

## **CZĘŚĆ TEORETYCZNA**

Twardość to zdolność materiału do przeciwstawiania się odkształceniom plastycznym przy wzajemnym nacisku dwóch ciał stykających się bardzo małymi częściami jej powierzchni . nie jest to stała fizyczna, lecz złożona właściwość, zależy ona zarówno od wytrzymałości jak i plastyczności danej próbki materiału, jak i od metody pomiaru.

$$H = k \cdot E_c^m \cdot R_{c0,01}^n$$

Gdzie m, n – materiałowe stałe doświadczalne

K – współczynnik,  $E_c$  – współczynnik sprężystości przy ściskaniu  $R_{c0,01}$  granica sprężystości przy ściskaniu

Najpopularniejsza grupa metod pomiaru twardości materiałów opiera się na statycznej próbie wciskania wgłębników w płaską powierzchnie materiału. Najbardziej rozpowszechnionymi metodami tego typu jest metoda Brinnela, Rockwella i Vickersa. Twardość w tych metodach opiera się na stosunku działającego obciążenia do powierzchni odcisku.

Prócz tego wyróżniamy także inne metody:

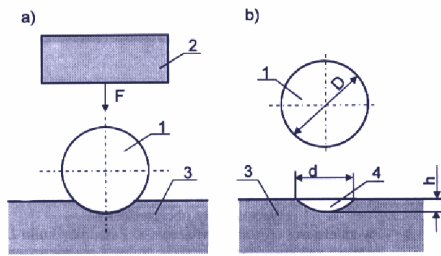
- zarysowania (Metoda Martensa, skala Mohsa dla kamieni mineralnych)
- dynamiczno-plastycznego wciskania wgłębnika (Baumanna, Poldi)
- dynamiczno-sprężystego wciskania wgłębnika (Shora)

Próby mogą się dzielić na badanie mikrotwardości i makrotwardości. Makrotwardość jak sama nazwa wskazuje odnosi się do obszaru z dużą ilością ziaren, mikrotwardość natomiast pozwala określić opór jaki napotyka wgłębnik przy próbie ściskania pojedynczych ziaren materiału polikrystalicznego. Wg polskiej normy makrotwardość to pomiary przy obciążeniu powyżej 9,81 N czyli 10kG. Poniżej tej wartości poprawnie wykonane pomiary nazywamy pomiarami mikrotwardości.

### **STATYCZNE METODY**

I tak dla metody Brinnela: Narzędziem wciskającym się w powierzchnię próbki jest kulka stalowa lub przy twardszych materiałach – kulka wykonana z węglików spiekanych. Kulka ta posiada średnicę D. Próbka jest odpowiednio gładkim materiałem, którego grubość musi być co najmniej 8 razy większa niż wielkość wgłębienia wykonanego pod danym obciążeniem.

Wizualizacja metody:



a) obciążenie próbki, b) odcisk

1 - penetrator (włębnik), 2 - siła obciążająca, 3 - próbka,  
4 - odcisk

Twardością Brinnela nazywamy stosunek siły pod danym obciążeniem do powierzchni czasy kulistej jaka została naznaczona na powierzchni materiału. Twardość się określa na podstawie średnicy odcisku  $d$ , zmierzonej po wykonaniu próby z obciążeniem.

$$HB = \frac{F}{S_{cz}} \quad [1]$$

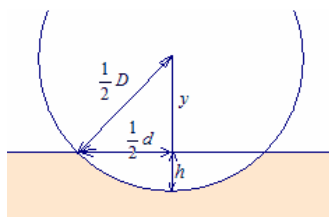
Pole powierzchni czasy kulistej obliczamy ze wzoru:

$$S_{cz} = \pi Dh \quad [2]$$

Gdzie  $h$  – wysokość powstałej czasy,  $D$  średnica kulki

Można zauważyć poprawność wzoru przez podstawienie za wysokość średnice kulki, otrzymujemy wówczas wzór na pole kuli:

$$S_{cz} = \pi D \cdot D = \pi D^2 = 4\pi R^2 \quad [3]$$



Z twierdzenia pitagorasa:

