

Technologia wytapianych modeli w zastosowaniu dla stopów miedzi

S. Rządkosz^a, M. Kranc^b, A. Garbacz-Klempka^c, J. Kozana^d, M. Piękoś^e

^{a,c,d,e} Akademia Górniczo-Hutnicza, ul. Reymonta 23, 30-059 Kraków, Polska

^b Instytut Odlewnictwa w Krakowie, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Polska

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: agarbacz@agh.edu.pl

Streszczenie

Technologia wytapianych modeli należy do najstarszych technologii odlewniczych. Historycznie służyła do odlewania narzędzi, broni i ozdób. Model wykonany z wosku pszczelego oblepiano gliną suszono i wypalano. Otrzymywano odlewy o dużej gładkości powierzchni, dokładności i precyzji wykonania ornamentu. Metodą tą odlewano niewielkie kilkugramowe odlewy jak i wielkogabarytowe pomniki. Współcześnie ta technologia jest wykorzystywana w wielu ważnych gałęziach produkcji zarówno artystycznej, jak i przemysłowej. Szczególnie w przemyśle zbrojeniowym, lotniczym, motoryzacyjnym, energetycznym, budowlanym, a nawet kosmicznym.

W pracy przedstawiono wyniki badań i eksperymentów, prowadzonych w zakresie technologii odlewnictwa miedzi i stopów miedzi z zastosowaniem metody wytapianych modeli, zarówno w aspekcie historycznym, jak i współczesnej praktyki przemysłowej. Przykładowo przedstawiono analizę wybranych elementów dawnych technologii, form i odlewów wytworzonych w epoce brązu oraz wyniki badań dotyczące aktualnie produkowanych odlewów dla branży energetycznej. Jakość odlewów została oceniona na podstawie przeprowadzonych badań z zakresu mikrostruktury, składu chemicznego, przewodności elektrycznej i zawartości tlenu.

Słowa kluczowe: innowacyjne materiały i technologie odlewnicze, metalografia, wady odlewów, technologia wytapianych modeli, stopy miedzi.

1. Wprowadzenie

Rozpowszechnienie umiejętności użycia metali i produkcji stopów związane jest z technologią wytwarzania modeli, form i odlewów. W Polsce badania archeologiczne potwierdzają znajomość technologii przygotowywania stopów i stosowania zaawansowanych metod sporządzania form. Znane są różne rodzaje form odlewniczych, z których najpopularniejsze są formy dzielone kamienne do produkcji seryjnej (formy wielorazowego użytku) i formy gliniane do produkcji jednostkowej (formy niszczone). Rzadziej, jednak w epoce brązu są spotkane także

formy ceramiczne wielorazowe, a nawet formy metalowe (brązowe). Wyroby mniejsze, wykonywano z udziałem metody wytapianych modeli (traconego wosku) i odlewano w całości. Wyroby większe w tej metodzie produkowano w częściach i następnie łączono, lub odlewano je w całości z udziałem glinianego rdzenia, który wybijano, lub pozostawiano wewnątrz wyrobu. Metoda oparta o model woskowy, który wytapiano przed zalaniem formy, zapewniała znaczną gładkość i dokładność odtwarzania modelu, a także cienką ściankę odlewu. Powtarzalność modeli woskowych, uzyskiwano prawdopodobnie przez odlanie wosku do form kamiennych. Woskowy model

wielowarstwowo oklejano gliną, suszono i wypalano w temperaturze, zapewniającej właściwą ogniotrwałość i trwałość formy przy kontakcie z ciekłym metalem. Metodą wytapianych modeli w epoce brązu produkowano naszyjniki, bransolety, szpile i in.

Według źródeł historycznych najstarsze, znane obecnie człowiekowi, przedmioty (miedziane) odlewane metodą „traczonego wosku” pochodzą z okresu IV-III. tysiąclecia p.n.e. [1]. Ten sposób odlewania został zastosowany do wytwarzania wielu narzędzi (np. noże i sierpy), części uzbrojenia (miecze, sztylety i groty włóczni) oraz innych przedmiotów [2].

Technika ta rozwinęła się szczególnie w starożytnej Grecji i Rzymie [3], gdzie uzyskiwano artystyczne odlewy rzeźb i dużych posągów o rozbudowanych i skomplikowanych kształtach. Precyzyjne odtworzenie reliefu powierzchni zdecydowało o szerszym zastosowaniu tej techniki w warsztatach złotników, o czym wspominał już w XII wieku Mnich Teofil [4]. W późniejszym okresie stosowano tę metodę zarówno w małych warsztatach do wyrobu ozdób, jak i w ludwisarniach wykonujących duże odlewy jak dzwony, armaty, pomniki i in. [1, 5, 6]. W końcu XIX wieku, metoda wytapianych modeli była już wykorzystywana w prototypie dentystycznej [2].

Współcześnie tą metoda pozwala na wykonywanie niepowtarzalnych wyrobów artystycznych, zarówno dużych, jak i bardzo małych precyzyjnych odlewanych części maszyn i urządzeń. Za pomocą tej technologii można wytwarzać odlewy z dowolnych stopów odlewniczych. W pracy pokazano doświadczenia wskazujące na zalety stosowania tej metody dla jakości odlewów ze stopów miedzi.

