

# Pomiar twardości

## 1. Wprowadzenie

Badanie twardości polega na wciskaniu węgelnika w badany materiał poza granicę sprężystości, do spowodowania odkształceń trwałych. Wobec czego *twardość* można określić jako miarę odporności materiału na odkształcenia trwałe powstające w wyniku wciskania węgelnika.

Twardość materiałów związana jest z naturą wiązań chemicznych i jej wpływem na przemieszczenie dyslokacji w metalach i ceramice. Podczas odkształcenia plastycznego w próbie twardości istniejące w materiale dyslokacje ulegają poślizgowi, w związku z tym w takiej próbie mierzy się opór jaki pokonują przemieszczające się w danym materiale dyslokacje (Ashby, 1995).

Badania twardości stosowane są przede wszystkim w metaloznawstwie i w związku z tym najwięcej metod pomiarów opracowano dla metali. Jednak niektóre z nich mają zastosowanie również w badaniu ceramik i polimerów. Pomiary twardości stosuje się często z uwagi na występowanie korelacji między twardością (Vickers, Brinell) a granicą plastyczności lub wytrzymałością na rozciąganie metali, ale również między twardością a składem fazowym lub Modułem Younga. Badanie twardości jest stosunkowo szybkie, proste i praktycznie nieniszczące.

Metody badania twardości można pogrupować w zależności od rodzaju przyłożonego obciążenia. *Statyczna próba twardości* dotyczy odkształcenia plastycznego pod działaniem obciążenia statycznego. Związana z właściwościami sprężystymi materiału, *twardość dynamiczna*, zwiana jest z odkształceniem udarowym. Natomiast opór materiału związany z zarysowaniem albo ścieralnością określa się w tzw. *próbach specjalnych badania twardości*, np. metoda Mohsa.

W praktyce najczęściej stosuje się statyczne próby twardości, polegające na powolnym wciskaniu węgelnika o określonym kształcie i z określonego materiału w badaną próbkę. Metody badań są znormalizowane a różnice polegają przede wszystkim na kształcie węgelnika i sposobie obliczenia. Do najbardziej powszechnych to metod statycznych należą: Brinella, Vickersa oraz Rockwella.

## 2. Opis poszczególnych metod statycznych pomiaru twardości

### I. Metoda Brinella.

Próba twardości według tej metody objęta jest normą PN-EN ISO 6506-1:2008. Polega ona na wciskaniu pod obciążeniem  $F$  węgelnika, w postaci hartowanej kulki stalowej o średnicy  $D$  (10; 5 2,5 1 mm) w powierzchnię badanego materiału, w czasie  $t$ . Średnica odcisku kuli  $d$ , jako średnia z dwóch pomiarów w kierunkach wzajemnie prostopadłych, służy do obliczania pola powierzchni czaszy. Twardość Brinella jest to stosunek siły obciążającej do pola powierzchni czaszy odcisku (rys. 1.).

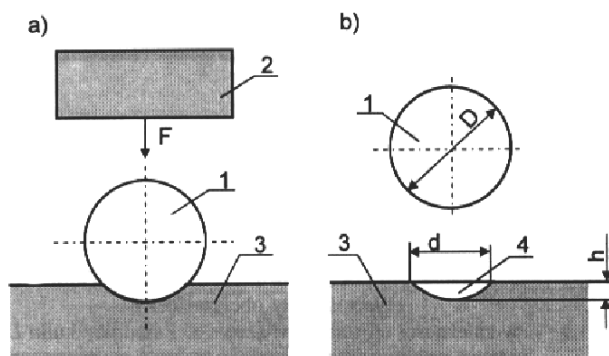
$$HB = \frac{F}{S_{cz}} \quad (1)$$

gdzie:

$HB$  - twardość wg Brinella,

$F$  - siła obciążająca,

$S_{cz}$  - pole powierzchni czaszy.



