

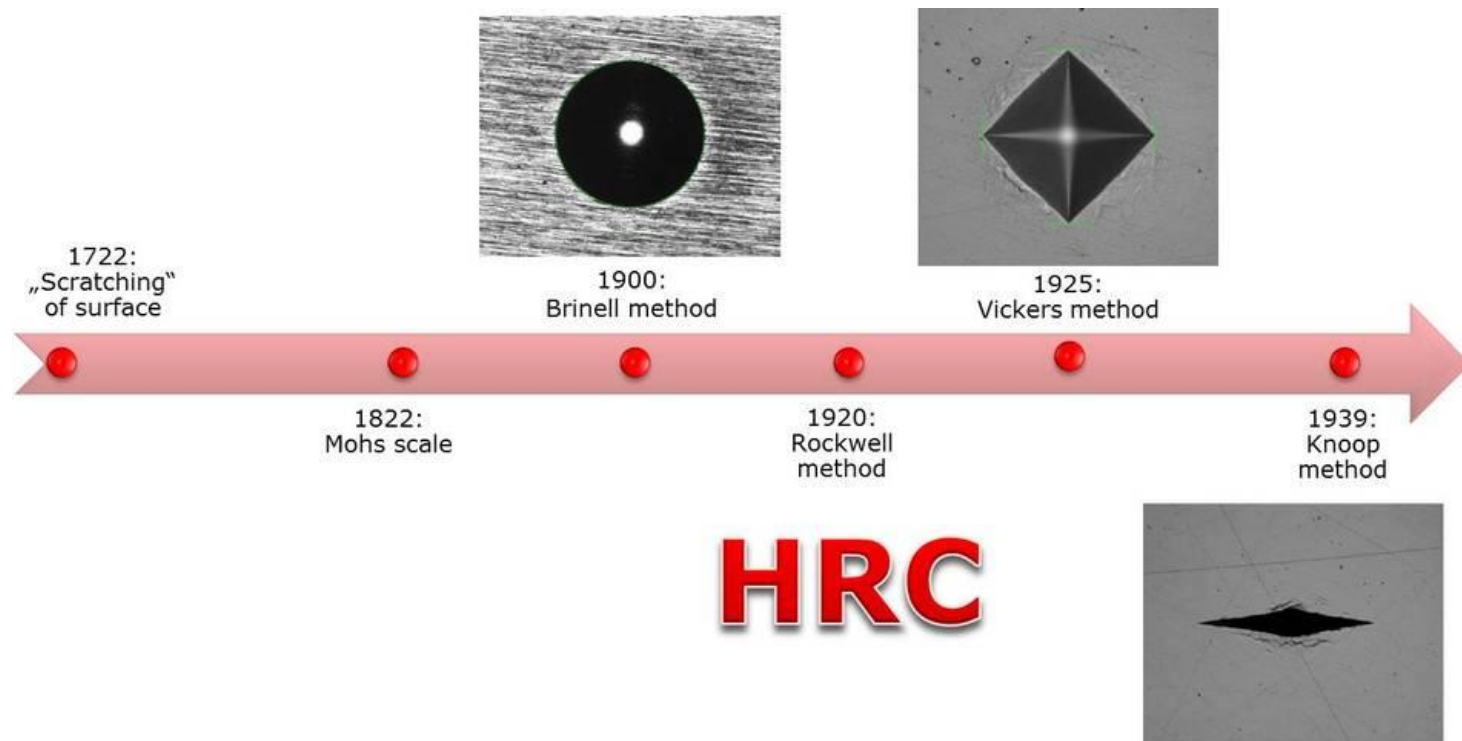


METAL ESASLI MALZEMELERİN MEKANİK TESTLERİ

SERTLİK TESTLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN

TARİHÇE





1722: R. A. Réaumur, çelik kullanarak minerallerin yüzeyinin "çizilmesi" ile sertliklerini tayin eden yöntem geliştirdi.

1822: Mineral testi için Mohs ölçeği icat edildi. Bu, her bir malzemenin bir sonraki sert malzeme kullanılarak çizilebileceği on noktalı bir çizilme sertlik ölçeğidir. Mohs sertlik değerleri günümüzde hala mineralojide kullanılmaktadır, ancak teknik malzemelerin (metallerin) sertliğini belirlemek için uygun değildir. Bireysel sertlik adımları nispeten büyüktür ve farklı aralıklara sahiptir.

1900: J. A. Brinell, daha sonra Brinell yöntemi olarak bilinen bir küresel ucun batması ile sertlik ölçen testi geliştirdi.

1920: S.R. Rockwell, gemilerini test etmek için ön yükleme yöntemini geliştirdi.

1925: Vickers yöntemi İngiltere'de R. Smith ve G. Sandland tarafından icat edildi. Mikro sertlik testlerinin yapılmasına da olanak sağlayan bir test yöntemidir.

1939: F. Knoop, C. G. Peters ve W. B. E. Emerson, Ulusal Standartlar Bürosu'nda (ABD) Knoop yöntemini geliştirdi.



Mühendisler ve metalürjistler uzun süredir malzemenin mekanik özelliklerini belirleme anlamında sertlik ölçümü gerçekleştirirler. 1822’de malzemelerin yüzeylerinin bir elmasa sürtülmesi ve bunun sonucunda oluşan çizgiğin genişliğinin ölçülmesi prensibi ile sertlik ölçümü gerçekleştirilirdi ^[226]. Bu yöntemi ilk olarak F. Mohs kullanmış ve standart olarak belirlediği 10 adet malzemeyi 1’den 10’a kadar sıralayarak Mohs Sertlik Ölçeğini oluşturmuştur. Bu referanslardan en yumuşağı 1 Mohs değerinde olan Talk (Talc), en sert olanı ise 10 Mohs sertlik değerine sahip olan ve doğal olarak en sert malzeme olarak bilinen Elmas’tır. 1900’de J. A. Brinell sert malzemedan yapılmış bilyenin malzeme yüzeyine belirli bir kuvvet ile bastırılarak iz oluşturması ve iz büyüklüğünün ölçülmesi esasına dayanan Brinell sertlik ölçme yöntemini ortaya koyar ^[226]. Brinell sertliğine alternatif olarak ortaya çıkan Vickers sertliği olarak anılan piramit şekilli ucun kullanılarak iz oluşturma yöntemi ise 1924 yılında R. L. Smith ve G. E. Sandland tarafından geliştirildi ^[226]. Ucun malzeme içine dalma miktarının ölçümü ile gerçekleştirilen ve dünyada en çok kullanılan Rockwell sertlik ölçme yönteminin fikri 1908’de Paul Ludwik tarafından ortaya atılmış patenti ise Hugh M. Rockwell ve Stanley P. Rockwell tarafından 1919 yılında alınmıştır ^[226].

Sertliğin Tanımı

Sertlik, en genel ve en çok kabul edilen şekliyle, malzemenin deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Bu tanıma göre gerçekleştirilecek sertlik ölçümünün iki adımdan oluştuğu düşünülebilir. Birincisi, sertliği ölçülecek malzemenin yüzeyi üzerinde standart koşullar altında ve standart yöntemler ile deformasyon (iz) oluşturmak, ikincisi ise, malzemenin oluşturulan bu deformasyona karşı direncinin büyüklüğünü (iz büyüklüğünü) ölçmektir. Bu durumda deformasyon (iz) ne kadar küçük ise malzeme o kadar sert, ne kadar büyük ise malzeme o kadar yumuşaktır.



Sertlik Ölçeğinin Oluşturulması

Sertlik ölçümü standart bir metodun uygulanması sonucu oluşan iz büyüklüğünün ölçümü ile gerçekleştirilir ve en genel haliyle uygulanan kuvvetin oluşan izin alanına oranı olarak ifade edilir. Genel anlamda sertlik aşağıdaki deneysel formül ile hesaplanabilir:

$$\text{Sertlik} = \frac{\text{Uygulanan Kuvvet (Yük)}}{\text{Meydana Gelen İzin Alanı (Büyüklüğü)}}$$

Bazı sertlik ölçüm yöntemlerinde ise oluşan izin alanı yerine derinliği ölçülerek sertlik hesaplanır. Bir sertlik ölçeğini 4 ana bileşen oluşturur. Bu bileşenler;

- Kuvvet
- Uç
- İz ölçme sistemi
- Test döngüsü

Sertliği ölçülecek malzemenin yüzeyi üzerine deformasyon (iz) oluşturmak için uygulanacak kuvvetin belirli değerlerde ve doğruluk değerlerine sahip olması gerekir. Test cihazlarında % 1, referans makinelerde ise % 0,1 doğruluk değerlerine sahip olması gereken kuvvetler, ucun üzerine titreşim yapmadan ve darbesiz uygulanır. Kuvvet yardımıyla ucun malzeme içine dalması sağlanır. Kuvvet ölü ağırlık, ölü ağırlık-manivela sistemi veya referans kuvvet dönüştürücü ile uygulanır.

Kuvvetin uygulandığı batıcı uçlar ise sert malzemelerden yapılmış olup belirli bir geometriye sahiptirler. Rockwell sertliğinde küresel-konik elmas uç, 1,587 5 mm ve 3,175 mm tungsten karbür bilye uçlar, Brinell sertliğinde 1 mm, 2,5 mm, 5 mm ve 10 mm tungsten karbür bilye uçlar kullanılır. Vickers ve Knoop sertlik ölçeklerinde ise sırasıyla kare tabanlı piramid ve rhombic şekilli elmas uçlar kullanılır. Bilye uçların çapları ve malzemeleri, elmas uçların tepe açıları, açı eksenellikleri ve yüzey düzgünlükleri önemli parametrelerdir.



a)Rockwell ucu



b)Brinell ucu



c)Vickers ucu



İz büyüklüklerini ölçmek için iz ölçme sistemleri kullanılır. Rockwell sertliğinde dalma derinliği ölçüm sensörleri; Brinell, Vickers ve Knoop sertliklerinde ise iz çap (Brinell) ve köşegen uzunlukları (Vickers, Knoop) ölçümü gerçekleştiren sistemler mevcuttur. Dalma derinliği ölçümü için kullanılan sensörler komparatör, mesafe ölçüm probu veya lazer enterferometre olabilir. İz alanı ölçümleri için ışık mikroskobu ve kamera görüntüleme sistemi kullanılır.

Test döngüsünü ise kuvvetin uygulandığı hızlar ile zaman dilimleri oluşturur. Kuvvetin hızlı veya yavaş uygulanması, kısa veya uzun bir süre boyunca ucun üzerinde tutulması oluşturulacak izin büyüklüğünü değiştireceği için bu parametrelerin de standardize edilmesi gerekir.



SERTLİK DEĞERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Deney süresi, yani statik yükün uygulama süresi ölçülen sertlik değerini etkiler. Özellikle sürünme eğilimi gösteren yumuşak malzemelerde bu süre en az 30 saniye, diğer malzemelerde 10-15 saniye arasında seçilmelidir.

