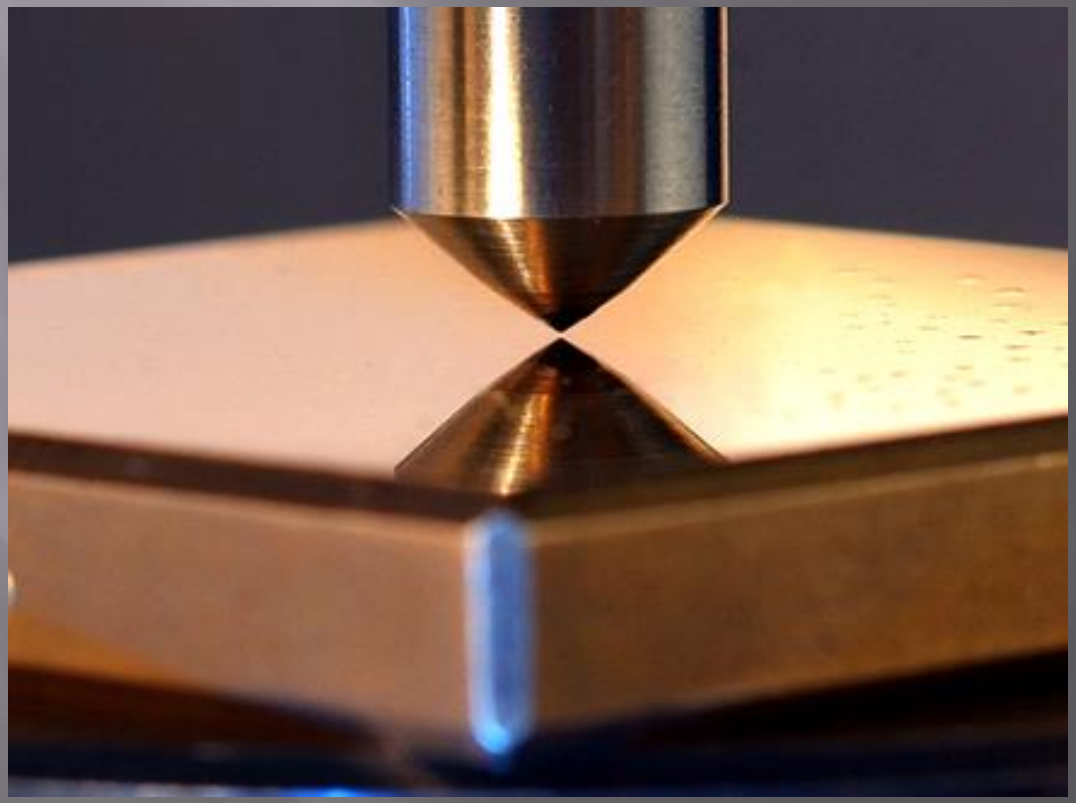
MALZEMELERDE SERTLİK ÖLÇME



Malzemelerin Özellikleri

Fiziksel Özellikler: boyut, şekil, yoğunluk…
Kimyasal özellikler: kimyasal bileşim, korozyon direnci, asit-baz tepkimesi, afinite…
Mekanik Özellikler: mukavemet, rijitlik, elastiklik, süneklik, kırılganlık, sertlik, aşınma…
Isısal özellikler: ergime noktası, ısı iletkenliği, ısıl genleşme…
Eletrik ve manyetik özellikler: elektrik iletkenliği, manyetiklik…
Akustik Özellikler:sesi geçirmesi, sesi yansıtması, sesi emmesi…
Optik Özellikler: Renk, ışığı yansıtması…

Mekanik özellikler mühendislik uygulamalarında en fazla kullanılandır ve nisbeten daha kolay uygulanırlar.

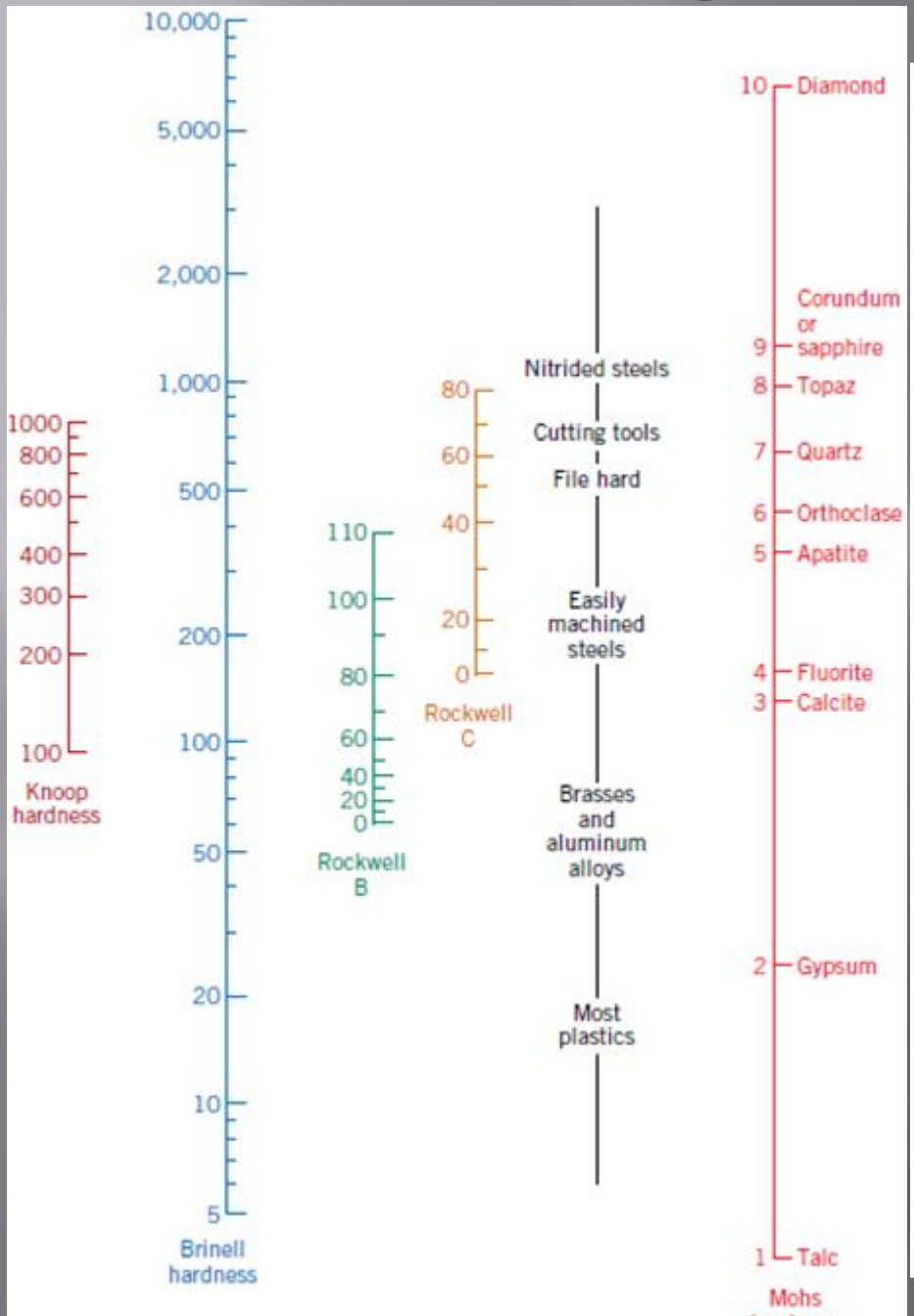
Mohs Hardness Scale

Increasing Hardness

Mineral Name	Scale Number	Common Object
Diamond	10	
Corundum	9	Masonry Drill Bit (8.5)
Topaz	8	
Quartz	7	Steel Nail (6.5)
Orthoclase	6	
Apatite	5	Knife/Glass Plate (5.5)
Fluorite	4	Copper Penny (3.5)
Calcite	3	
Gypsum	2	Fingernail (2.5)
Talc	1	

1822'de Friedrich Mosh minerolojide ve öğütme makinalarında kullanılan 10 adımlı çizik sertlik testini geliştirdi. Minerolojide kullanılır.

Mohs Sertlik Skalası



Sertlik	Mineral	Formülü	Mutlak Sertlik	Resim	Çizme denemesi
1	Talk	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	1		Tırnakla çizilenler
2	Jips	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	2		Çakı ve iğne ile çizilenler
3	Kalsit	$(CaCO_3)$	9		Çakı ve iğne ile çizilenler
4	Fluorit	CaF_2	21		Çakı ve iğne ile çizilenler
5	Apatit	$Ca_5(PO_4)_3(OH^-,Cl^-,F^-)$	48		Eğe ile çizilenler
6	Ortoklas	$KAlSi_3O_8$	72		Eğe ile çizilenler
7	Kuvars	SiO_2	100		Camı kuvvetle çizenler
8	Topaz	$Al_2SiO_4(OH^-,F^-)_2$	200		Camı kuvvetle çizenler
9	Yakut veya Safir	Al_2O_3	400		Camı kuvvetle çizenler
10	Elmas	C	1500		sadece çok güçlü lazerlerle çizilenler

Mohs-Vickers Sertliği arasındaki lineer olmayan ilişki

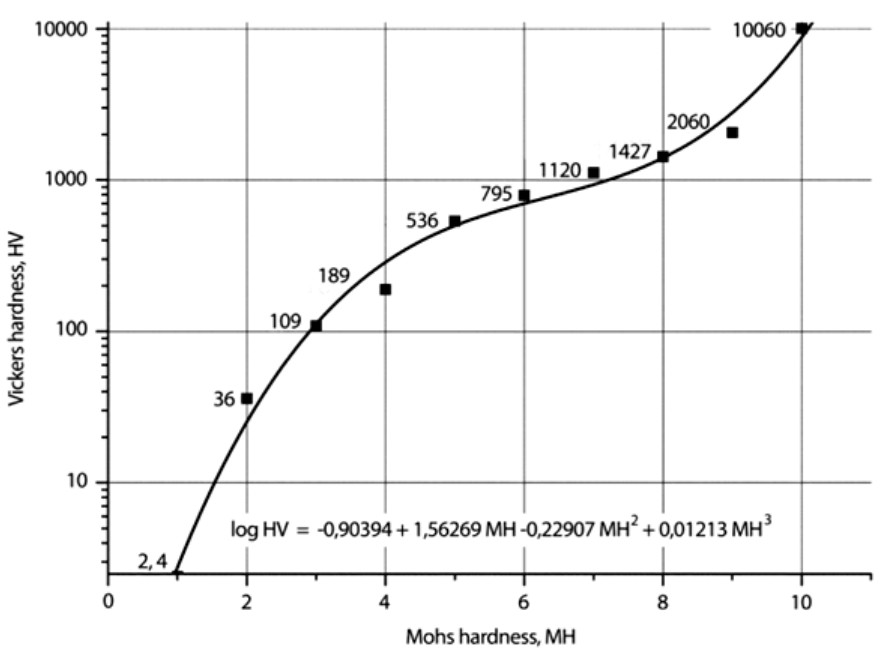
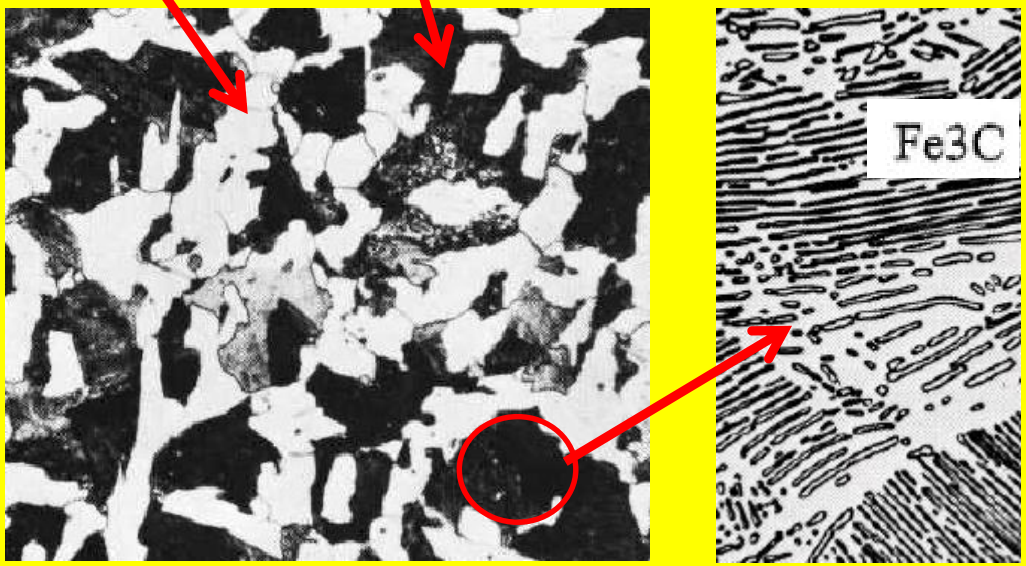