$$\left(\frac{1}{2}d\right)^2 + y^2 = \left(\frac{1}{2}D\right)^2$$

$$y^2 = \left(\frac{1}{2}D\right)^2 - \left(\frac{1}{2}d\right)^2 = \frac{1}{4}(D^2 - d^2)$$

$$h = \frac{1}{2}D - y = \frac{1}{2}D - \frac{1}{2}(D^2 - d^2)^{\frac{1}{2}}$$

Zatem:

$$S_{cz} = \pi D \cdot h = \pi D \cdot \left( \frac{1}{2} D - \frac{1}{2} \sqrt{D^2 - d^2} \right) = S = \frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2}) \text{ mm}^2 \quad [4]$$

Podstawiając do wzoru [1] – Twardość otrzymujemy wzór:

$$HB = \frac{F}{S_{cz}} = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \left[ \frac{kG}{mm^2} \right]$$

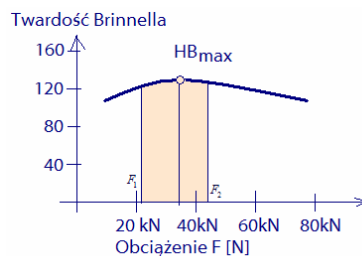
Lub

$$HB = \frac{2 \cdot 0,102 F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

[5]

Niektóre maszyny na skali mają jednostkę kp – kilopond – która jest równa jednemu kilogramowi siły.

Kiedy , na powierzchnie materiału oddziaływać będziemy za pomocą różnych obciążeń poprzez tą sama kulę, to uzyskamy podstawivszy dane do wzoru powyżej w przeważającej części różne wyniki. Jest to związane z naruszeniem podobieństwa geometrycznego pól powierzchni odcisków. Na wykresie poniżej można zauważyć tą zależność.

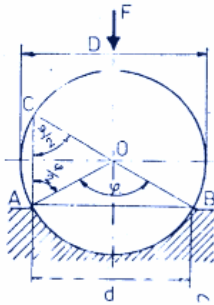


Powstaje krzywa osiągająca pewne maksimum pomiędzy punktami  $F_1$  i  $F_2$ .

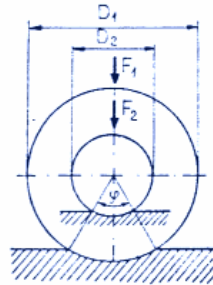
Doświadczalnie sprawdzono, że aby wyniki pomiarów były zadowalające, średnica otrzymanego odcisku  $d$  będzie zawierała się w granicach  $0,24D < d < 0,6D$

Aby zapewnić porównywalność pomiarów kulek o różnych średnicach spełnione musi być prawo podobieństwa. Trzeba określić kąt wciskania  $\varphi$ , określony na lewym rysunku poniżej

a)



b)



- a) Zależność średnicy czaszy odcisniętej w materiale od kąta wciskania i średnicy kulki  
 b) Podobieństwo geometryczne odcisków Brinnela, dokonanych za pomocą kul o różnych średnicach w tym samym materiale

Podstawiając te wartości do wzoru otrzymuje się:

$$d = D \sin \frac{\varphi}{2}$$

$$HB = \frac{0,102F}{D^2} \frac{2}{\pi \left(1 - \sqrt{1 - \sin^2 \frac{\varphi}{2}}\right)} = \frac{0,102F}{D^2} \frac{1}{\pi \sin^2 \frac{\varphi}{4}} \quad [7]$$

Ze wzrastającą średnicą wgłębnika musi iść w parze wzrost obciążenia inaczej krawędź odcisku będzie poszarpana i uzyskany pomiar nie będzie prawidłowy.