Deney sıcaklığının etkisi statik ve dinamik dayanım büyüklüklerine olan etki gibidir. Artan sıcaklık değeri sertlik değerinin düşmesine neden olur.

Parçanın büyüklük ve boyutunun sertlik değerine etkisi, ancak deney yükü nedeniyle parçanın eğilmesi, ize göre ölçüm yüzeyinin ve parça kalınlığının yeterli olmaması gibi durumlarda görülür.

Deney yüzeyinin çok küçük olması veya ucun kenara çok yakın basılması malzemenin batmaya karşı direncinin küçük olmasına yol açar. Ayrıca iki iz arasındaki mesafe de az olursa izler birbirini etkiler. Numune kalınlığının batma derinliğinin en az 10 katı olması gerekirç (Brinell deneyinde 17 katıdır)



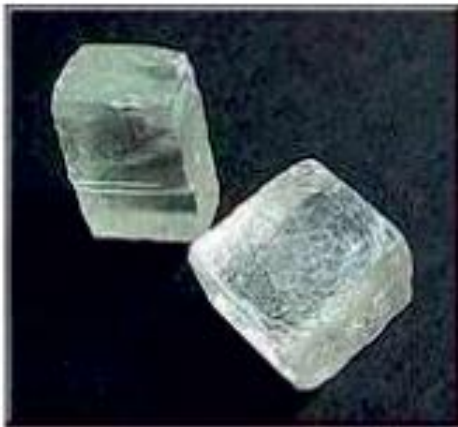
ÖLÇÜM STANDARTLARI VE YÖNTEMLERİ

Sertlik ölçümü hızlı, kolay, ucuz ve aynı zamanda malzemenin mekanik özellikleri hakkında bilgi veriyor olması dolayısıyla sanayinin vazgeçilmez test yöntemlerinden birisidir. Metal malzemelerin sertlik ölçümlerinin yanında plastik ve kauçuk malzemelerin de sertlik ölçümleri benzer yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Ayrıca metroloji dünyasında pek de yaygın olmamasına rağmen sanayide kullanılabilen çeşitli sertlik ölçme yöntemleri ve ölçekleri de mevcuttur. Bu ölçeklere Barcol sertliği, Leeb sertliği, Wallace sertliği, Mohs sertliği, Webster sertliğini örnek verebiliriz. Yaygın olarak kullanılan sertlik ölçme yöntemleri aşağıdaki gibi gruplandırılabilir.

- Çizme-Çizilme Sertliği
- Dinamik Sertlik
- Statik Sertlik
 - Metal Malzemelerin Sertliği
 - Rockwell Sertliği
 - Brinell Sertliği
 - Vickers Sertliği
 - Knoop Sertliği
 - Plastik ve Kauçuk Malzemelerin Sertliği
 - Shore Sertliği
 - IRHD Sertliği (International Rubber Hardness Degree)

Çizme/Çizilme Sertliği

Çizme/Çizilme sertliği bilinen en eski sertlik ölçme yöntemlerindedir ve mineralojistler tarafından bulunmuştur. Bu sertlik ölçme yönteminin temeli, bir katı maddenin başka bir katı maddeyi çizebilme veya daha başka bir katı madde tarafından çizilebilme prensibine dayanır. Bu yöntem 1822'de Mohs tarafından ortaya konulmuştu ve bu sertlik ölçeğine Mohs sertliği de denilebilir. Mohs, sertliklerini deney yoluyla ortaya koyduğu 10 adet minerali sertlik referans standardı olarak seçmiş ve bu minerallerin sertlik değerlerini 1'den 10'a kadar ölçeklendirmiştir. Bu minerallerin malzemeleri çizebilme yeteneklerine bakarak malzemelerin sertliklerini belirleme yoluna gitmiştir.



a) Kalsiyum karbonat: 3 Mohs

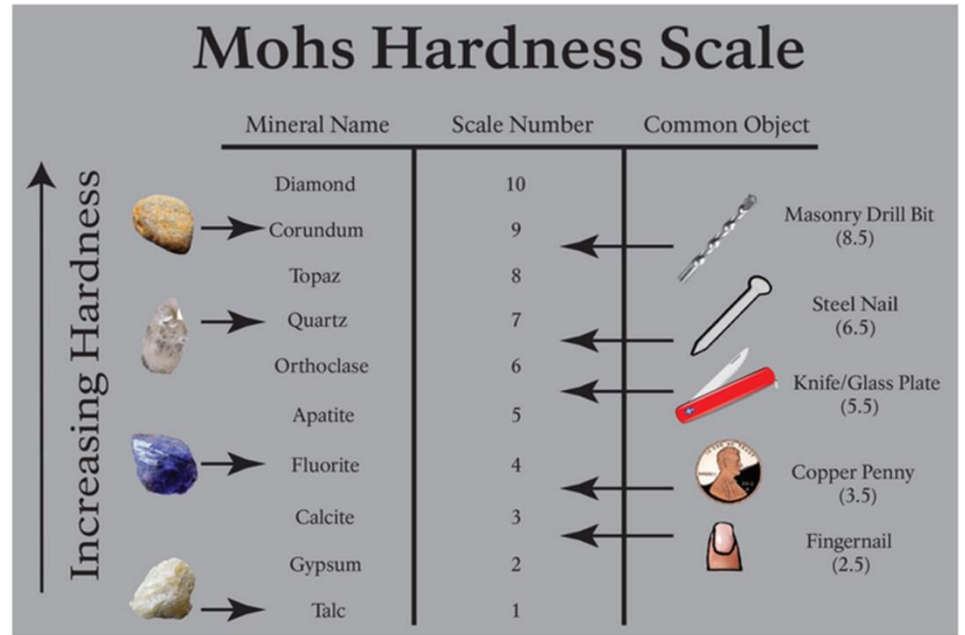


b) Lincoln senti: 2,5 Mohs; Hindistan senti: 3,5 Mohs



Mohs ve Breithaupt sertlik değerleri en yumuşaktan en serte doğru derecelere ayrılmıştır.

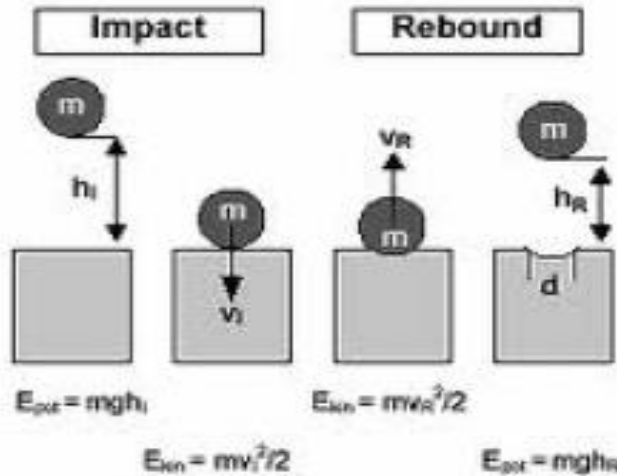
Malzeme	Mohs	Breithaupt
Talk	1	1
Alçı	2	2
Mika		3
Kalsit	3	4
Flourspat	4	5
Apatit	5	6
Boynuz Taşı		7
Feldispat	6	8
Kuartz	7	9
Topaz	8	10
Korundum	9	11
Elmas	10	12



Mineral	Mohs relative Hardness	Scratch Test	Rosiwal absolute Hardness	Vickers kp/mm^2
Talc	1	scrapeable with fingernail	0.03	2.4
Gypsum	2	scracheable with fingern.	1.25	36
Calcite	3	scr. with copper coin	4.5	109
Fluorite	4	easily scr. with knife	5	189
Apatite	5	still scr. with knife	6.5	536
Orthoclase	6	scr. with steel file	37	795
Quartz	7	scratches window glass	120	1,120
Topaz	8	scratches quartz	175	1,427
Corundum	9	scratches topaz	1,000	2,060
Diamond	10	scratches corundum	140,000	10,060

Dinamik Sertlik

Bu yöntemde genellikle sert metal bir bilye uç, sertliği ölçülecek metal malzemenin yüzeyine belirli bir enerji (hız) ile fırlatılır ve sertlik, oluşan izin büyüklüğü ile değerlendirilir. Bazı durumlarda ise bilye ucun yüzeye çarpıp geri döndükten sonra çıktığı yükseklik malzemenin sertliğinin bir göstergesi olarak kabul edilir. Burada bilye ile malzeme yüzeyi arasında gerçekleşecek çarpışmada malzemenin şekil değişimi ne kadar fazla ise yani malzeme ne kadar yumuşak ise enerji kaybı o kadar fazla olacaktır. Bazı uygulamalarda ise, bilye uç belirli bir enerji (hız) ile sertliği ölçülecek malzemenin yüzeyine gönderilir ve malzemenin sertliği bilyenin yüzeye çarpmadan hemen önceki hız ile çarptıktan hemen sonraki hızlarının oranı ile ölçülür.



a) Ölçüm prensibi



b) Test cihazı



Statik Sertlik

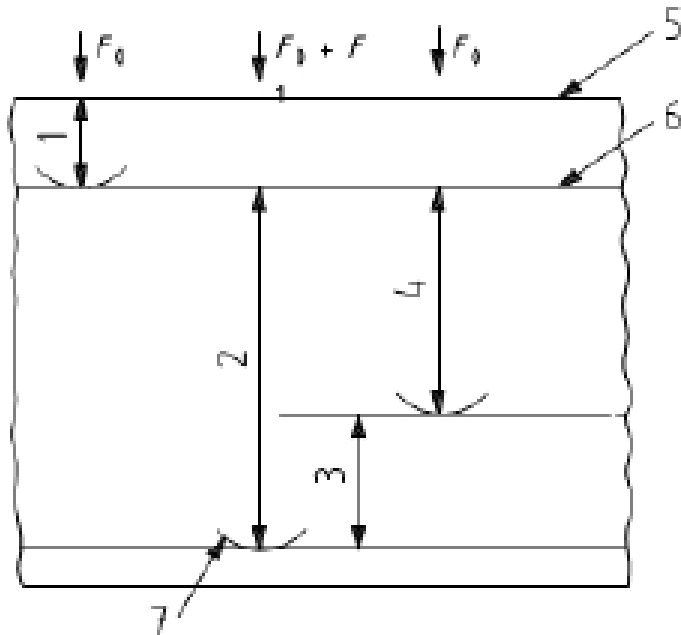
Günümüzde en çok kullanılan bu sertlik ölçme yönteminde, sertliği ölçülecek malzemenin yüzeyinde, belirli bir şekle sahip ve sert malzemedan yapılmış bir uç üzerine belirli bir kuvvet uygulanarak bir deformasyon oluşturulur. Standart bir prosedür dahilinde gerçekleştirilen bu deformasyonun büyüklüğü ölçülür ve deformasyon ne kadar küçük ise sertlik o kadar büyük, deformasyon ne kadar büyük ise sertlik o kadar küçüktür. Bu yöntem ile metal ve plastik malzemelerin sertliklerinin ölçümünde çok yaygın olarak kullanılır. Metal malzemelerin sertliklerinin ölçülmesinde kullanılan Rockwell, Brinell, Vickers-Mikrovickers, Knoop sertlik ölçekleri ile plastik ve kauçuk malzemelerin sertliklerinin ölçülmesinde kullanılan Shore ve IRHD sertlik ölçekleri statik sertlik ölçümü içinde yer alır. Bu sertlik ölçekleri aynı zamanda metroloji dünyasında en çok kullanılan sertlik ölçeklerdir. Aşağıda bu sertlik ölçeklerini detaylı bir şekilde inceleyeceğiz.