Rys. 1. Schemat obciążenia w metodzie Brinella

Ponieważ:

$$S_{cz} = p \cdot D \cdot h \quad (2)$$

przy czym:

$$h = \frac{1}{2} \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right) \quad (3)$$

to:

$$HB = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (4)$$

Kulki są wykonane ze stali stopowej i obrobione cieplnie do twardości równej HV=8500 (twardość w skali Vickersa) i można nimi mierzyć twardość do HB=4500; natomiast kulkami wykonanymi z węglików spiekanych, można mierzyć twardość do HB=6300. W zasadzie należy dobierać kulki o możliwie dużych średnicach, tak jednak, aby:

- 1) odstęp dwóch sąsiednich odcisków był nie mniejszy od czterokrotnej średnicy odcisku,
- 2) odstęp środka odcisku od krawędzi badanej powierzchni był nie mniejszy od  $2,5 d$ ,
- 3) grubość badanego przedmiotu w miejscu badania wynosiła 10 głębokości odcisku bez względu na twardość badanego materiału, tj.  $g \geq 10h$ .

Kulkę należy obciążyć bez wstrząsów w ciągu około 10 s. Czasy trwania próby dla metali pod pełnym obciążeniem podaje Tabela 1.

Tabela 1. Czas trwania próby dla metali

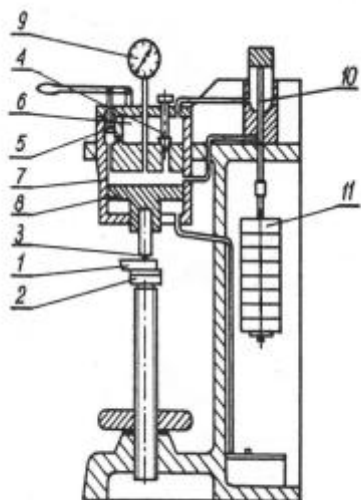
Materiał	Stal, żeliwo	Metale o twardości	
		HB $\geq$ 320	HB < 320
Czas, s	10 ÷ 15	30	60

Średnice odcisków  $d$  mierzy się za pomocą mikroskopu z podziałką o dokładności 0,01 mm. Dla obliczenia twardości danego materiału należy brać wartość średnicy z trzech pomiarów. Twardość HB w przybliżeniu jest proporcjonalna do wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$ :

$$R_m = cHB, \text{ MPa} \quad (5)$$

np. dla stali węglowej  $c=0,35$ .

Pomiar twardości dokonuje się na twardościomierzu Brinella pokazanym na rys. 2.



1. próbka,
2. stolik,
3. wgłębnik,
4. zawór cylindra,
5. pompka,
6. zbiornik oleju,
7. cylinder,
8. tłok,
9. manometr,
10. tłoczek podnoszący obciążenie 11.

Rys. 2. Schemat twardościomierza Brinella

Zaletami tej metody są:

- 1) możliwość pomiaru twardości w obszarze makro,
- 2) jedna skala twardości,
- 3) istnieje relacja między twardością a wytrzymałością.

Wadami zaś są:

- 1) kłopotliwy pomiar średnic odcisku i względnie pracochłonne obliczanie twardości,
- 2) nie nadaje się do pomiaru twardości materiałów twardych, warstw utwardzonych i małych przedmiotów,
- 3) pomierzona twardość jest zależna od siły nacisku,
- 4) nie można mierzyć twardości dużych gotowych wyrobów.

## II. Metoda Vickersa.

Próba twardości według metody Vickersa objęta jest normą PN-EN ISO 6507-1:2007. Pomiar twardości tą metodą polega na wciskaniu diamentowego wgłębnika w kształcie ostrosłupa o podstawie kwadratowej w powierzchnię badanego ciała. Twardość według metody Vickersa określa się analogicznie jak w metodzie Brinella, obliczając stosunek siły wciskającej wgłębnik w badany materiał do pola powierzchni bocznej odcisku:

$$HV = \frac{F}{S_b} \quad (6)$$

gdzie:

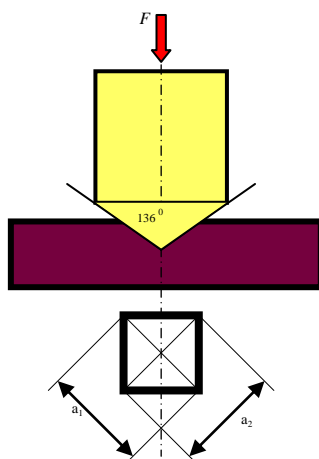
$F$  - siła wciskająca wgłębnik,

$S_b$  - pole powierzchni bocznej odcisku.