Założenie to znaczy tyle, że w naszym wyrażeniu czynnik zawierający kąt wciskania jest stały:

$$\frac{1}{\pi \sin^2 \frac{\varphi}{4}} = const. \quad [8]$$

$$HB = \frac{0,102F_1}{D_1^2} \frac{1}{\pi \sin^2 \frac{\varphi}{4}} = \frac{0,102F_2}{D_2^2} \frac{1}{\pi \sin^2 \frac{\varphi}{4}} = \dots$$

$$\frac{0,102F_1}{D_1^2} = \frac{0,102F_2}{D_2^2} = \frac{0,102F}{D^2} = \dots \quad [9]$$

$$\frac{0,102F_1}{D_1^2} = \frac{0,102F_2}{D_2^2} = \frac{0,102F}{D^2} = K$$

Gdzie K – to współczynnik obciążenia

Wzór ten pozwala dobrać siłę w zależności od rodzaju badanego materiału. I jest znormalizowany dla różnych materiałów (PN-91/H-04350) może on wynosić 30; 15; 10; 5 2,5; 1,25; 1

Dzięki czemu możemy dobrać siłę mając zasugerowany współczynnik obciążenia K:

$$F = \frac{KD^2}{0,102} \quad [10]$$

Im większa twardość materiału, tym współczynnik twardości jest większy.

Przy pomiarze twardości ważny jest też czas wykonywania próby może on wynosić 3 minuty dla twardości do 10HB (dla najmniejszych metali) 2 minuty dla twardości zawierającej się w przedziale 10-35HB, 1 minuta dla twardości 35-100HB; i około 10-15 sekund dla materiałów o twardości ponad 100HB.

Pomiarów uzyskanych przy różnych współczynnikach K nie porównuje się, gdyż metale uzyskują różne skłonności utwardzania się.

Czas jest większy dla metali plastycznych, gdyż ich struktura potrzebuje więcej czasu do ustalenia wgłębienia niż stopy i materiały twardsze.

Wyniki można porównywać ze sobą jedynie z pomocą empirycznego prawa Meyera: [11]

$$F = ad^n$$

Gdzie:

F – siła obciążająca

D – średnica odcisku

n i a – stałe doświadczalne; a zależy od materiału i średnicy kulki D

Podstawiając do prawa Meyera zależności współczynnika twardości i warunek podobieństwa otrzymujemy

$$F = 0,102 \cdot a \cdot D^n \cdot \sin^n \frac{\varphi}{2}$$
$$\frac{0,102 \cdot a_1 \cdot D_1^n \cdot \sin^n \frac{\varphi}{2}}{D_1^2} = \frac{0,102 \cdot a_2 \cdot D_2^n \cdot \sin^n \frac{\varphi}{2}}{D_2^2} = \frac{0,102 \cdot a_K \cdot D_1^n \cdot \sin^n \frac{\varphi}{2}}{D_K^2} = K \quad [12]$$
$$0,102 \cdot a_1 \cdot D_1^{n-2} \cdot \sin^{n-2} \frac{\varphi}{2} = 0,102 \cdot a_2 \cdot D_2^{n-2} \cdot \sin^{n-2} \frac{\varphi}{2} = 0,102 \cdot a_K \cdot D_1^{n-2} \cdot \sin^{n-2} \frac{\varphi}{2} = K$$

$\sin^{n-2} \frac{\varphi}{2}$  - jest stałe, gdyż argument jest stały toteż:

$$0,102 \cdot a_1 \cdot D_1^{n-2} = 0,102 \cdot a_2 \cdot D_2^{n-2} = 0,102 \cdot a_K \cdot D_1^{n-2} = \frac{K}{\sin^n \frac{\varphi}{2}} = \text{const.}$$

$$0,102 \cdot a_1 \cdot D_1^{n-2} = 0,102 \cdot a_2 \cdot D_2^{n-2} = 0,102 \cdot a_K \cdot D_1^{n-2} = \sigma_0$$

Aby wyznaczyć stałe  $a$ ,  $\sigma_0$ ,  $n$  należy logarytmować wyrażenie z prawa Meyera [10]

