

LISICA Adam<sup>1</sup>  
OSTROWSKI Bogusław<sup>2</sup>  
POPRZECZKA Andrzej<sup>3</sup>

### STEREOLOGIA WYDZIELEŃ FAZY $\gamma_2(\text{CuBe})$ A WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI BRĄZU BERYLOWEGO AMPCOLOY 83

*Wymagania stawiane stopom metali są w rzeczywistości wymaganiami odnoszącymi się do ich struktury, którą można w różny sposób kształtować, np. przez obróbkę cieplną. W związku z tym, coraz bardziej konieczna staje się ocena ilościowa struktury tych materiałów. W niniejszej pracy wyznaczono, a następnie porównano wybrane parametry stereologiczne struktury brązu berylowego z jego właściwościami, takimi jak: twardość, udarność i zużycie ściernie. Próbki do badań wykonano z brązu berylowego Ampcoloy 83, zawierającego 2% Be. Różne warianty struktury tego brązu uzyskano po utwardzaniu wydzieleniowym, składającym się z zabiegów cieplnych przesycań i starzenia.*

### $\gamma_2(\text{CuBe})$ PRECIPITATED PHASE STEREOLOGY AND THE SELECTED PROPERTIES OF AMPCOLOY 83 BERYLLIUM BRONZE

*The requirements related to metallic alloys refer in fact to their structure which can be formed in a number of ways: heat treatment, for instance. Consequently, quantitative evaluation of those materials' structure becomes more and more essential. In this paper the author indicated and then compared the selected stereological parameters of beryllium bronze's structure and its properties, such as: hardness, notch toughness and abrasive wear. The research was performed basing on Ampcoloy 83 beryllium bronze, containing 2% of beryllium. Various structure options of the bronze were obtained as a result of precipitation hardening that consists of solution heat treatment and quench ageing.*

<sup>1</sup> Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, ul. Krasickiego 54, 26-600 Radom, tel.: +48 48 361-76-12, e-mail: alisica@pr.radom.pl

<sup>2</sup> Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, ul. Krasickiego 54, 26-600 Radom, tel.: +48 48 361-76-05

<sup>3</sup> Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, ul. Krasickiego 54, 26-600 Radom, tel.: +48 48 361-76-11

## 1. WSTĘP

Brązy berylowe poddaje się obróbce cieplnej. Najczęściej stosowane jest utwardzanie wydzieleniowe, składające się z zabiegów cieplnych przesycania i starzenia. Przesycanie ma na celu wprowadzenie jak największej ilości berylu do roztworu stałego  $\alpha$  i jego ujednorodnienie, a przez chłodzenie w wodzie zatrzymanie struktury przesyconego roztworu do temperatury otoczenia. Podczas starzenia zachodzi utwardzanie wydzieleniowe. Po tych zabiegach brązy berylowe mają strukturę dwufazową złożoną z fazy  $\alpha$  oraz wydzieleni fazy  $\gamma_2(\text{CuBe})$ .

W dostępnej literaturze [1÷11] można znaleźć istotne szczegóły dotyczące technologii utwardzania wydzieleniowego brązów berylowych zawierających 2% berylu, najczęściej stosowanych w technice. Podawana jest temperatura przesycania w granicach  $650 \div 850$  °C, a temperatura starzenia w granicach  $250 \div 400$  °C.

Brązy berylowe mają liczne i wyjątkowe cechy fizyczne, chemiczne i mechaniczne. Łączą zalety stopów miedzi (obrabiwalność, odporność na korozję) z zaletami stali (duża wytrzymałość i twardość). Cechują się dużą przewodnością cieplną i elektryczną. Mają dużą odporność na działanie wysokich temperatur, pełzanie i ścieranie. Są niemagnetyczne i sprężynujące oraz wykazują brak skłonności do iskrzenia przy uderzeniu [1÷3].