Table 2 Mohs hardness values

Minerals	Mohs hardness	Metals	Mohs hardness	Various materials	Mohs hardness
Talc	1	Lead	1.5	$Mg(OH)_2$	1.5
Gypsum	2	Tin, cadmium	2	Fingernail	2–2.5
Calcite	3	Aluminium	2.3–2.9	Cu_2O	3.5–4
Fluorite	4	Au, Mg, Zn	2.5	ZnO	4–4.5
Apatite	5	Silver	2.7	Mn_3O_4	5–5.5
Orthoclase	6	Antimony	3	Fe_2O_3	5.5–6
Quartz	7	Copper	3	MgO	6
Topaz	8	Iron	3.5–4.5	Mn_2O_3	6
Corundum	9	Nickel	3.5–5	SnO_2	6.5–7
Diamond	10	Chromium (soft)	4.5	Martensite	7
		Cobalt	5	MoC	7–8
		Os, Ta, W, Si, Mn	7	V_2C_3	8
		Chromium (hard, electrolytic)	8	TiC	8–9
		Case carburized steel	8	Sapphire (Al_2O_3)	9
				Mo_2C, SiC, VC, W_2C, WC	9–10
				Cubic boron carbide	10

Malzeme Yapısı ve Sertlik arasındaki ilişki



- ***Dağlanmış çelik numuneyi mikroskop altında incelediğimizde çeliğin düzensiz yapısını görebiliriz.***
- ***Yapının her bir bileşeni ayrı kompozisyona sahiptir ve dolayısıyla farklı fiziksel özelliklik gösterecektir.***

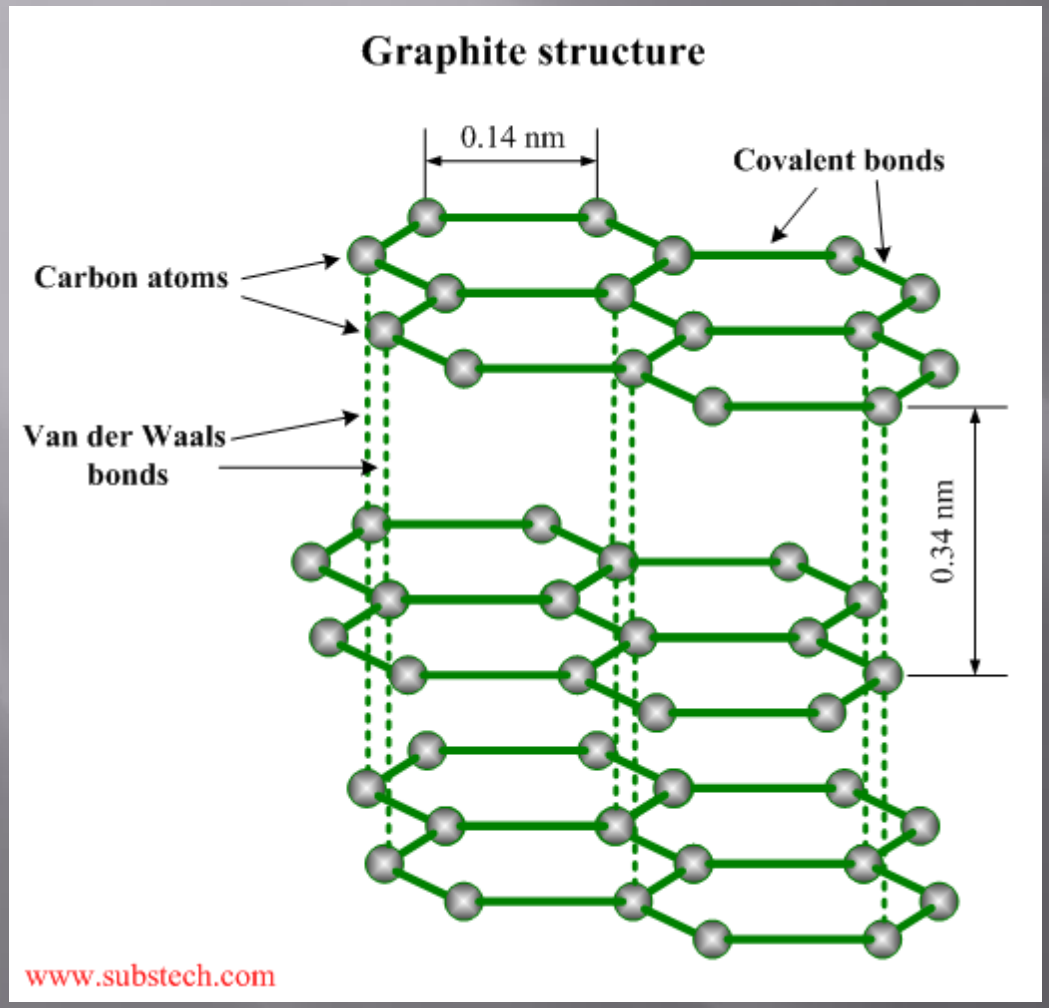
- ***Latisteki atomik paketlenme yoğunluğu ve atomlar arası bağ kuvveti malzemenin sertliği ile yakından ilişkilidir.***
- ***Kimyasal bağ kuvvetlerinin kristal yapıya olan etkisini Mohs skalasında görebiliriz.***

Table 3 Crystal structure of Mohs hardness scale reference minerals

Mohs hardness value	Reference mineral	Chemical composition	Crystal lattice type
1	Talc	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	Monocline layer lattice
2	Cement	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Monocline layer lattice
3	Calcite	$CaCO_3$	Trigonal or hexagonal layer lattice
4	Fluorite	CaF_2	Cubic lattice (ion bonding)
5	Apatite	$CaF(PO_4)_3$	Trigonal or hexagonal lattice (ion bonding)
6	Orthoclase	$KAlSi_3O_8$	Monocline lattice (SiO_4 frame)
7	Quartz	SiO_2	Trigonal or hexagonal lattice (SiO_4 frame)
8	Topaz	$Al_2F_2SiO_4$	Orthorhombic lattice (valency bonding)
9	Corundum	Al_2O_3	Trigonal or hexagonal lattice (valency bonding)
10	Diamond	C	Cubic lattice (valency bonding)

Malzeme Yapısı ve Sertlik arasındaki ilişki

- **Sertlik elektriksel ve manyetik özelliklerle de ilişkili olabilir.**



- **Katmanlar içerisinde güçlü kovalent bağ,katmanlar arasında zayıf Vander Waals bağı kristal kafesin farklı özellikler göstermesine neden olacak.**

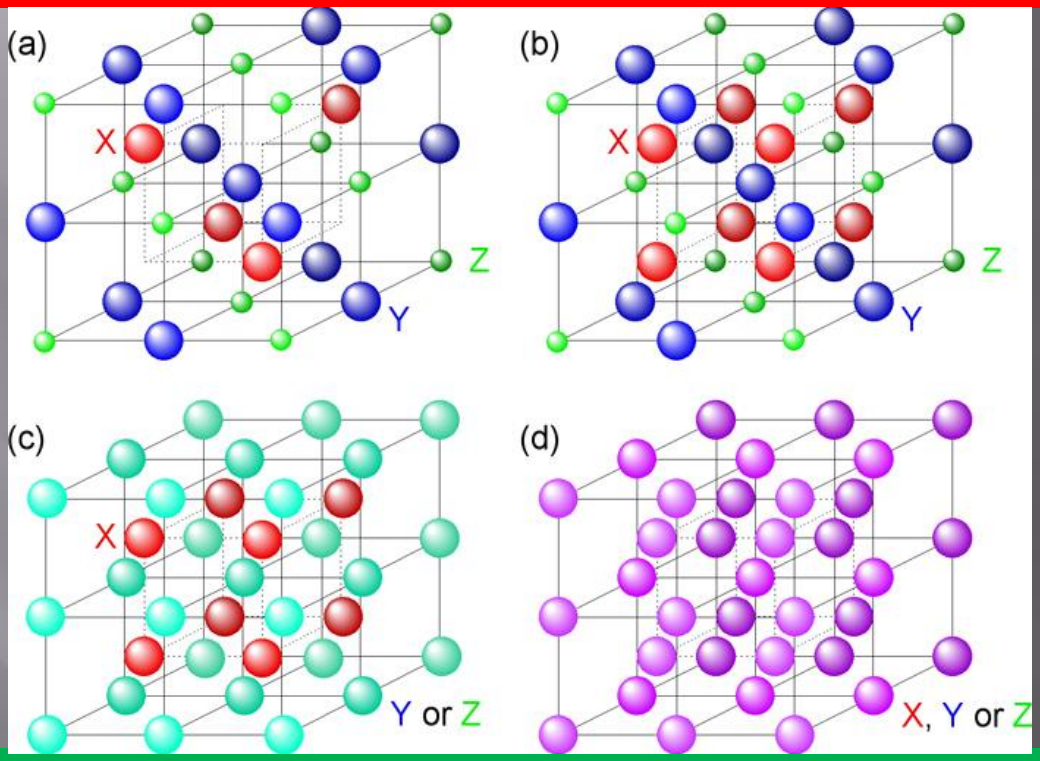
- **Düşük elektrik iletkenliğin olduğu katmanlarda yüksek sertlik, yüksek elektrik iletkenliğin olduğu düzlemler arasında düşük sertlik gözleniyor.**

- **Metallerde eletrik iletkenliği-sertlik arasında ters orantılı bir ilişki var.**

- **Grafit bu özelliği ile yağlayıcı olarak kullanılıyor.**

Malzeme Yapısı ve Sertlik arasındaki ilişki

➢ **Çeliklerin elektrik direncindeki artış çeliğin karbon içeriği ile doğru orantılıdır. Aynı şekilde sertlik de çeliğin içerisindeki karbon içeriği ile doğru orantılı.**



➢ **Alaşımlı metallerin sertliğinin saf haldeki sertliklerinden daha büyük olduğu bilinmektedir. Bunun nedeni birbirinden farklı moleküllerin bağ kuvveti birbirine benzer moleküllerin bağ kuvvetinden büyük olmasıdır. İşte bu da metallerin sertliğini artırmak için neden yabancı (farklı) element eklediğimizin nedenidir.**

