BMM 205
Malzeme Biliminin Temelleri

Dislokasyonlar ve Güçlendirme Mekanizmaları
Bölüm - 1

Dr. Ersin Emre Ören

Biyomedikal Mühendisliği Bölümü
Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Ankara - TÜRKİYE

eeoren@etu.edu.tr
http://eeoren.etu.edu.tr

Biyoteknoloji
Nanoteknoloji
Tasarım
BİYONANOTASARIM LABORATUVARI

Plastik (Yoğruk) Deformasyon:

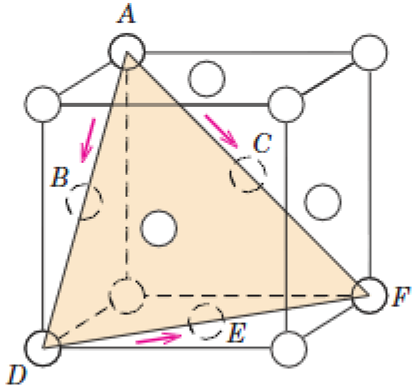
Plastik deformasyon büyük miktarda dislokasyonun harekete geçmesi ile oluşur.

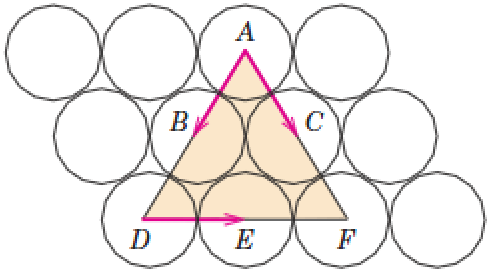
Plastik deformasyonu anlamak için dislokasyonları ve dislokasyon hareketlerini anlamalıyız.

Plastik deformasyonu önlemek yani malzemenin akma dayanımını (yield strength) arttırmak için malzeme içerisindeki dislokasyon hareketlerini zorlaştıracak mekanizmalar bulmalıyız.

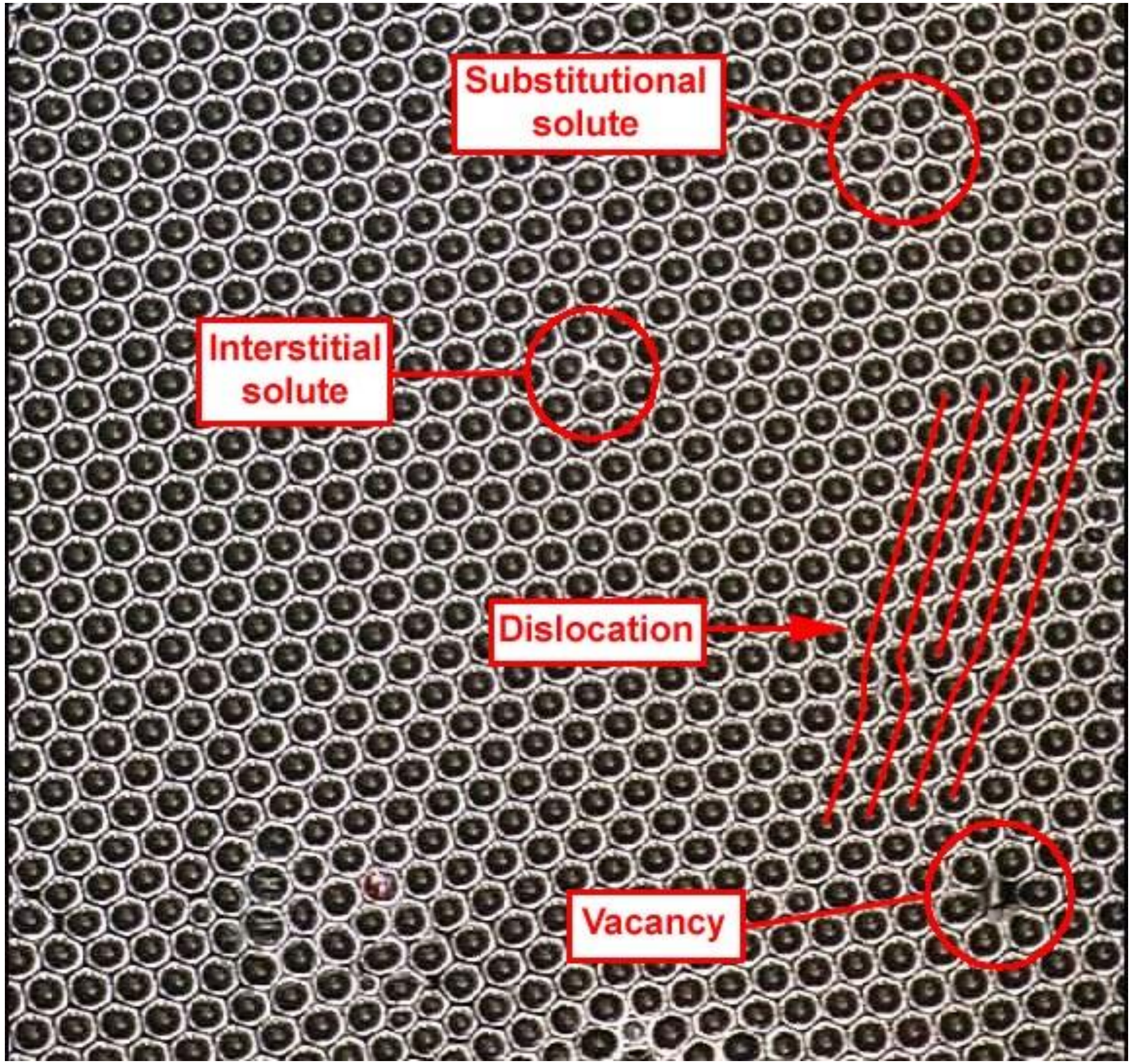
Kayma (slip): Malzemelerde dislokasyon hareketleri ile oluşan plastik deformasyona kayma denir.

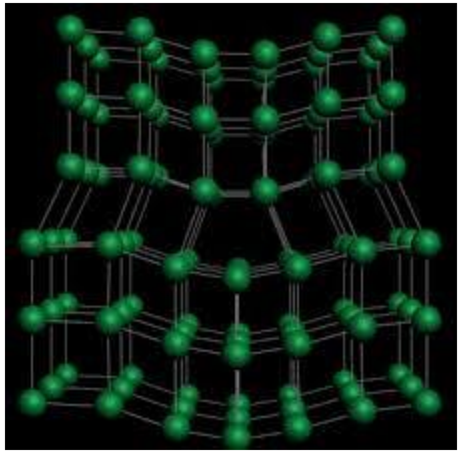
Kayma malzemelerdeki kristal düzlem ve yönlere bağlıdır.





Tek kristalli çinkoda kayma kuşakları.





https://www.youtube.com/watch?v=xzUE1uki66Q

DİSLOKASYONLAR

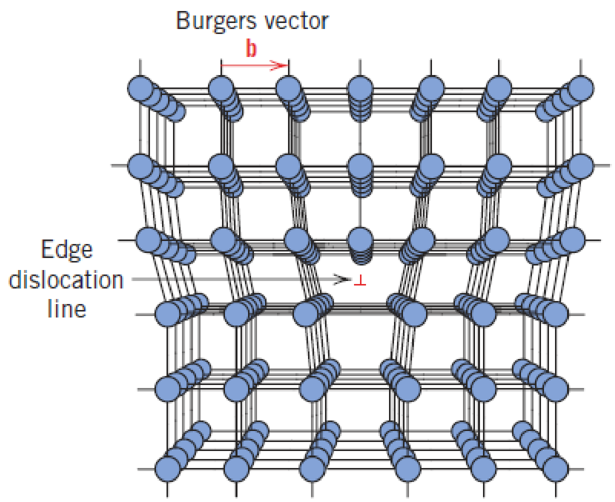
Dislokasyon (Aykırı yerleşim): çizgi veya 1 boyutlu kusur olarak adlandırılır ve çevresindeki atomların yanlış yerleşmesi / yerdeğiştirmesi sonucu oluşur. Bu kusurlar genellikle kristallerin büyümesi sırasında veya mekanik deformasyon nedeni ile olur.