Wiele właściwości mechanicznych i użytkowych brązów berylowych wynika z ich struktury metalograficznej, którą można kształtować, np. przez odpowiednią obróbkę cieplną. Znaczne rozbieżności temperatur zabiegów cieplnych przesycania i starzenia przedstawione w literaturze fachowej świadczą, że ta struktura często jest różna pod względem liczby, kształtu i wielkości wydzieleni fazy umacniającej  $\gamma_2(\text{CuBe})$ . Różnice te można ilościowo opisać wieloma parametrami stereologicznymi struktury. Do ich wyznaczania stosowane są automatyczne lub półautomatyczne analizatory Quantimet, Epiquant lub Microvideomat. Od niedawna wykorzystuje się do tego celu także specjalistyczne oprogramowanie komputerowe, np. program do analizy obrazu „Aphelion”. W przypadkach trudnych nadal pozostaje żmudne i pracochłonne ręczne wyznaczanie parametrów struktury jedną z metod stereologicznych [12, 13].

W niniejszej pracy wyznaczono wybrane parametry stereologiczne struktury brązu berylowego po różnych zabiegach przesycania i starzenia, a następnie porównano je z takimi właściwościami jak twardość, udarność i zużycie ściernie. Badania przeprowadzono w ramach pracy [14] na próbkach z brązu berylowego Ampcoloy 83. Część wyników badań, jak np. próba optymalizacji procesu utwardzania wydzieleniowego brązu berylowego pod kątem jego twardości, udarności i zużycia ściernego została opublikowana w pracach [15÷17].

## 2. BADANIA WŁASNE

Do badań wytypowano brąz berylowy Ampcoloy 83 w postaci prętów o średnicy 12,7 mm i długości 1000 mm, zakupiony w firmie OBERON [18]. Skład chemiczny tego brązu pokazano w tabeli 1.

Tab. 1. Skład chemiczny brązu berylowego Ampcoloy 83

Zawartość pierwiastków, % wag			
Be	Co + Ni	Inne	Cu
2,0	0,5	0,5max	reszta

Z prętów wykonano 40 sztuk próbek o wymiarach  $10 \times 7,5 \times 55$  mm, które poddano obróbce cieplnej w piecu elektrycznym firmy Linn Elektro Therm. Szczegóły obróbki cieplnej (utwardzania wydzieleniowego) przedstawiono w pracy [15].

Po obróbce cieplnej wykonano pomiary twardości sposobem Vickersa (PN-EN ISO 6507-1:1999) przy obciążeniu węgelnika wynoszącym 98,07 N. Następnie, po nacięciu karbu typu U przeprowadzono próbę udarności sposobem Charpy'ego w temperaturze otoczenia przy użyciu młota o energii początkowej 300 J (wymiarzy i dopuszczalne odchyłki próbek były zgodne z PN-EN 10045-1:1999). Badania zużycia ściernego przeprowadzono na testerze do badania ścieralności typu T-07 [19], zgodnie z wymaganiami normy GOST 23.208-79.

Do ilościowego opisanego wydzieleni fazy umacniającej  $\gamma_2(\text{CuBe})$  w strukturze badanego brązu berylowego wytypowano i wyznaczono następujące parametry stereologiczne [12, 13]:

a) objętość względna (objętość właściwa) –  $V_v$  :

$$V_v = \frac{1}{k \cdot z} \sum_{i=1}^k P_i \quad (1)$$

gdzie:

- $P_i$  – liczba punktów (węzłów) siatki trafiających w daną fazę w  $i$ -tym przyłożeniu,
- $z$  – liczba węzłów siatki,
- $k$  – liczba przyłożeń siatki,

b) długość względna linii granic wydzieleni –  $L_A$  :

$$L_A = \frac{\pi}{2} P_L = \pi N_L \quad (2)$$

gdzie:

- $P_L$  – średnia liczba przecięć siecznej z granicami wydzieleni przypadająca na jednostkę długości siecznej ( $\text{mm}^{-1}$ ),
- $N_L$  – średnia liczba wydzieleni na jednostkę długości,

c) powierzchnia względna granic wydzieleni –  $S_V$  :

$$S_V = 2P_L = 4N_L \quad (3)$$

- d) średnia liczba powierzchni przekrojów wydzielen na  $1 \text{ mm}^2 - N_A$ ,  
 e) średnia powierzchnia jednego wydzielenia –  $\bar{A}_{j.w.}$ .

