kuvveti, bir düzlemin bir tarafındaki (ikiz sınır) atomlarını, diğer tarafın atomlarının ayna görüntüsü pozisyonlarında yer alacağı şekilde atomik yer değiştirmeler üretebilir.
- İkizlenme kristal yapıya bağlı olarak belirli kristalografik düzlemde ve belirli bir yönde gerçekleşir.
- ikizlenmeden elde edilen toplam plastik deformasyon miktarı normalde kaymaya göre küçüktür.
- ikizlenme, kristalleri yeniden yönlendirebilir ve kaymaya devam etmek için uygun yönlerde sahip yeni kayma sistemini başlatabilir