

Adam LISICA¹
Andrzej POPRZECZKA²

**WPLYW UTWARDZANIA WYDZIELENIOWEGO
NA ZUŻYCIE ŚCIERNE BRĄZU BERYLOWEGO
AMPCOLOY 83**

Właściwości brązów berylowych zależą głównie od zastosowanej obróbki cieplnej. Najczęściej jest to utwardzanie wydzieleniowe, składające się z zabiegów przesykania i starzenia. W nielicznych dostępnych publikacjach na ten temat występują znaczne rozbieżności dotyczące zalecanych zakresów temperatury tych zabiegów cieplnych. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki własnych badań wpływu utwardzania wydzieleniowego na zużycie ściernie brązu berylowego zawierającego 2% berylu, najczęściej stosowanego w technice. Pokazano, że zastosowane parametry obróbki cieplnej wpływają na zużycie ściernie brązu berylowego. Do badań i opracowania wyników zastosowano pełnoczynnikową macierz planowania doświadczeń 2³ i program komputerowy Statistica.

**INFLUENCE OF PRECIPITATION HARDENING
ON AMPCOLOY 83 BERYLLIUM BRONZE
ABRASIVE WEAR**

Properties of beryllium bronze depend primarily on the applied heat treatment. Precipitation hardening, consisting of solution heat treatment and ageing, is the most commonly used method. Few available publications covering the subject provide us with significant discrepancies related to the recommended solutioning temperature and ageing temperature ranges. This paper presents results of the author's research on the influence of precipitation hardening on the abrasive wear of beryllium bronze containing 2% beryllium, which is most widely used in technology. The paper also demonstrates considerable influence of the applied heat treatment method on the abrasive wear of beryllium bronze. The analysis and result handling were performed with the use of the 2³ full-factor experiment design matrix and Statistica software.

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

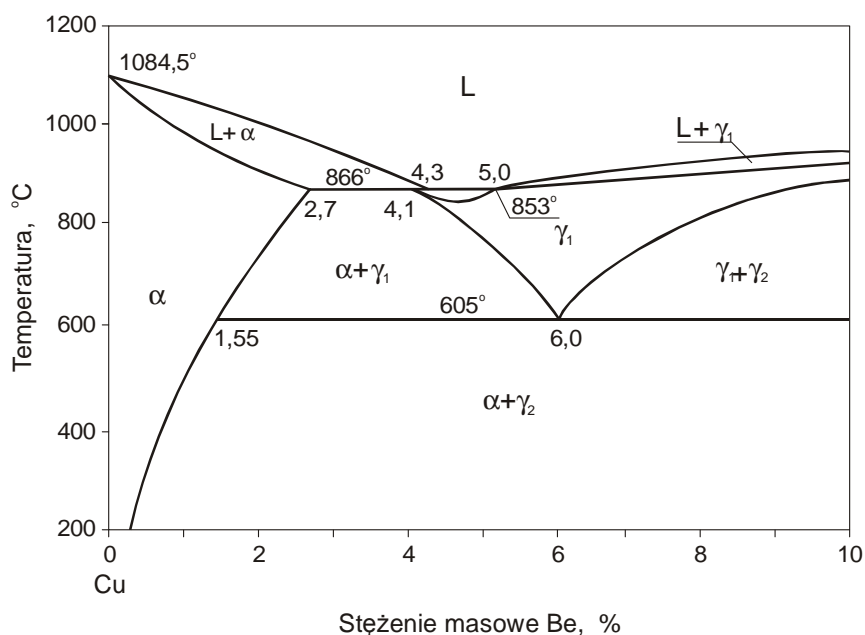
² Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, ul. Krasickiego 54, 26-600 Radom, tel/: +48 48 361-76-11

1. WSTĘP

Brązy berylowe są stopami jedynymi w swoim rodzaju ze względu na 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 znaczną odporność na działanie wysokich temperatur, pełzanie i ścieranie. Są niemagnetyczne i sprężynujące. Cenną ich zaletą jest też brak skłonności do iskrzenia przy uderzeniu [1÷3].