Odpowiednie błędy bezwzględne  $\delta$  wyznaczono ze wzorów:

$$\delta_{V_V} \leq u_\alpha \sqrt{\frac{V_V (1 - V_V)}{k \cdot z}} \quad (4)$$

$$\delta_{L_A} = \pi u_\alpha \sqrt{\frac{N_L}{k \cdot l}} \quad (5)$$

$$\delta_{S_V} = 4 u_\alpha \sqrt{\frac{N_L}{k \cdot l}} \quad (6)$$

gdzie:

- $u_\alpha$  – współczynnik ufności dla przyjętego prawdopodobieństwa  $1 - \alpha$   
 (dla  $\alpha = 0,1$ ;  $u_\alpha = 1,645$ ),  
 $k$  – liczba przyłożeń siatki lub „rzucanych” siecznych,  
 $l$  – długość siecznej.

Badania metalograficzne mikroskopowe brązu berylowego Ampcoloy 83 przeprowadzono za pomocą mikroskopu świetlnego, stosując powiększenie  $100\times$  i  $500\times$  oraz odczynnik trawiący Mi25Cu [20].

### 3. WYNIKI BADAŃ

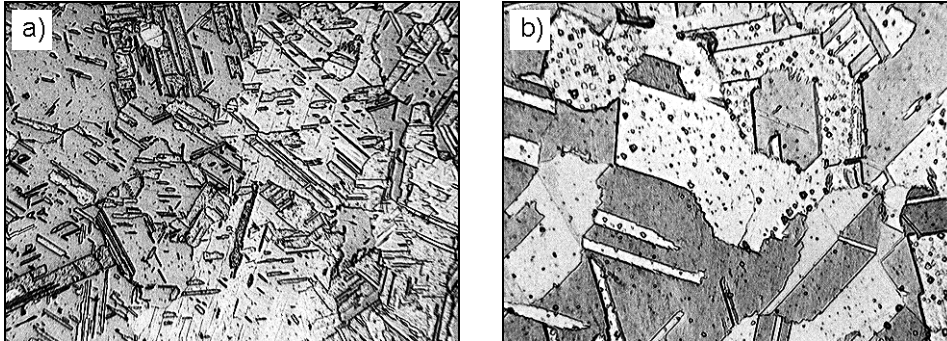
W tabeli 2 przedstawiono najwyższe i najniższe wartości twardości – HV10, udarności – KCU i zużycia ściernego –  $Z_W$  badanego brązu berylowego Ampcoloy 83. Uzyskano je na próbkach z doświadczeń nr 6, 12 i 13. Różniły się one między sobą temperaturą przesycania, temperaturą starzenia i czasem starzenia brązu. Pełne wyniki tych badań można znaleźć w pracach [15÷17].

W tabeli 2 zestawiono także wyznaczone dla tych doświadczeń (ze skrajnymi wynikami twardości, udarności i zużycia ściernego) parametry stereologiczne struktury brązu berylowego, takie jak: objętość względna (objętość właściwa) –  $V_V$ , długość względna linii granic wydzielen –  $L_A$ , powierzchnia względna granic wydzielen –  $S_V$ , średnia liczba powierzchni przekrojów wydzielen na  $1 \text{ mm}^2 - N_A$  i średnia powierzchnia jednego wydzielenia –  $\bar{A}_{j.w.}$ . Opisują one ilościowo wydzielenia fazy umacniającej  $\gamma_2(\text{CuBe})$ .

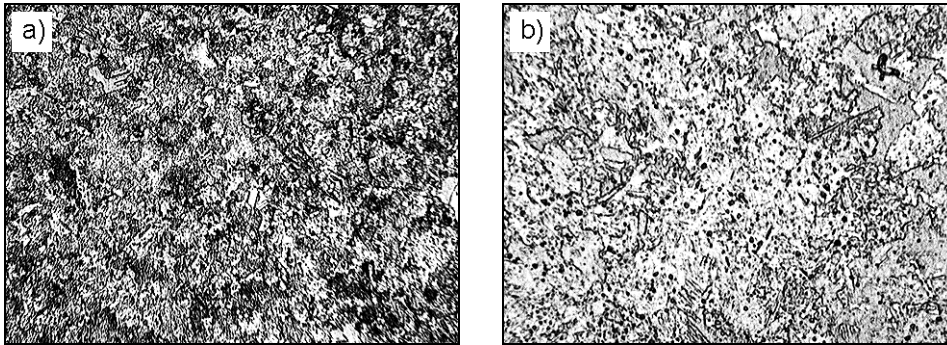
Analizowaną strukturę brązu berylowego Ampcoloy 83 pokazano na rysunkach 1÷3.