Malzeme Yapısı ve Sertlik arasındaki ilişki

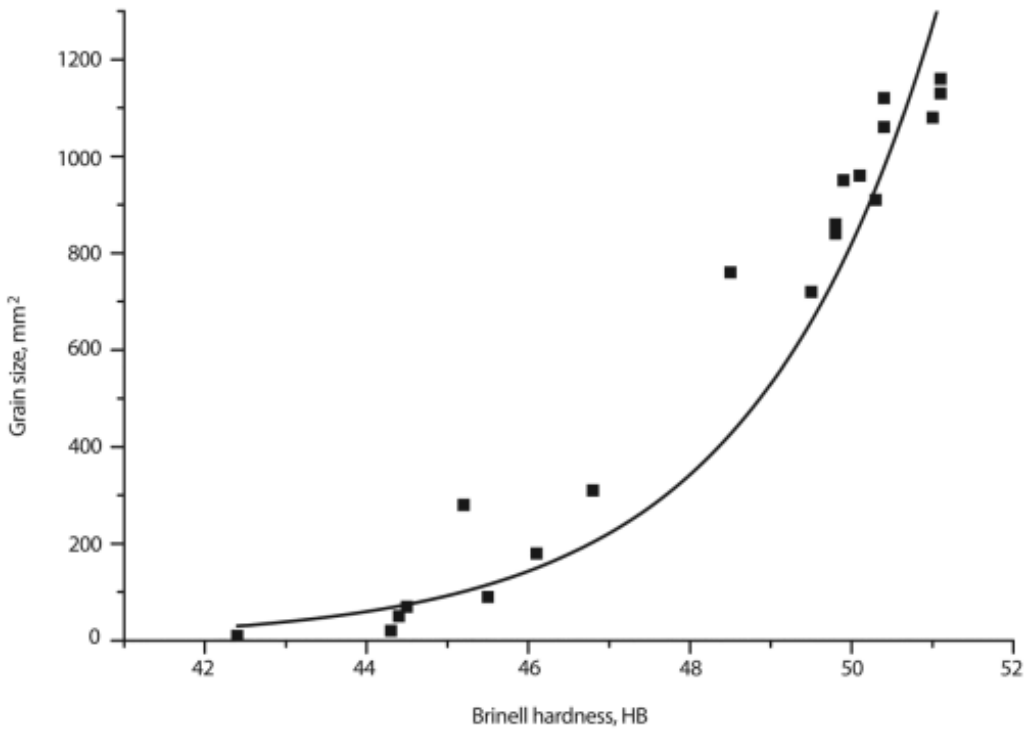
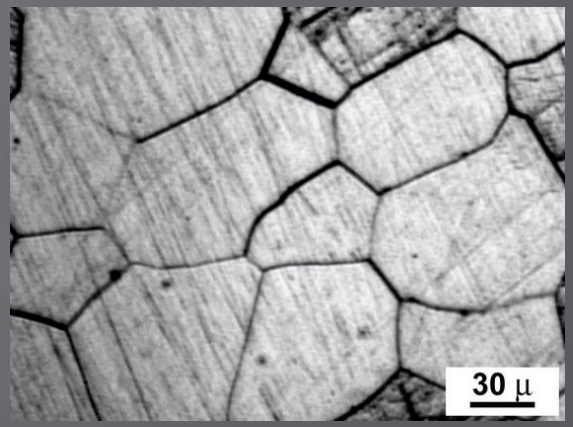
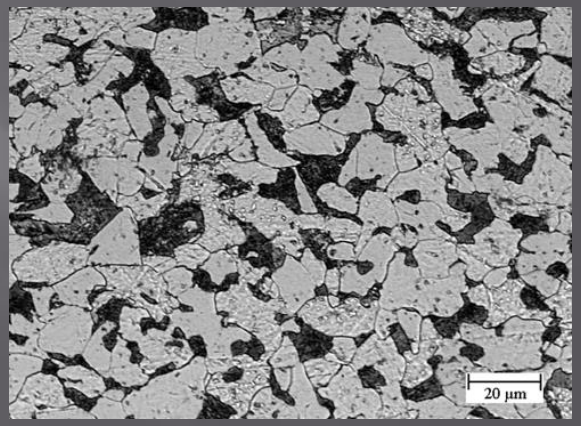


Fig. 2 Relationship between the Brinell hardness of copper and the grain size. Source: Ref 7





- ***Metalin sertliği tane boyutuna da bağlıdır.***
- ***Ne kadar küçük taneli o kadar büyük sertlik değeridir.***

Sertlik Ölçümünde Sertliğin Birimi

- **Sertlikte elde edilen değerler SI birimlerinde fiziksel niceliklerdir.**
- **Örneğin Brinell sertlik değerini N/mm^2 olarak belirtmek doğru değildir çünkü küresel uçta basınç dağılımı uniform değildir.**

Fiziksel değerlerin özellikleri:

1-bir oran belirtirler: 2 değer ya eşit ya da eşit değildir.

2-Toplama, Çıkarma: aynı tipte 2 değer toplanıp ya da çıkarıldığında yeni bir değer elde edilir.

3-Çarpma: pozitif bir sayı ile çarpıldıklarında yeni değer elde edilir.

Sertlik Ölçümünde Sertliğin Birimi

➡ Tek kural vardır: 50 HRC > 20 HRC

➡ 100 HB + 200 HB

Burada sertlik 300 HB olmaz çünkü sertlik skalası lineer değildir.

➡ 3 X 300 HV

Burada sertlik 300 HV'nin 3 katı değildir çünkü sertlik skalası lineer değildir.

Doğru

50 g = 50 X 1 g

↓

Birimdir

Yanlış

500 HV = 500 X 1 HV

↙

HV ölçüm prosesinin sembolüdür ancak ölçümün birimi değildir.

Malzemelerde Sertlik Ölçümü

Sertlik izafi bir ölçü olup batmaya, sürtünmeye, çizmeye, kesmeye ve plastik deformasyona karşı direnç olarak tarif edilir. Sertlik ölçümlerindeki değer malzemenin plastik deformasyona karşı gösterdiği dirençtir.

Sertlik ölçme konik veya küresel standart bir ucun malzemeye batırılmasına karşı malzemenin gösterdiği direnci ölçmekten ibarettir. Seçilen uç bir yük altında malzemeye batırıldığı zaman malzeme üzerinde bir iz bırakır. Malzemenin sertliği bu iz ile ters orantılıdır.

SERTLİK TESTLERİ

Sertlik ölçme yöntemleri:

-Brinell Sertlik Deneyi (HB)

-Vickers Sertlik Deneyi (HV)

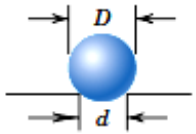
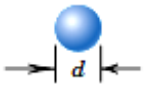
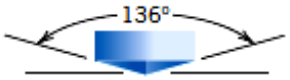
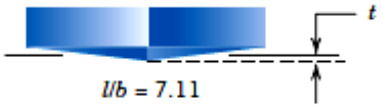
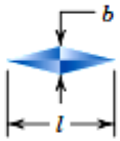
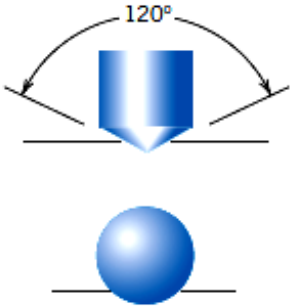
} İz alanı ölçülür

-Rockwell Sertlik Deneyi (HR) } İz derinliği ölçülür

- ✓Mikro Sertlik
- ✓Nano Sertlik

SERTLİK TESTLERİ

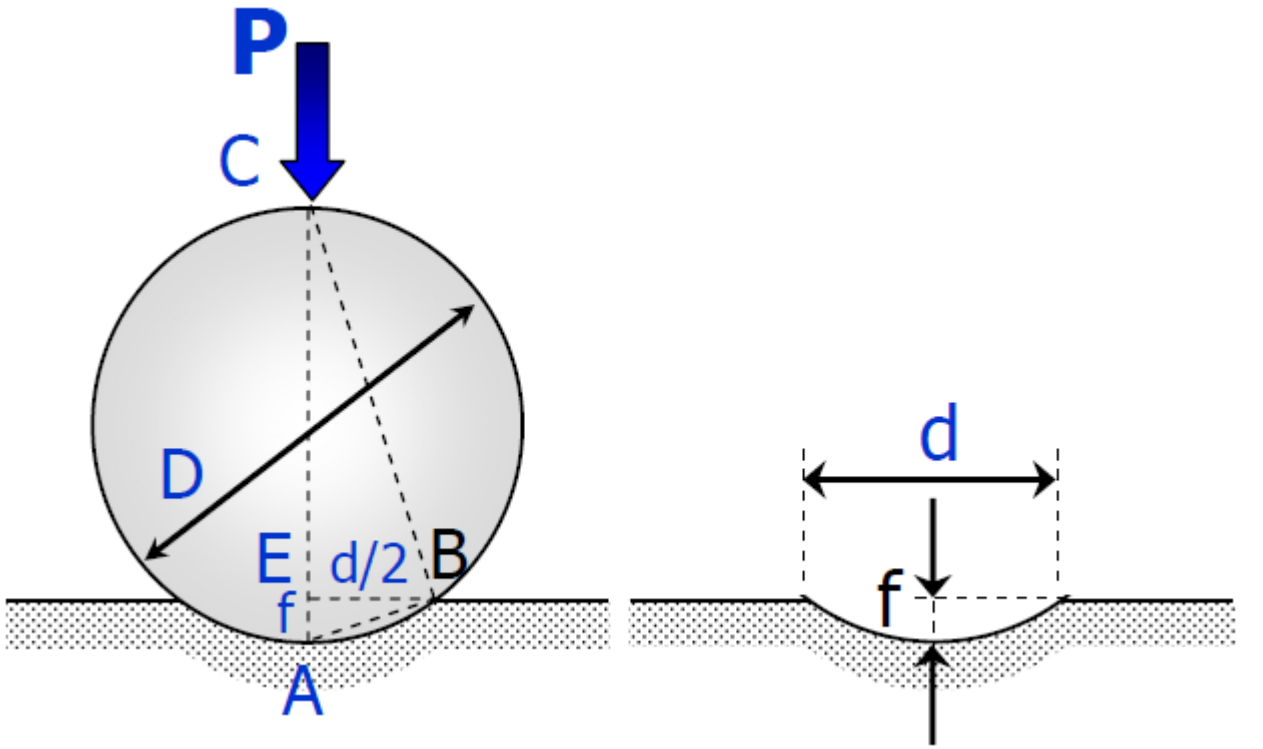
Table 6.5 Hardness-Testing Techniques

Test	Indenter	Shape of Indentation: Side View	Shape of Indentation: Top View	Load	Formula for Hardness Number[a]
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$\mathrm{HB} = \dfrac{2P}{\pi D[D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P	$\mathrm{HV} = 1.854P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$\mathrm{HK} = 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	Diamond cone; $\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}$ in. diameter steel spheres			60 kg, 100 kg, 150 kg: Rockwell 15 kg, 30 kg, 45 kg: Superficial Rockwell	

[a] For the hardness formulas given, P (the applied load) is in kg, while D, d, d_1, and l are all in mm.

Source: Adapted from H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, *Mechanical Behavior*. Copyright © 1965 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.

Brinell Sertlik Deneyi (BSD, HB):



$$BSD = \frac{2P}{\pi D\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)}$$

P : Kg cinsinden uygulanan yük

D : mm cinsinden bilya çapı

d : mm cinsinden izin çapı

Brinell Sertlik Deneyi (BSD, HB):

Standart deney şartlarında bilya çapı 10 mm, uygulanan yük 3000 kg, tatbik süresi 10-15 saniye kadardır. Diğer deney şartları için BSD değerinin altına test şartları yazılır.

62 BSD 5/500/30

- 30 saniyede batırılmış
- 500 kg yük uygulanmış
- 5 mm bilya çapı

Brinell Deneyi için numune şartları:

- Test edilecek parçanın kalınlığı meydana gelen iz derinliğinin 8 katından az olmamalıdır.

- İz merkezinin, numune kenarından olan uzaklığı iz çapının en az 2,5 katı ve en yakın iki izin merkezleri arasındaki uzaklık iz çapının en az 4 katı olmalıdır.

- Numene yüzeyi parlak ve düzgün olmalıdır.

- Kalıcı iz çapı 0,2D'den küçük ve 0,7D'den büyük olmamalıdır:

$$0{,}2D < d < 0{,}7D$$

Brinell Deneyi için numune şartları:

- İz çapı (d) en az 0,02 mm hassasiyetle ölçülmelidir. İz tam dairesel değilse birbirine dik doğrultudaki çaplar ölçülüp, ortalaması alınmalıdır.

- Brinell sertliği 450'den büyük olmayan malzemelerde sertleştirilmiş ve menevişlenmiş çelik bilya, sertliği 630'dan büyük olmayan malzemelerde metal karbür bilya kullanılır.

- 630'un üstündeki malzemelerde Brinell sertlik testi tavsiye edilmez.

Brinell Deneyinin Yapılışı:

- Brinell deneyinde kullanılan yükler standart yükler 500, 1500 ve 3000 kg'dır.
- Malzemenin sertliği arttıkça daha büyük yükler uygulanması gerekir.

- Uygulanan yük bakır,pirinç gibi yumuşak metaller için 500 kg
- Aluminyum alaşımları için 1500 kg
- Çelik ve demir alaşımları için 3000 kg

Brinell Deneyinin Yapılışı:

- Daha yumuşak olan metallerde 250, 150 veya 100 kg'lık yükler kullanılır.
- 10 mm standart ölçü bilyesinin dışındaki bilye çapları 5 ve 2.5 mm'dir.