(EN ISO 6508, ASTM E18)

Rockwell Sertliği

Rockwell sertlik ölçümü, malzemelerin deformasyonu ile gerçekleştirilen, standart metotlar ve uçlar kullanarak izler oluşturup ve bu izlerin büyüklüklerinin ölçümünü gerçekleştirerek yapılan bir sertlik ölçüm yöntemidir. Rockwell sertlik değeri ucun malzeme içine dalma derinliği ölçülerek hesaplanan bir sertlik değeridir.

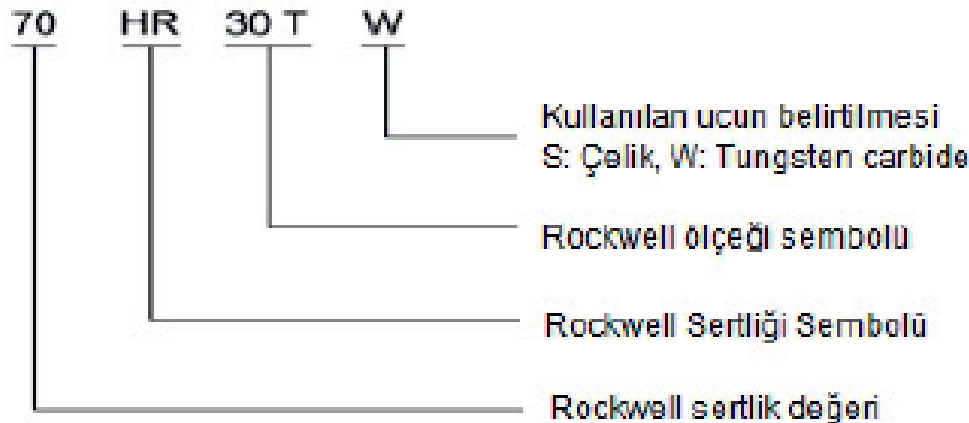
Rockwell sertliği ölçüm yönteminde malzeme üzerine baticı bir uç yardımıyla önce sabit belirli küçük bir yük (ön yük) uygulanır ve meydana gelen izin dip kısmı dalma derinliği ölçümü için başlangıç noktası kabul edilir. Yük daha yüksek belirli bir değere (toplam yük) artırılır daha sonra tekrar önceki yüke (ön yüke) dönülür. Ucun başlangıç noktasına göre malzeme içine dalma miktarına dalma derinliği denir. Dalma derinliği ile hesaplanan Rockwell Sertliği genellikle daha sert metallerin sertliğinin ölçülmesinde kullanılan bir ölçektir. Doğruluğunun yüksek olması, ölçümünün diğer sertlik ölçeklerine göre çok daha hızlı ve kolay olması bu ölçeğin son derece önemli olmasına ve yaygın kullanılmasına sebep olmuş ve dünyada en çok kullanılan sertlik ölçeği haline getirmiştir. Bu ölçekte ucun üzerine uygulanan kuvvetler ve bu kuvvetlere göre ucun malzeme içinde dalma derinlikleri Şekil 356'da gösterilmiştir ^[227].



Ucun Malzeme İçindeki Konumları:

- 1) Ucun F_0 ön yük (ön kuvvet) altında dalma derinliği
- 2) Ucun toplam kuvvet F altında dalma derinliği, plastik ve elastik deformasyon
- 3) Ucun ek yük kaldırıldıktan sonra ilk ön yük F_0 altında dalma derinliği
- 4) Malzeme yüzeyinde oluşan ve sertlik ölçümünde asıl parametre olan kalıcı (plastik) deformasyon
- 5) Sertliği ölçülen malzemenin yüzeyi
- 6) Dalma derinliğinin ölçümü için seçilen referans yüzey

Sonuç, malzemenin sertlik değerini veren bir sayıdır. Rockwell sertliği, “sertlik değeri / Rockwell sertlik sembolü / ölçek sembolü / bilye uç kullanılan sertlik ölçekleri için bilyenin malzemesini gösteren sembol” şeklinde ifade edilir. Elmas ucun kullanıldığı bir sertlik ölçeği örneği verirsek, 60 HRC sertliği, sertlik değeri (60) / Rockwell sertlik sembolü (HR) / kullanılan ölçek (C) şeklinde ifade edilir. Bilye uç kullanılan bir sertlik ölçümünde ise 70 HR30TW gibi bir ölçüm sonucu en açık haliyle aşağıdaki gibi ifade edilir ^[227].



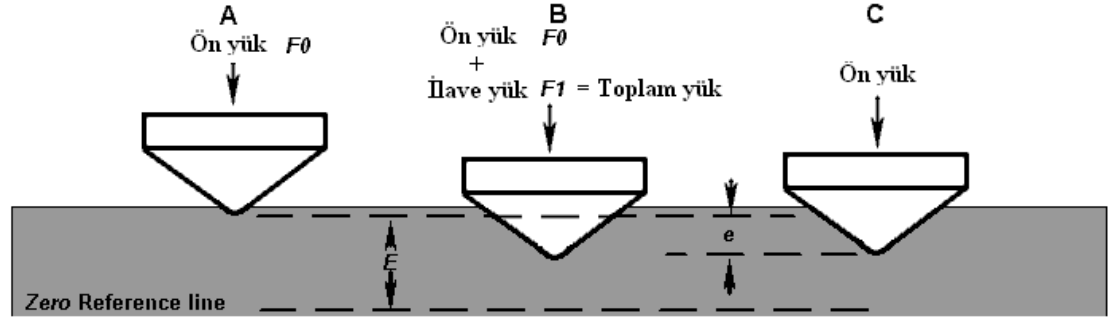
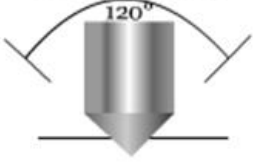
Malzemelerin çeşitliliği ve bu malzemelerin kullanım farklılıkları, farklı sertlik ölçeklerini oluşturma gerekliliğini ortaya koyar. Rockwell Sertliği'nde kullanılan kuvvet değerlerine göre iki türlü sertlik ölçeği mevcuttur. Bunlar; Rockwell ve Yüzeysel Rockwell sertlik ölçekleridir. Rockwell sertlik ölçeklerinde ön yük 10 kgf (98,07 N) iken yüzeysel sertlik ölçeklerinde 3 kgf (29,42 N)'dur. Sertlik ölçeklerinin oluşturulmasında önemli rol oynayan diğer bir parametre ise malzemelerin sertliklerindeki çeşitlilik ve bu çeşitlilikten kaynaklanan farklı uç varyasyonlarıdır. Rockwell sertlik ölçeklerinde üç tür uç kullanılır: Küresel-konik elmas uç, 3,175 mm bilye uç ve 1,5785 mm bilye

BATICI UÇLAR

küre şeklinde uç



koni şeklinde uç



HRC Yöntemi

Çelikler, sert çelikler, sert dökme demirler, 100 HRB'den daha sert olan malzemelere uygulanır.

Yük : 10+140=150 kp

B. Uç : 120°lik elmas koni

Süre : 20 sn

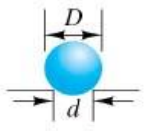


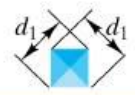
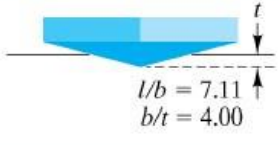
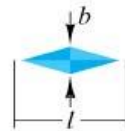
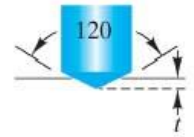

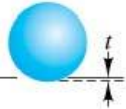

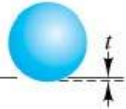

HRB Yöntemi

Yumuşak çelikler, bakır alaşımları ve alüminyum alaşımlarına uygulanır.

Yük : 10+90=100 kp

B. Uç : 1/16 inç çelik bilya

Süre : 20 sn

Test	Indenter	Shape of indentation		Load	Formula for hardness number
		Side view	Top view		
Brinell	10 mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$\text{BHN} = \frac{2P}{\pi D \left[D - \sqrt{D^2 - d^2} \right]}$
Vickers	Diamond pyramid			P	$\text{VHN} = 1.72P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$\text{KHN} = 14.2P/l^2$
Rockwell					
A } C } D }	Diamond cone			60 kg 150 kg 100 kg	$\left. \begin{matrix} R_A = \\ R_C = \\ R_D = \end{matrix} \right\} 100 - 500t$
B } F } G }	$\frac{1}{16}$ in. diameter steel sphere			100 kg 60 kg 150 kg	$\left. \begin{matrix} R_B = \\ R_F = \\ R_G = \end{matrix} \right\} 130 - 500t$
E } H }	$\frac{1}{8}$ in. diameter steel sphere			100 kg 60 kg	$\left. \begin{matrix} R_E = \\ R_H = \end{matrix} \right\} 130 - 500t$

Source: H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. 3: *Mechanical Behavior*, John Wiley & Sons, Inc., NY, 1965.



DİKKAT!!

- Batma derinliğinin ölçülmesi esasına dayanır.
- Baticı uç olarak sertleştirilmiş çelik bilye veya elmas koni kullanılır.
- Malzemenin makro geometrik durumunun kötü etkilerinden kurtulmak ve derinlik ölçümünde sıfır noktasının iyi ayarlanabilmesi için ön yükleme yapılır.
- Numene yüzeyi parlak ve düzgün olmalıdır.
- Numune kalınlığı batma derinliğinin en az 10 katı olmalıdır.
- Yöntemin üstünlüğü; sertlik değerinin deney cihazı üzerindeki ölçme saatinden direkt olarak okunabilmesidir.