Liczne i ciekawe właściwości brązów berylowych decydują o ich zastosowaniu. Wykonuje się z nich m.in. sprężyny, membrany, kontakty sprężynujące, amortyzatory, szczotki silników elektrycznych, części maszyn i urządzeń oraz narzędzia w przemyśle materiałów wybuchowych, przemyśle naftowym, na tankowcach i w kopalniach. Znalazły też zastosowanie w elektrotechnice, elektronice, spawalnictwie, na elementy aparatury chemicznej i precyzyjnej [1÷9]. Podstawową przeszkodą w szerokim zastosowaniu brązów berylowych jest wysoka cena berylu.

Brązy berylowe mogą być obrabiane cieplnie. Najczęściej stosowane jest utwardzanie wydzieleniowe, składające się z zabiegów przesycania i starzenia. Obróbka cieplna tych stopów ma na celu nadanie im dużej sprężystości, odporności na zmęczenie i odporności na ścieranie [1].



Rys. 1. Fragment wykresu równowagi Cu – Be (D.T. Hawkins)

Utwardzanie wydzieleniowe brązów berylowych jest możliwe w wyniku zmiennej rozpuszczalności berylu w miedzi w miarę obniżania temperatury (rys. 1). Beryl rozpuszcza

się w miedzi do 2,7% w temperaturze perytektycznej 866 °C, po czym jego rozpuszczalność spada do 1,55% w temperaturze eutektoidalnej 605 °C i w temperaturze pokojowej jest bardzo mała (< 0,2%).

Stosowane w technice gatunki brązów berylowych zawierają najczęściej ok. 2% Be oraz niekiedy dodatkowo niewielkie ilości pierwiastków, takich jak: Ni, Co, Fe i Ti (PN-EN 1652:1999, PN-EN 1654:2001, PN-EN 12163:2002, PN-EN 12164:2002, PN-EN 12166:2002, PN-EN 12167:2002 oraz PN-92/H-87060). Dla takich stopów można znaleźć w dostępnej literaturze [1÷11] znaczne rozbieżności dotyczące zalecanych parametrów utwardzania wydzieleniowego. Podawana jest temperatura przesycania w granicach 650÷850 °C z chłodzeniem w wodzie, a temperatura starzenia w granicach 250÷400 °C. Można więc przypuszczać, że zalecane parametry obróbki cieplnej brązów berylowych typu CuBe2 nie zawsze leżą w zakresie optymalnym.

Poniżej przedstawiono własne badania wpływu parametrów utwardzania wydzieleniowego na zużycie ściernie brązu berylowego. Badania zostały przeprowadzone w ramach pracy [12]. Część wyników badań, jak np. próba optymalizacji parametrów przesycania i starzenia brązu berylowego typu CuBe2 pod kątem jego twardości i udarności, została opublikowana w pracach [13, 14].

2. METODYKA BADAŃ

Do badań wytypowano brąz berylowy Ampcoloy 83 w postaci prętów o średnicy 12,7 mm i długości 1000 mm, zakupiony w firmie OBERON [15]. 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	0,5 max	reszta

Z prętów wykonano 40 sztuk próbek o wymiarach 10×7,5×55 mm, które podano obróbce cieplnej w piecu elektrycznym firmy Linn Elektro Therm. Założono, że zużycie ściernie brązu berylowego będzie zależało od trzech parametrów utwardzania wydzieleniowego: temperatury przesycania – T_p , temperatury starzenia – T_s oraz czasu starzenia – τ_s (tab. 2). Czas przesycania ustalono na stałym poziomie – 3h.