Standart olmayan bu deneylerde standart deneylere yakın sonuçlar elde edebilmek için yük (P, kg) ve bilya çapı (D, mm) arasındaki bağıntı, standart deneylerde kullanılanlarla aynı olmalıdır.

Brinell Deneyinin Yapılışı:

- **5 mm çapında bir bilya üzerine 125 kg'lık bir deney yükü ile bastırılınca bulunan Brinell sertlik değeri, 10 mm çapındaki bilya üzerine 500 kg'lık deney yükünün bastırılması ile bulunan değere yakın sonuçlar bulunur:**

Yani ;

$$\frac{P}{D^2} = \frac{125}{5^2} = \frac{500}{10^2} = 5$$

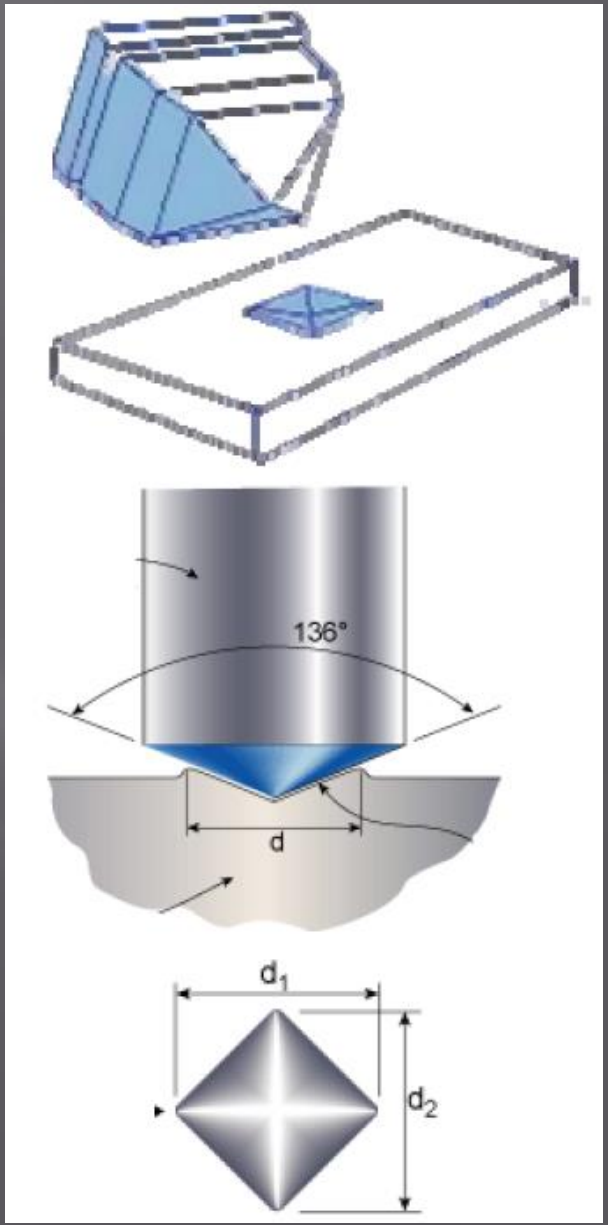
Vickers Sertlik Deneyi (VSD, HV)

Brinell sertlik deneyi, sertliği çoğunlukla 65-450 arasında olan yumuşak çelik veya yapı çeliğinin muayenesinde kullanılır.

Malzeme daha sert olunca deneyde kullanılan çelik bilyanın şekil değişimi de önem kazanır.

Bu nedenle daha değişik yöntemler kullanmak gerekir. Bunların en önemlisi Vickers sertlik deneyidir.

Bu yöntemde metal yüzeyine batıcı olarak kare kesitli ve tepe açısı 136° olan elmas piramit bir uç kullanılır



Vickers Sertlik Deneyi (VSD, HV)

Meydana gelen iz, taban köşegeni (d) olan kare piramittir ve tepe açısı 136 °. Vickers sertlik değeri, kg olarak ifade edilen deney yükünün (mm^2) olarak ifade edilen iz alanına bölümüdür. Geometrik yolla yapılan hesap neticesinde Vickers sertlik değeri bulunur.

$$VSD = \frac{2P\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2}$$

$$VSD = \frac{1.854 \times P}{d^2}$$

P : Kgf cinsinden uygulanan yük

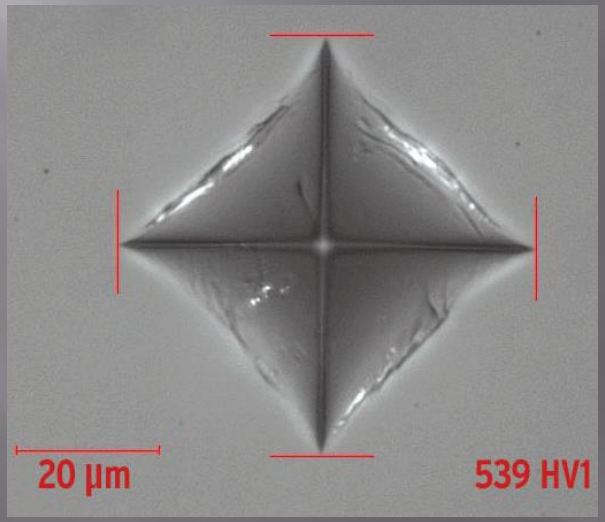
α : tepe açısı = 136 °

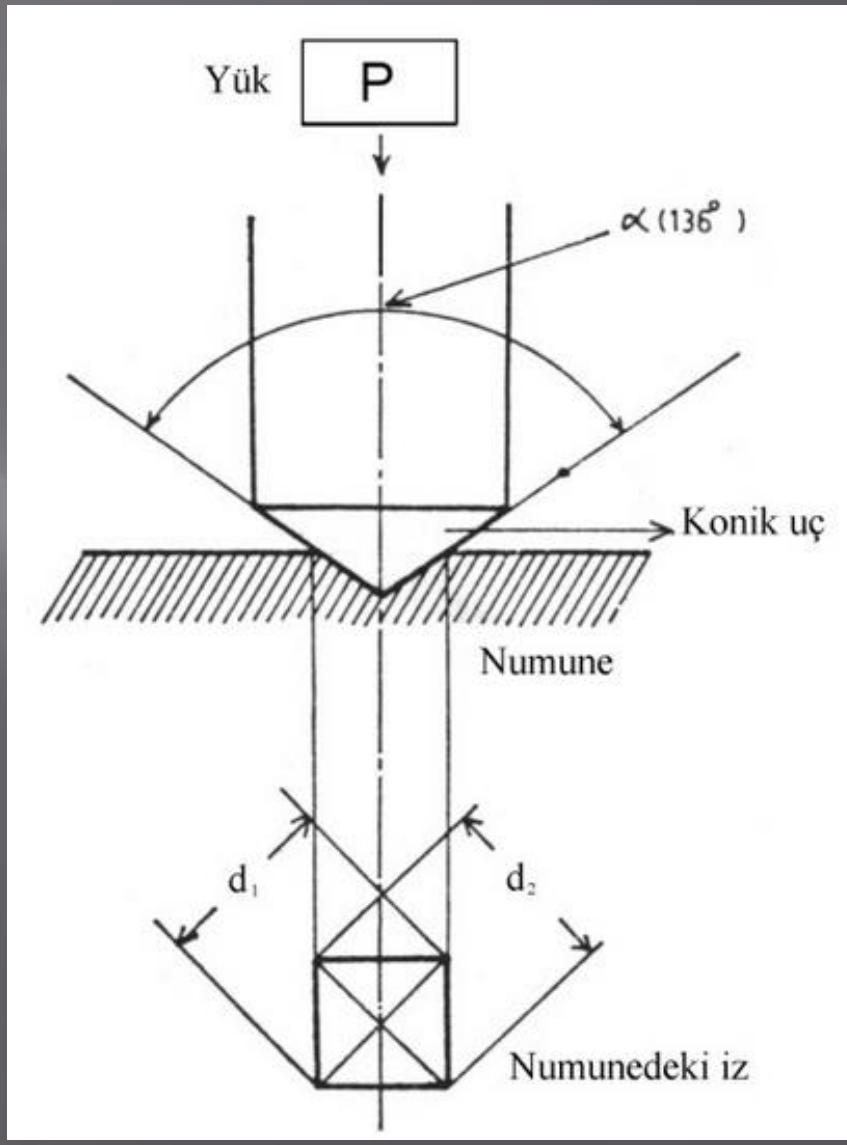
d : taban köşegeni

Vickers Sertlik Deneyi (VSD, HV)

Numune üzerinde meydana getirilen izin görüntüsü mikroskop yardımıyla ölçme ekranına aktarılır.

Piramidin bıraktığı izin köşegeni (d), her iki köşegen uzunluğunun milimetrenin 1/1000'i duyarlılıkta mikroskopla ölçülmesi ve ortalamasının alınması ile tespit edilir.





Vickers Sertlik Deneyi (VSD, HV)

- Yumuşak malzemelerden, çok sert malzemelere kadar geniş bir kullanım aralığı mevcuttur.
- Geniş çubuklardan saçlara kadar her ölçüde malzemeye uygulanabilir.
- Uygulama süresi 10-15 saniyedir.

- Gösterim şekli: 550 VSD/30/15; deney yükünün 30 kgf, uygulama süresi 15 saniye ve Vickers sertliğinin 550 olduğunu gösterir.

Vickers sertliği metallerin yanında seramik malzemelerin sertliğinin ölçümünde de güvenilir bir sertlik ölçüm metodudur.

Vickers Sertlik Deneyi (VSD, HV)

- 600'e kadar Brinell sertliği yaklaşık olarak Vickers sertliğine eşittir.
- Vickers sertliğinin birimi kgf/mm^2'dir.
- Vickers deneyi mikrosertlik ölçümünde de kullanılır.
- Köşegenlerin uçlarını tam olarak görebilecek şekilde parlatılmış olmalı.

Aynı malzemedeki farklı yük ve yükleme hızlarındaki vickers sertlik izleri görüntüsü

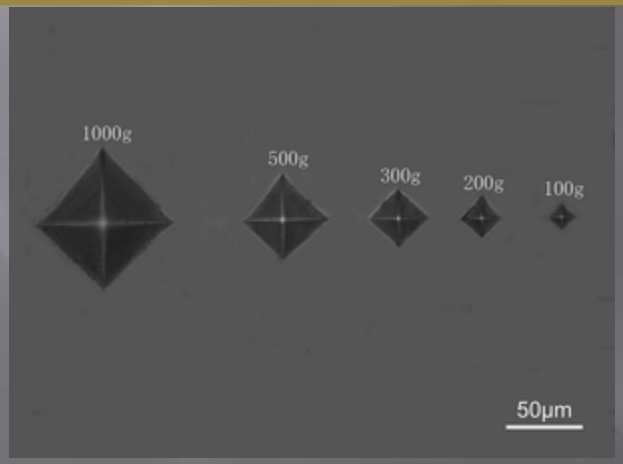
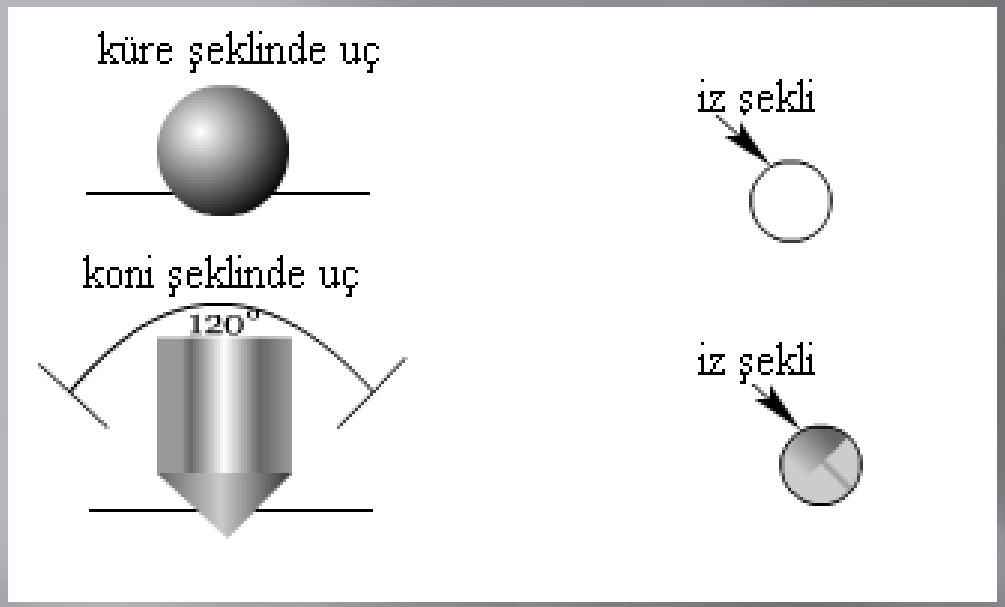


Figure 1. Group of Vickers indentations on enamel at different loads and times.