Pole powierzchni bocznej odcisku oblicza się ze wzoru:

$$S_b = \frac{a^2}{2 \sin \frac{136^\circ}{2}} = \frac{a^2}{1,8544} \quad (7)$$

gdzie:  $a$  - średnia długość przekątnych  $a_1$  i  $a_2$  (rys. 3.).



Rys. 3. Schemat obciążenia w metodzie Vickersa

Wstawiając wzór (7) do (6) otrzyma się:

$$HV = 1,8544 \frac{F}{a^2} \quad (8)$$

Naciski wgłębnika są znormalizowane i wynoszą:  $F=9,8; 24,5; 49; 98; 196; 294; 491; 981$  N. Dobór siły nacisku zależy od rozmiarów próbki. Przekątne odcisku należy mierzyć z dokładnością  $0,0001 \pm 0,00002$  mm. Kąt  $136^\circ$  ostrosłupa diamentowego jest tak dobrany, aby w tym samym tworzywie twardości Brinella przy  $d/D = 0,375$  i Vickersa były równe.

W rzeczywistości dla materiałów miękkich (do 300 HB) HV jest większe od HB o około 50 jednostek. Im twardszy materiał badany, tym HV jest większe od HB. Podawanie wyników twardości według Vickersa jest następujące:

- 1) symbol twardości HV poprzedza jej wartość  $x$ ,
- 2) symbol twardości HV uzupełnia się jeszcze dodatkowymi liczbami wartości obciążenia  $F$  i jego czasu działania  $t$  w przypadku, gdy obciążenie  $F$  jest różne od 294 N i czas  $t$  działania obciążenia całkowitego jest inny niż  $10 \div 15$  s (np.  $x$  HVF/t).

Zaletami tej metody są:

- 1) twardość nie zależy od wartości siły,
- 2) nadaje się do pomiaru materiałów o różnych twardościach,
- 3) nadaje się do pomiaru przedmiotów małych i cienkich warstw utwardzonych,
- 4) praktycznie nie niszczy przedmiotu,
- 5) duża dokładność pomiarów.

Wadami zaś są:

- 1) konieczność dokładnego oczyszczenia powierzchni,
- 2) długotrwałość pomiarów,
- 3) nie nadaje się do pomiarów makrotwardość stopów gruboziarnistych,
- 4) nie można mierzyć twardości dużych gotowych wyrobów.

### III. Metoda Rockwella.

Próba twardości według metody Rockwella objęta jest normą PN-EN ISO 6508-1:2007. Metoda ta opiera się na pomiarze głębokości odcisku wykonanego przez wciśnięcie kulki stalowej o średnicach od 1/2 do 1/16 cala lub stożka diamentowego (dla materiałów twardszych) o kącie wierzchołkowym 120<sup>0</sup> w powierzchnię badanego materiału.

Pomiaru twardości dokonuje się mierząc głębokość odcisków, stosując umowne skale twardości (15 skal oznaczonych literami od A do V). Zgodnie z normą podstawowymi skalami są C i B, dodatkowymi zaś A i F. Szczegółowe informacje o tych skalach znajdują się w Tabeli 2.

Symbol skali	Zastosowanie	Wgłębnik	Obciążenie, N			Oznaczenie
			Wstępne	Główne	Całkowite	
A	Węglik spiekane, stal głęboko utwardzana, stal (twardość > 67 HRC)	Stożek diamentowy	98	490	588	HRA
B	Stopy miedzi, miękkie stale, stopy aluminium, żeliwo (twardość 35÷100 HRB)	Kulka stalowa 1/16 cala	98	883	981	HRB
C	Stal, twarde żeliwo, tytan, głęboko utwardzana stal (twardość 20÷67 HRC)	Stożek diamentowy	98	1373	1471	HRC
F	Wyżarzane stopy miedzi, cienkie blachy metalowe (twardości > 35 HRB)	Kulka stalowa 1/16 cala	98	490	588	HRF