Rockwell sertlik ölçekleri

Rockwell Sertlik Ölçeği	Sertlik Sembolü ¹	Kullanılan Uç	Ön Yük (N)	Ek Yük (N)	Toplam Yük (N)	Uygulama Alanı (Rockwell Sertlik Testi)
A	HRA	Elmas Uç	98,07	490,3	588,4	20HRA– 88HRA
B	HRB	1,5875 mm Bilye Uç	98,07	882,6	980,7	20HRB-100HRB
C	HRC	Elmas Uç	98,07	1373	1471	20HRC-70HRC
D	HRD	Elmas Uç	98,07	882,6	980,7	40HRD-77HRD
E	HRE	3,175 mm Bilye Uç	98,07	882,6	980,7	70HRE-100HRE
F	HRF	1,5875 mm Bilye Uç	98,07	490,3	588,4	60HRF-100HRF
G	HRG	1,5875 mm Bilye Uç	98,07	1373	1471	30HRG-94HRG
H	HRH	3,175 mm Bilye Uç	98,07	490,3	588,4	80HRH-100HRH
K	HRK	3,175 mm Bilye Uç	98,07	1373	1471	40HRK-100HRK
15N	HR15N	Elmas Uç	29,42	117,7	147,1	(70 – 94) HR15N
30N	HR30N	Elmas Uç	29,42	264,8	294,2	(42 – 86) HR30N
45N	HR45N	Elmas Uç	29,42	411,9	441,3	(20 – 77) HR45N
15T	HR15T	1,5875 mm Bilye Uç	29,42	117,7	147,1	(67 – 93) HR15T
30T	HR30T	1,5875 mm Bilye Uç	29,42	264,8	294,2	(29 – 82) HR30T
45T	HR45T	1,5875 mm Bilye Uç	29,42	411,9	441,3	(10 – 72) HR45T

¹ Bilye uç kullanılan sertlik ölçeklerinde yukarıda verilen sembollere, paslanmaz çelik bilye kullanıldığında "S", sertleştirilmiş metal (tungsten karbid) kullanıldığında ise "W" harfleri eklenir.

Skala	Batıcı uç	Ön yük F_0 (kp)	Büyük Yük F_i (kp)	Toplam Yük F (kp)	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	1/4 inç 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 Soft bearing metals, plastics and other very soft materials

HRR
HRS
HRV

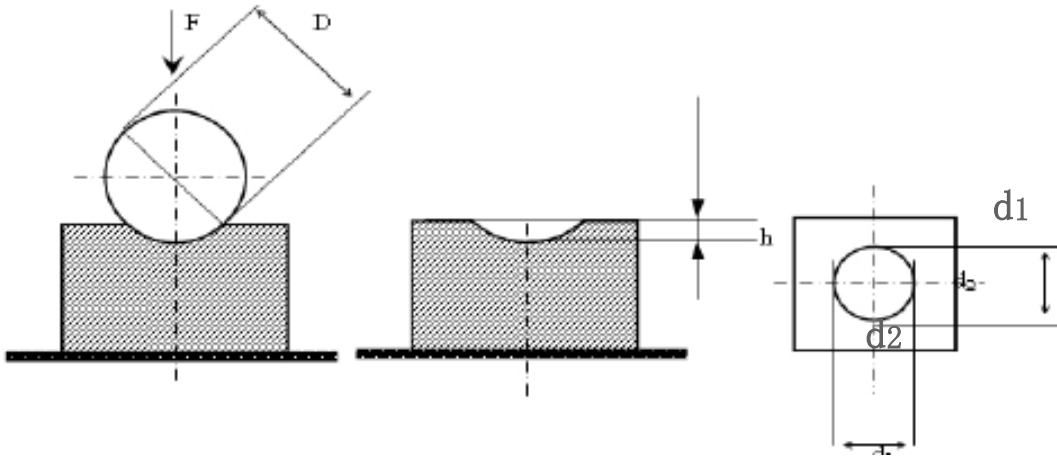


Sembol	Açıklaması	Birim
F_0	Ön yük	N
F_1	Ek yük	N
F	Toplam yük	N
S	Ölçek birimi, ölçeğe bağlıdır	mm
N	Ölçek birimi cinsinden adedi	
h	Ek yükün kaldırılmasından sonra ön yük altında oluşan izin kalıcı derinliği	mm
HRA		
HRC	Rockwell Sertliği = $100 - \frac{h}{0,002}$	
HRC	Rockwell Sertliği = $100 - \frac{h}{0,002}$	
HRD		
HRB		
HRE	Rockwell Sertliği = $130 - \frac{h}{0,002}$	
HRF		
HRG		
HRH		
HRK		
HRN		
HRT	Rockwell Sertliği = $100 - \frac{h}{0,001}$	

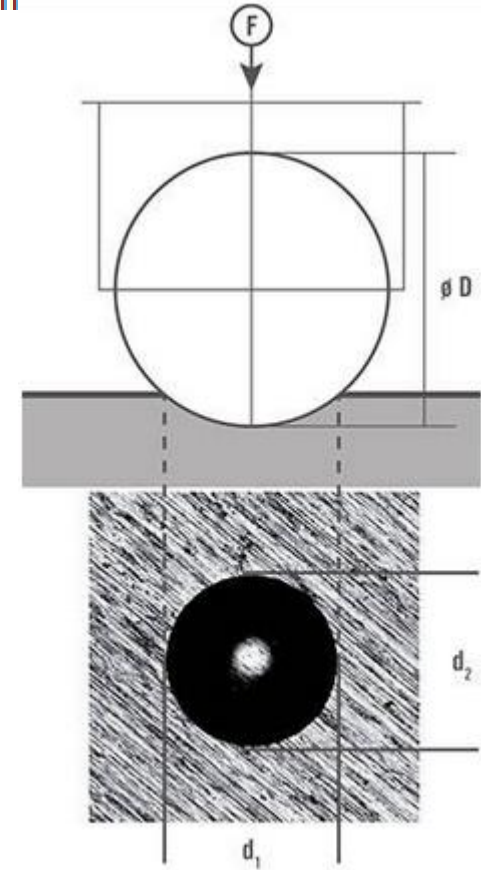
Brinell Sertliği

HBW (BSD) (EN ISO 6506, ASTM E 10)

Brinell sertlik ölçümü, bir malzemenin yüzeyine belirli bir yükün, belirli çaptaki sert malzemeden yapılmış bir bilye yardımıyla belirli bir süre uygulanmasından ve sonuç olarak meydana gelen izin çapının ölçülmesinden ibarettir. Brinell sertlik değeri uygulanan kuvvetin, oluşan izin küresel yüzey alanına oranıdır. Küresel yüzey alanı da izin ölçülen ortalama çap ile küresel (bilye) ucun çapından faydalanılarak bulunur.



$$d = (d_1 + d_2) / 2$$



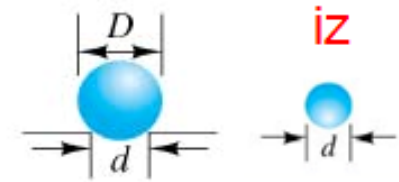
Standart test: 10mm çaplı sert bilye ve 3000 kgf yük ile yüzeye bastırılır.

Yük: $F(\text{kgf}) = A \cdot D^2(\text{mm}^2)$

A malzemenin türüne bağlı yük katsayısıdır.

2.5mm bilye ile çelik ölçülüyorsa, 187.5 kgf,

Al ölçülüyorsa 31.25 kgf yük gerekir.