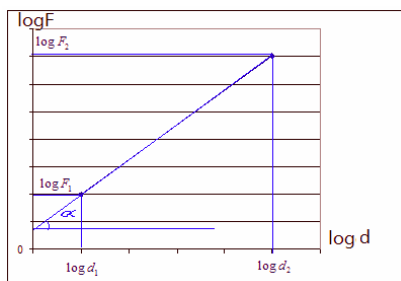
$$F = ad^n$$

$$\log F = \log(ad^n)$$

$$\log F = \log a + \log d^n$$

$$\log F = \log a + n \log d$$

Uzyskujemy linię prostą, z której metodą regresji liniowej można wyliczyć  $\log a$ , i tangensowy współczynnik kierunkowy wiążący zależność między siłą a średnicą odciskanych czaszy:



Aby wyznaczyć przybliżony współczynnik  $n$ , starczy dwa punkty na wykresie

$$\text{Co daje } n = \frac{\log F_2 - \log F_1}{\log d_2 - \log d_1} = \text{tg } \alpha \quad [14]$$

Stałą  $a$  można wyliczyć ze wzoru:

$$\log a = \log F - n \log d \quad [15]$$

Mając dane  $n$  i  $a$  stałą  $\sigma_0$  można wyliczyć ze wzoru

$$0,102 \cdot a \cdot D_1^{n-2} = \sigma_0 \quad [16]$$

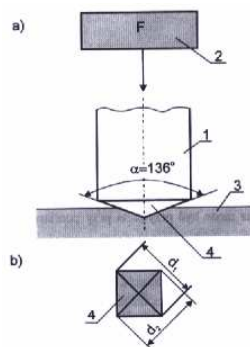
$$HB = \frac{2\sigma_0}{\pi} \frac{\sin^n \frac{\varphi}{2}}{1 - \sqrt{1 - \sin^2 \frac{\varphi}{2}}} \quad [17]$$

HB osiąga maximum jeśli pochodna względem sinusa połowkowego kąta wciskania będzie równa 0

$$\sin \frac{\varphi}{2} = \frac{\sqrt{n(n-2)}}{n-1} \quad [18]$$

W ten sposób możemy obliczyć HB 10/3000/30, oznacza to wg PN, że próba została przeprowadzona przy użyciu kulki o średnicy  $D=10\text{mm}$  i obciążeniu  $29\text{kN}$  przy próbie trwającej 30 sekund.

### *Twardość wg Vickersa (PN-91/H-04360)*



Pomiar twardości metoda Vickersa różni się od metody Brinnela przede wszystkim wgłębnikiem, który wg normy składa się z ostrosłupa prawidłowego o podstawie kwadratowej (piramidy), kat między przeciwległymi ścianami wynosi  $\alpha = 136^\circ$

Twardość określa się na podstawie zmierzonych przekątnych wykroju kwadratowego.

Tak jak w metodzie Brinnela twardość jest wyznaczona ze stosunku siły do powierzchni powstałej w materiale przez penetrację wgłębnikiem.

$$HV = \frac{F}{S}$$

Pole powierzchni wynosi:

$$S = \frac{d^2}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}$$

Gdzie  $d$  – to średnia arytmetyczna z dwóch przekątnych:

$$S = \frac{d^2}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{(d_1 - d_2)^2}{4 \cdot 2 \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{(d_1 - d_2)^2}{8 \sin \frac{\alpha}{2}}$$

Kąt jest znormalizowany  $\alpha = 136^\circ$  zatem można to uprościć:

$$HV = 1,85 \frac{F}{d^2} \quad \text{dla wyrażen siły w kG}$$

$$HV = 0,102 \cdot 1,85 \frac{F}{d^2} = 0,19 \frac{F}{d^2} \quad \text{dla wyrażen siły w N}$$

Zaletą tej metody, jest to, iż przy wyliczaniu twardości za pomocą różnych wgłębników otrzymujemy bardzo przybliżone pomiary, które nie wykazują ściśle monotonicznych zależności takich, jak w przypadku metody Brinnela przy użyciu kulki stalowej.

Aby wyniki były prawidłowe zaleca się aby odległość między odciskami wynosiła minimum  $2,5d$  dla stali oraz  $3d$  dla metali lekkich, ołowiu, cyny i ich stopów.