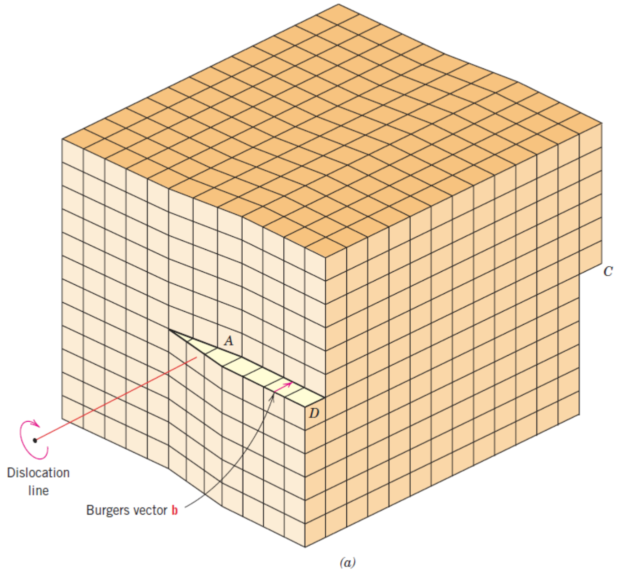
Dislokasyon yoğunluğu: Si, Ge gibi kristallerde: 10^6 - 10^7 tane/cm^2 iken bazı kristallerde 10^{16} tane/cm^2 gibi değerlere çıkabilir...

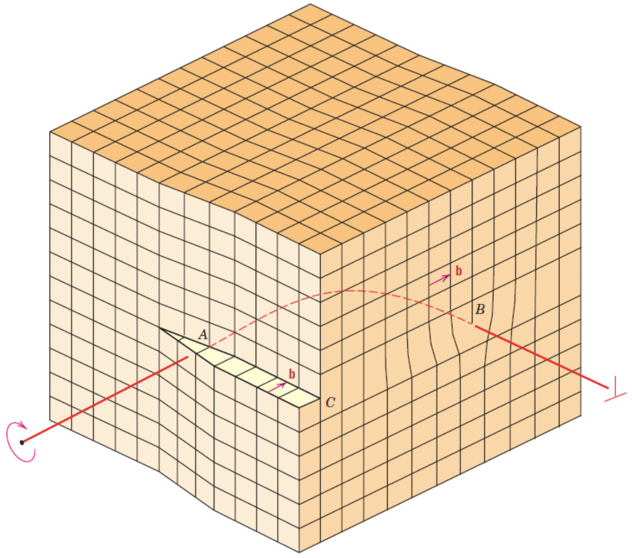
Kenar Dislokasyonu (Edge dislocation)

Burgu Dislokasyonu (Screw dislocation)

Karışık dislokasyon (Mixed dislocation)

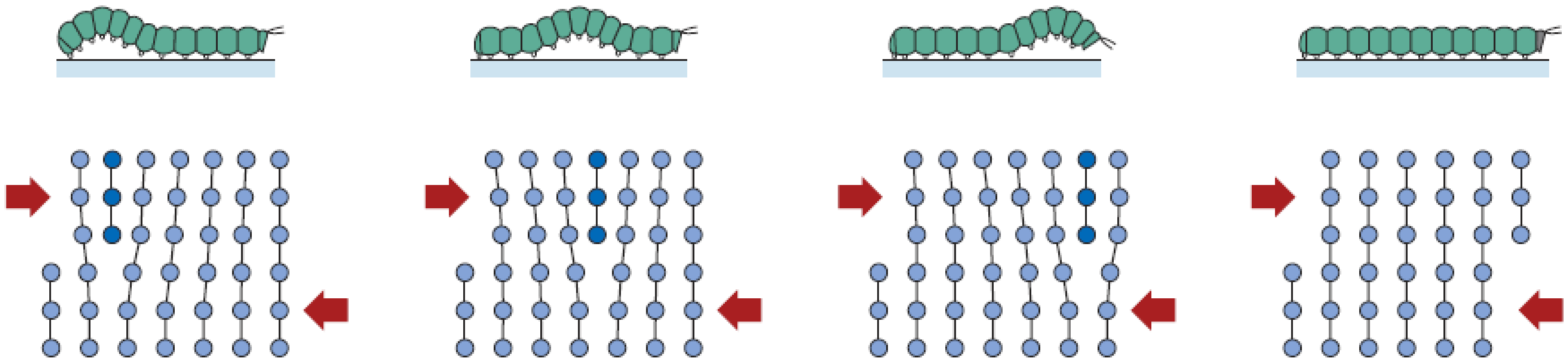


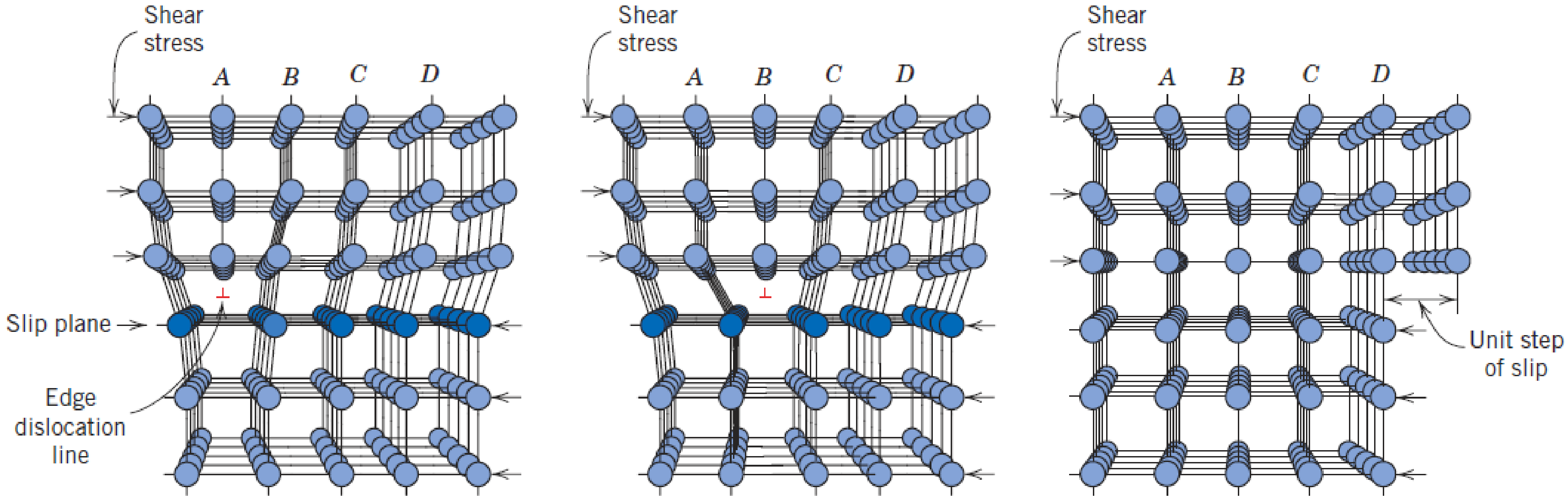




Dislokasyonlar

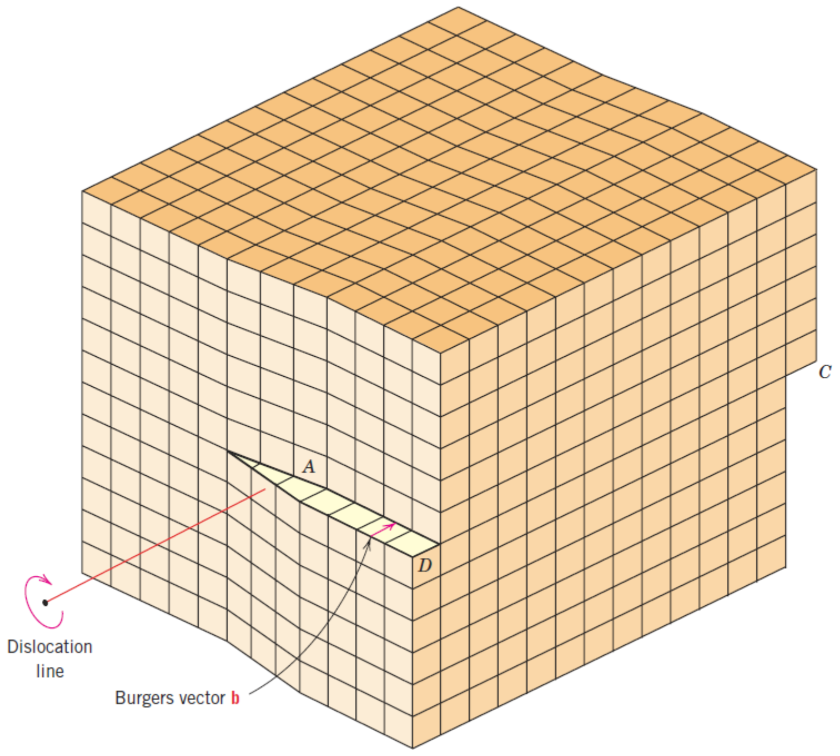
Kenar Dislokasyonu (Edge dislocation): kristal içerisinde fazladan bir yarım atom düzlemi varsa bu tip dislokasyonlara kenar dislokasyonu denir.