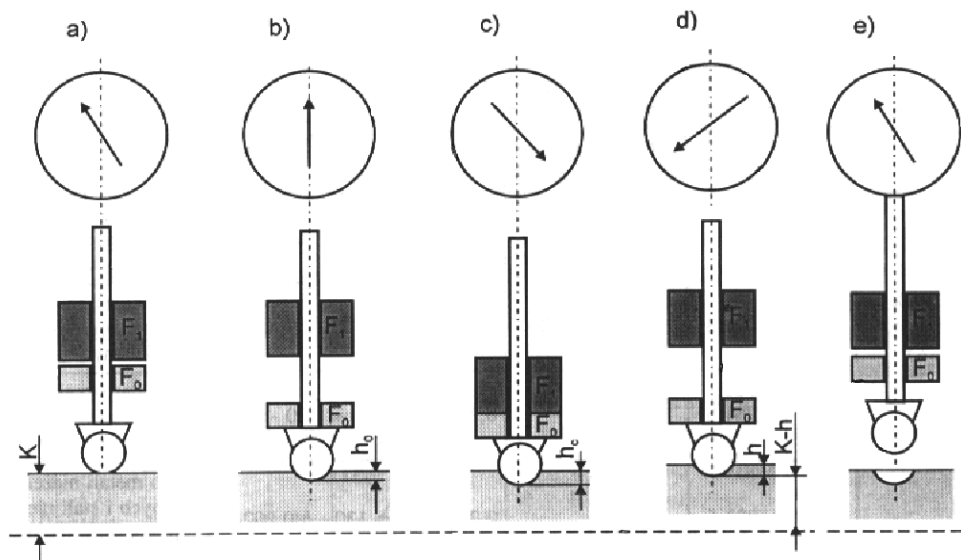
Miarą twardości Rockwella jest głębokość, na jaką zagłębi się wgłębnik w sposób trwały i określa się wzorem:

$$HR = K - \frac{h}{0,002} \quad (9)$$

gdzie:

$K$  - stała umowna zależna od rodzaju wgłębniaka, która dla stożka wynosi 100, a dla kulki 130, 0,002mm -jednostkowa głębokość; dlatego czujnik w aparacie Rockwella zaopatrzone jest w dwie skale przesunięte względem siebie o 30 działek,

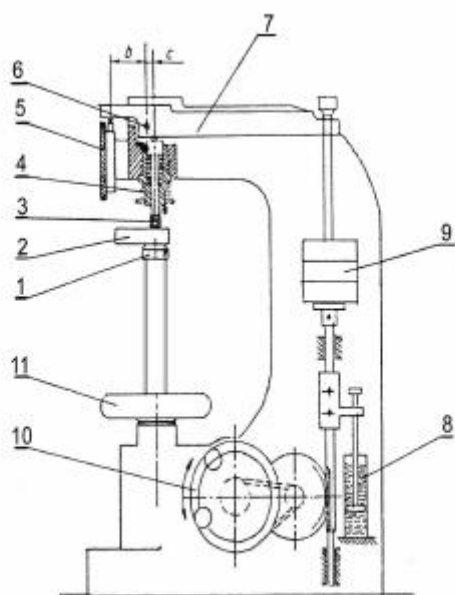
$h$  - trwałe zagłębienie wgłębniaka po przyłożeniu i zdjęciu obciążenia głównego (Rys. 4.).



**Rys. 4. Schemat obciążania w metodzie Rockwella**

- a) I faza pomiaru - zbliżenie próbki do wgłębnika,
- b) II faza pomiaru - ustawienie obciążenia wstępnego  $F_0$ ,
- c) III faza pomiaru - obciążenie całkowite  $F_1+F_0$ ,
- d) VI faza pomiaru - usunięcie obciążenia pomiarowego (nadaj pozostaje obciążenie wstępne  $F_0$ ) i odczyt wyniku ze skali,
- e) usunięcie obciążenia wstępnego i odsunięcie próbki od wgłębnika

Grubość przedmiotu w badanym miejscu nie powinna być mniejsza niż  $8h$ . Odległość środków odcisków sąsiednich i odległości ich od brzegów przedmiotu powinny być nie mniejsze niż  $3\text{mm}$ . Za wynik miarodajny należy przyjąć średnią arytmetyczną, z co najmniej trzech pomiarów. Schemat aparatu Rockwella przedstawiono na rys. 5.