Tab. 2. Wartości parametrów obróbki cieplnej

Parametr	Zakres zmian parametru	x_i ($\alpha = \pm 1,682$)				
		$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
T_p , °C	650 ÷ 850	650	690	750	810	850
T_s , °C	250 ÷ 400	250	280	325	370	400
τ_s , h	0,16 ÷ 10	0,16	2	5	8	10

Tab. 3. Macierz planowania rotatabilnego drugiego rzędu 2^3

	Nr doświadczenia	Nr próbki	x_1	x_2	x_3	\bar{Y}_{Z_w}
Doświadczenie czynnikowe 2^3	1	1/2	-1	-1	-1	0,204
	2	3/4	+1	-1	-1	0,209
	3	5/6	-1	+1	-1	0,202
	4	7/8	+1	+1	-1	0,215
	5	9/10	-1	-1	+1	0,195
	6	11/12	+1	-1	+1	0,205
	7	13/14	-1	+1	+1	0,173
	8	15/16	+1	+1	+1	0,186
6 punktów „gwiazdnych”	9	17/18	-1,682	0	0	0,184
	10	19/20	+1,682	0	0	0,211
	11	21/22	0	-1,682	0	0,210
	12	23/24	0	+1,682	0	0,151
	13	25/26	0	0	-1,682	0,307
	14	27/28	0	0	+1,682	0,196
6 punktów centralnych	15	29/30	0	0	0	0,177
	16	31/32	0	0	0	0,181
	17	33/34	0	0	0	0,169
	18	35/36	0	0	0	0,186
	19	37/38	0	0	0	0,200
	20	39/40	0	0	0	0,157

Do określenia współzależności wymienionych parametrów utwardzania wydzieleniowego zastosowano plan rotabilny drugiego rzędu 2^3 (tab. 3), zakładając krzywoliniowy charakter zależności [16]. Trzy zmienne niezależne (wejściowe) w równaniach regresji, będące zmiennymi kodowymi, zapisano w postaci x_i :

$$x_1 = \frac{T_p - 750}{60}, \quad x_2 = \frac{T_s - 325}{45}, \quad x_3 = \frac{\tau_s - 5}{3} \quad (1)$$

Wartości wielkości wejściowych przedstawiono w tabeli 2. Zmienne kodowe x_1 , x_2 i x_3 opisują odpowiednio wpływ temperatury przesycań, temperatury starzenia i czasu starzenia na zużycie ścierny brązu berylowego obrabianego cieplnie. Punkty „gwiazdne” dla wybranej macierzy planu rotatabilnego wynoszą $\alpha = \pm 1,682$.

Zmienną zależną (wyjściową) \bar{Y}_{Z_w} dla wybranego zakresu badań jest wartość zużycia ściernego badanych próbek.

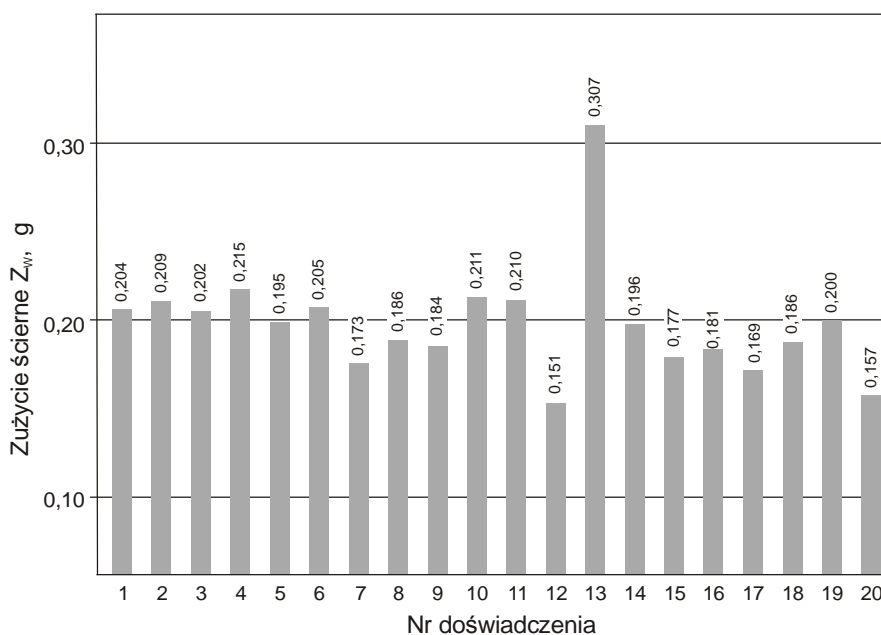
Badanie zużycia ściernego przeprowadzono na testerze do badania ścieralności typu T-07 [17], zgodnie z wymaganiami normy GOST 23.208-79. Szczegóły badania zużycia ściernego były następujące:

- średnica przeciwpróbki – 48,93 mm,
- szerokość przeciwpróbki – 15,04 mm,
- siła docisku próbki do przeciwpróbki – 44 N,
- ścierniwo – elektrokorund nr 90 (PN-76/M-59115),
- czas testu – 10 min (600 obrotów).

Zużycie ścierne (wagowe) określono na podstawie ubytku masy próbek z brązu berylowego podczas ścierania. Próbki ważono na wadze analitycznej z dokładnością do 0,001 g.

3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki badań zużycia ściernego brązu berylowego Ampcoloy 83, poddanego różnym parametrom utwardzania wydzieleniowego.



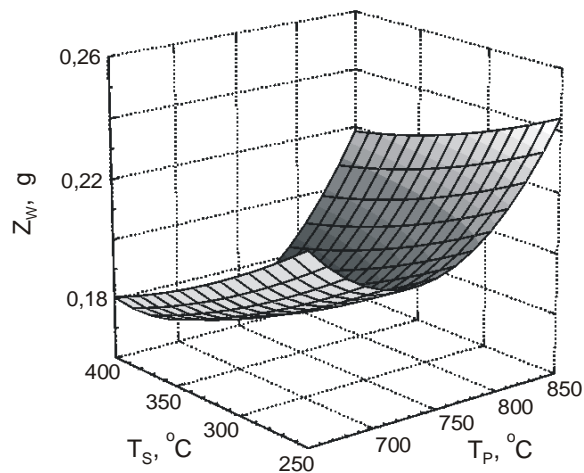
Rys. 2. Zużycie ścierne brązu berylowego Ampcoloy 83 po przeprowadzonej obróbce cieplnej

Korzystając ze wspomaganie komputerowego, wyznaczono współczynniki regresji oraz oceniono ich istotność. W rezultacie uzyskano równanie regresji (2), opisujące wpływ parametrów obróbki cieplnej brązu berylowego na jego zużycie ściernie. Wartości poszczególnych współczynników tego równania regresji określają kierunek i siłę oddziaływania zastosowanych parametrów utwardzania wydzieleniowego na zużycie ściernie badanego brązu. Istotność równania regresji testowano według kryteriów t-Studenta dla $1-P=0,05$ i adekwatności F-Fishera przy $1-P=0,01$.

Równanie to przyjęło postać:

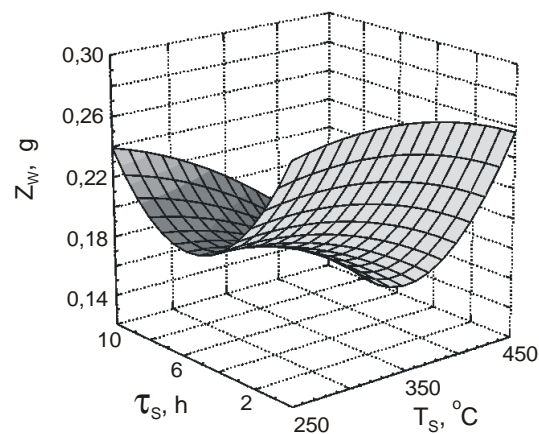
$$\bar{Y}_{Z_w} = (178,7 - 10x_2 - 18,9x_3 - 5,6x_2x_3 + 23,1x_3^2) \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

