

Zdzisław Zatorski¹⁾, Rafał Biernat¹⁾

ENERGETYCZNE OKREŚLENIE TWARDOŚCI BRINELLA

ENERGY-BASED DETERMINATION OF BRINELL HARDNES

STRESZCZENIE W artykule zweryfikowano energetycznie twardość Brinella materiałów konstrukcyjnych. Badania realizowano w Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni przy użyciu oprzyrządowanych maszyn wytrzymałościowych MTS 810.12 i FU 1000. Analiza wykresów siła — głębokość odcisku służyła do wyznaczenia energii właściwych odkształceń sprężystych, plastycznych i całkowitych absorbowanych przez materiał. Energie właściwe wyznaczono przez podzielenie odpowiednich wartości energii przez objętość odkształceń całkowitych, sprężystych oraz plastycznych odcisku.

Słowa kluczowe:

twardość Brinella, energie właściwe odkształceń, materiały sprężysto-plastyczne, odkształcenia całkowite, sprężyste, plastyczne.

ABSTRACT This article presents energy-based verification of Brinell hardness in construction materials. The investigations were conducted at the Naval Academy in Gdynia using testing machines MTS 810.12 and FU 1000. The analysis of force-indentation depth diagrams was used to determine proper energies of elastic, plastic and total strains being absorbed by the material. In order to determine the proper energies the appropriate energy values were divided by the volume of total, elastic and plastic strains of the indentation.

Keywords:

Brinell hardness, proper energies of strains, materials elastic-plastic, volume of total, elastic and plastic.

DOI: 10.5604/0860889X.1139636

¹⁾ Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny, 81-103 Gdynia, ul. J. Śmiedowicza 69; e-mail: z.zatorski@amw.gdynia.pl

WSTĘP

Zagadnieniom twardości wiele uwagi poświęcił Arystoteles [2] i jego opisowe definicje mogły posłużyć do sformułowania szeregu technologicznych metod pomiaru [3]. Dotyczyły one zarówno materiałów sprężysto-plastycznych, kruchych, jak i porowatych. Dla pomiaru twardości materiałów sprężysto-plastycznych wykorzystuje się metody Brinella, Meyera, Vickersa i Rockwella. Metoda Meyera jest najlepszą miarą właściwości plastycznych [5, 8].

Szczególne miejsce zajmują metody pomiaru twardości w układach oprzyrządowanych w zakresie mikro- i nanoskali, zwłaszcza dla materiałów wielowarstwowych oraz supertwardych [7, 9]. Dzięki temu można uzyskać informacje o właściwościach sprężystych materiałów, zwłaszcza modułu Younga i liczby Poissona [1, 4, 6].

Celem artykułu jest porównanie metody technologicznej, jaką jest pomiar twardości metodą Brinella, z metodą fizyczną, która opiera się na określeniu energii odkształceń plastycznych, a zarazem całkowitych i sprężystych, które towarzyszą procesowi powstawania odcisku w materiale, i odpowiednio podzielenie otrzymanych wartości przez objętość odkształceń całkowitych, sprężystych oraz plastycznych odcisku. Po wykonaniu powyższych czynności można zweryfikować wymiar energetyczny twardości z twardością wybranych materiałów konstrukcyjnych uzyskaną z pomiarów twardościomierzem Brinella.

INTRODUCTION

The issue of hardness was given a lot of consideration by Aristotle [2] and his descriptive definitions could be used to formulate a lot of technological measurement methods [3]. This applied not only to elastic-plastic, brittle and porous materials. For testing hardness of elastic-plastic materials Brinell, Meyer, Vickers and Rockwell methods are used. Meyer Method is the best for testing plastic properties [5, 8].

Methods for measuring hardness in systems using micro nano and scale instrumentation, and especially for multi-layer and super hard materials [7, 9] have a special place. Owing to them it is possible to obtain information on the elastic properties of materials, especially with regard to Young's modulus and Poisson number [1, 4, 6].

The aim of this article is to compare the technological method, i.e. measuring hardness with the Brinell method, with the physical method, which is based on determining the energy of plastic strain, and simultaneously total and elastic strain magnitudes which accompany the process of indentation formation, and then properly dividing the magnitudes obtained by the volume of the total, elastic and plastic indentation strains. Afterwards the energy-based hardness dimension can be compared with the hardness of some construction materials measured with the Brinell hardness tester.

POMIARY TWARDOŚCI METODĄ BRINELLA

Pomiar twardości próbek przy użyciu twardościomierzy Brinella (wg PN-EN ISO 6506-1:2002) polega na wciskaniu siłą F [N] węgłownika w postaci twardej stalowej kulki o średnicy D w wygładzoną powierzchnię badanego metalu oraz pomiarze średnicy d odcisku.