Tab. 2. Wyniki badań i obliczeń

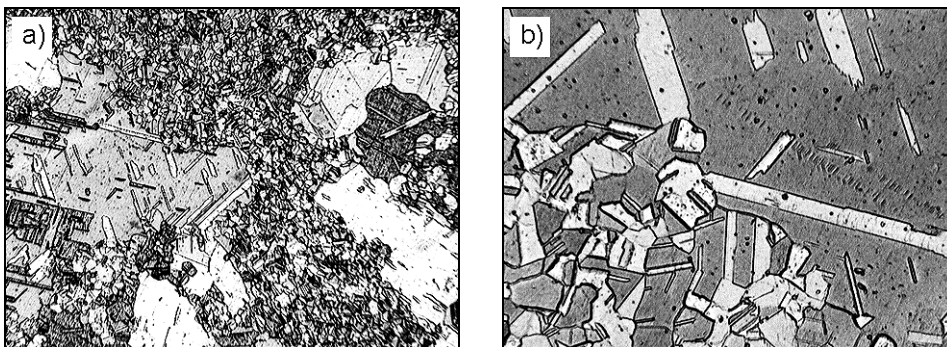
Parametry	Nr doświadczenia		
	6	12	13
Twardość HV10	414 (max)	—	137 (min)
Udarność KCU J/cm <sup>2</sup>	9 (min)	—	296 (max)
Zużycie ściernie Z <sub>w</sub> g	—	0,151 (min)	0,307 (max)
Objętość względna V <sub>v</sub> %	0,82 ÷ 2,78	2,64 ÷ 5,36	1,23 ÷ 3,37
Długość względna linii granic wydzielen L <sub>A</sub> mm <sup>-1</sup>	79,2 ÷ 126,0	275,9 ÷ 360,7	125,3 ÷ 182,7
Powierzchnia względna granic wydzielen S <sub>v</sub> mm <sup>-1</sup>	100,9 ÷ 160,5	351,4 ÷ 459,4	159,5 ÷ 232,5
Średnia liczba powierzchni przekrojów wydzielen N <sub>A</sub> mm <sup>-2</sup>	19829 ÷ 22855	29007 ÷ 30345	13497 ÷ 14415
Średnia powierzchnia jednego wydzielenia $\bar{A}_{j.w.}$ mm <sup>2</sup>	(7,92 ÷ 9,04)·10 <sup>-7</sup>	(1,00 ÷ 1,80)·10 <sup>-7</sup>	(5,57 ÷ 5,93)·10 <sup>-7</sup>



Rys. 1. Struktura brązu berylowego Ampcoloy 83. Doświadczenie nr 6 (najwyższa wartość HV10, najniższa wartość KCU). Trawiono Mi25Cu; a) pow. 100×, b) pow. 500×



Rys. 2. Struktura brązu berylowego Ampcoloy 83. Doświadczenie nr 12 (najniższa wartość  $Z_w$ ). Trawiono Mi25Cu; a) pow. 100×, b) pow. 500×



Rys. 3. Struktura brązu berylowego Ampcoloy 83. Doświadczenie nr 13 (najwyższa wartość  $Z_w$ , KCU, najniższa wartość HV10). Trawiono Mi25Cu; a) pow. 100×, b) pow. 500×

#### 4. PODSUMOWANIE

Na podstawie uzyskanych wyników badań brązu berylowego Ampcoloy 83 poddanego utwardzaniu wydzieleniowemu można ogólnie stwierdzić, że:

- wydzielenia fazy  $\gamma_2(\text{CuBe})$  charakteryzujące się mniejszą objętością względną, mniejszą długością względną linii granic, mniejszą powierzchnią względną granic oraz większą średnią liczbą powierzchni przekrojów i stosunkowo większą powierzchnią jednego wydzielenia sprzyjają większej twardości brązów;
- w przypadku udarności brązu wymienione parametry stereologiczne wydzieleni fazy  $\gamma_2(\text{CuBe})$  mają wpływ dokładnie odwrotny;
- wydzielenia fazy  $\gamma_2(\text{CuBe})$  charakteryzujące się dużą objętością względną, dużą długością względną linii granic, dużą powierzchnią względną granic i większą średnią liczbą powierzchni przekrojów oraz małą średnią powierzchnią jednego wydzielenia sprzyjają mniejszemu zużyciu ściernemu brązu;
- aby uzyskać stosowne równania regresji tych zależności konieczne są dalsze żmudne i pracochłonne badania.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Bonderek Z., Kulig Z.: *Stopy o specjalnych właściwościach*, Kraków, Skrypt uczelniany AGH, 1980.
- [2] Wojtkun F., Sołncew J.P.: *Materiały specjalnego przeznaczenia*, Radom, Wyd. Politechniki Radomskiej, 2001.
- [3] Tokarski M.: *Metaloznawstwo metali i stopów nieżelaznych w zarysie*, Katowice, Wyd. „Śląsk”, 1985.
- [4] Dobrzański L., A.: *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, Gliwice – Warszawa, WNT, 2002.
- [5] Górny Z., Sobczak J.: *Nowoczesne tworzywa odlewnicze na bazie metali nieżelaznych*, Kraków, Instytut Odlewnictwa, 2005.
- [6] Przybyłowicz K.: *Metaloznawstwo*, Warszawa, WNT, 2003.
- [7] Filip R., Kozik A., Kubiak W., Marszałek J.: *Metaloznawstwo*, Rzeszów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 1999.
- [8] Wendorf Z.: *Metaloznawstwo*, Warszawa, WNT, 1976.
- [9] Ciszewski A., Radomski T., Szummer A.: *Materiałoznawstwo*, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1996.
- [10] Prowans S.: *Materiałoznawstwo*, Warszawa – Poznań, PWN, 1977.
- [11] Zisel'man V.L., Shatalov R.L., Aldunin A.V.: *Developing efficient regimes of thermomechanical treatment for obtaining quality strip made of beryllium bronze*, Metallurgist, vol. 50, No. 1–2, pp. 102–107, 2006.
- [12] Ryś J.: *Stereologia materiałów*. Kraków, Wydawnictwo Fotobit Design, 1995.
- [13] Ryś J.: *Metalografia ilościowa*. Kraków, Skrypt uczelniany AGH, 1983.
- [14] Lisica A., Poprzeczka A., Ropelewski Z.: *Wpływ obróbki cieplnej na wybrane właściwości mechaniczne i użytkowe brązu berylowego*, Praca naukowo-badawcza Nr 2634/22/P. Radom, Politechnika Radomska, 2008–2010.

- [15] Lisica A., Poprzeczka A.: *The influence of heat treatment parameters on CuBe2 beryllium bronze hardness*, Monograph „Computer Systems Aided Science and Engineering Work in Transport, Mechanics and Electrical Engineering”, Technical University of Radom, Faculty of Transport, Radom, 2008, s. 345 – 350,.
- [16] Poprzeczka A., Lisica A.: *Wpływ utwardzania wydzieleniowego na udarność brązu berylowego Ampcoloy 83*, Logistyka, 2009, nr 6, CD-R.
- [17] Lisica A., Poprzeczka A.: *Wpływ utwardzania wydzieleniowego na zużycie ściernie brązu berylowego Ampcoloy 83*, Logistyka, 2010, nr 6, CD-R.
- [18] [www.oberon.pl](http://www.oberon.pl)
- [19] [www.itee.radom.pl/tribologia/pliki/T-07.pdf](http://www.itee.radom.pl/tribologia/pliki/T-07.pdf)
- [20] Sękowski K., Piaskowski J.: *Atlas struktur znormalizowanych stopów odlewniczych*. Kraków, Instytut Odlewnictwa, WNT, 1972.