W przypadku odciskania próby na elemencie cylindrycznym, należy uwzględnić, aby przedłużenie siły działającej poprzez wgłębник przechodziło przez oś obrotową walca, podobnie w przypadku próby dokonanej na powierzchni kuli: przedłużenie siły ma wypaść w środku geometrycznym. Uzyskane pomiary średnicy należy przemnożyć przez znormalizowany współczynnik, uwzględniający kształt.

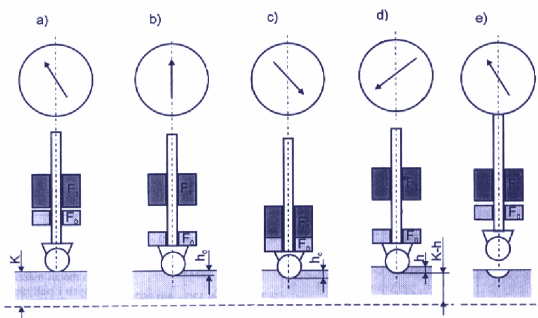
Wgłębник należy wciskać ze stałą prędkością do uzyskania całkowitej siły obciążającej około 15 sekund, czas działania obciążenia powinien wynosić 10-15sekund.

### ***Metoda Rockwella. (PN-91/H-04355 i PN-82/H-04362)***

Metoda Rockwella różni się od dwóch powyższych tym, iż wciskanie jest dwustopniowe. Wgłębkiem jest tutaj stożek diamentowy o kacie wierzchołkowym 120 stopni lub kulka stalowa o średnicy 1,588mm lub 3,175mm przy określonych obciążeniach.

Wartość twardości szczytuje się bezpośrednio na skali twardościomierza z czujnika zegarowego.

Przebieg obciążania:





- a) I faza pomiaru - zbliżenie próbki do węgelnika,
- b) II faza pomiaru - ustawienie obciążenia wstępnego,
- c) III faza pomiaru - obciążenie całkowite,
- d) VI faza pomiaru - usunięcie obciążenia pomiarowego (nadal pozostaje obciążenie wstępne) i odczyt wyniku ze skali,
- e) usunięcie obciążenia wstępnego i odsunięcie próbki od węgelnika

Na początku pomiaru węgelnik poddany jest obciążeniu początkowemu  $F_0$  i węgłbia się w badany materiał na głębokość  $h_0$ , którą przyjmuje się za *głębokość odniesienia*. Czujnik pomiarowy ustawia się w położeniu zerowym, lekki naddatek koryguje się obracając tablicę czujnika zegarowego (pozycja II).

Do obciążenia wstępnego dodaje się statycznie obciążenie główne  $F_z$ , które powoduje zagłębienie węgelnika na głębokość  $h_1$  (pozycja III). Zdejmując obciążenie główne  $F_z$  wskutek sprężystości materiału i samego twardościomierza następuje materiał powoduje podniesienie się skali o wysokość  $h_2$ .

$$\begin{aligned} &\text{Różnica:} \\ &h = h_1 - h_2 \end{aligned}$$

to przyrost głębokości, będący podstawą określenia twardości (pozycja IV).

Wartość trwałego przyrostu głębokości odcisku  $h$  nie może być przyjęta za miarę twardości, z uwagi na to, że dla mniejszych twardości otrzymywalibyśmy większe twardości liczbowe i odwrotnie dla większych twardości – mniejsze wartości liczbowe, a więc odmiennie niż w pozostałych metodach. Z tego względu w przypadku metody Rockwella przyjęto, że wynik pomiaru twardości jest wyrażony ogólnym wzorem:

$$HR = \frac{K - h}{c}$$

gdzie:

$K$  – wartość stała zależna od zastosowanego węgelnika oraz skali twardości Rockwella [mm],

$h$  – trwały przyrost głębokości odcisku [mm],

$c$  – wartość działki elementarnej czujnika [mm].