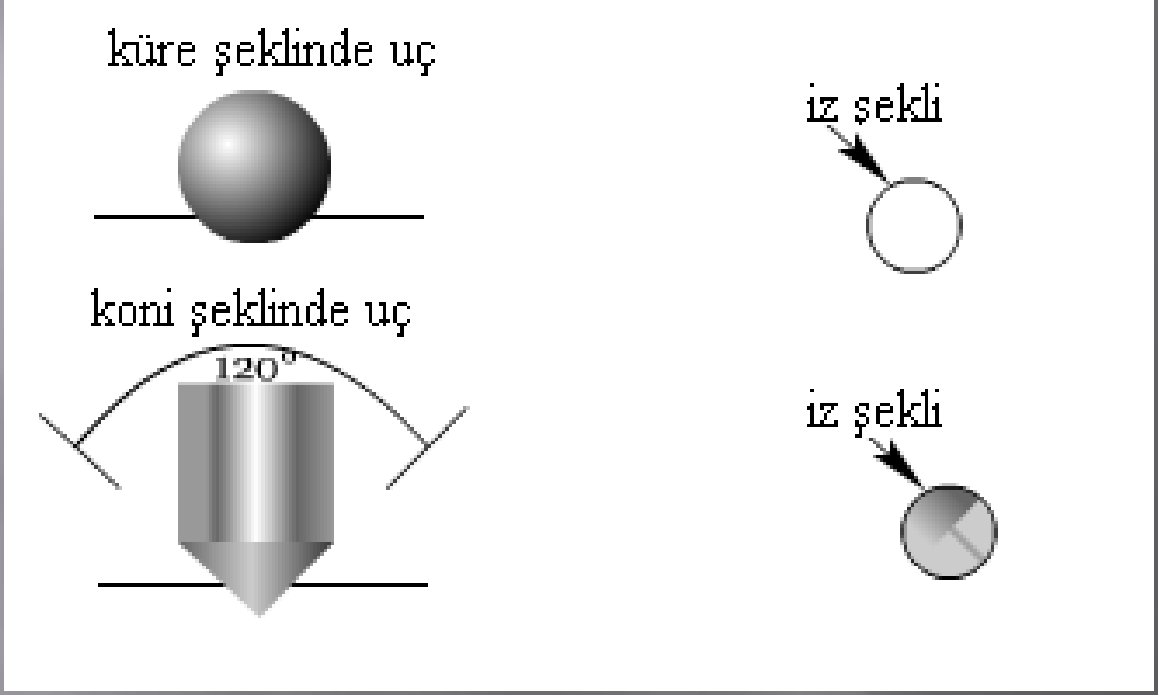
Rockwell Sertlik Deneyi (RSD, HR)



Rockwell sertlik deneyi (RSD), yapılmasının çok kolay olması ve özel bir ustalık gerektirmemesinden dolayı metallerin sertlik ölçümünde en yaygın kullanılan metottur.

- Rockwell deneyi için kullanılan batıcı uçlar belirli çaplarda çelik bilyalarla, konik elmas uçlardır.
- Rockwell sertlik değeri daima sembol harfle birlikte belirtilir. Bu harf batıcı ucun tipini, kullanılan yükün miktarını ve kadran üzerinde okunacak bölümü belli eder.

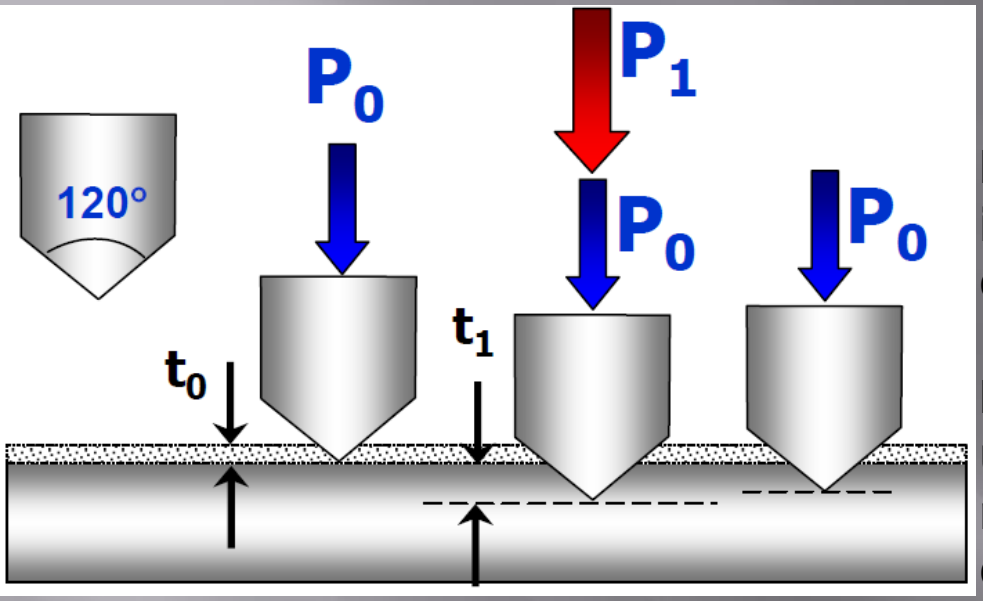
Rockwell Sertlik Deneyi (RSD, HR)



- Sertliği ölçülecek malzemenin yüzeyleri oksitlerden, girinti ve çıkıntılardan arındırılmış olmalıdır. En önemlisi yüzeyin pürüzsüz ve parlak olması istenir.

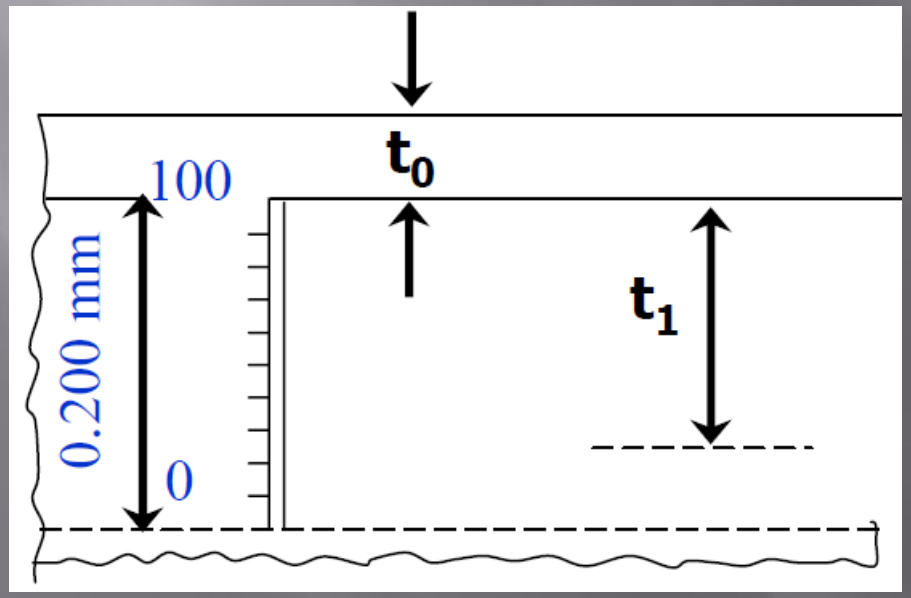
- **Prensip olarak en küçük bilya ile deney yapmak tercih edilir. Zira bilya çapı büyüdükçe deney hassasiyeti azalır. Ancak yapısı homojen olmayan yumuşak malzemelerde büyük bilya daha elverişli sonuçlar verir.**

Rockwell Sertlik Deneyi (RSD, HR)



Bu yöntemde batma derinliği ölçüleceği için yüzey pürüzlülüğü sonuçları etkileyebilir.

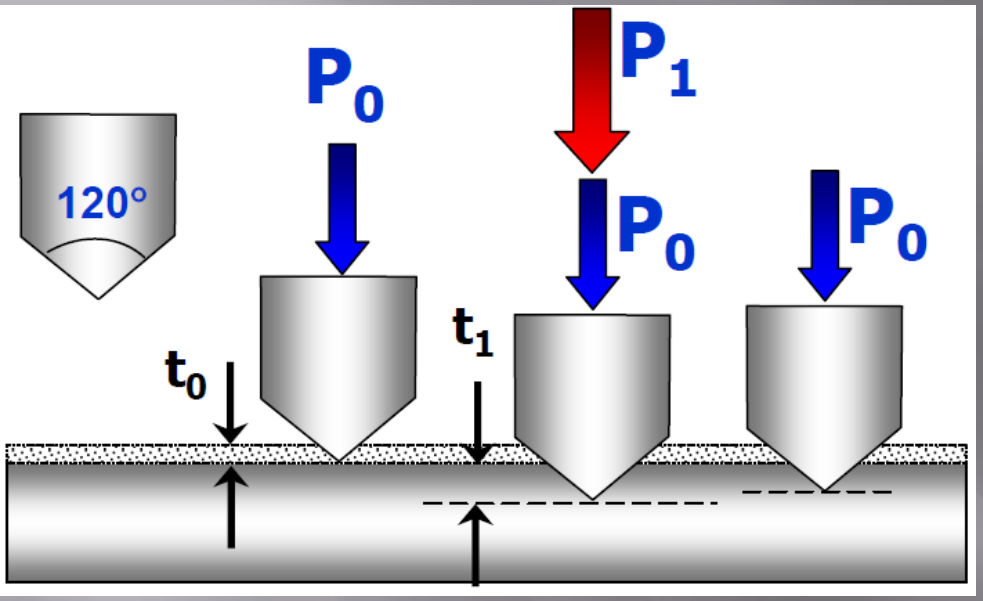
Bu sakıncayı gidermek için önce batıcı uç küçük bir yükle (P_0= ön yük) malzemeye daldırılarak alet sıfır düzeyine ayarlanır.

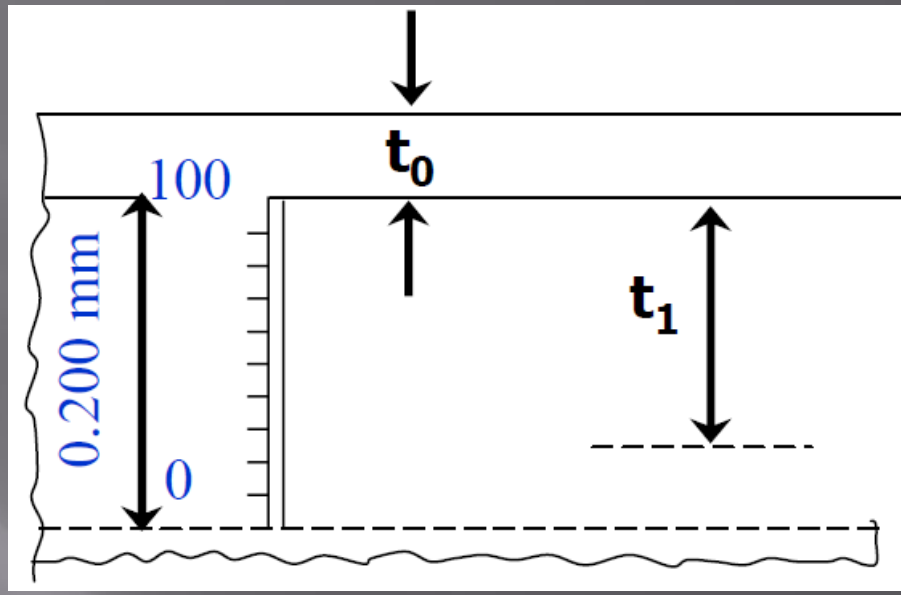


Daha sonra toplam yüke tamamlanacak şekilde ana yük (P_1) uygulanır.