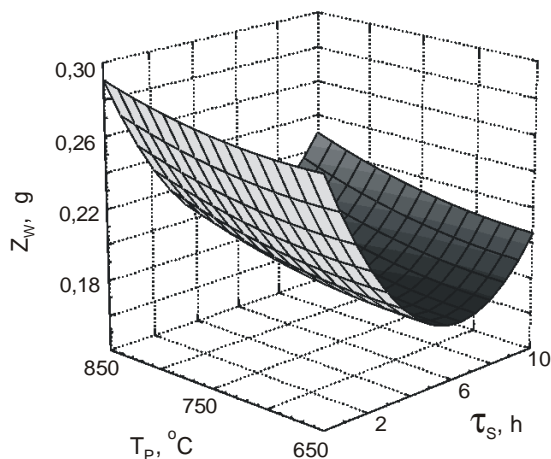
Na rysunkach 3÷5 pokazano elementy graficzne zależności (2).



Rys. 3. Wpływ temperatury przesycańia T_p i temperatury starzenia T_s na zużycie ściernie brązu berylowego Ampcoloy 83 ($\tau_s=5h$)

Rys. 4. Wpływ temperatury starzenia T_s i czasu starzenia τ_s na zużycie ściernie brązu berylowego Ampcoloy 83 ($T_p=750^\circ C$)





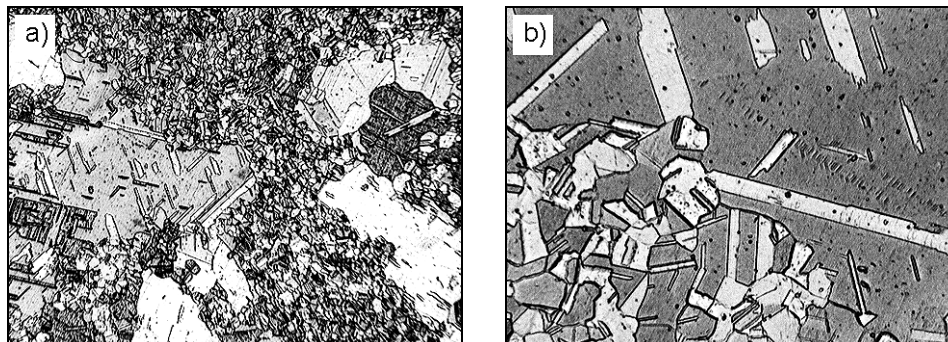
Rys. 5. Wpływ czasu starzenia τ_s i temperatury przesycaenia T_p na zużycie ścierne brązu berylowego Ampcoloy 83 ($T_s=325^\circ\text{C}$)

Z rysunku 2 wynika, że po przeprowadzonych zabiegach cieplnych zużycie ścierne brązu berylowego Ampcoloy 83 waha się w granicach $0,151 \div 0,307$ g. Wartość zużycia ściernego poszczególnych próbek różni się między sobą w granicach $30 \div 100\%$. Między skrajnymi próbkami występuje więc 2-krotna różnica zużycia ściernego.

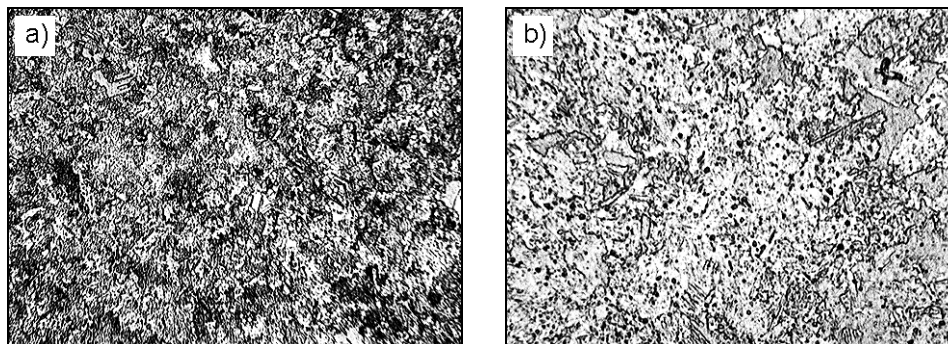
Z analizy równania (2) i rysunków 3÷5 wynika, że liniowo najsilniejszy wpływ na zużycie ścierne brązu berylowego Ampcoloy 83 wywiera czas jego starzenia po przesycaeniu. Wydłużenie tego czasu prowadzi do zmniejszenia zużycia ściernego brązu w badanych warunkach. W tym samym kierunku działa temperatura starzenia lecz jej wpływ jej blisko 2-krotnie mniejszy (porównując współczynniki regresji przy zmiennych x_2 i x_3). Statystycznie nieistotny okazał się wpływ temperatury przesycaenia brązu berylowego oraz współdziałanie wszystkich parametrów obróbki cieplnej. Jedynie współczynnik regresji przy zmiennych x_2, x_3 jest na pograniczu istotności statystycznej. Wynik ten jest zaskakujący, gdyż zarówno temperatura starzenia jak i czas starzenia mają silny wpływ na zużycie brązu. Należało się więc spodziewać silnego wpływu współdziałania tych dwóch parametrów obróbki cieplnej.