Podstawiając do ogólnego wzoru odpowiednie wartości stałej  $K$  i wartości działki elementarnej czujnika  $c$ , otrzymuje się następujące wzory na twardość Rockwella dla skal:

$$C - HRC = \frac{(0,20 - h)}{0,002} = 100 - e,$$

$$B - HRB = \frac{(0,26 - h)}{0,002} = 130 - e.$$

Twardość Rockwella odczytuje się bezpośrednio na tarczy czujnika pomiarowego.

W zależności od węgelnika i użytych obciążeń wstępnego i głównego; wyróżnić możemy 11 skal twardości Rockwella z 15 różnymi oznaczeniami.

## ***Część obliczeniowa***

### ***Metoda Brinnela***

Przed przystąpieniem do pomiaru zapoznano się z zależnością  $F = K \cdot D^2$

Gdzie D – to średnica poszukiwanej kulki

Dla rozpatrywanej próbki stalowej o budowie walca o średnicy 20mm i wysokości 25 mm rozpatrzono współczynnik obciążenia równy 30. Przed rozpoczęciem ćwiczenia zbadano materiał diamentowym próbnikiem stożkowym w metodzie Rockwella, aby sprawdzić czy badana stal nie jest hartowana, co mogłoby zniszczyć stalowy próbnik metody Brinnela.

Maksymalna siłą jaką dysponuje aparat jest  $250k_p=250kG$

Grubość badanego przedmiotu powinna być taka, aby na powierzchni przeciwległej do odcisku nie powstało odkształcenie, doświadczalnie stwierdzono, że grubość powinna być co najmniej 8 razy większa niż głębokość odcisków. A odległość między krawędziami odcisków większa od 3d (trzech średnic odcisków) , a pomiędzy ich środkami 4d, odległość od krawędzi przedmiotu powinna być większa niż 2,5 d

Grubość próbki jest wystarczająco duża, by wysokość wgłębienia wyniosła nawet 3,1mm. Ale odpowiadałoby to bardzo dużej kulce, dużej sile i odciskowi który nie zmieścił by się w trzech próbach na badanej próbki.

Na to jaką kulkę wybierzemy ma wpływ także rozstaw śladów wgłębników, możemy ułożyć je w dowolny kształt na przykład trójkąta równobocznego czy też ułożenia na jednej linii.

Układając odciski na średnicy próbki na jednym odcinku o długości 20 mm musimy odznaczyć 14 średnic d (dwa razy 2,5 d (od krawędzi do pierwszego odcisku) plus trzy razy średnica kulki 1d oraz dwa razy odległość trzech średnic 3d między odciskami daje to  $2,5d+1d+3d+1d+3d+1d+2,5d = 14d < 20mm$   
Czyli  $d < 1,4mm$

Taka wielkość średnicy wgłębienia  $d=1,4$  mm odpowiadałaby kulce średnicy około 3mm. Każde inne rozstawienie odcisków umożliwia zastosowanie większej kulki.

Mniejsza kulka, jaka jest dostępna ma średnice 2,5mm, tą kulkę dobieram jako właściwą do przeprowadzenia badania, pasuje ona ze względu na wielkość powierzchni próbki oraz jej wysokość. Wielkość kulki jest dobrana tak, aby przy uwzględnieniu obciążeń dostępnych krawędź odcisku była wyraźna.

Przy założeniu współczynnika obciążenia oraz dobranej kulki dobieram obciążenie potrzebne do wykonania próby:

$$F = K \cdot D^2 = 30 \frac{kG}{mm^2} \cdot (2,5mm)^2 = 187,5kG$$

Wykonuję trzykrotnie próbę z obciążeniem 187,5kG i kulką o średnicy 2,5mm (taką kombinację obciążenia i średnicy kulki łatwo można odnaleźć w tablicach).