Twardość Brinella HB jest ilorazem siły obciążającej F przez powierzchnię kulistą odcisku S_{cz} , gdzie pole powierzchni czaszy kulistej S_{cz} oblicza się ze wzoru

$$S_{cz} = 0,5\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2}), \text{ [mm}^2\text{]}. \quad (1)$$

PN-EN ISO 6506-1:2002 podaje wzór do obliczania twardości Brinella HB

$$HB = \frac{2F \cdot 0.102}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]. \quad (2)$$

Obciążenie F będzie prawidłowo dobrane dla danego materiału, gdy średnica otrzymanego odcisku będzie zawarta w granicach $0,25 D \leq d \leq 0,6 D$. Porównywalne ze sobą wartości liczbowe twardości można uzyskać, gdy współczynnik obciążenia K do wyznaczenia siły działającej na kulkę $F = K \cdot D^2$ jest wartością znormalizowaną i wynosi: 30, 10, 5, 2,5 oraz 1, zależnie od twardości badanego materiału. Badane materiały poddano obciążeniom od 304N do 29430N kulkami o średnicy (2,5, 5 i 10 mm), a twardości Brinella podano w tabeli 1.

MEASUREMENTS WITH THE BRINELL HARDNESS METHOD

Measuring hardness samples with Brinell hardness tester (in accordance with PN-EN ISO 6506-1:2002) is based on pressing by force F [N] an indenting tool in the form of hard steel ball, having diameter D , into a planished surface of the tested metal and then on measuring the diameter d of the indentation.

The Brinell hardness HB is the quotient of the force F divided by the spherical surface of the indentation S_{cz} , where the area of the spherical cap is calculated from the formula

PN-EN ISO 6506-1:2002 provides the formula for calculating the Brinell hardness HB

The load F will be properly selected for a given material if the diameter of the obtained indentation is $0,25 D \leq d \leq 0,6 D$. Numerical magnitudes of hardness comparable with each other can be obtained, when the load coefficient K for determining the force applied to on ball $F = K \cdot D^2$ is the standardized magnitude and is equal to: 30, 10, 5, 2,5 and 1, depending on the material hardness. The tested materials were subjected to loads from 304N do 29430N using balls having 2,5, 5 and 10 mm in diameter, and the Brinell hardness magnitudes are presented in table 1.

Tabela 1. Twardość Brinella HB badanych materiałów
 Table 1. The Brinell hardness HB for tested materials

Rodzaj materiału / Material grade	Twardość / Hardness HB
Stop Al / Al Alloy, EN AW-7020 AlZn4, 5Mg1 — PA 47	65
Stal / Steel, S235JR	128
Stal / Steel, P265GH	146
Stal / Steel, X2CrNiMnMoNb21-16-5-4	161
Brąz / Bronze, BMA 12733, CuMn12Al7Fe3Ni3	202
Stal / Steel, 10MnCrMoB3-5-5-S620QL	301
Płytką wzorcowa / Hardness block, 502 HV/84	471

OKREŚLENIE ENERGETYCZNEGO WYMIARU TWARDOŚCI BRINELLA

Przebieg obciążenia próbki siłą F [N] w zależności od głębokości odcisku h [mm] uzyskany z maszyny wytrzymałościowej przedstawiono schematycznie na rysunku 1. Na jego podstawie wyznaczono energię odkształceń całkowitych, sprężystych i plastycznych, gdzie:
 L_c — energia odkształceń całkowitych

$$L_c = \int_0^{h_c} F \cdot dh, \text{ [N mm]}, \quad (3)$$

L_{sp} — energia odkształceń sprężystych

L_{sp} — energy of elastic strains

$$L_{sp} = \int_{h_p}^{h_c} F \cdot dh, \text{ [N mm]}, \quad (4)$$

L_p — energia odkształceń plastycznych

L_p — energy of plastic strains

$$L_p = \int_0^{h_c} F \cdot dh - \int_{h_p}^{h_c} F \cdot dh, \text{ [N mm]}, \quad (5)$$

gdzie:

where:

h_c — głębokość odkształceń całkowitych odcisku, [mm]
 depth of indentation total strains, [mm];

h_{sp} — głębokość odkształceń sprężystych odcisku, [mm]
depth of indentation elastic strains, [mm];

h_p — głębokość odkształceń plastycznych odcisku ($h_p = h_c - h_{sp}$), [mm]
depth of indentation plastic strains ($h_p = h_c - h_{sp}$), [mm].