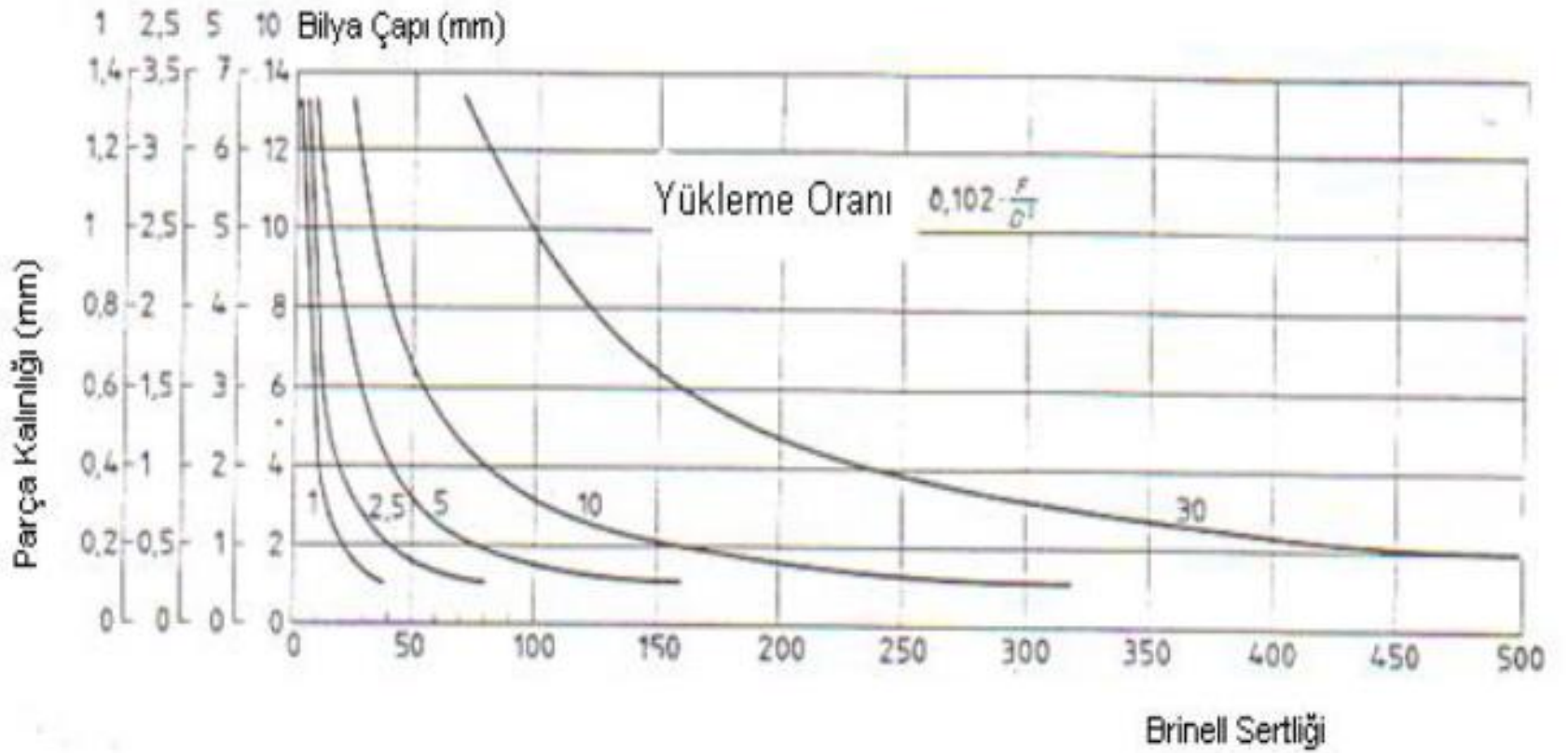


$$BSD = \frac{2F}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$$

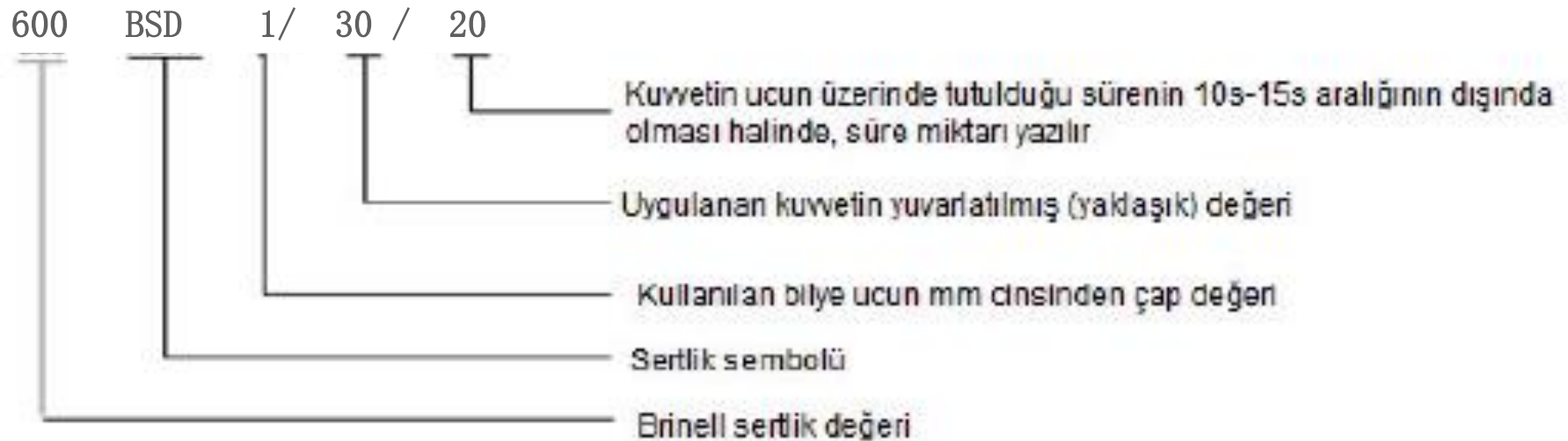
BSD = Brinell sertlik değeri
D = Bilye çapı
F = Uygulanan kuvvet
d = izin çapı.

Malzeme	Brinell Sertliği	Yük katsayısı $0,102^*(F/D^2)$
Çelik, nikel alaşımları, titanyum alaşımları		30
Dökme demir	<140	10
	≥140	30
Bakır ve bakır alaşımları	<35	5
	35 ile 200 arası	10
	>200	30
Hafif metaller ve alaşımları	<35	2,5
	35 ile 80 arası	5 -10-15
	>80	10 - 15
Kurşun, kalay		1

Brinell sertliği ve yük katsayısı değerlerine göre, test edilebilecek minimum parça kalınlıkları



Brinell sertliği, sertlik değeri / Brinell sertlik sembolü ve bilyenin malzemesini gösteren sembol / mm biriminde bilye çapı / kgf biriminde kuvvet / (10 – 15) saniyenin dışında ise kuvvetin uç üzerinde tutulma zamanı şeklinde ifade edilir. Mesela 600 / HBW / 1 / 30 / 20 ifadesi “30 kgf yükün 1 mm çaplı bilyeye 20 saniye uygulanması sonucu elde edilen Brinell sertlik değeri 600 olarak bulunmuştur” anlamında ifade edilir.



Brinell Sertliği'nde kullanılan kuvvet değerleri 1 kgf ile 3000 kgf arasındadır. Birçok kuvvet değeri kullanılmakla birlikte en çok kullanılan kuvvet değerleri 62,5 kgf ve 187,5 kgf değerleridir. Brinell sertlik ölçeklerinde farklı çaplarda Tungsten karbür (sertleştirilmiş metal) bilyeler kullanılır. Bu bilyelerin çapları 1 mm, 2,5 mm, 5 mm, 10 mm'dir.



DİKKAT!!

•Minimum malzeme (numune) kalınlığı $S_{min} = 17 \times bilyanın\ batma\ derinliği$ kadar olmalıdır.

•Numene yüzeyi parlak ve düzgün olmalıdır.

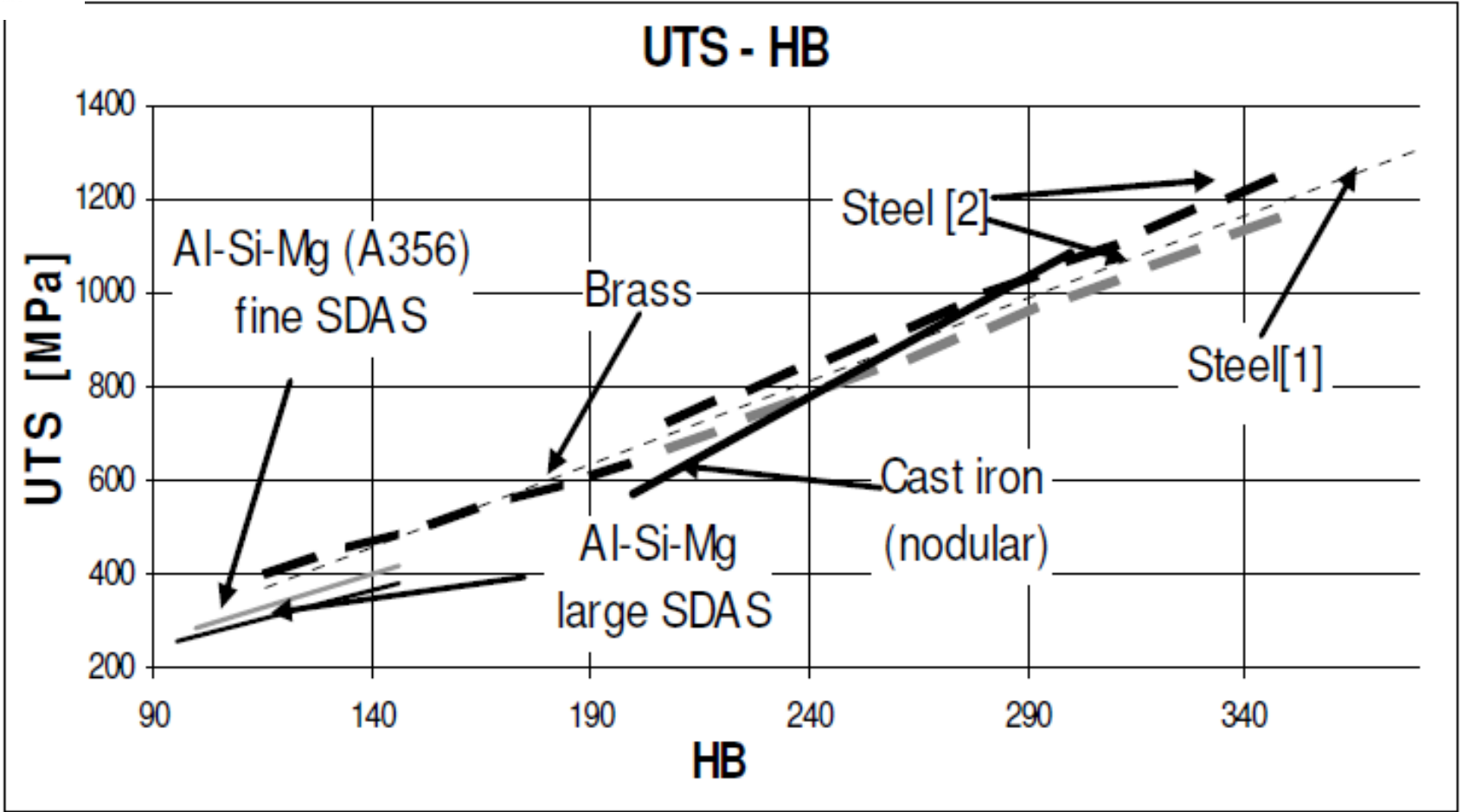
•Kalıcı iz çapı $0,2D$ 'den küçük ve $0,7D$ 'den büyük olmamalıdır.

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

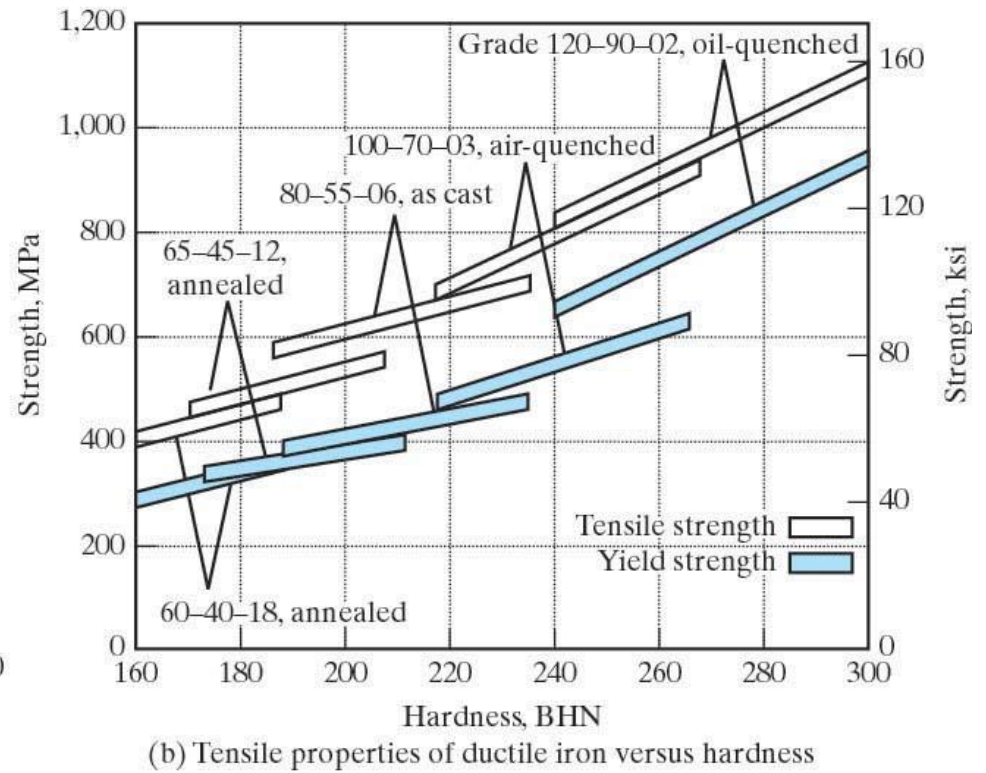
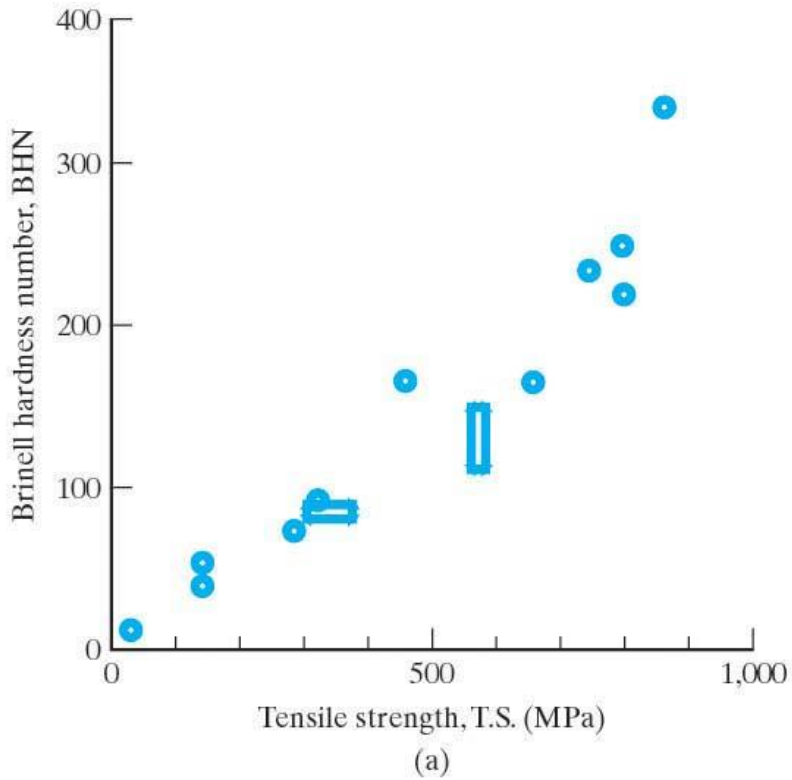
•Numune üzerinde kalan izin merkezinin parça kenarından ve bir diğer izin merkezinden uzaklığı iz çapının iki katı kadar olmalıdır ($2d$).