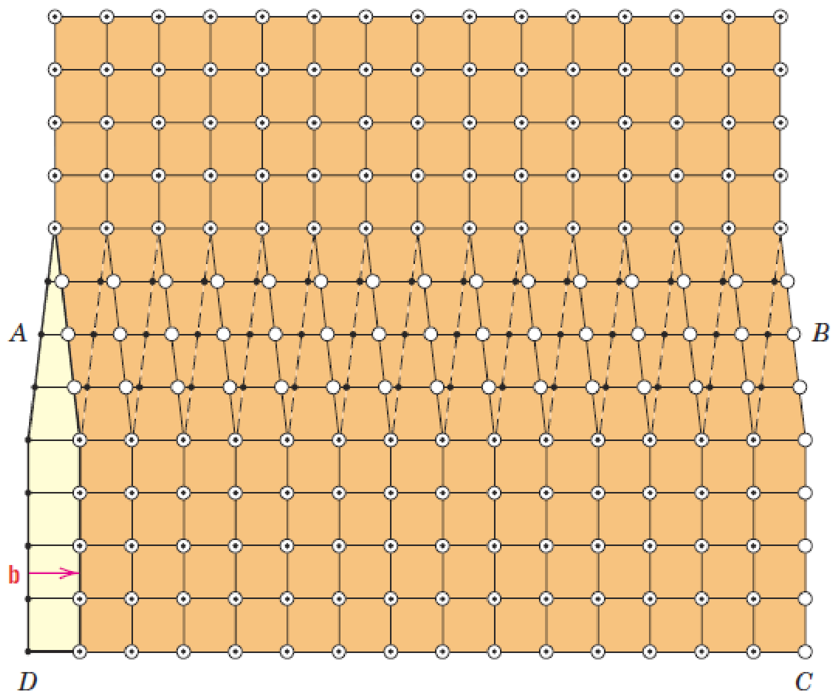


Dislokasyonlar

Burgu dislokasyonu (Screw dislocation): kristalin alt ve üst katmanlarına uygulanan kayma gerilmesi (shear stress) sonucu kristalin üst ön bölümü alt ön bölümüne göre bir atom uzaklığı kayarsa oluşur.



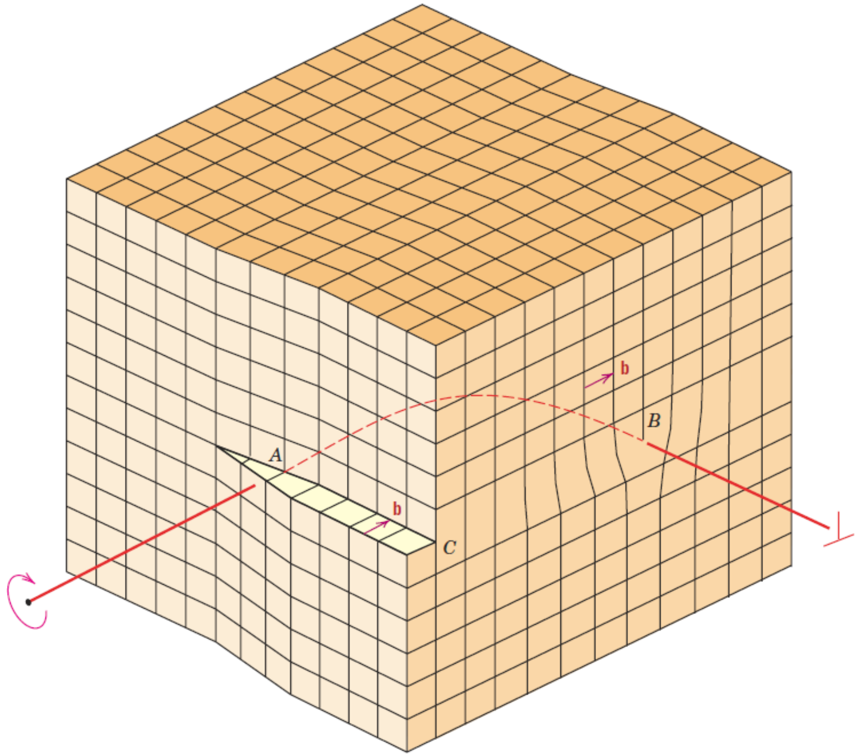
(a)

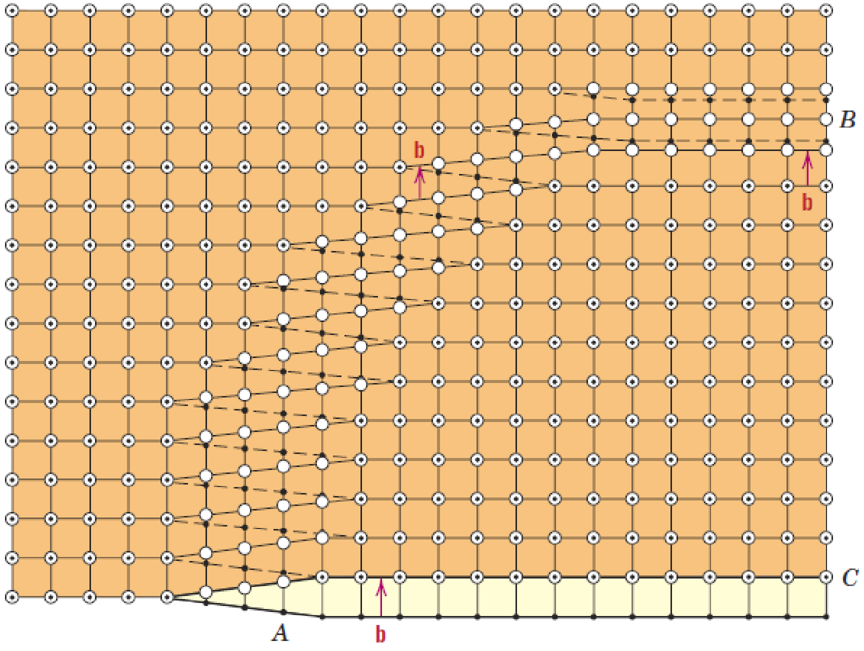


Kayma vektörü (Burgers vector): bir dislokasyonun her adımda ilerlediği yönü ve mesafeyi belirtir.

Dislokasyonlar

Karışık dislokasyon (Mixed dislocation): kristal malzemeler içerisindeki dislokasyanları çoğunluğu ne tek kenar ne de tek burgu dislokasyonudur. Daha çok her iki tip dislokasyonun da özelliklerini belirli bölgelerde gösterirler.