Son olarak Ana yük (P_1) kaldırılır. Meydana gelen kalıcı izdeki derinlik artışı bulunarak mevcut göstergeden Rockwell Sertlik değeri okunur.

Rockwell Sertlik Deneyi (RSD, HR)





- **Rockwell Sertlik değeri boyutsuzdur.**
- **Ucun malzeme içine her 0.002 mm batışı bir sertlik değerinin düşmesi olarak alınır.**

Rockwell Sertlik Deneyi (RSD, HR)

Birçok farklı skala, farklı yük ve çeşitli uç kombinasyonlarının kullanımıyla en sertten en yumuşağa kadar tüm metal ve alaşımların sertliğinin tayin edilmesine olanak sağlar.

Skala	Batıcı uç	Ön yük F_0 (kg)	Büyük Yük Fi (kg)	Toplam Yük F (kg)	E
A	Elmas koni	10	50	60	100
B	1/16 inç çelik bilya	10	90	100	130
C	Elmas koni	10	140	150	100
D	Elmas koni	10	90	100	100
E	1/8 inç çelik bilya	10	90	100	130
F	1/16 inç çelik bilya	10	50	60	130
G	1/16 inç çelik bilya	10	140	150	130
H	1/8 inç çelik bilya	10	50	60	130
K	1/8 inç çelik bilya	10	140	150	130
L	1/4inç çelik bilya	10	50	60	130
M	1/4 inç çelik bilya	10	90	100	130
P	1/4 inç çelik bilya	10	140	150	130
R	1/2 inç çelik bilya	10	50	60	130
S	1/2 inç çelik bilya	10	90	100	130
V	1/2 inç çelik bilya	10	140	150	130

HRA : Cemented carbides, thin steel and shallow case hardened steel
HRB : Copper alloys, soft steels, aluminium alloys, malleable irons, etc.
HRC : Steel, hard cast irons, case hardened steel and other materials harder than 100 HRB
HRD : Thin steel and medium case hardened steel and pearlitic malleable iron
HRE : Cast iron, aluminium and magnesium alloys, bearing metals
HRF : Annealed copper alloys, thin soft sheet metals
HRG : Phosphor bronze, beryllium copper, malleable irons

HRH . : Aluminium, zinc, lead
HRK . . . . }
HRL . . . . }
HRM . . . .}
HRP . . . . }
HRR . . . . }
HRS . . . . }
HRV . . . . }

soft bearing metals, plastics and other very soft materials

Rockwell Sertlik Deneyi (RSD, HR)

Hem ön yükün hem de toplam yükün büyüklüğüne göre iki tip deney vardır:

- **1. Rockwell**
- **2. Yüzeysel Rockwell.**

2. Yüzeysel Rockwell

Ön yük= 3 kgf

Toplam yük = 15 kgf

Toplam yük = 30 kgf

Toplam yük = 45 kgf

Skala sembolü	Batıcı uç	Ana yük (kgf)
15N	Elmas	15
30N	Elmas	30
45N	Elmas	45
15T	1/16 inch küre	15
30T	1/16 inch küre	30
45T	1/16 inch küre	45
15W	1/8 inch küre	15
30W	1/8 inch küre	30
45W	1/8 inch küre	45

- **İnce saçların, karbürize ve nitrasyonlu yüzeylerin sertliklerinin ölçülmesinde kullanılır.**

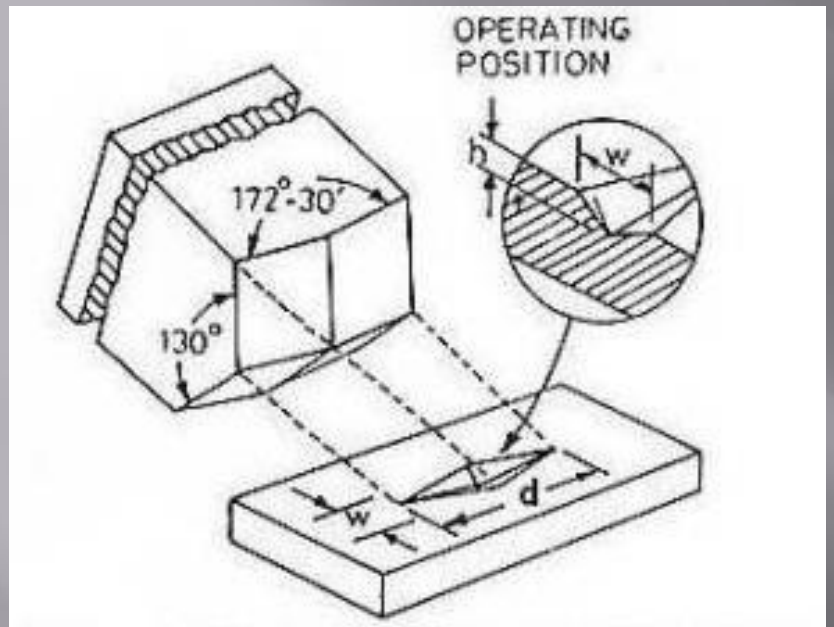
Mikro-Sertlik Deneyi:

- Uç otomatik olarak numuneye batar ve 20 saniye sonra otomatik olarak geriye döner

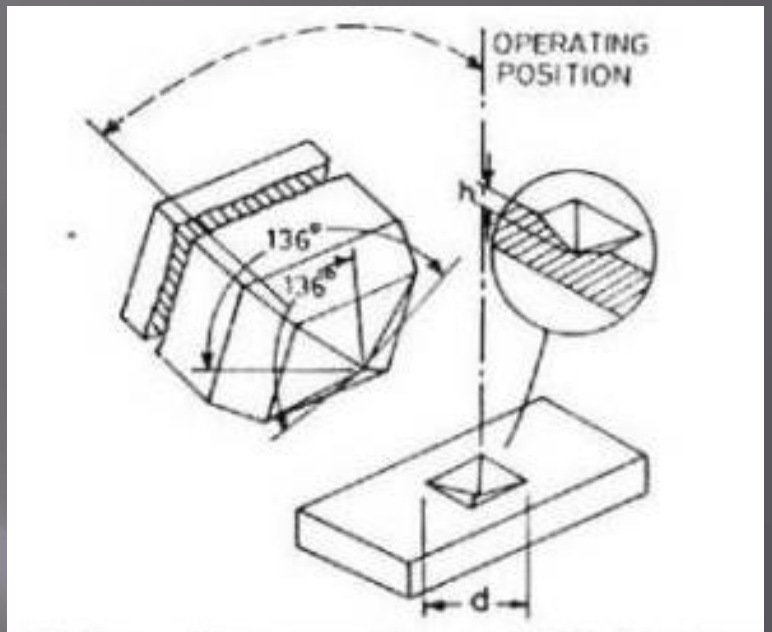
- Bu yöntem özellikle çok küçük numunelerin ve ince saçların sertliklerinin ölçülmesinde elverişlidir.
- Karbürize, dekarbürize, nitrürlenmiş ve kaplanmış malzemelerin sertliklerinin ölçülmesinde kullanılır.
- Metalik alaşımların fazlarının sertlik ölçümlerinde
- Cam, seramik gibi gevrek malzemelerin ölçülmesinde
- Segregasyonların ölçülmesinde
- Deney malzemesinin sertliğine göre seçilen yükler için batıcı ucun malzemeye girdiği derinlik hiçbir zaman 1 mikronu geçmez.

Mikro-Sertlik Deneyi:

Kullanılan uç ve yükler



Knoop Diamond Pyramid Indenter

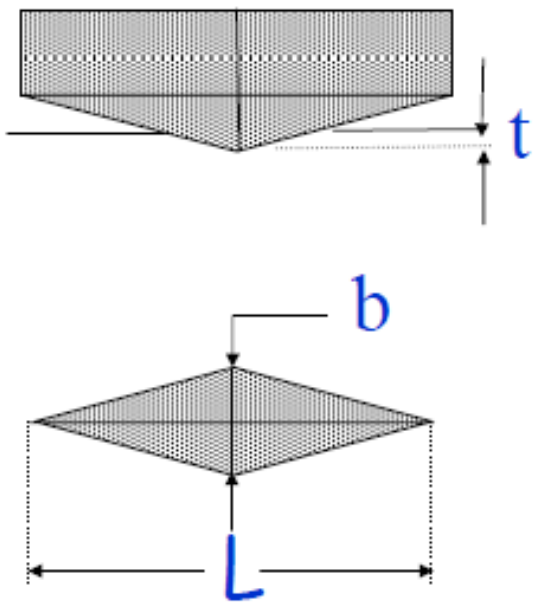


Vickers Diamond Pyramid Indenter

- **Mikro sertlik deneyinde 25 gr'dan 10000 gr'a kadar yük tatbik etmek mümkün.**
- **En uygun yük köşegenlerin uzunluklarının kolayca ölçülebilecek şekilde olmalıdır.**

Mikro-Sertlik Deneyi:

Knoop Sertliği



$$L/b = 7.11$$

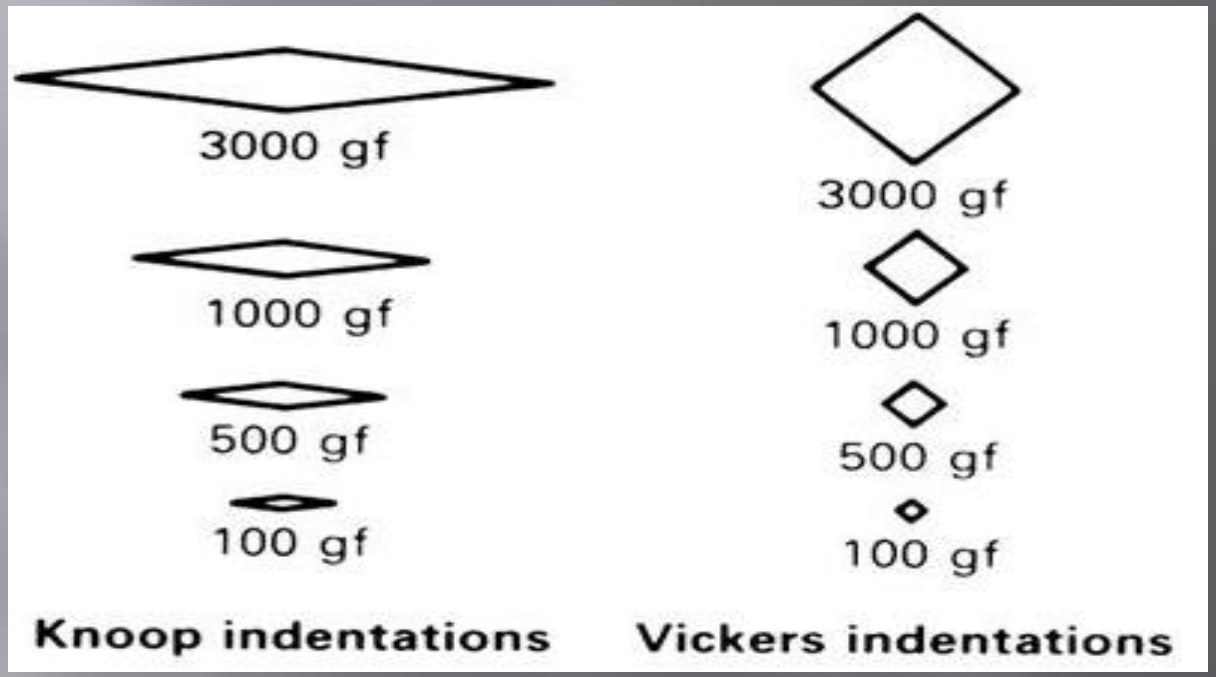
$$b/t = 4.00$$

- Bu deneyde tepe açısı 130º ve 173º 30’ olan piramit şekilli elmas bir uç malzeme üzerine bastırılır.
- Bir boyutu diğerinin yaklaşık olarak 7 katı olan bir iz oluşur.
- Malzemenin sertliği izin derinliği ölçülerek bulunur.
- Malzeme üzerine uygulanan yük genellikle 1 kgf’den daha azdır. Batıcı uç yaklaşık olarak 0.01 ile 0.1 mm arasında dört yanlı bir iz bırakır.

$$KSD = \frac{14.2P}{L^2}$$

- Sertlik değerinin belirlenmesi için uzun köşegenin ölçülmesi yeterlidir.