Energię właściwą odkształceń całkowitych l_c , sprężystych l_{sp} i plastycznych l_p wyznaczamy ze wzoru

The specific energy of total l_c , elastic l_{sp} and l_p strain magnitudes are calculated from the formula

$$l_{c,sp,p} = \frac{L_{c,sp,p}}{V_{c,sp,p}}, \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]. \quad (6)$$

Energię właściwą odkształceń całkowitych, sprężystych i plastycznych w jednostkach twardości Brinella wyznaczamy z zależności

The specific energy of total, elastic and plastic magnitudes in the Brinell hardness units are calculated, according to

$$HB_{c,sp,p} = \frac{0.102 L_{c,sp,p}}{V_{c,sp,p}}, \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]. \quad (7)$$

Gdy do obliczenia objętości odcisku V_p wyznaczamy średnicę d_p i głębokość h_p z pomiaru

When, in order to calculate the indentation volume V_p the diameter d_p and the depth h_p are calculated from the measurement

$$V_p = \frac{1}{6} \pi h_p (0,75 d_p^2 + h_p^2), [\text{mm}^3] \quad (8)$$

lub wyznaczamy średnicę d_p z pomiaru i obliczymy h_{pw} zgodnie z normą

or the diameter d_p is calculated from the measurement and h_{pw} is calculated in accordance with the standard

$$h_{pw} = 0,5(D - \sqrt{D^2 - d_p^2}), [\text{mm}], \quad (9)$$

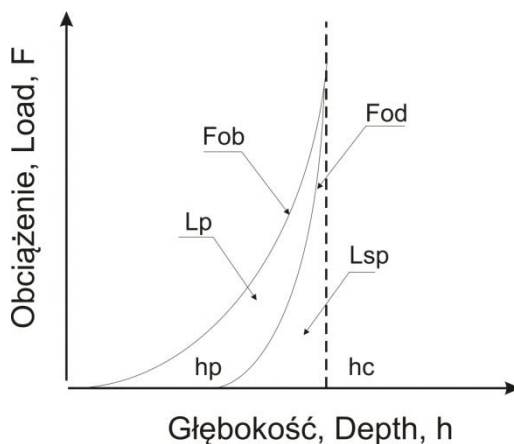
wówczas energię właściwą odkształceń plastycznych w jednostkach twardości Brinella oznaczamy odpowiednio przez HB_p oraz HB_{pw} .

then the specific energy of plastic strains in the Brinell hardness units are marked with HB_p and HB_{pw} respectively.

Do obliczenia objętości odcisku V_c i V_{sp} wyznaczamy głębokości h_c i h_{sp} z pomiaru oraz obliczamy średnicę d_c zgodnie z normą

In order to calculate the indentation volume V_c i V_{sp} the depth h_c and h_{sp} is determined from the measurement and the diameter d_c is calculated following the norm

$$d_c = 2\sqrt{D h_c - h_c^2}, [\text{mm}]. \quad (10)$$



Rys. 1. Przebieg obciążenia próbki siłą F w zależności od głębokości odcisku h :
 L_p, L_{sp} — energia odkształceń plastycznych i sprężystych, h_p, h_c — głębokość odkształceń plastycznych i całkowitych, F_{ob}, F_{od} — siła obciążenia i odciążenia

Fig. 1. The load distribution of force F dependent on the indentation depth h :
 L_p, L_{sp} — energy of plastic and elastic strains, h_p, h_c — depth of plastic and total strains,
 F_{ob}, F_{od} — load and relieve force

Dla wyznaczenia energetycznego wymiaru twardości Brinella badaniom poddano te same próbki, które wcześniej użyto w pomiarach twardościomierzem Brinella. W badaną próbkę wciskano również te same kulki o średnicy 2,5, 5 lub 10 mm. Było to możliwe dzięki wmontowaniu próbnika z twardościomierza Brinella do specjalnie skonstruowanego uchwytu, jak pokazano na rysunku 2.

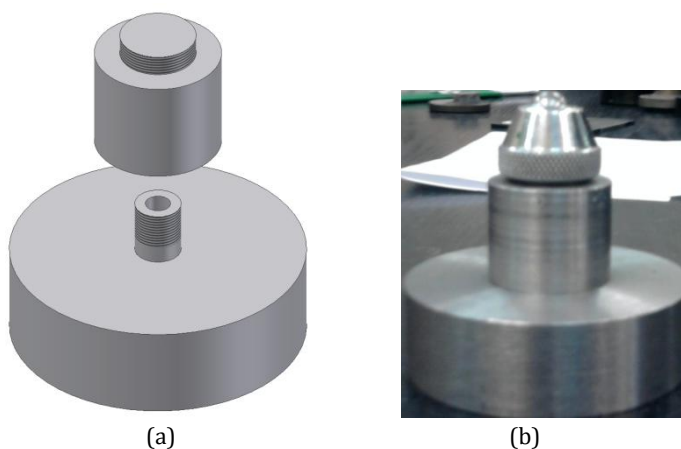
In order to calculate the energy dimension of Brinell hardness the same samples as used earlier in measurements with the Brinell hardness tester were tested. The same 2,5, 5 or 10 mm in diameter balls were pressed into the tested sample. It was possible owing to fitting a sampler from the Brinell hardness tester to a specially designed grip, as shown in figure 2.

Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej FU 1000 przy obciążeniu próbek siłą do 10 kN oraz na maszynie wytrzymałościowej MTS 810.12

The tests were carried using the strength testing machine FU 1000 for the load applied to samples with strength up to 10 kN and the strength testing machine MTS 810.12 for the

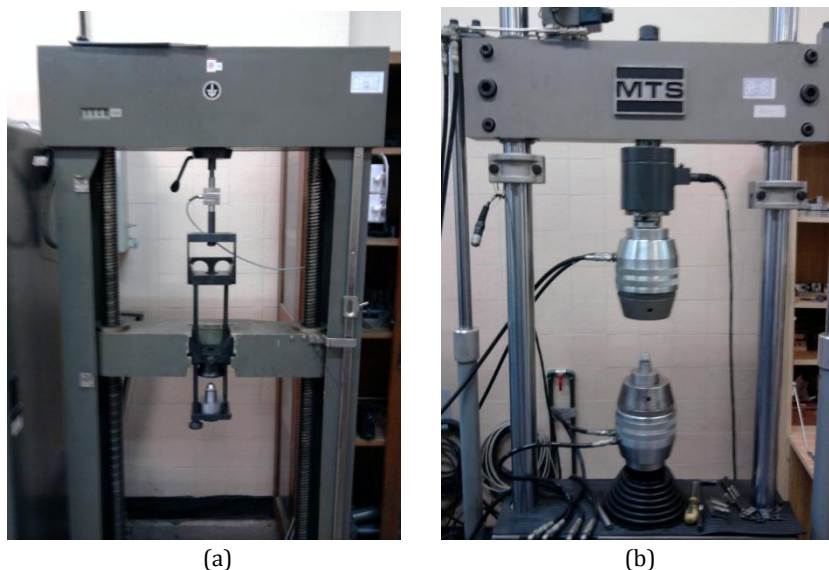
przy obciążeniu próbek stalowych siłą do 100 kN, jak pokazano na rysunku 3.

load applied to samples with strength up to 100 kN, as shown in figure 3.



Rys. 2. Model uchwyty uniwersalnego dla wgnębnika z kulką o średnicy 2,5, 5 i 10 mm (a) oraz uchwyt z wmontowanym wgnębnikiem z kulką o średnicy 10 mm (b)

Fig. 2. A Model of a universal grip for a an indenting tool with a 2,5, 5 and 10 mm in diameter ball (a) and the grip having the fitted indenting tool with 10 mm in diameter ball (b)



Rys. 3. Weryfikacja twardości metodą energetyczną na maszynie wytrzymałościowej FU1000 (a) oraz maszynie wytrzymałościowej MTS 810.12 (b)

Fig. 3. Hardness verification by means of energy-based method on a strength testing machine FU1000 (a) and strength testing machine MTS 810.12 (b)

W pomiarach wykorzystano również dane wyjściowe potrzebne do pomiaru twardości metodą Brinella. Współczynnik K , średnicę kulki D oraz obciążenie F podano przykładowo w tabeli 2.

In order to conduct the measurements initial data necessary for measuring hardness with the Brinell method was used. Examples of coefficient K , ball diameter D and load F are presented in table 2.

Tabela 2. Dane wyjściowe do energetycznej weryfikacji twardości metodą Brinella (HB_p)
Table 2. The initial data used for energy-based hardness verification with the Brinell metod (HB_p)

Rodzaj materiału Material grade	Współczynnik obciążenia Load factor K	Średnica kulki Ball diameter D [mm]	Średnica odcisku Indentation diameter d_p [mm]	Siła Load F [N]
Stop Al / Al Alloy EN AW-7020 AlZn4, 5Mg1 — PA 47	5	2,5	0,809	306,00
Stal / Steel S235JR	10	2,5	0,81	642,60
Stal / Steel P265GH	10	2,5	0,757	686,46
Stal / Steel X2CrNiMnMoNb21-16-5-4	10	2,5	0,697	612,00
Brąz / Bronze, BMA 12733, CuMn12Al7Fe3Ni3	10	2,5	0,638	652,80
	30	2,5	0,896	1938,00
Stal / Steel 10MnCrMoB3-5-5-S620QL	30	5	1,42	7746,90
Płytki wzorcowa / Hardness block, 502 HV/84	30	10	2,8	29591,7

ENERGETYCZNA WERYFIKACJA TWARDOŚCI BRINELLA

Na rysunkach 4. i 5. przedstawiono przebieg obciążenia siłą F [N] próbek stalowych w zależności od głębokości odcisku h [mm], gdzie: F_{ob} — siła obciążenia, F_{od} — siła odciążenia. Stosownie do przyłożonych sił obciążenia F_{ob} i odciążenia F_{od} uzyskane przebiegi aproksymowano wielomianem drugiego stopnia