•İz çapı (d) $0,01\text{ mm}$ hassasiyetle ölçülmelidir. İz tam dairesel değilse birbirine dik doğrultudaki çaplar ölçülüp, ortalaması alınmalıdır.

• 400 HB 'ye kadar olan sertlikler için, sertleştirilmiş çelikten imal edilmiş bilyalar kullanılır. Sert malzemelerde karbürden yapılmış bilyalar tercih edilir.



Farklı Metallerde Çekme Dayanımı ile Sertlik Arasındaki İlişki





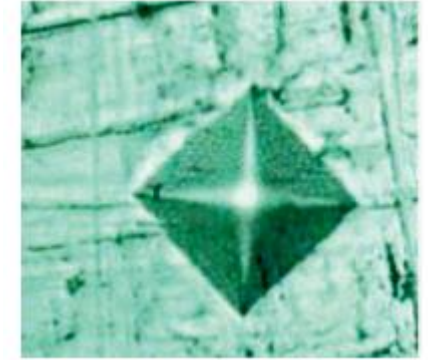
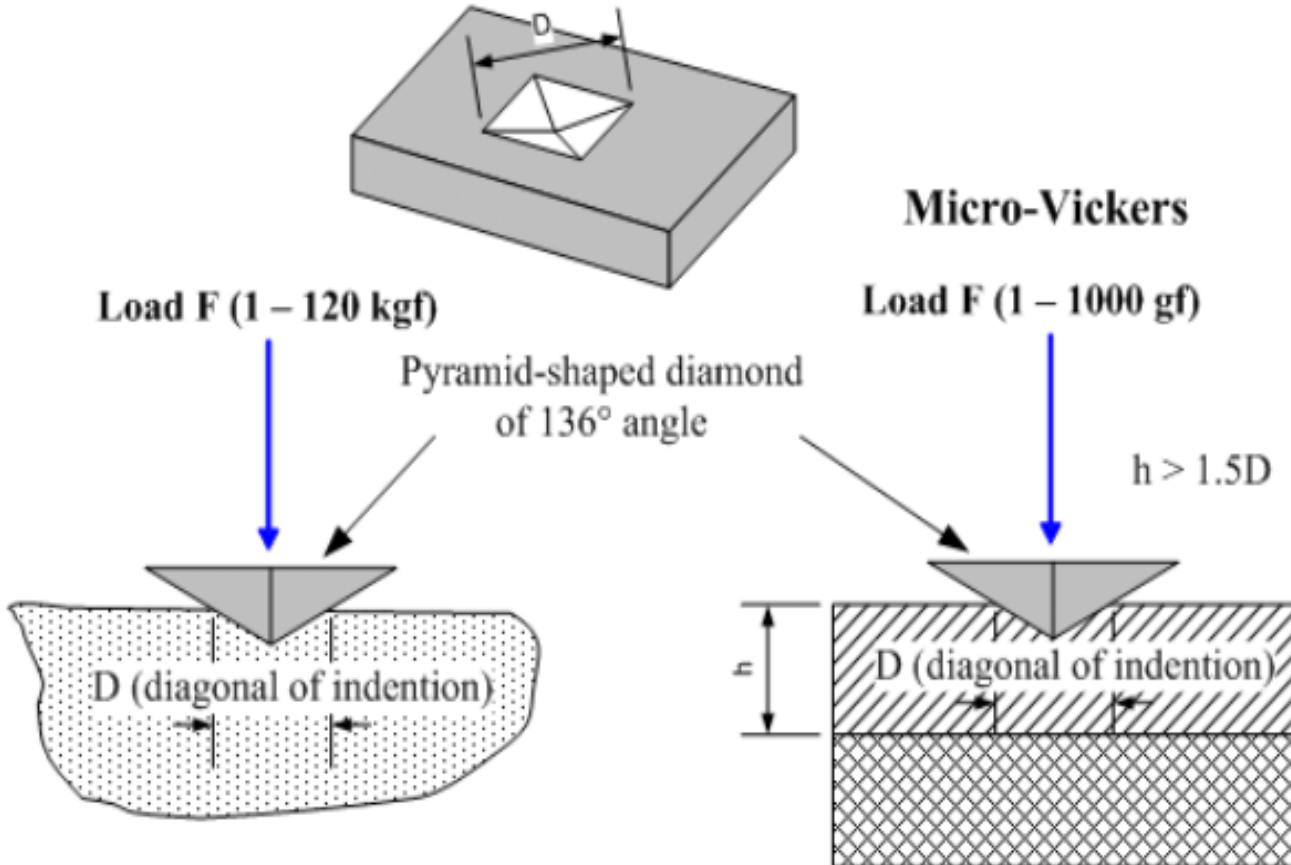
BRİNELL SERTLİK ÖLÇEĞİ

Sertlik Sembolü	Bilye Çapı	Test Kuvveti Nominal Değeri
HBW 10/3 000	10 mm	29,42 kN
HBW 10/1 500	10 mm	14,71 kN
HBW 10/1 000	10 mm	9,807 kN
HBW 10/500	10 mm	4,903 kN
HBW 10/250	10 mm	2,452 kN
HBW 10/100	10 mm	980,7 N
HBW 5/750	5 mm	7,355 kN
HBW 5/250	5 mm	2,452 kN
HBW 5/125	5 mm	1,226 kN
HBW 5/62,5	5 mm	612,9 N
HBW 5/25	5 mm	245,2 N
HBW 2,5/187,5	2,5 mm	1,839 kN
HBW 2,5/62,5	2,5 mm	612,9 N
HBW 2,5/31,25	2,5 mm	306,5 N
HBW 2,5/15,625	2,5 mm	153,2 N
HBW 2,5/6,25	2,5 mm	61,29 N
HBW 1/30	1 mm	294,2 N
HBW 1/10	1 mm	98,07 N
HBW 1/5	1 mm	49,03 N
HBW 1/2,5	1 mm	24,52 N
HBW 1/1	1 mm	9,807 N

Vickers Sertliği

(EN ISO 6507, ASTM E 92)

Vickers sertlik ölçümü, bir malzemenin yüzeyine belirli bir yükün, kare tabanlı piramit elmas bir uca belirli bir süre uygulanmasından ve sonuç olarak meydana gelen izin ortalama köşegen uzunluğunun ölçülmesinden ibarettir. Vickers sertlik değeri, uygulanan kuvvetin oluşan izin piramitsel (gerçek) yüzey alanına oranıdır. Piramit yüzey alanı da izin ölçülen ortalama köşegen uzunluğundan faydalanılarak bulunur.





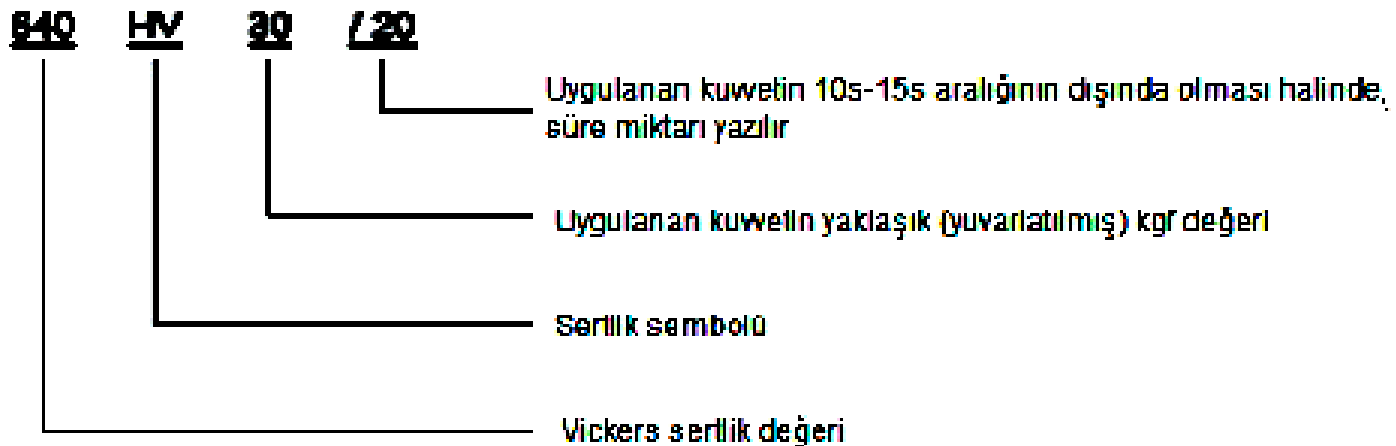
$$HV = \frac{1}{g_n} \frac{\text{kuvet}}{\text{izin yüzey alanı}} = 0,102 \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \frac{F}{d^2}$$

HV : Vickers sertliği

F : Uygulanan kuvvet [N]

d : Ölçülen izin köşegen uzunluğu [mm]

Vickers sertliği, "sertlik değeri / Vickers sertlik sembolü / ölçeğe ait kuvvetin kgf karşılığı / (10 - 15) saniyenin dışında ise zaman" şeklinde ifade edilir. Mesela 600 / HV / 30 / 20 ifadesi "30 kgf yükün elmas uca 20 saniye uygulanması sonucu elde edilen Vickers değeri 600 olarak bulunmuştur" anlamında ifade edilir





Diğer sertlik ölçeklerinde olduğu gibi Vickers sertlik ölçeğinde de farklı kuvvetler kullanılarak farklı sertlik ölçekleri oluşturulur. Uç ise bütün ölçekler için aynıdır fakat Mikrovickers ölçeklerinde kullanılan piramit elmas ucun daha hassas olmasına dikkat edilir. Vickers sertlik ölçeklerinde kullanılan kuvvetler 10 gf ile 100 kgf arasında değişir, uç ise hep aynı olup 136° tepe açılı kare tabanlı piramit elmas uçtur.