Najsilniej krzywoliniowo oddziałuje czas starzenia brązu berylowego. Oznacza to, że istnieje taki przedział czasowy starzenia, kiedy zużycie ścierne będzie najmniejsze. Pozostałe wyrażenia kwadratowe są statystycznie nieistotne.

Z analizy struktury brązu berylowego Ampcoloy 83 po różnych zabiegach obróbki cieplnej wynika, że składa się ona z ziarn roztworu stałego α z licznymi bliźniakami rekrytalizacji oraz drobnych punktowych wydzielen fazy $\gamma_2(\text{CuBe})$. Pomiedzy różnymi próbkami występuje duża różnica w rozdrobieniu ziarn roztworu stałego α oraz w ilości i dyspersji fazy $\gamma_2(\text{CuBe})$. Próbki z gruboziarnistą strukturą jednofazową z niewielką ilością fazy umacniającej γ_2 (rys. 6) charakteryzowały się największym zużyciem ściernym, zaś próbki mające drobną strukturę dwufazową z dużą ilością dyspersyjnych wydzielen fazy umacniającej γ_2 (rys. 7) – najmniejszym zużyciem ściernym.



Rys. 6. Struktura brązu berylowego Ampcoloy 83. Doświadczenie nr 13 (największa wartość zużycia ściernego). Trawiono Mi25Cu; a) pow. 100×, b) pow. 500×



Rys. 7. Struktura brązu berylowego Ampcoloy 83. Doświadczenie nr 12 (najmniejsza wartość zużycia ściernego). Trawiono Mi25Cu; a) pow. 100×, b) pow. 500×

4. PODSUMOWANIE

Sterowanie parametrami utwardzania wydzieleniowego, zwłaszcza temperaturą i czasem starzenia, umożliwia istotną zmianę struktury oraz zużycia ściernego brązu berylowego Ampcoloy 83.

Największą odporność na zużycie ściernie brązu berylowego Ampcoloy 83 uzyskano stosując średnią temperaturę przesycaenia $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($x_1 = 0$), średnią lub wysoką temperaturę starzenia $325\text{ }^{\circ}\text{C}$ lub $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($x_2 = 0$ lub $x_2 = +\alpha$) oraz średni czas starzenia 5 h ($x_3 = 0$). Struktura takiego brązu berylowego jest dwufazowa i bardzo rozdrobniona z dużą ilością fazy umacniającej $\gamma_2(\text{CuBe})$.

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] 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.
- [13] 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, pp. 345 – 350, Radom 2008.
- [14] Poprzeczka A., Lisica A.: *Wpływ utwardzania wydzieleniowego na udarność brązu berylowego Ampcoloy 83*, Logistyka, Nr 6, CD-R, 2009.
- [15] www.oberon.pl
- [16] Polański Z.: *Planowanie doświadczeń w technice*, Warszawa, PWN 1984.
- [17] www.itee.radom.pl/tribologia/pliki/T-07.pdf