ENERGETYCZNA WERYFIKACJA TWARDOŚCI BRINELLA

Figures 4 and 5 present the load distribution with force F [N] of steel samples depending on the indentation depth h [mm], where: F_{ob} — load force, F_{od} — relieve force. Applying the load F_{ob} and relieve F_{od} force magnitudes the obtained distributions were approximated with the second degree polynomial

$$F = A_1 h^2 + A_2 h + A_3, \text{ [N]}, \quad (11)$$

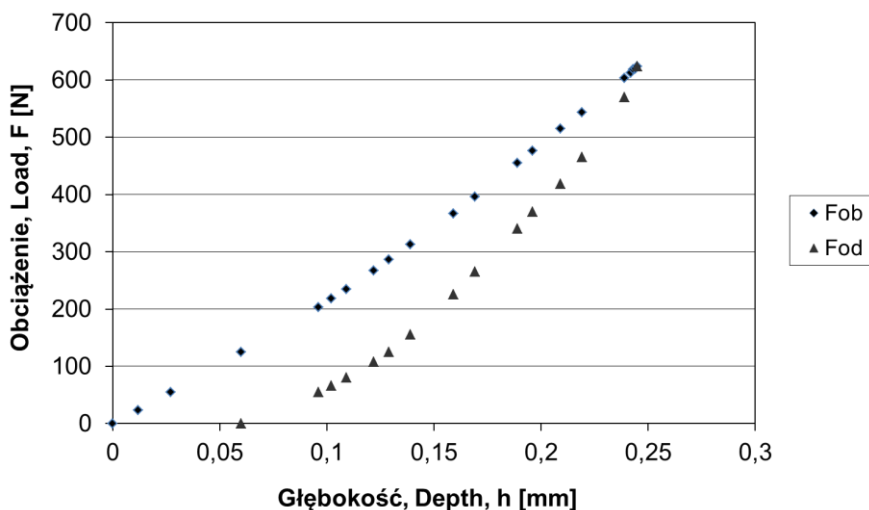
gdzie:

where:

A_1, A_2, A_3 — stałe wyznaczone doświadczalnie
constants determined experimentally.

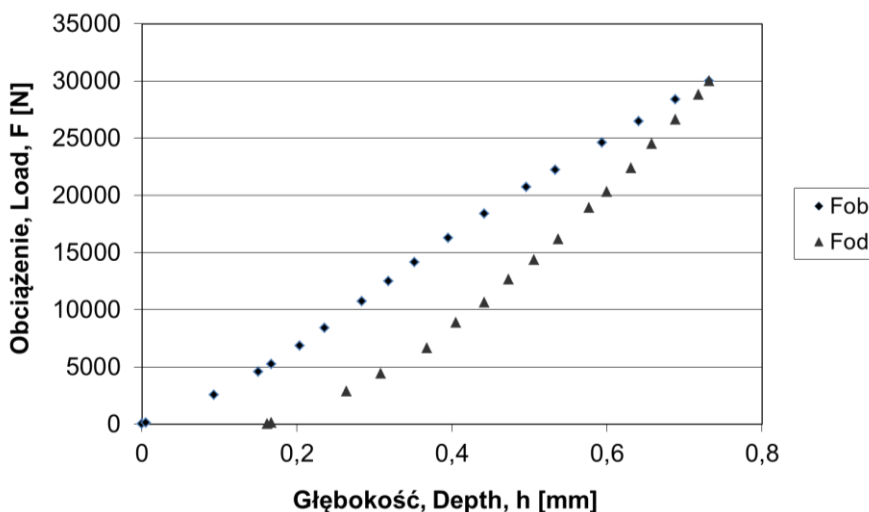
Na tej podstawie wyznaczono energię odkształceń: całkowitych L_c , sprężystych L_{sp} i plastycznych L_p , zgodnie z wzorami (3-5).

Based on this, the energy strains were determined: total L_c , elastic L_{sp} and plastic L_p , following the formulas (3-5).



Rys. 4. Przebieg siły F obciążającej próbkę ze stali ferrytyczno-perlitycznej uzyskany na maszynie wytrzymałościowej FU1000 w zależności od głębokości odcisku h , gdzie: F_{ob} — siła obciążenia, F_{od} — siła odciążenia

Fig. 4. The distribution of force F applying load to a sample made of ferritic-perlitic steel, obtained on strength testing machine FU1000, depending on the indentation depth h , where: F_{ob} — load force, F_{od} — relieve force



Rys. 5. Przebieg siły F obciążającej płytkę wzorcową 502 HV10 uzyskany z maszyny wytrzymałościowej MTS 810.12 w zależności od głębokości odcisku h , gdzie: F_{ob} — siła obciążenia, F_{od} — siła odciążenia

Fig. 5. The distribution of force F applying load to hardness block 502 HV10, obtained from strength testing machine MTS 810.12, depending on the indentation depth h , where: F_{ob} — load force, F_{od} — relieve force

Następnie według wzoru (6) wyznaczono energie odkształceń właściwych: całkowitych l_c , sprężystych l_{sp} i plastycznych l_p , które otrzymano przez podzielenie odpowiednich wartości energii przez objętość odkształceń całkowitych, sprężystych oraz plastycznych odcisku.