**Rys. 5. Schemat aparatu Rockwella**

- 1. stół,
- 2. próbka,
- 3. wgłębnik,
- 4. uchwyt wgłębnika,
- 5. czujnik,
- 6. przegub dźwigni,
- 7. dźwignia,
- 8. amortyzator olejowy,
- 9. ciężarki,
- 10. urządzenie do podnoszenia dźwigni,
- 11. pokrętło do podnoszenia stołka 1.

Sposób pomiaru jest następujący.

Na stoliku **1** kładzie się próbkę **2** i pokręcając pokrętłem **11** podnosi się próbkę aż do zetknięcia się z wgłębnikiem **3**, co poznaje się po drgnięciu wskazówki czujnika **5**. Od tego położenia podnosi się stół jeszcze o wysokość odpowiadającą trzem obrotom wskazówki czujnika tak, aby wskazówka stanęła w pozycji pionowej w górę z dokładnością  $\pm 5$  działek; spowoduje to uniesienie się samej dźwigni, której ciężar jest tak dobrany, że na wgłębniku uzyskuje się nacisk wstępny  $F_0 = 98 \text{ N}$ . W tym położeniu nastawia się czujnik **5** na wskazanie początkowe 100 w skali C przy stosowaniu stożka diamentowego, lub 130 (30 + pełny obrót wskazówki) w skali B, przy zastosowaniu kulki.

W twardościomierzach Rockwella stosuje się czujnik zegarowy z podziałką dzieloną na 100 działek. Przesunięcie trzpienia czujnika o 0,01mm odpowiada jednej działce. Ponieważ stosunek ramion  $a/b = 1/5$ , to jednej działce odpowiada przesunięcie wgłębnika o 0,002mm. Następnie zwalnia się dźwignię **10**, co powoduje przyłożenie obciążenia głównego  $F_1$ , którego wartość została ustalona przez zawieszenie na szalce odpowiedniego ciężarka **9**. W tym czasie wskazówka czujnika cofa się do liczb mniejszych w miarę, jak rośnie obciążenie na wgłębniku, gdyż amortyzator olejowy **8** powoduje powolne wzrastanie siły. Gdy siła osiągnie pełną wartość zaczyna się mierzyć czas i po 10÷15 sekundach podnosi się dźwignię **10**. Po tej czynności wskazówka czujnika wskazuje badaną twardość, którą należy zanotować w tabeli pomiarowej. Pomiar należy powtórzyć co najmniej pięciokrotnie.

Zaletami tej metody są:

- 1) możliwość pomiarów twardości materiałów o różnych twardościach,
- 2) duża szybkość pomiarów, dzięki czemu metoda ta nadaje się do pomiarów masowych.

Wadami zaś są:

- 1) istnieje wiele źródeł błędów, szczególnie wynikających z pomiaru głębokości odcisku,
- 2) duża liczba skal umownych i przez to konieczność porównywania ich za pomocą tablic,
- 3) nierównomierność skal,
- 4) nie można mierzyć twardości dużych gotowych wyrobów.

## 5. Literatura

1. **Ashby M. F., Jones D. R. H.** – *Materiały inżynierskie*. WNT Warszawa 1996
2. **Blicharski M.** – *Wstęp do inżynierii materiałowej*. WNT Warszawa 2001
3. **Dobrzański L.** – *Metaloznawstwo z podstawami nauki o materiałach*. WNT Warszawa 1998
4. **Dobrzański L.** – *Metaloznawstwo i obróbka cieplna stopów metali*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1993
5. **Lis J.** – *Laboratorium z nauki o materiałach*. Skrypty uczelniane nr 1566. AGH – Uczelniane Wydawnictwa Naukowe – Dydaktyczne. Kraków 2000

Joanna Hydzik-Wiśniewska, KGBiG