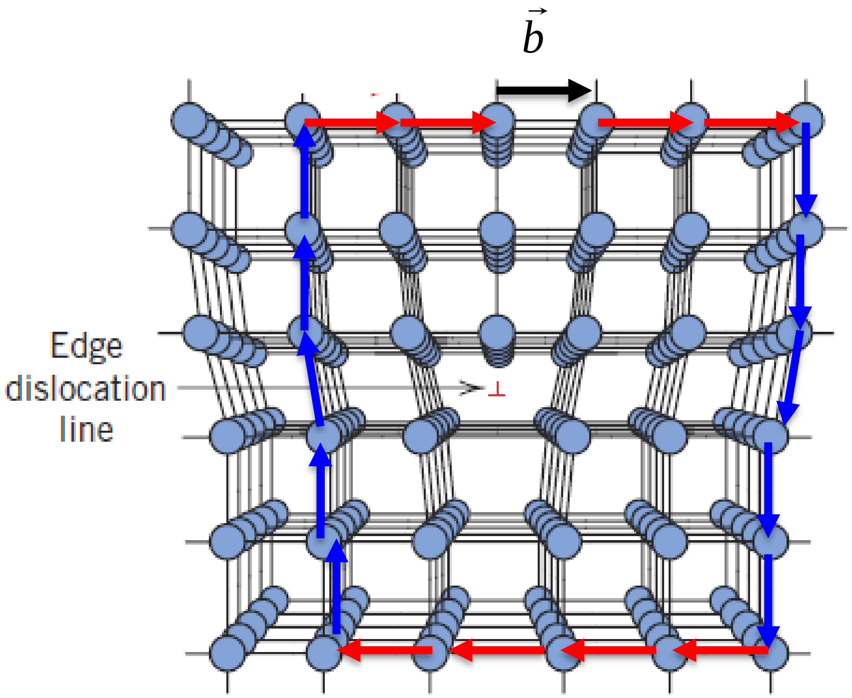
(b)

Kayma vektörü (Burgers vector): bir dislokasyonun her adımda ilerlediği yönü ve mesafeyi belirtir.

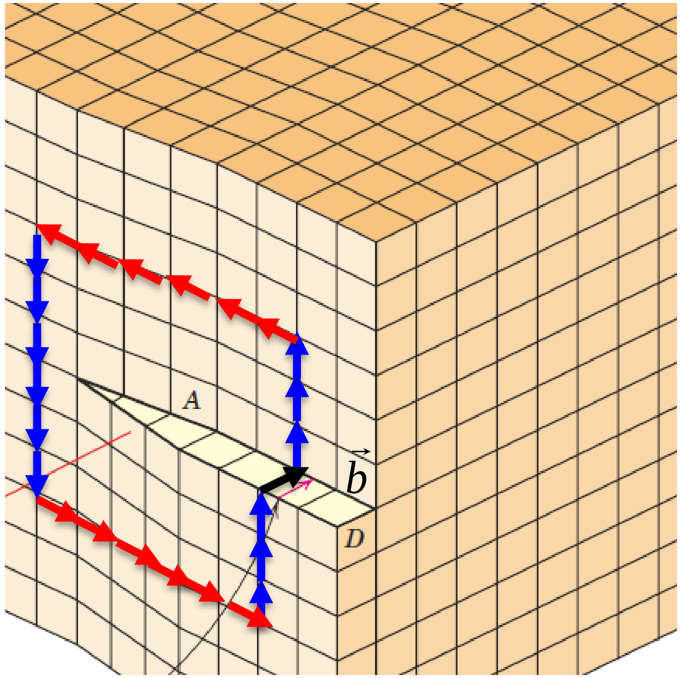
Dislokasyonlar

Kayma vektörü (Burgers vector): bir dislokasyonun her adımda ilerlediği yönü ve mesafeyi belirtir.

Kayma vektörü'nü bulmak için atomdan atoma her yönde eşit miktar giderek kapalı bir devre kurmaya çalışılır. Devrenin kapanması için gereken vektör kayma vektörüdür.

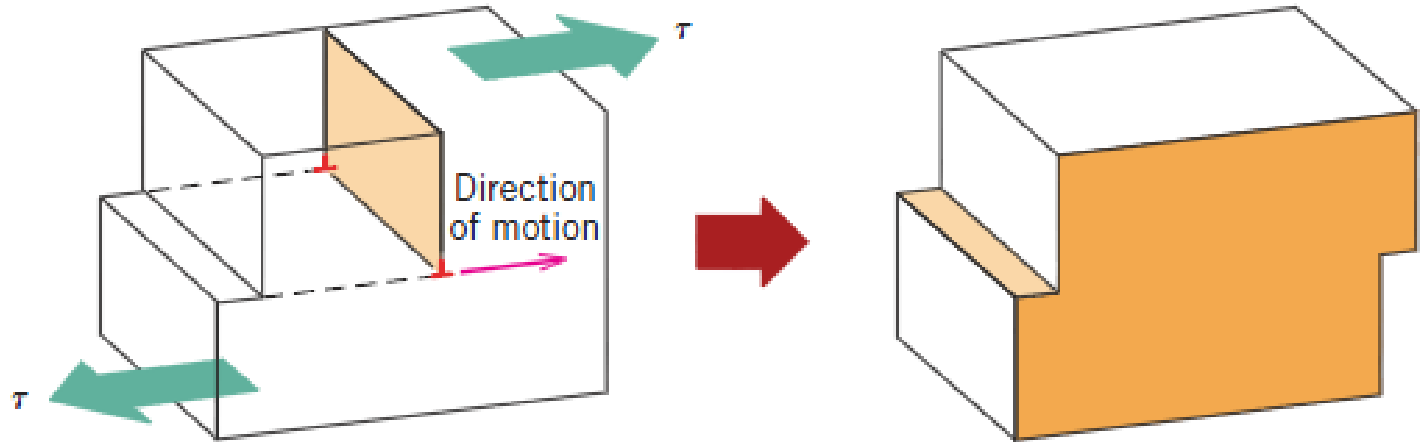


$\vec{b}$ dislokasyon hattına diktir.

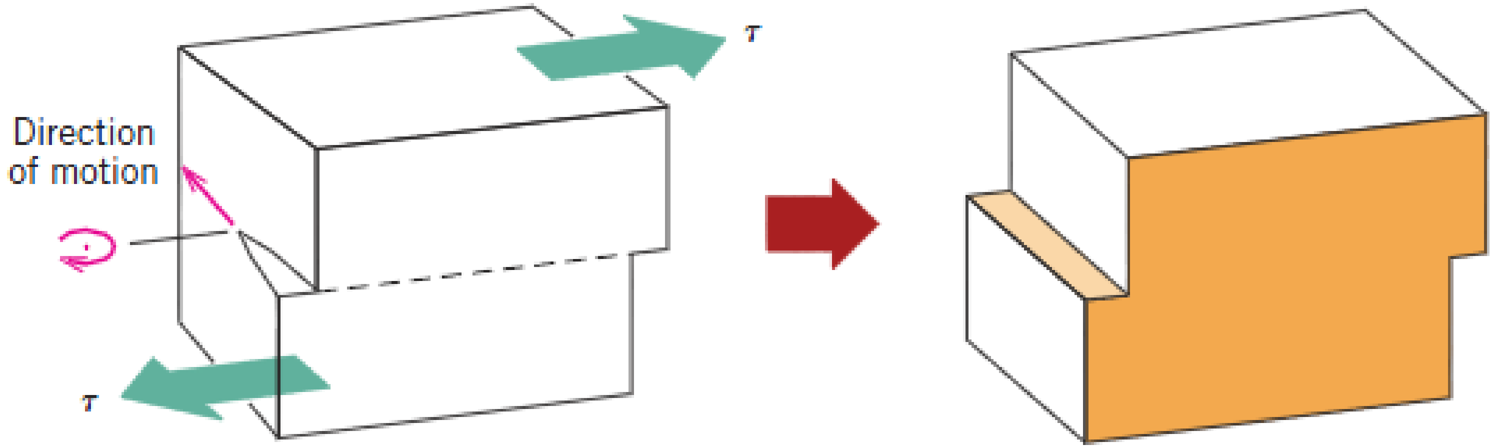


$\vec{b}$ dislokasyon hattına paraleldir.