<b>Obciążenie F</b>	<b>Kulka D</b>	<b>Średnica odcisku d</b>	<b>Głębokość odcisku</b>	<b>Stosunek d/D</b>	<b>Powierzchnia czasy</b>	<b>HB</b>
kG	mm	mm	mm	%	Scz mm.kw	
187,5	2,5	1,1	0,13	44	1,00	187,332
187,5	2,5	1,12	0,13	44,8	1,04	180,3239
187,5	2,5	1,1	0,13	44	1,00	187,332

Dokonyje obliczeń odchylenia standardowego trzech otworów przy sile 187,5kG, aby sprawdzić poprawność pomiarów

Można powiedzieć że twardość przy użyciu siły 187,5kG wynosła: HB = 185

### *Twardość wg Rockwella*

Wykonano 3 pomiary w skali HRB, na twardościomierzu, badając daną próbkę stalową. Odczytano ze skali urządzenia automatycznego 3 wyniki

HRB=84

HRB=87

HRB=86

Porównano pomiary w tabeli przeliczającej ze skalą HB i uzyskano prawidłowość

Obliczam dla powyższych trzech pomiarów błąd metodą odchylenia standardowego

n=3	$X_n$	$\varepsilon$	$\varepsilon^2$
	84,00	-2,33	5,44
	87,00	0,67	0,44
	88,00	1,67	2,78
średnia: $\bar{x}$	<b>86,33</b>	Sd	<b>2,08</b>

Obliczona wartość to HRB 86±2

Co wg tabel przeliczających odpowiada pomiarowi wg metody Brinnela

### *Pomiar mikrotwardości metodą Vickersa.*

Przed przystąpieniem do pomiarów należy wyznaczyć, jaką wartość ma jedna działka na pokrętle mikroskopu. W tym celu pod okularom mikroskopu umieszcza się płytkę szklaną lub inną formę wzorca. Na płytce znajduje się równomiernie naniesiona podziałka o długości 1 mm. Długość 1 mm podzielona jest na 100 części, a zatem 0,01 mm = 10 μm. Następnie sprawdzamy wyliczając z proporcji, jakiej liczbie obrotów bębna odpowiada jaka ilość działek ze skali wzorca.

W wyniku zastosowania obciążeni 200G – siły dostępnej w twardościomierzu średnia z kilku pomiarów wyniosła 168 działek

Wartość jednej działki:

$$X_{SR} = 0,3\mu m$$

Średnice wyliczymy mnożąc  
168 x 0,3 = d

Mikrotwardość obliczamy ze wzoru

$$HV_{\mu} = 1854,4 \frac{P[G]}{d^2} = 1854,4 \frac{200}{(168 \cdot 0,3)^2} = 145,9$$

## ***WNIOSKI***

Twardość jest parametrem niezwykle czułym na zmianę struktury materii i warstwy wierzchniej – zmienia się ona w wyniku obróbki chemicznej, cieplnej, mechanicznej (np. walcowanie, ciągnięcie). Twardość zmienia się w tym samym kierunku co granica plastyczności.

Badając materiał zbyt cienki lub dokonując prób w zbyt bliskiej odległości od siebie można uzyskać błędne wyniki.

Wyniki uzyskane w różnych skalach można ze sobą porównywać za pomocą odpowiednich tabel przeliczających.

Badanie twardości w przeciwieństwie do badania właściwości sprężystych i plastycznych w próbie ściskania lub rozciągania nie niszczy właściwości praktycznych przedmiotu. Pomiaru można dokonywać bezpośrednio na badanym elemencie maszyny, narzędziu itp. Pomiar twardości jest pomiarem bezpiecznym, tanim i prostym.

Zestawienie wyników:

Można powiedzieć że twardość przy użyciu siły 187,5kG wyniosła: HB = 185  
A przy sile 250kG wyniosła HB = 183 (ze średniej)

HB przy 187,5 kG	–	HB = 185
HB przy 250,0 kG	–	HB = 183

HRB 86

Co odpowiada zawartości około 0,6% węgla wg wykresu zawartość węgla/twardość Brinnela  
– na podstawie wykresu z książki Zofii Wendorff – Metaloznawstwo

**Więcej na: [www.tremolo.prv.pl](http://www.tremolo.prv.pl) , [www.tremolo.pl](http://www.tremolo.pl) dział laboratoria**

*©2002-2006 by Tremolo – Robert Gabor pomyśl zanim skopiujesz ☺*