Energię właściwą odkształceń plastycznych l_p wyznaczono dwoma sposobami. Energetyczny wymiar twardości Brinella wyznaczany w jednostkach twardości HB_{pw} i HB_p zaprezentowano w tabelach 3. i 4.

Then, following the formula (6) the strain energy magnitudes: total l_c , elastic l_{sp} and plastic l_p , obtained by dividing relevant energy magnitudes by the volume of the total, elastic and plastic strains of the indentation, were determined.

Two methods were used to determine the specific energy of plastic strains l_p . The Brinell energy-based hardness dimension determined in hardness units HB_{pw} and HB_p is presented in tables 3. and 4.

Tabela 3. Wyniki energetycznej weryfikacji twardości metodą Brinella HB_{pw} (h_p ze wzoru)

Table 3. The results of the energy-based hardness verification with the Brinell method HB_{pw} (h_p from the diagram)

Rodzaj materiału / Material grade	h_{pw} [mm]	V_{pw} [mm ³]	L_{pw} [N mm]	HB_{pw} [N/mm ²]
Stop Al / Al Alloy EN AW-7020 AlZn4, 5Mg1 — PA 47	0,067	0,017	10	58,5
Stal / Steel S235JR	0,067	0,018	30	174,6
Stal / Steel P265GH	0,059	0,013	20	153,3
Stal / Steel X2CrNiMnMoNNb21-16-5-4	0,050	0,010	20	214,4
Brąz / Bronze, BMA 12733, CuMn12Al7Fe3Ni3	0,041	0,007	20	306,8
	0,083	0,026	100	385,4
Stal / Steel 10MnCrMoB3-5-5-S620QL	0,103	0,082	450	559,5
Płytką wzorcowa / Hardness block, 502 HV/84	0,200	0,620	3670	604,1

Tabela 4. Wyniki energetycznej weryfikacji twardości metodą Brinella HB_p (h_p z wykresu)

Table 4. results of the energy-based hardness verification with the Brinell method HB_p (h_p from the diagram)

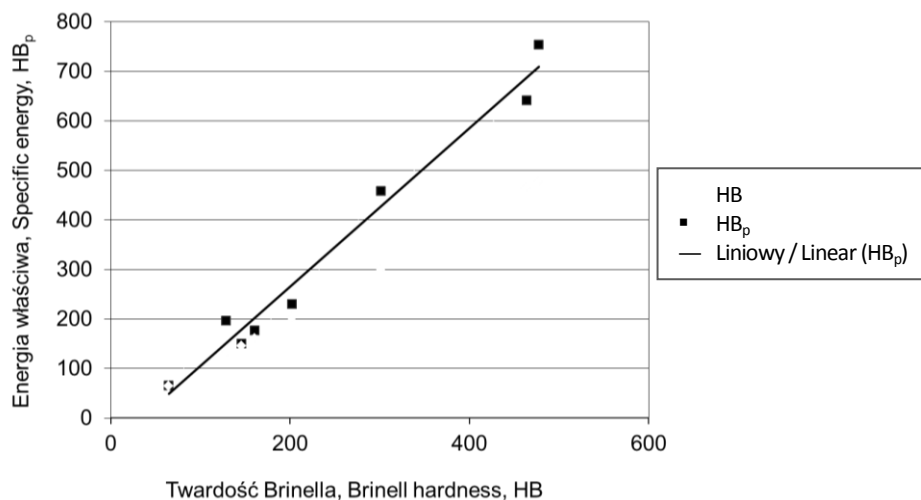
Rodzaj materiału / Material grade,	h_p [mm]	V_p [mm ³]	L_p [N mm]	HB_p [N/mm ²]
Stop Al / Al Alloy EN AW-7020 AlZn4, 5Mg1 — PA 47	0,06	0,016	10	65,7
Stal / Steel S235JR	0,06	0,016	30	196,6
Stal / Steel P265GH	0,06	0,014	20	149,9
Stal / Steel X2CrNiMnMoNNb21-16-5-4	0,06	0,012	20	176,6
Brąz / Bronze, BMA 12733, CuMn12Al7Fe3Ni3	0,05	0,009	20	229,9
	0,07	0,022	100	458,7
Stal / Steel 10MnCrMoB3-5-5-S620QL	0,09	0,072	450	641,0
Płytką wzorcowa / Hardness block, 502 HV/84	0,16	0,496	3670	754,0

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Na rysunkach 6. i 7. porównano wyniki pomiaru twardości uzyskane metodą technologiczną Brinella z wartościami energii właściwej odkształceń plastycznych w jednostkach twardości Brinella HB_p i HB_{pw} .