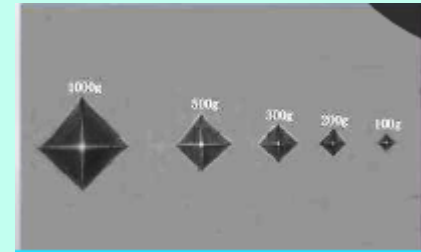
Vickers sertlik ölçekleri

Sertlik Testi ¹⁾		Düşük Yük Sertlik Testi		Mikrosertlik Testi	
Sertlik Sembolü	Nominal Kuvvet Değeri F (N)	Sertlik Sembolü	Nominal Kuvvet Değeri F (N)	Sertlik Sembolü	Nominal Kuvvet Değeri F (N)
HV5	49,03	HV0,2	1,961	HV0,01	0,098 07
HV10	98,07	HV0,3	2,942	HV0,015	0,147
HV20	196,1	HV0,5	4,903	HV0,02	0,196 1
HV30	294,2	HV1	9,807	HV0,025	0,245 2
HV50	490,3	HV2	19,61	HV0,05	0,490 3
HV100	980,7	HV3	29,42	HV0,1	0,980 7

¹⁾ 980,7 N'dan büyük nominal kuvvet değeri kullanılabilir.

DİKKAT !!

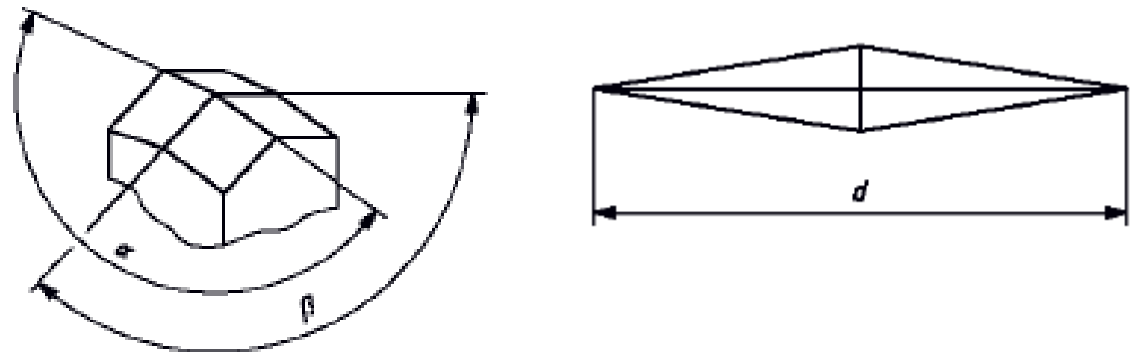
- Yük darbesiz olarak uygulanmalıdır.
- Numene yüzeyi parlak ve düzgün olmalıdır.
- Elmas uç darbeden ve çarpmadan korunmalıdır.
- Numune üzerinde kalan izin merkezinin parça kenarına veya bir diğer izin kenarına olan uzaklığı en az 3d kadar olmalıdır.
- Piramid uç P yükü ile deney parçasına düşey olarak batırılmalı, iz köşegenleri 0,002 mm hassaslıkla ölçülmelidir
- Aynı malzemedeki farklı yükleme hız ve kuvvetleriyle farklı izler oluşur → karşılaştırma yaparken aynı şartların uygulandığına emin olun.



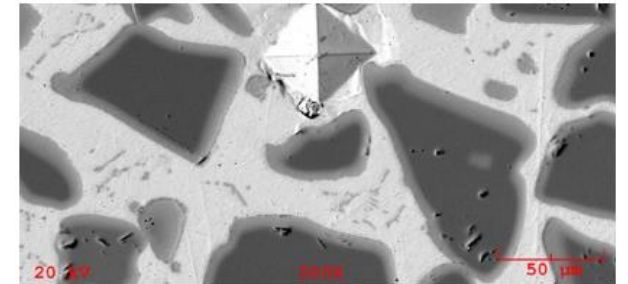
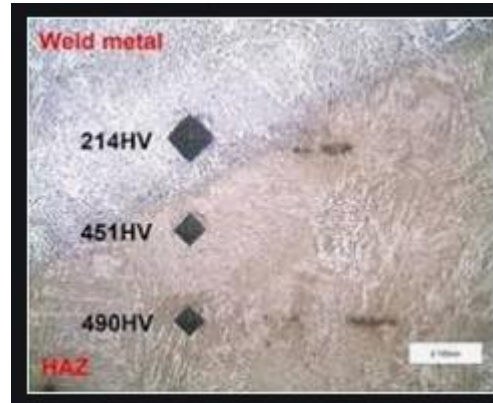
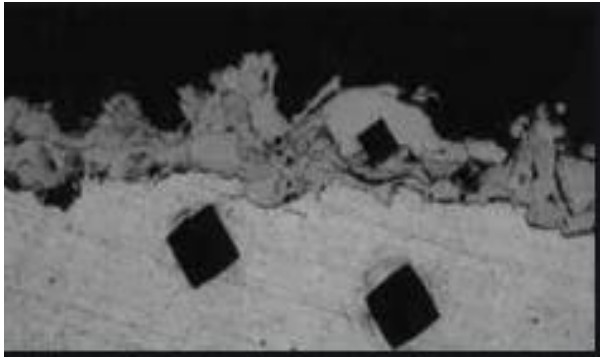
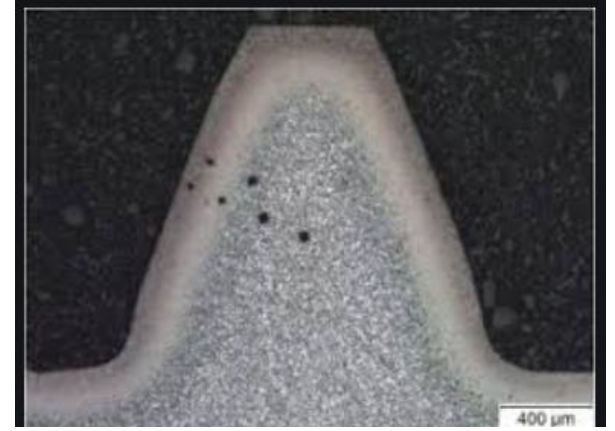
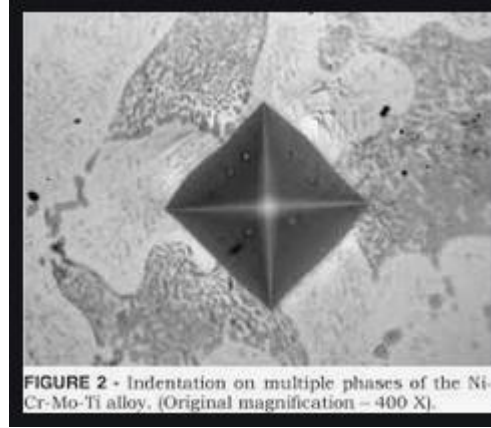
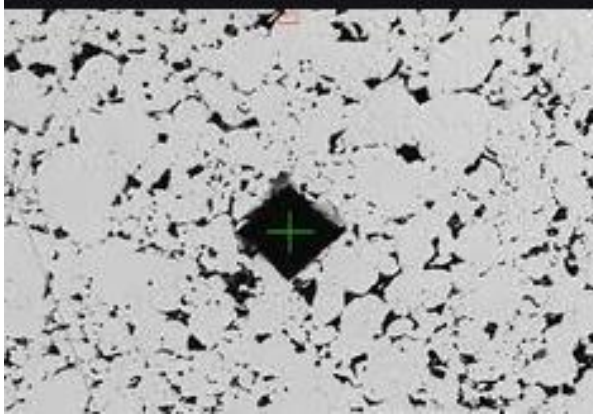
Knoop Sertliği Knoop Sertlik Ölçme Metodu (EN ISO 4545-1, ASTM E384)

İnce tabakaların sertlik ölçümünde kullanılan ve Mikrovickers ile birlikte mikrosertlik ölçeğini oluşturan Knoop sertliği, metal malzemelerin sertliğinin ölçümünde en az kullanılan sertlik ölçeğidir. Mikroviçerks sertlik ölçeğinde kullanılan kuvvet değerleri kullanılır. Kare tabanlı piramit elmas uç yerine rhombic şekilli elmas uç kullanılır.

Knoop sertlik ölçümü, bir malzemenin yüzeyine belirli bir yükün, rhombic şekilli elmas uç yardımıyla belirli bir süre uygulanması ve sonuç olarak meydana gelen eşkenar dörtgen şekilli izin uzun köşegen uzunluğunun ölçülmesi ile gerçekleştirilir. Knoop sertlik değeri uygulanan kuvvetin oluşan piramit izin gerçek yüzey alanına oranıdır. Rhombic yüzey alanı da izin ölçülen uzun köşegen uzunluğundan faydalanılarak bulunur. Aşağıda Knoop sertlik ölçümünde kullanılan ucu görebilirsiniz ^[231].

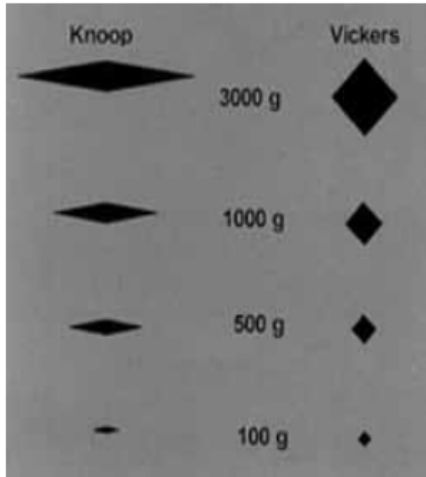


Bu deney, özellikle çok küçük numunelerin ve ince sacların sertliklerinin ölçülmesinde elverişlidir. Sertleştirilmiş ve kaplanmış yüzeylerin sertlikleri de bu yöntemle belirlenebilir. Ayrıca, malzeme iç yapısında bulunan çeşitli fazların ve bölgelerin sertlikleri de bu yöntemle ölçülür. Bu yöntemde batma derinliği genellikle 1 mikronu geçmez.



Mikro-sertlik deneylerinde iki standart uç kullanılır. Bunlardan biri 136° tepe açısına sahip tabanı kare olan piramit uç (Vickers ucu) dur. Diğeri ise, Knoop ucu olarak bilinen 172°30' □ lık piramit uçtur.

Vickers ucu numune üzerinde kare şeklinde iz bırakırken, Knoop ucu eş kenar dörtgen şeklinde bir iz bırakır.