Dislokasyonlar



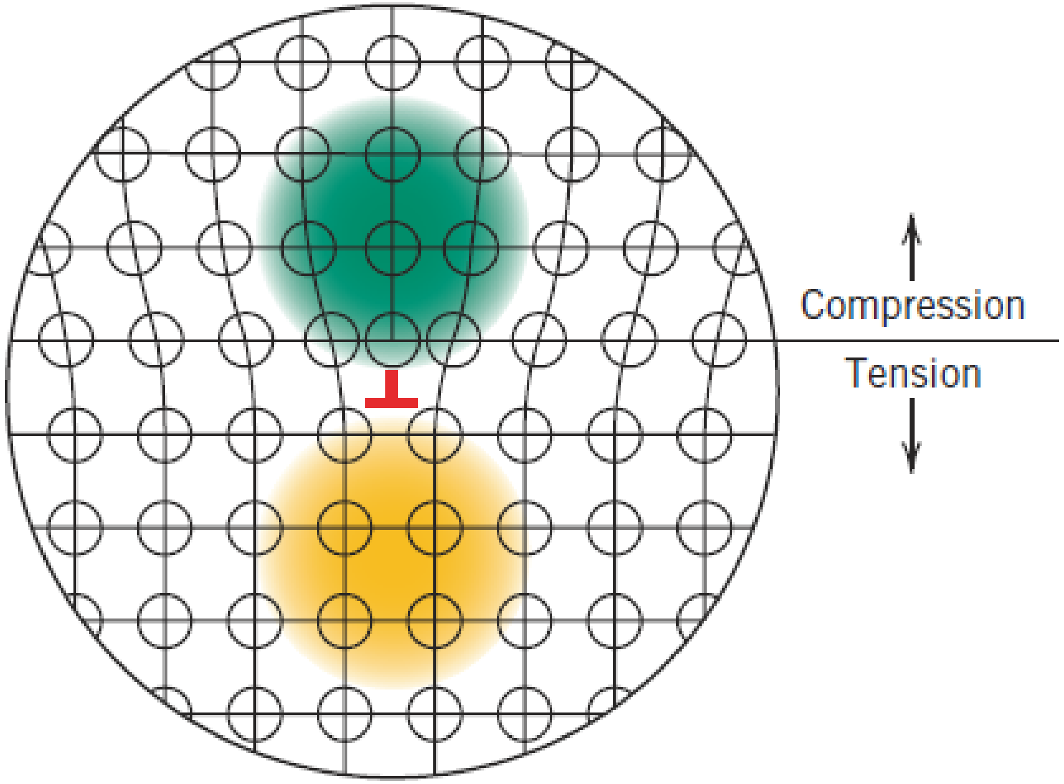
Kenar dislokasyonlarında dislokasyon hattı, uygulanan kayma gerilimi (shear stress) yönünde hareket eder.

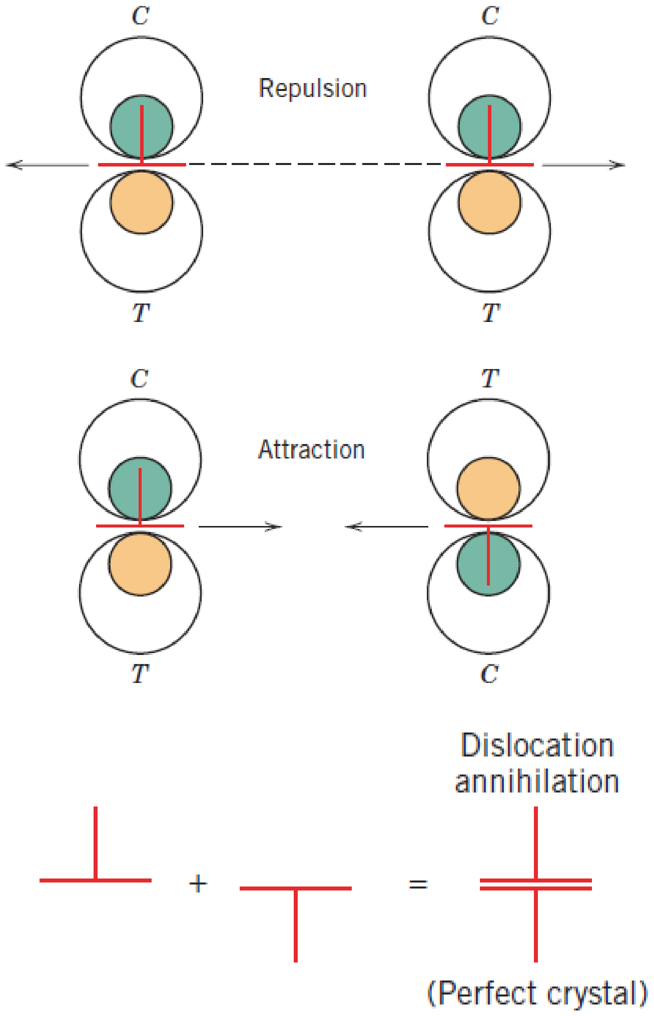


Burgu dislokasyonlarında dislokasyon hattı, uygulanan kayma gerilimine (shear stress) dik yönde hareket eder.

Dislokasyonlar

Plastik deformasyon sırasında deformasyon enerjisinin bir kısmı (%5) malzeme içerisinde kalır geri kalan enerji ise ısı olarak yayılır.





Malzeme içerisinde kalan bu enerjinin büyük bir kısmı dislokasyonlar çevresinde ***gerinim alanları (strain fields)*** olarak depolanır.

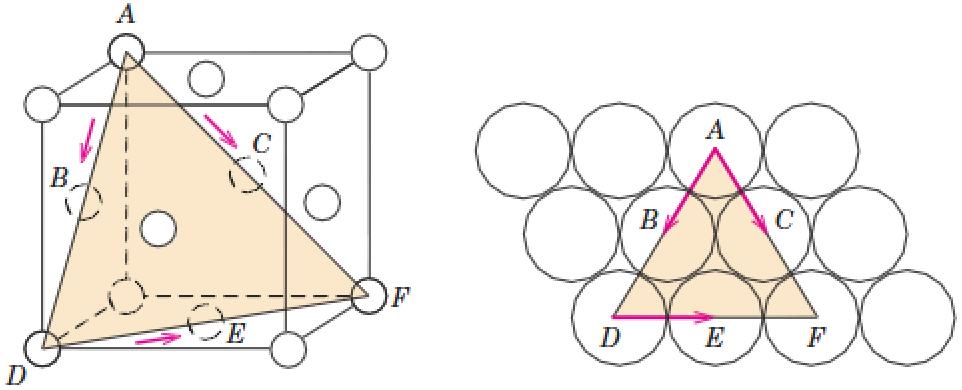
Kayma Sistemleri:

Dislokasyonların malzeme içerisindeki hareketleri kristal yapılara bağlıdır. Bazı düzlemlerde diğerlerine göre daha kolay hareket ederler. Bu düzlemlere ***kayma düzlemi (slip plane)*** denir. Aynı şekilde kayma düzlemi içerisinde de bazı yönler diğerlerine göre tercih sebebidir ve bu yönlere de ***kayma yönü (slip direction)*** denir.

Kayma Sistemleri: ***kayma düzlemi (slip plane)*** + ***kayma yönü (slip direction)***

Kayma Sistemlerinde dislokasyon hareketleri sırasında oluşan atomik gerinimler (distortion) en küçük değerlerini alır.

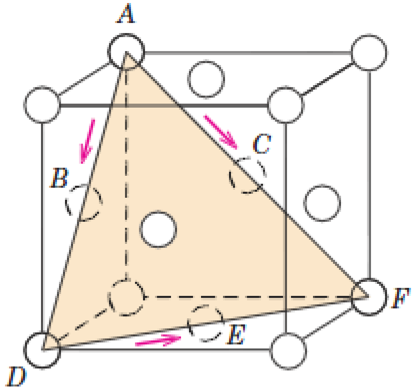
Kristal yapılarda ***kayma düzlemi*** en yoğun şekilde paketlenmiş yani düzlemsel atom yoğunluğu en yüksek olan düzlemdir. Aynı şekilde ***kayma yönü*** kayma düzlemi üzerindeki en yoğun çizgisel atom yoğunluğuna sahip olan yöndür.