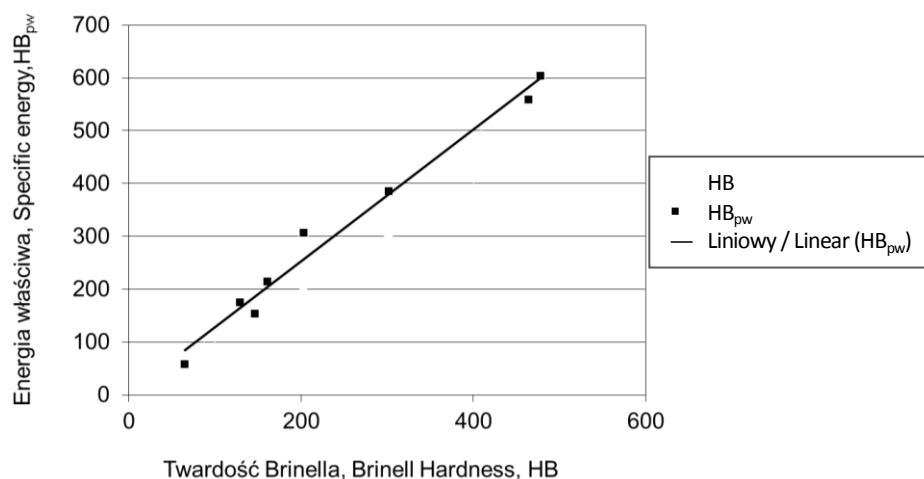
THE ANALYSIS OF THE TEST RESULTS

The hardness measurement results obtained with the Brinell technological method are compared in figures 6 and 7 with the magnitudes of plastic strain specific energy given in Brinell hardness units HB_p and HB_{pw} .



Rys. 6. Porównanie energii właściwej odkształceń plastycznych w jednostkach twardości Brinella HB_p z twardością Brinella HB , gdzie: $HB_p = 1,5996 HB - 54,8$, $R = 0,9879$

Fig. 6. A comparison of the plastic strain specific energy in Brinell units HB_p with the Brinell hardness BHN , where: $HB_p = 1.5996 HB - 54.8$, $R = 0.9879$



Rys. 7. Porównanie energii właściwej odkształceń plastycznych w jednostkach twardości Brinella HB_{pw} z twardością Brinella HB

Fig. 7. A comparison of the plastic strain specific energy in Brinell hardness units HB_{pw} with the Brinell hardness HB

W efekcie zależność energii właściwej odkształceń plastycznych wyrażoną w jednostkach twardości Brinella HB_p (h_p z wykresu) od twardości Brinella HB wyraża relacja

$$HB_p = 1,5996 HB - 54,8, \quad (12)$$

przy współczynniku korelacji $R = 0,9879$.

Energia właściwa odkształceń plastycznych w jednostkach twardości Brinella HB_{pw} jest w przybliżeniu wprost proporcjonalna do twardości Brinella HB

$$HB_{pw} = 1,2474 HB + 3,7, \quad (13)$$

przy współczynniku korelacji $R = 0,9905$.

Z porównania energii właściwej odkształceń plastycznych w jednostkach twardości Brinella wynika, że dla materiałów o niskiej twardości HB_{pw} jest mniejsze niż HB_p , a dla materiałów o wysokiej twardości HB relacja jest przeciwna. W celach poznawczo-porównawczych wyznaczono również energię właściwą w jednostkach twardości Brinella w zakresie odkształceń całkowitych HB_c oraz odkształceń sprężystych HB_{sp} z twardością Brinella HB . W efekcie wykazano zależności:

$$HB_c = 0,05554 HB + 17,35, \quad (14)$$

przy współczynniku korelacji $R = 0,6833$ oraz

$$HB_{sp} = 0,07141 HB + 7,45, \quad (15)$$

przy współczynniku korelacji $R = 0,8158$.

As a result of the dependence of the plastic strain specific energy expressed in Brinell hardness units HB_p (h_p from the diagram) on the Brinell hardness HB is expressed by the relation

for the correlation coefficient $R = 0.9879$.