Mikro-Sertlik Deneyi:
Knoop Sertliği



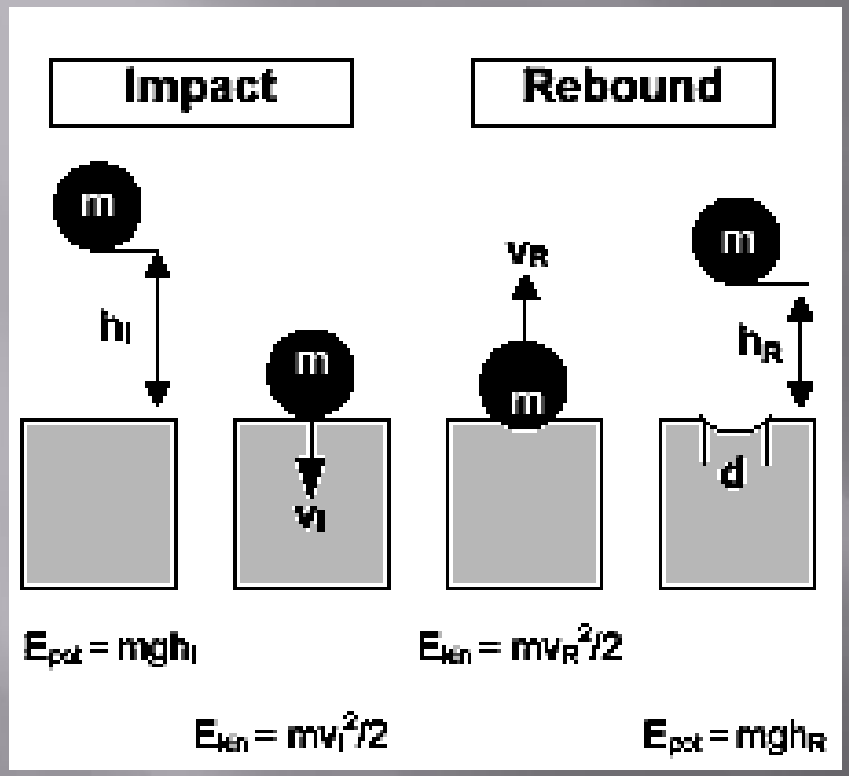
- **Uzun köşegen daha hassas ölçüm sağlar çünkü Vickers de 2 köşegenin ortalaması alınarak sertlik bulunurken Knoop da tek köşegenden hesaplanır.**
- **Ayrıca ince filmlerin ve yüzeylerin sertlik ölçümlerinde uzun kenardan dolayı Vickers'e göre daha az derine batarak hassas ölçüm sağlar.**

Endüstride kullanılan farklı sertlik ölçme yöntemleri

Şimdiye kadar bahsedilen sertlik ölçme yöntemleri “statik sertlik ölçme yöntemleri” olarak adlandırılır. Bu yöntemlerde numunelerin hazırlanması gerekir. Endüstride sertlik ölçme işleminin daha seri ve daha hızlı yapılması istenir. Bazı durumlarda parçadan numune çıkarma imkanı yoktur ve olduğu yerde ölçülmesi gerekir. Bu tür sertlik ölçme yöntemlerine ise “dinamik sertli kölçme yöntemleri” denir

Çalişma prensibine göre iki ana grupta toplamak mümkün:
1- Darbe etkisi ile sertlik ölçen cihazlar
2- Sıçrama miktarı ile sertlik ölçen cihazlar

1- Darbe etkisi ile sertlik ölçen cihazlar: Poldi Yöntemi



Brinell değerleri hesaplanır ancak kuvvet darbe şeklinde uygulanır. Batıcı uç genellikle çelik bilya olup darbe etkisi ile yüzeyde bir iz bırakır. İz çapı ölçülüp statik Brinell sertlik değerine geçilir.

2- Sıçrama miktarı ile sertlik ölçen cihazlar: Shore Testi

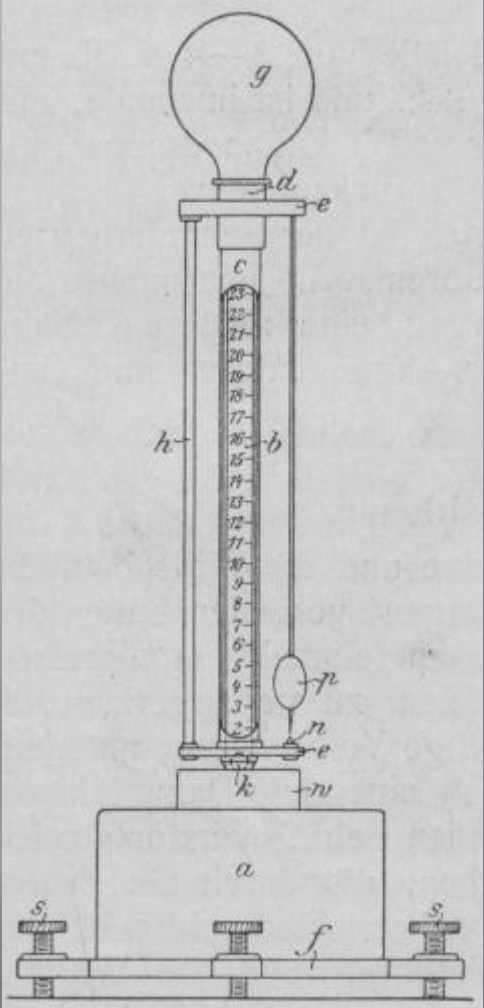
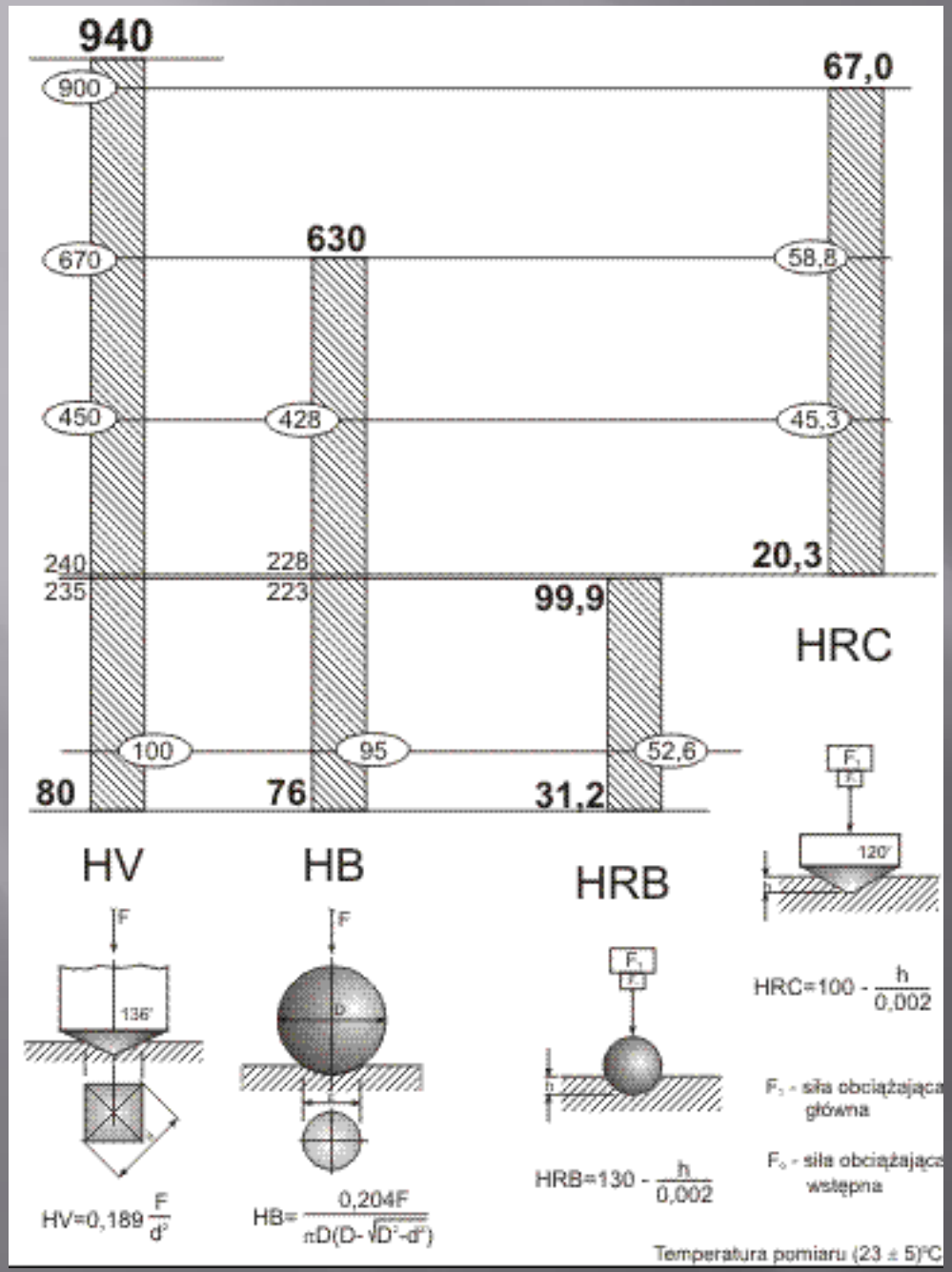


Fig. 1.

Belirli bir yükseklikten bırakılan küçük bir ağırlık numune yüzeyinde daha çok elastik elastik bir deformasyon yaparak geriye sıçrar. Sıçrama miktarı, düşen cismin numuneye çarmasından sonraki elastik enerji miktarı ile orantılı olup, sertlik ölçmede kriter olarak kullanılmaktadır. Yumuşak malzemelerde sıçrama daha az, sert malzemelerde sıçrama daha fazla olacaktır.



Vickers Sertlik Değeri	Brinell Sertlik Değeri 10 mm tungsten karbür uç	Rockwell Sertlik Değeri	
-	Yük 3000 kg	100 kg yük ile B skalası	150 kg yük ile C skalası
940	-	-	68.0
920	-	-	67.5
900	-	-	67.0
880	(767)	-	66.4
860	(757)	-	65.9
570	535	-	53.6
560	525	-	53.0
400	379	-	40.8
390	369	-	39.8
380	360	(110.0)	38.8
370	350	-	37.7
360	341	(109.0)	36.6
275	261	-	26.4
270	256	(102.0)	25.6
170	162	85.0	(3.0)
160	152	81.7	(0.0)
150	143	78.7	-
100	95	56.2	-
95	90	52.0	-
90	86	48.0	-
85	81	41.0	-

Nano Sertlik

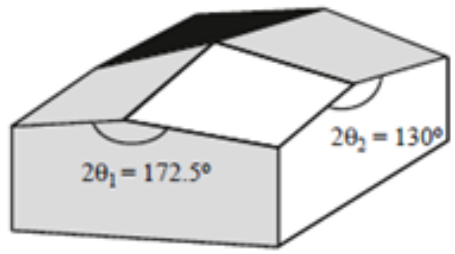


Fig. 2.4 (a) Geometry of a Knoop indenter.