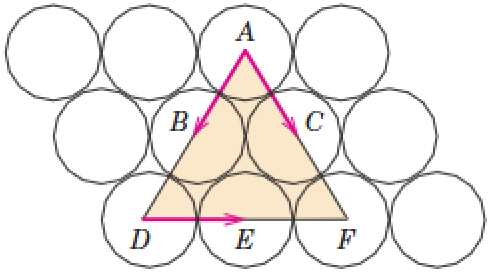


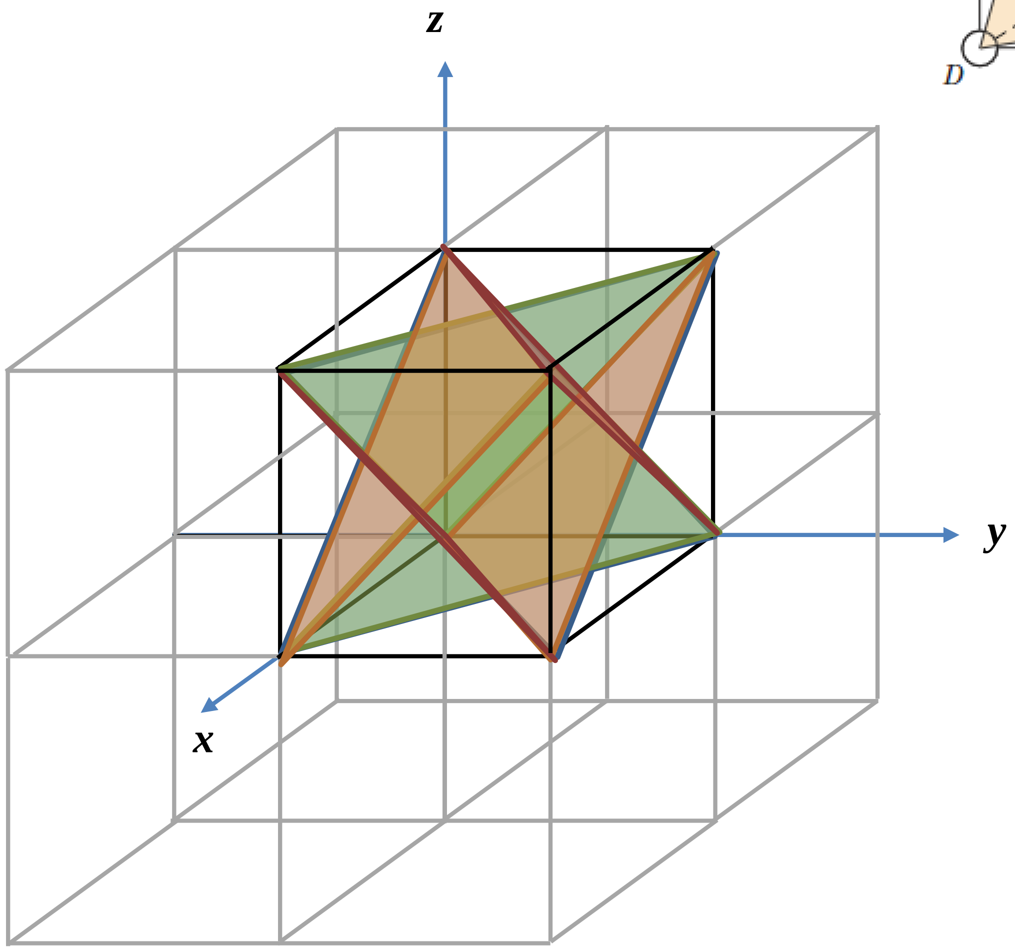
Kayma Sistemleri:

Yüzey Merkezli Kübik (YMK - FCC):

{111} düzlemleri <110> yönleri







Bağımsız Kayma Sitemleri Sayısı

(111)	$(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$
$(\bar{1}\bar{1}1)$	$(11\bar{1})$
$(1\bar{1}1)$	$(\bar{1}1\bar{1})$
$(\bar{1}11)$	$(1\bar{1}\bar{1})$

4 x 3 = 12

Kayma Sistemleri:

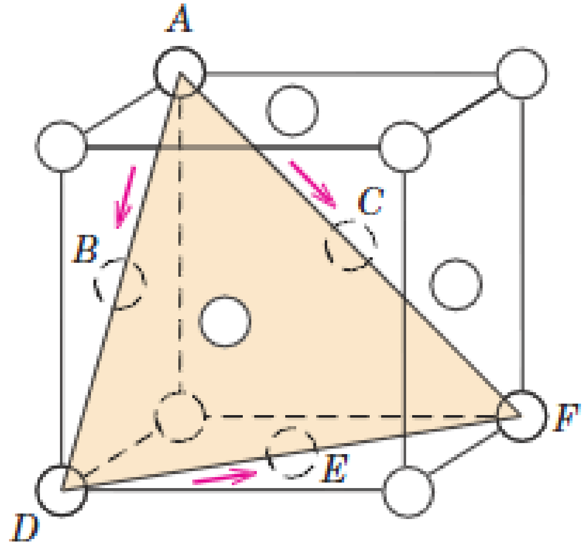
Table 7.1 Slip Systems for Face-Centered Cubic, Body-Centered Cubic, and Hexagonal Close-Packed Metals

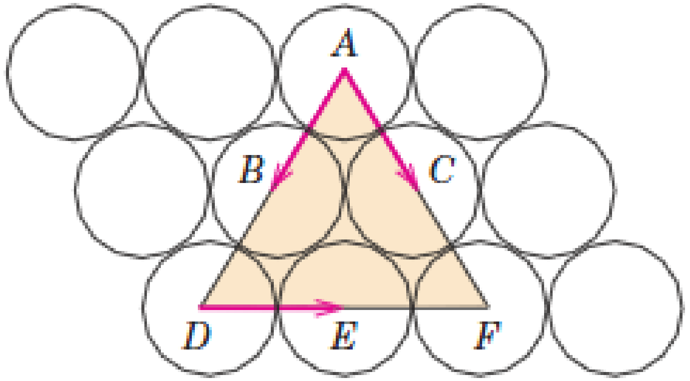
Metals	*Slip Plane*	*Slip Direction*		*Number of Slip Systems*
	Face-Centered Cubic			
Cu, Al, Ni, Ag, Au	$\{111\}$	$\langle 1\bar{1}0\rangle$		12
	Body-Centered Cubic		Sünek	
α-Fe, W, Mo	$\{110\}$	$\langle \bar{1}11\rangle$		12
α-Fe, W	$\{211\}$	$\langle \bar{1}11\rangle$		12
α-Fe, K	$\{321\}$	$\langle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

Birden fazla kayma düzlemine sahip BCC ve HCP kristal yapıdaki metallerde bazı kayma sitemleri sadece yüksek sıcaklıklarda aktif hale geçerler.

Kayma Sistemleri:

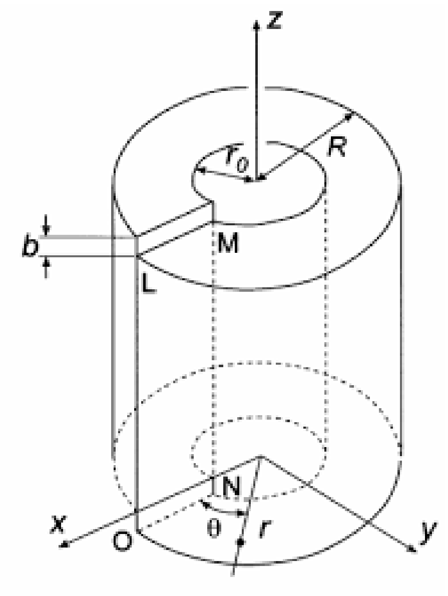
Kayma vektörü (Burgers vector): bir dislokasyonun her adımda ilerlediği yönü ve mesafeyi belirtir.