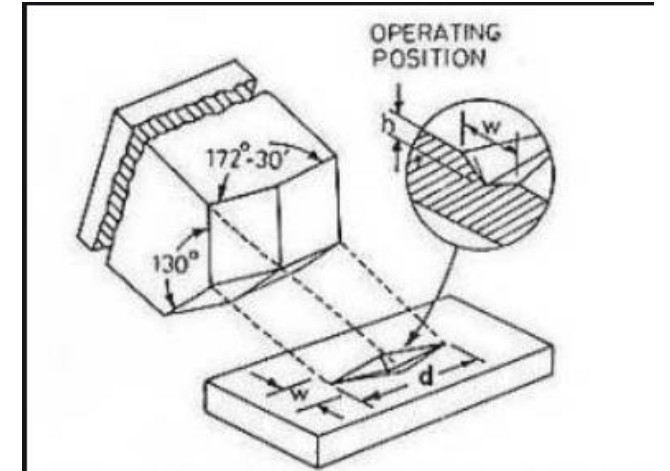
Knoop sertliği aşağıdaki formüle göre hesaplanır.

$HK = \text{Katsayı} \times \text{test yükü} / \text{iz alanı}$

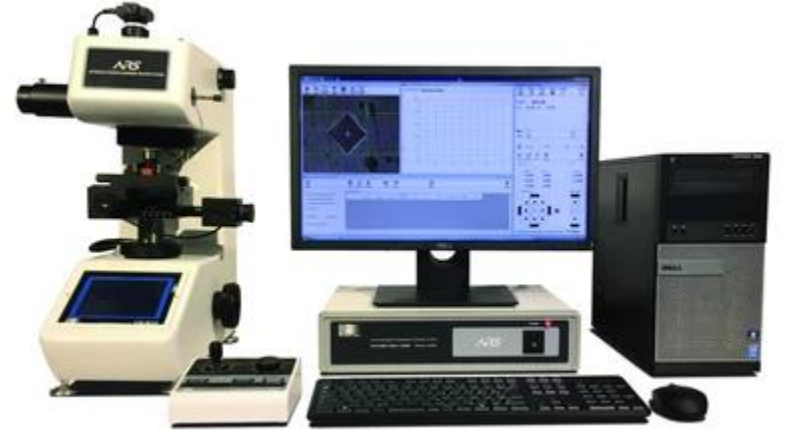
Knoop sertliği metaller için HK 60 -HK1000 arasında belirtilir.

Örneğin, 450 HK0.5, 0,5 kgf da yapılan Knoop sertlik değerini gösterir.

$$\text{Knoop sertliği (KS)} = 14.229F/d^2$$

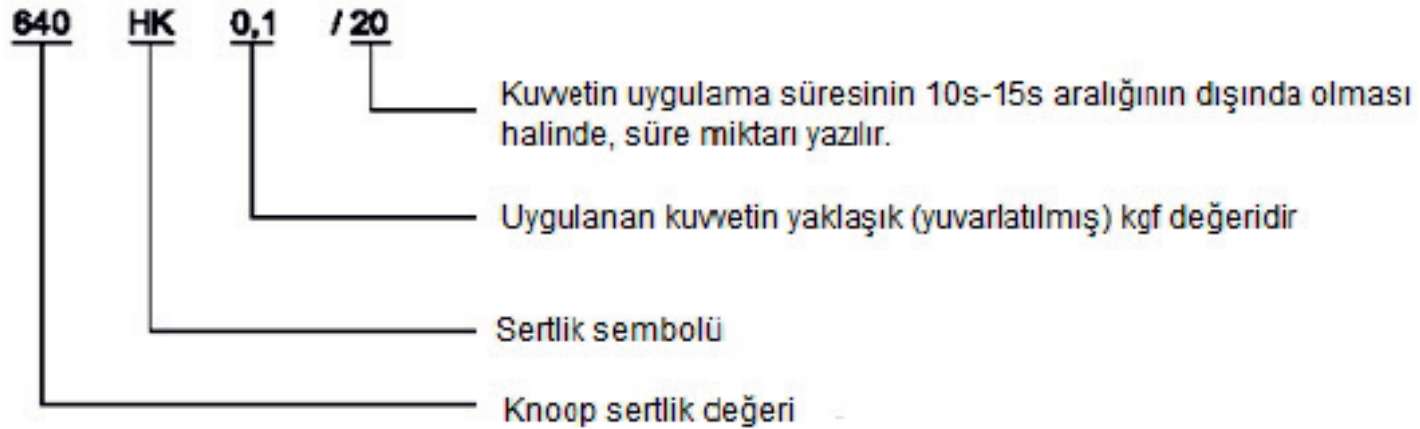


Mikro sertlik ölçüm cihazı hassas bir cihaz olup, kontrolü otomatik olarak yapılır. Makro sertlik ölçüm cihazlarından farkı, sistemin komple bir metal mikroskobu içermesidir. Sertliği ölçülecek numune mikroskobun tablasına oturtulur ve okülerden net görüntü alınca kadar tabla hareket ettirilir. Daha sonra, sertlik ölçülecek bölge seçilir ve düğmeye basılarak otomatik olarak yükleme yapılır. Böylece numune üzerinde bir iz elde edilir. İzin boyutları genellikle el ile ayarlanan bir sistemle belirlenir.



Mikro-sertlik cihazlarında genellikle 1-10.000 g arası yük değerleri kullanılmaktadır. 1 g altında yük kullanan ultra-sertlik ölçüm cihazları da vardır. Öte yandan son yıllarda geliştirilen ve nano-sertlik ölçüm cihazları olarak bilinen cihazlarla μN seviyelerinde yükler kullanılarak nm ölçüsünde iz derinlikleri de elde edilebilmektedir.

Knoop sertliği, "sertlik değeri / Knoop sertlik sembolü / ölçüğe ait kuvvetin kgf karşılığı / (10 - 15) saniyenin dışında ise zaman" şeklinde ifade edilir. Mesela 640 / HK / 0,1 / 20 ifadesi "0,1 kgf yükün elmas uca 20 saniye uygulanması sonucu elde edilen Knoop değeri 640 olarak bulunmuştur" anlamında ifade edilir ^[231]. Burada da verilen bilgiler, ulaşılan sertlik değerinin hangi koşullar altında yapılan ölçüm sonucunda bulunduğunu ifade eder. Süre standardının dışında kaldığı bazı durumlarda ise bu süre sertlik notasyonuna eklenir ve uyulan süre ne ise sonuç ifadesinde gösterilir. Standart sürenin dışına çıktığı durumlar için örnek olabilecek şematik bir gösterim Şekil 368'de verilmiştir.



Sertlik sembolü	Nominal kuvvet değeri		Sertlik sembolü	Nominal kuvvet değeri	
	F (N)	F (kgf)		F (N)	F (kgf)
HK0,01	0,09807	0,010	HK0,2	1,961	0,200
HK0,02	0,1961	0,020	HK0,3	2,942	0,300
HK0,025	0,2452	0,025	HK0,5	4,903	0,500
HK0,05	0,4903	0,050	HK1	9,807	1,000
HK0,1	0,9807	0,100	HK2	19,614	2,000



Endüstriyel sertlik ölçüm yöntemleri

Şimdiye kadar incelenen sertlik ölçme yöntemleri laboratuvar tipi olup, “statik sertlik ölçme yöntemleri” olarak adlandırılır. Bu yöntemlerde numunenin sertlik ölçümü için özel olarak hazırlanılması gerekir. Bazı hallerde ise parçadan numune çıkarmanın imkânı olmayabilir veya sertliğin çok büyük parçalar üzerinde ölçülmesi gerekir. Bu tipteki sertlik ölçümleri için endüstriyel tipte cihazlar geliştirmiştir.

Endüstriyel sertlik ölçme yöntemleri genellikle “dinamik sertlik ölçme yöntemleri” diye anılır. Bu amaçla geliştirilen cihazları iki grupta toplamak mümkündür.

- a) Darbe etkisi ile sertlik ölçen cihazlar,
- b) Sıçrama miktarı ile sertlik ölçen cihazlar.

Birinci grupta, Brinell deneyine benzer bir yol izlenir. Ancak burada kuvvet darbe şeklinde uygulanır. Çelik bilye şeklindeki batıcı uç darbe etkisi ile yüzeyde bir iz bırakır. Bu gruptaki cihazların en tanınmış Poldi çekici sertlik ölçme yöntemidir.

Bu yöntemde, sertliği bilinen bir master kullanılır. Elde edilen izin boyutları, aynı zamanda mastarda elde edilen iz ile karşılaştırılarak sertlik değeri belirlenir.



İkinci grupta ise numune üzerine, belirli bir yükseklikten düşürülen küçük bir ağırlık, numune üzerinde daha çok elastik bir deformasyon yaparak geriye sıçramaktadır. Sıçrama miktarı, düşen cismin numuneye çarptıktan sonraki elastik enerji miktarı ile orantılı olup, bu durum yöntemin prensibini oluşturmaktadır.

Bu açıklamaya göre, yumuşak malzemelerde sıçrama daha az, sert malzemelerde daha fazla olacağı açıktır. Bu cihazda batıcı uç olarak sertleştirilmiş çelik bilye veya küresel elmas uç kullanılır ve bunlar düşen ağırlığın alt yüzeyine tutturulur.

Sıçrama miktarının kolay ölçülebilmesi için gösterge üzerinde hareket edebilen seyyar ibreler kullanılır. Sıçrama esasına göre çalışan cihazların en çok tanınanı “Shore Skleroskobu” dur.

Bu tip cihazların en önemli avantajı, iz bırakmadan sertlik ölçmesi ve çok geniş bir yüzeyde sertlik dağılımını ölçebilme kolaylığı sağlamasıdır.



ARAŞTIRMA ÖDEVİ

- 1) **Dinamik sertlik ölçme yöntemleri nelerdir? Çalışma prensiplerini şekil ile ifade ederek anlatınız.**
- 2) **Sertlik deneyleri ile ilgili standartları bulup listeleyiniz.**

Ödev teslim son tarih: 10 Nisan 2020 Perşembe

Ödevin gönderileceđi adres

memmt2020odev@gmail.com

KAYNAKLAR

- Metroloji, 1. Basım, Şubat 2013 , Tübitak Ulusal Metroloji Enstitüsü
- Chandler, H; Hardness Testing, Second Edition, ASM International, United States Of America, 1999.
- Pürçek, G.; Mekanik Malzemelere Uygulanan Mekanik Deneyler (Ders Notu), 2014
- Kayalı, E.S.; Ensari, C. Ve Dikeç, F.; Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri, İ.T.Ü. Kimya Metalürji Fa. Ofset Atölyesi, İstanbul, 1990.
- Güleç, Ş. Ve Aran, A.; Malzeme Bilgisi, Cilt 1, TÜBİTAK Marmara Bilimsel Ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü, Gebze, 1988.
- Ölçme Tekniği (Boyut, Basınç, Akış Ve Sıcaklık Ölçmeleri), Prof. Dr. Osman GENCELİ, Birsen Yayınevi.
- Metin Bulut, Sertlik Ölçme Metodları ve cihazları, www.bulutmak.com