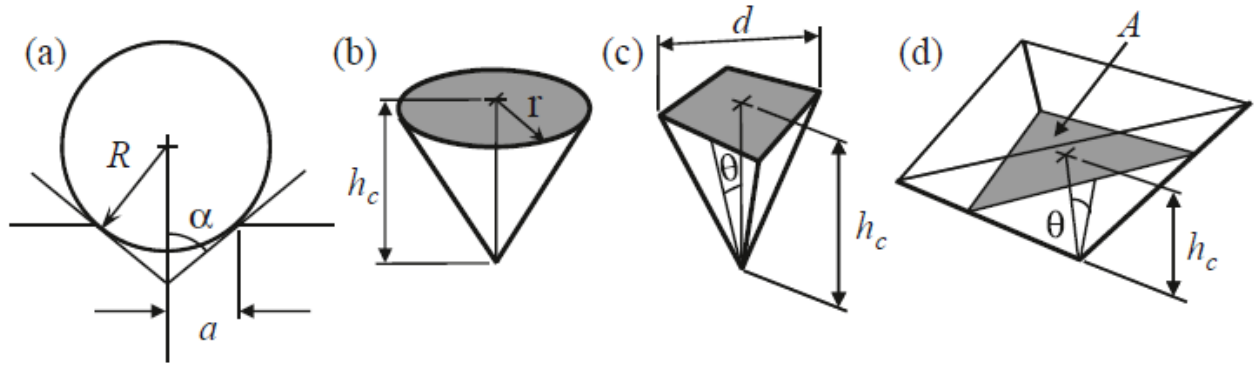


Fig. 2.2 Indentation parameters for (a) spherical, (b) conical, (c) Vickers, and (d) Berkovich indenters (not to scale)

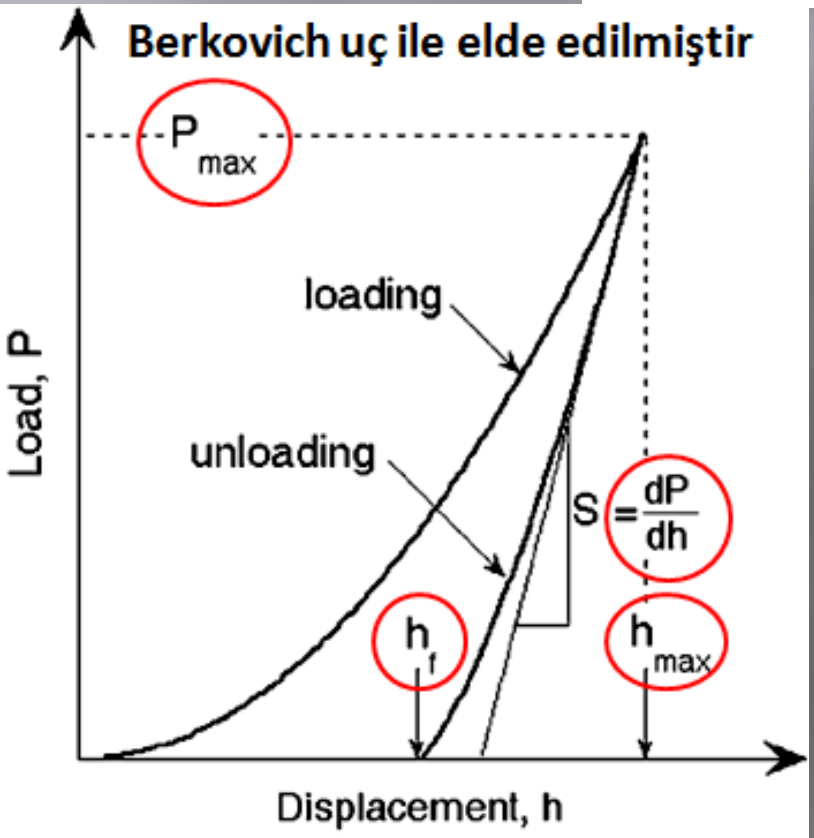


FIG. 1. Schematic illustration of indentation load–displacement data showing important measured parameters (after Ref. 1).

P-h eğrisinden 3 özelliğin ölçülmesi gerekmektedir:

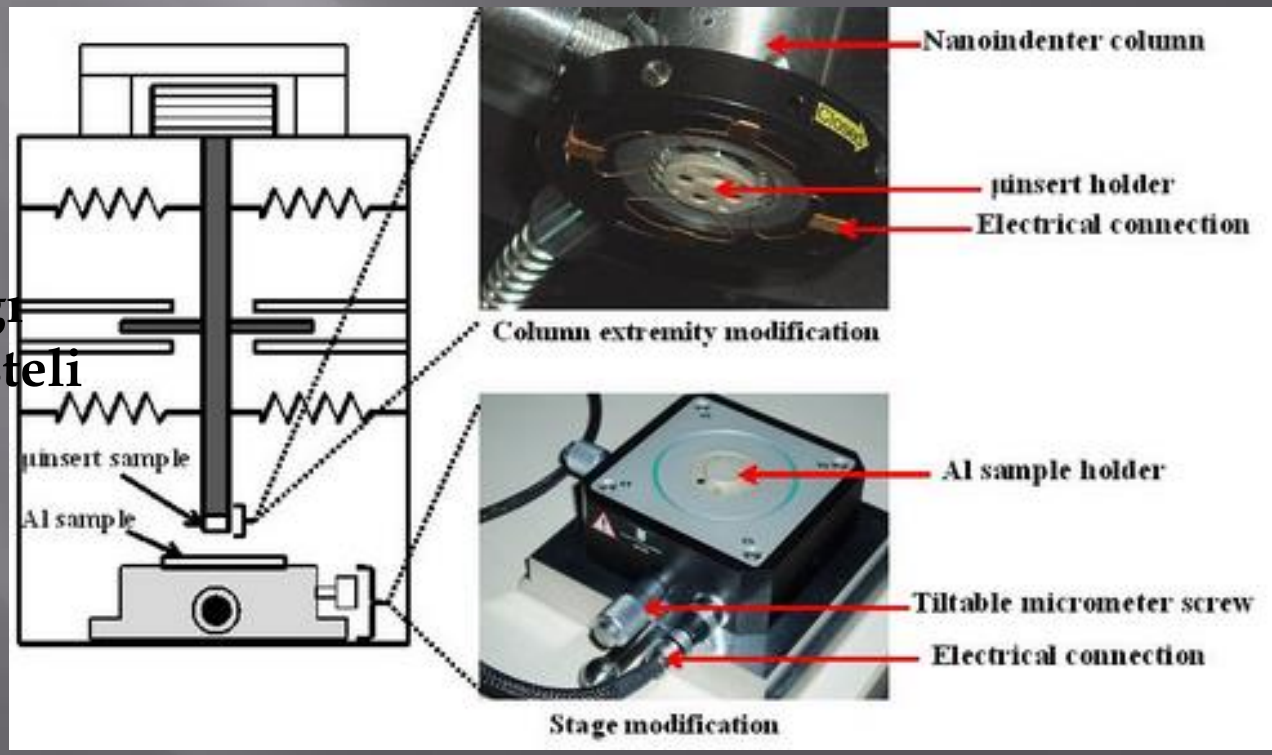
P_{max}: Maksimum yük
h_{max}: maksimum yer değişimi
dP/dh: yükün kaldırıldığı andaki yüksüz eğrinin eğimi (*contact stiffness*)

Sertlik ve E. Modülün doğruluğu bu 3 değerin ne kadar hassas ölçüldüğüne ve yük kaldırıldıktan sonraki kalıcı derinliğin, h_f mesafesine bağlıdır.

Nano Sertlik

Nano sertlik ile malzemelerin sertlik ve elastik modüllerinin yanında batıcı ucun izinin belirlenmesine gerek kalmadan batma derinliği ve yük arasındaki ilişkilerden diğer mekanik özellikler belirlenebilmektedir.

- **Nano-sertlik**
- **Elastik modül**
- **Farklı sıcaklıklardaki özellikler**
- **Sürtünme katsayısı**
- **Adhezyon**
- **Kırılma Tokluğu**
- **Sürünme**
- **Yüzey Kuvvetleri**
- **Gerinme Hızı duyarlılığı**
- **Gerinme Sertleşmesi Üsteli**
- **Darbe Testi**
- **Artık Gerilmeler**



Kırılma Tokluğu

Nanoindentation testi geleneksel testlerin mantığına benzer şekilde kırılma tokluğunun belirlenmesinde kullanılabiliyor. Bu yöntemde yüzeydeki çatlağın boyutundan kırılma tokluğu belirleniyor.

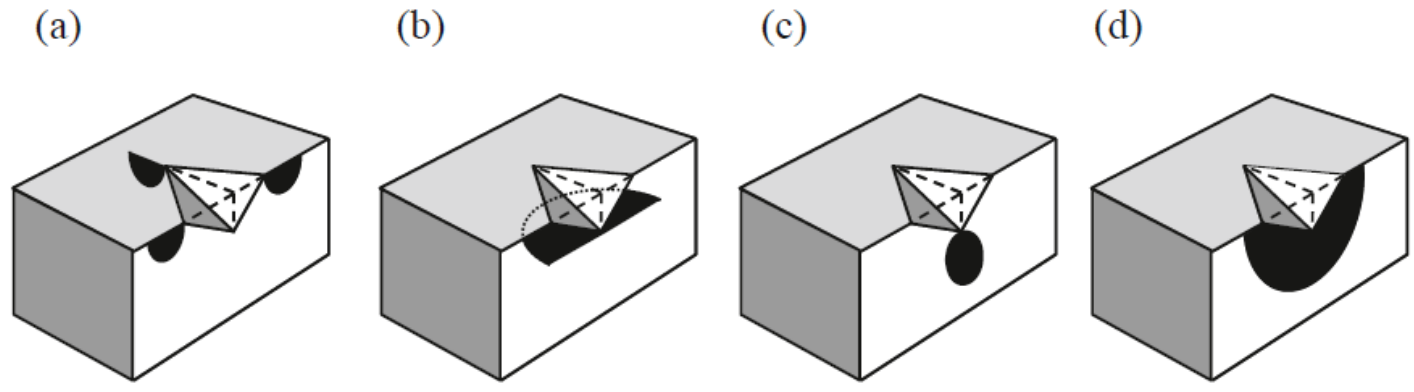


Fig. 9.2 Crack systems for Vickers indenter: (a) radial cracks, (b) lateral cracks, (c) median cracks, (d) half-penny cracks (after [13])

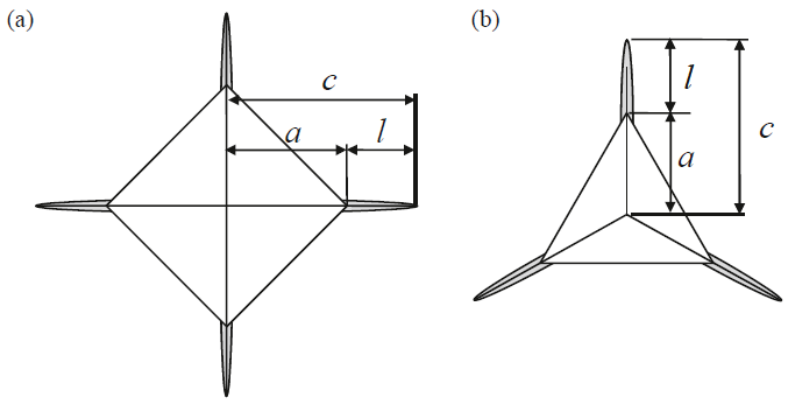
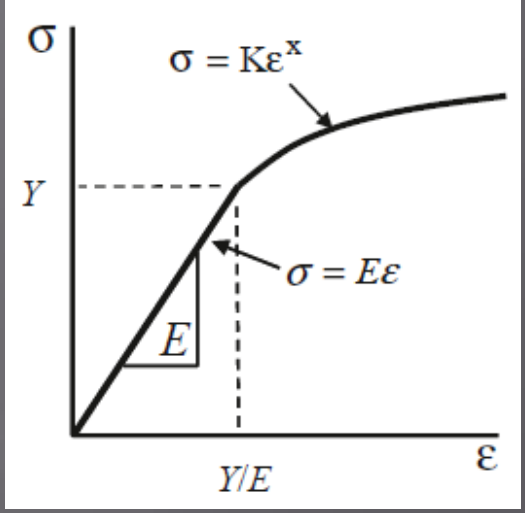


Fig. 9.3 Crack parameters for Vickers and Berkovich indenters. Crack length c is measured from the center of contact to end of crack at the specimen surface (after [13])

Pekleşme Üsteli

Elastik- tam plastik davranış



Pekleşme gösteren davranış

Shinohara, Yasuda, Yamada ve Kinoshita piramit batıcı uçla bakır, aluminyum ve nikel üzerine yaptıkları araştırmalarda yük ile pekleşme üsteli arasında bağıntı kurdular.

Pekleşme göstermeyen metalin sertliği →

$$\frac{H(P)}{H_o(P)} = -0.83x + 0.95$$

Ahn and Kwon, küresel uçla yaptıkları deneyler ile gerçek temas çap ile pekleşme üsteli arasında bağıntı kurdular.

Batıcı uç yarıçapı

$$a = \frac{5}{2}\left(\frac{2-x}{4+x}\right)\left(2Rh_c^* - h_c^{*2}\right)$$

Gerçek temas yarıçapı

Pekleşme üsteli

Temas derinliği