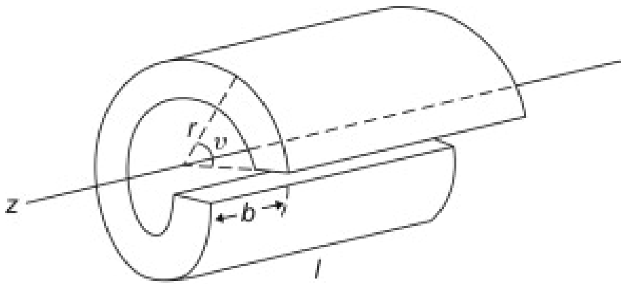


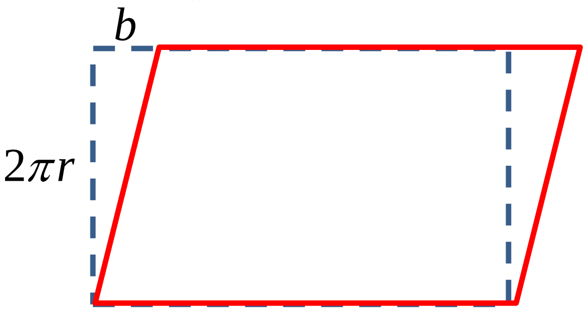


$$b_{FCC} = \frac{a}{2}\langle 110\rangle \qquad b_{BCC} = \frac{a}{2}\langle 111\rangle \qquad b_{HCP} = \frac{a}{2}\langle 11\bar{2}0\rangle$$

Dislokasyon Enerjisi: bir dislokasyonun birim uzunluğunu çevresinde depolanan elastik enerji.







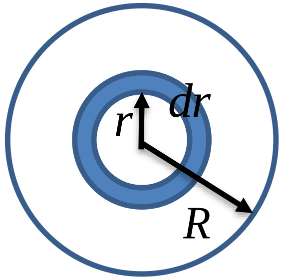
$$\text{Shear strain}=\frac{\text{elastik uzama}}{\text{üzerinde uzamanın olduğu uzaklık}} \qquad \gamma=\frac{b}{2\pi r}$$

$$\frac{\text{elastik gerinim enerjisi}}{\text{birim hacim}}=\frac{1}{2}\text{gerilim}\times\text{gerinim}=\frac{1}{2}G\times\text{gerinim}^2$$

$$\frac{\text{elastik gerinim enerjisi}}{\text{birim hacim}}=\frac{1}{2}G\left(\frac{b}{2\pi r}\right)^2$$

$$\frac{\text{elastik gerinim enerjisi}}{\text{birim dislokasyon uzunluğu}}=\Gamma=\int_{r_0}^{r_1}\frac{1}{2}G\left(\frac{b}{2\pi r}\right)^2 dA \quad =\int_{r_0}^{r_1}\frac{1}{2}G\left(\frac{b}{2\pi r}\right)^2 2\pi r\ dr \quad \Gamma=\frac{Gb^2}{4\pi}\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)$$

$$\Gamma\propto Gb^2$$



$$dA=\pi(r+dr)^2-\pi r^2$$

$$dA=\pi\left(r^2+2rdr+dr^2\right)-\pi r^2 \qquad dA=2\pi rdr$$

Kayma vektörü (Burgers vector): $\Gamma \propto Gb^2$

Soru:
Hangisi daha olasıdır: 2b uzunluğunda bir burgers vektörü mü 2 tane b uzunluğunda burgers vektörümü

$$\Gamma_{2b} = G(2b)^2 = 4Gb^2 \qquad\qquad 2\Gamma_b = 2Gb^2$$

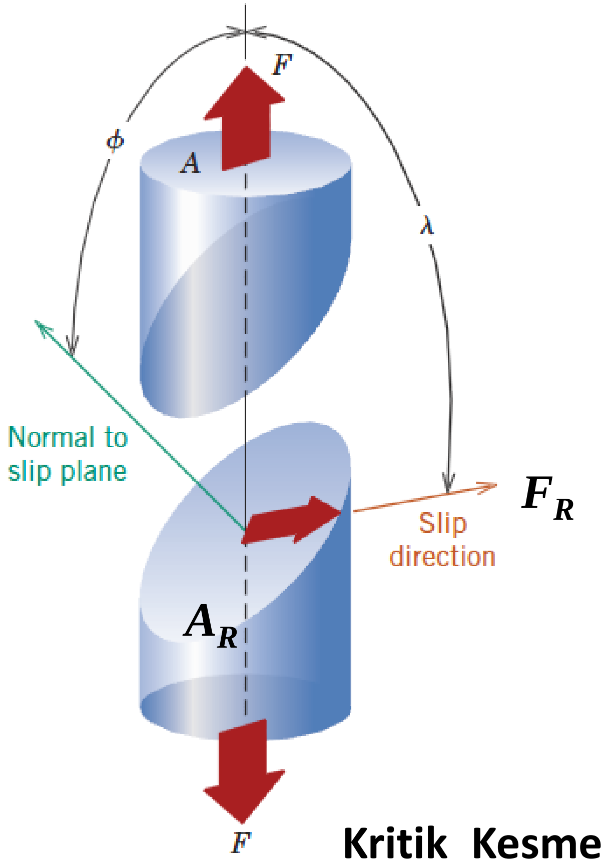
Soru:
Hacim merkezli kübik yapıda a<110> üzerindeki bir burgers vektörünün enerji açısından kararsız olduğunu ve 2 tane a/2<111> vektörüne dönüşeceğini gösteriniz.

$$a[110] \rightarrow \frac{a}{2}[111] + \frac{a}{2}\left[11\bar{1}\right]$$

$$a^2\left(1^2+1^2+0^2\right) \rightarrow \frac{a^2}{4}\left(1^2+1^2+1^2\right) + \frac{a^2}{4}\left(1^2+1^2+-1^2\right)$$

$$2a^2 \rightarrow \frac{3}{2}a^2$$

Kesme Gerilmesi (Resolved Shear Stress): Uygulanan gerilimin yanında sistem içerisindeki kayma sitemlerinin (kayma düzlemi ve kayma yönü) orientasyonuna bağlıdır.



$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$F_R = F\cos\lambda$$

$$A_R = \frac{A}{\cos\phi}$$

$$\Rightarrow \quad \tau_R = \frac{F_R}{A_R} = \frac{F}{A}\cos\phi\cos\lambda$$

$$\Rightarrow \quad \tau_R = \sigma\cos\phi\cos\lambda$$

$$\Rightarrow \quad \tau_R(\max) = \sigma(\cos\phi\cos\lambda)_{\max}$$

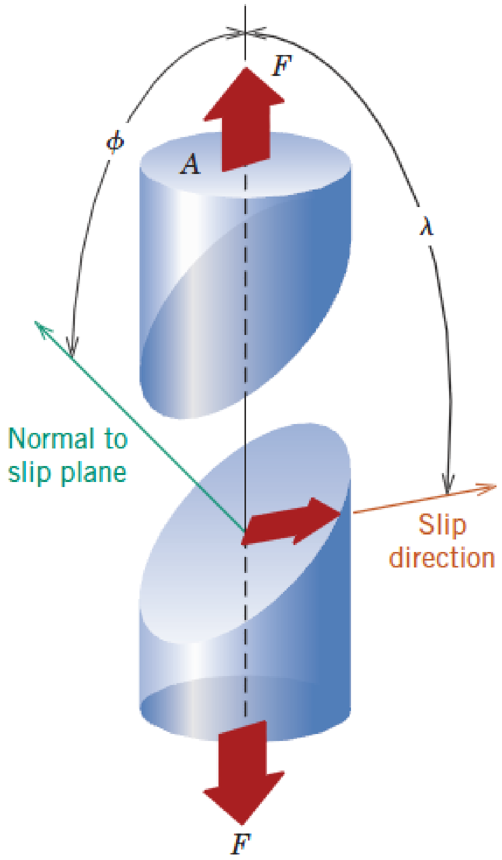
Kritik Kesme Gerilmesi (Critical Resolved Shear Stress) τ_{crss}