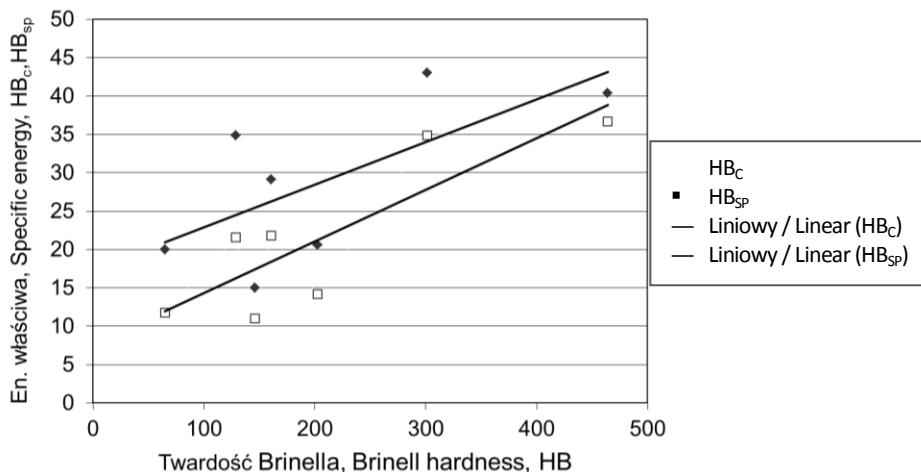
The plastic strain specific energy in Brinell units HB_{pw} is approximately directly proportional to the Brinell hardness HB

for the correlation coefficient $R = 0,9905$.

It follows from the comparison of the plastic strain specific energy in the Brinell hardness units that for materials having low hardness HB_{pw} is lower than HB_p , and for materials having high hardness HB the relation is opposite. For cognitive and comparative reasons the specific energy was also determined in the Brinell hardness units in the range of total strains HB_c and elastic strains HB_{sp} with the Brinell hardness HB .

for correlation coefficient $R = 0.6833$ and

for correlation coefficient $R = 0.8158$.



Rys. 8. Porównanie energii właściwej odkształceń całkowitych HB_c i sprężystych HB_{sp} w jednostkach twardości Brinella z twardością Brinella HB

Fig. 8. A comparison of the strain specific energy: total HB_c and elastic HB_{sp} in the Brinell hardness units with the Brinell hardness HB

WNIOSKI

W artykule zweryfikowano energetycznie twardość Brinella materiałów konstrukcyjnych. Wyznaczono energię właściwą odkształceń sprężystych l_{sp} , plastycznych l_p i całkowitych l_c absorbowanych przez materiał. Wykazano, że energia właściwa odkształceń plastycznych w jednostkach twardości Brinella HB_{pw} jest w przybliżeniu wprost proporcjonalna do twardości Brinella HB oraz że dla materiałów o niskiej twardości HB_{pw} jest mniejsze niż HB_p , a dla materiałów o wysokiej twardości HB relacja jest przeciwna.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Armstrong R. W., Elban W. L., Walley S. M., *Elastic, plastic, cracking aspects of the hardness of materials*, invited article for the 'International Journal of Modern Physics B', 8 January, 2013.
- [2] Arystoteles, t. 2, k. IV, *Meteorologika*, rozdz. 4–9, KUL, Lublin 1996 [*Meteorologic* — available in the Polish].

CONCLUSIONS

The article verifies the Brinell energy-based hardness of construction materials. It determines the elastic l_{sp} , plastic l_p and total l_c strain specific energy absorbed by a material. It proves that the plastic strain specific energy in the Brinell hardness units HB_{pw} is approximately directly proportional to the Brinell hardness HB and that for materials having low hardness HB_{pw} is lower than HB_p , and for materials having high hardness HB the relation is opposite.

- [3] Błażewski S., Mikoszewski J., *Pomiary twardości metali*, WNT, Warszawa 1981 [*Mesuring metal hardness* — available in the Polish].
- [4] Chicot D., Hage I., Lesage J., *Estimation du module d'Young par analyse de la geometrie de l'empreinte residuelle apres indentation Vickers*, 'La Revue de Metallurgie — CIT', 1995, 5, pp. 635–643.

- [5] Germak A., Origlia C., *Analysis and estimation of possible large systematic error in Brinell hardness measurements*, Hardmeko 2007, 'Recent Advancement of Theory and Practice in Hardness Measurement', 19–21 November, 2007, Tsukuba, Japan.
- [6] Sonmez F. O., Demir A., *Analytical relations between hardness and strain for cold formed parts*, 'Journal of Materials Processing Technology', 2007, 186, pp. 163–173.
- [7] Wolf B., *Inference of Mechanical Properties from Instrumented Depth Sensing Indentation at Tiny Loads and Indentation Depths*, 'Cryst. Res. Technol.', 2000, Vol. 35, Issue 4, pp. 377–399.
- [8] Yang-Tse Cheng, Che-Min Cheng, *Scaling, dimensional analysis, and indentation measurements*, 'Materials Science and Engineering', 2004, 44, pp. 91–149.
- [9] Yao Z., *Development of an Indentation Method for Material Surface Mechanical Properties Measurement*, PhD. Thesis, Morgantown, West Virginia 2005.