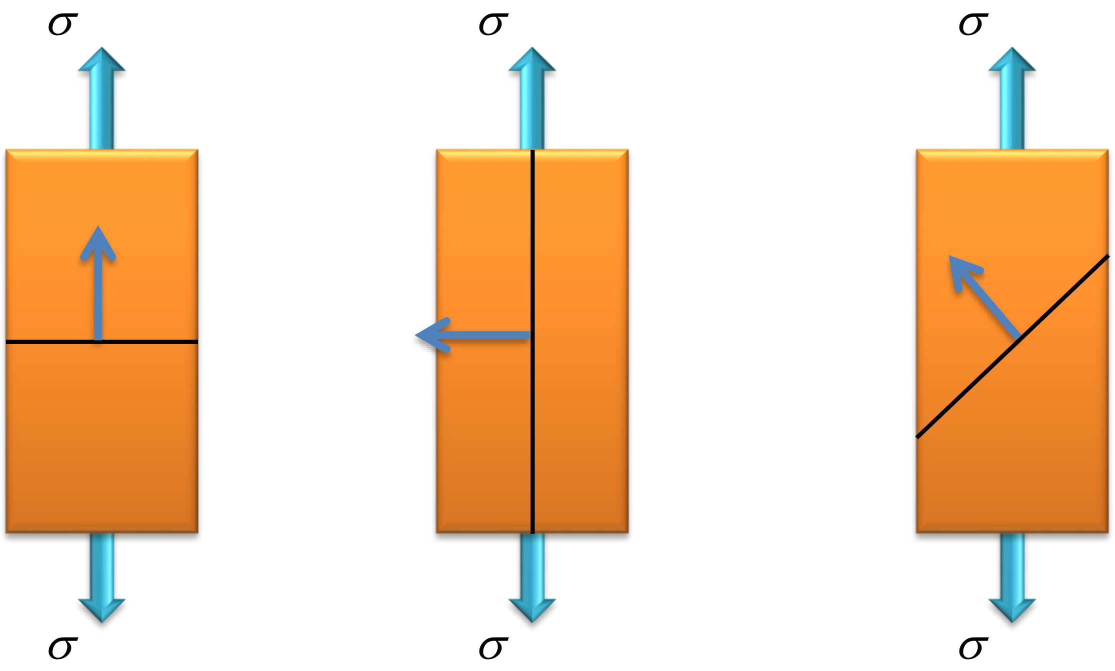
Kritik Kesme Gerilmesi (Critical Resolved Shear Stress) sistemde kayma olması için gereken en küçük kesme gerilmesidir. Bir malzeme özelliği olup akma dayanımını belirler.

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

Kesme Gerilmesi (Resolved Shear Stress)

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





$\lambda = 90$	$\lambda = 0$	$\lambda = 45$
$\phi = 0$	$\phi = 90$	$\phi = 45$

$(\cos\phi\cos\lambda)_{max}$ değeri $\phi = \lambda = 45^o$ 'de olur.

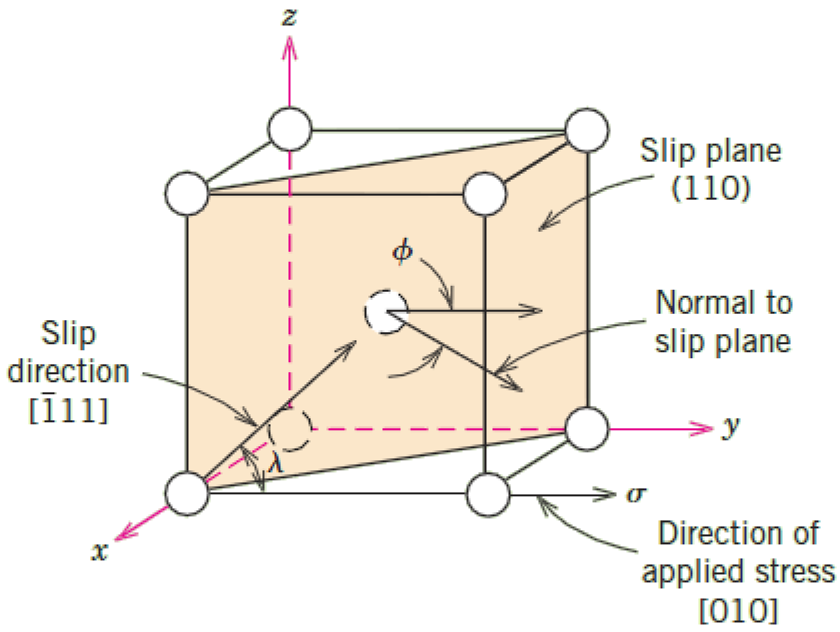
$$\sigma_y = 2\tau_{crss}$$

Soru

Hacim merkezli kübik kristal yapısına sahip tek kristal bir demire [010] yönünde çekme gerilmesi uygulanmaktadır.

a) Uygulanan çekme kuvveti 52 MPa ise (110) düzlemi ve [$\bar{1}$11] yönündeki kritik kesme gerilmesini hesaplayınız.

b) Eğer kayma (110) düzlemi ve [$\bar{1}$11] yönünde olursa ve kritik kesme gerilmesi 30 MPa ise akmanın başlaması için uygulanması gereken çekme kuvvetini hesaplayınız.



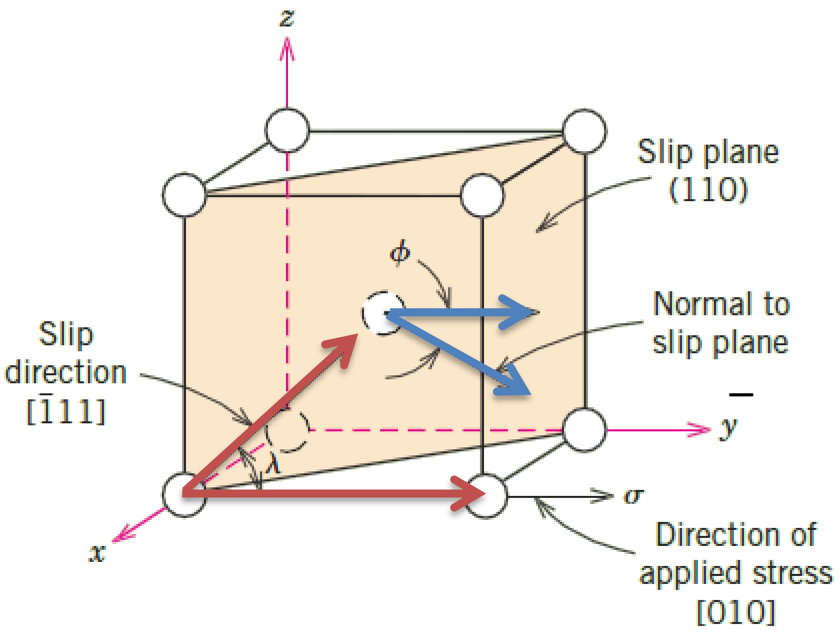
$$\tau_R = \sigma(\cos\phi \cos\lambda)$$

nokta çarpım (dot product) veya **skaler çarpım**

$$a \bullet b = |a||b|\cos\alpha = a_i b_i + a_k b_k + a_k b_k$$

$$= \sqrt{a_i^2 + a_j^2 + a_k^2}\sqrt{b_i^2 + b_j^2 + b_k^2}\cos\alpha$$

$$\Rightarrow \quad \cos\alpha = \frac{a_i b_i + a_k b_k + a_k b_k}{\sqrt{a_i^2 + a_j^2 + a_k^2}\sqrt{b_i^2 + b_j^2 + b_k^2}}$$



ϕ: (010) ve (110) yönleri arasındaki açı

$$\cos\phi = \frac{0\cdot1+1\cdot1+0\cdot0}{\sqrt{0^2+1^2+0^2}\sqrt{1^2+1^2+0^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

λ: (010) ve ($\bar{1}$11) yönleri arasındaki açı

$$\cos\lambda = \frac{0\cdot1+1\cdot1+0\cdot1}{\sqrt{0^2+1^2+0^2}\sqrt{1^2+1^2+1^2}} = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$\tau_R = 52 \text{ MPa} \frac{1}{\sqrt{2}}\frac{1}{\sqrt{3}} = 21.3 \text{ MPa}$$

akmanın başlaması için uygulanması gereken çekme kuvveti: $$\sigma_y = \frac{\tau_{crss}}{\cos\phi\cos\lambda} = \frac{30 \text{ MPa}}{\frac{1}{\sqrt{2}}\frac{1}{\sqrt{3}}} = 73.4 \text{ MPa}$$

Önümüzdeki Ders Saatinde

Ders Kitabımızın 7. Bölümündeki

DİSLOKASYONLAR VE GÜÇLENDİRME MEKANİZMALARI

adlı konuya devam edeceğiz!