Wraz z rozwojem wielu dziedzin gospodarki światowej wzrasta zapotrzebowanie na wytwarzanie specjalistycznych odlewów. Detale takie są często trudne do odlania z powodu skomplikowanych kształtów, silnie rozwiniętej powierzchni lub specjalnych wymagań pod względem właściwości fizykochemicznych i użytkowych, ale także specjalnej jakości powierzchni wykonywanych odlewów. Do wytwarzania takich właśnie produktów stosuje się technologie odlewania precyzyjnego wg metody wytapianych modeli. Metoda ta pozwala na odlewanie niewielkich, bardzo precyzyjnych elementów części maszyn. Tą technologią wykonuje się między innymi łopatki turbin, narzędzia chirurgiczne, endoprotezy i inne. Za pomocą tej technologii można wytwarzać odlewy ze stopów o specjalnych właściwościach.

Proces technologiczny metody wytapianych modeli składa się z szeregu czynności:

- wykonanie modeli woskowych i łączenie ich w zespoły modelowe,
- przygotowanie masy ceramicznej i nanoszenie kolejnych warstw formy
- wytopienie wosku w autoklawie i wygrzewanie form w zakresie temperatur
- zalewanie form ciekłym metalem, wybijanie i oczyszczanie odlewów.

W zależności od wielkości serii stosowane są różne materiały na wytworzenie matryc służących do wykonywania modeli woskowych. Mogą być wykonywane z gipsu, żywicy ale najczęściej są gumowe. Do produkcji seryjnej stosowane są matryce metalowe, wykonane ze stopów aluminium. Modele wykonywane są ze specjalnych mieszanek woskowych, którą za pomocą prasy pneumatycznej wtlacza się do matrycy.

Współczesne odlewnictwo miedzi i stopów miedzi z zastosowaniem metody wytapianych modeli napotyka na wiele ograniczeń technicznych i ekonomicznych. Trudności w procesie odlewania miedzi z powodu wysokiej temperatury topnienia i małej lejućności w wielu przypadkach kierują uwagę na metodę wytapianych modeli w technologii wytwarzania specjalnych odlewów dla energetyki i innych gałęzi przemysłu. Czysta miedź charakteryzuje się najwyższą po srebrze przewodnością elektryczną. Jej innymi cennymi zaletami są: wysoka przewodność cieplna, odporność na korozję. Właściwości te powodują, że miedź znajduje zastosowanie przede wszystkim w przemyśle energetycznym, elektronice, elektrotechnice. Przyczyną stosunkowo małego wykorzystania miedzi do wytwarzania odlewów są problemy wynikające ze stosunkowo niskich własności odlewniczych. Należą do nich wysoka temperatura odlewania, duży skurcz odlewniczy, napięcie powierzchniowe i lepkość. Inne niekorzystne z punktu widzenia technologii odlewniczych własności to skłonność do utleniania i absorpcji gazów, mała lejućność i skłonność do porowatości gazowej [7,8]. Te niekorzystne zjawiska powodują, że z czystej miedzi wykonuje się najczęściej odlewy o prostych, nieskomplikowanych kształtach. Główne odlewy z czystej miedzi to podzespoły urządzeń energetycznych (uzwojenia, pręty pierwotne, styki o wysokiej przewodności elektrycznej). Przewodność ta zależy w znacznej mierze od jej czystości.

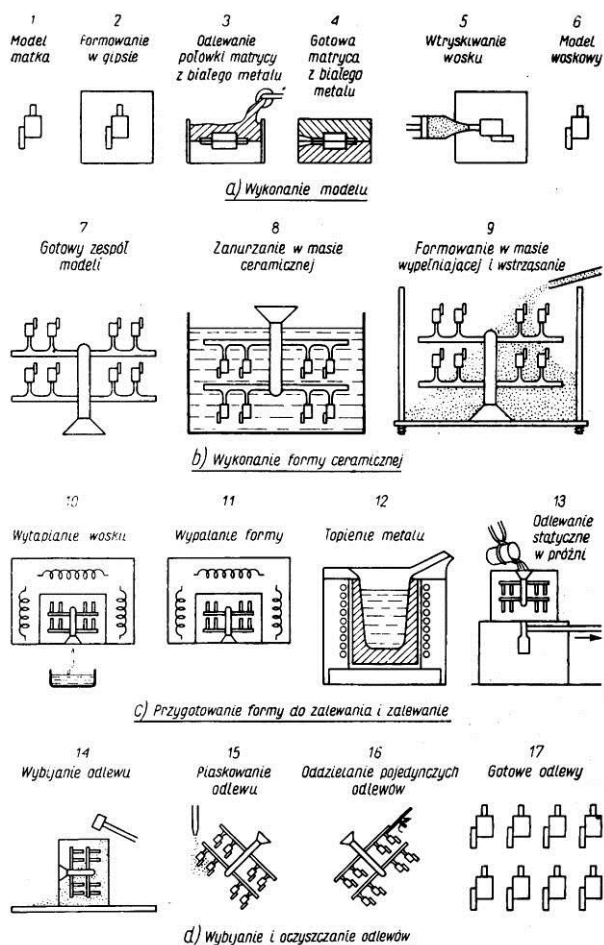
2. Metodyka badawcza

Analizowane elementy odlewnictwa precyzyjnego to opisane odlewy uzwojenia pierwotnego stosowane w transformatorach. Do ich wytwarzania, ze względu na wysokie wymagania właściwości fizykochemicznych i wymaganą jakość powierzchni, doskonale nadaje się technologia wytapianych modeli schematycznie ujęta w schemacie (rys. 1). Aby to uzyskać niezbędne jest zachowanie bardzo rygorystycznego reżimu technologicznego na każdym etapie procesu, począwszy od użycia wysokogatunkowych mieszanek woskowych, odpowiednich materiałów ceramicznych, odpowiednich materiałów wsadowych, procedur topienia uszlachetniania i odlewania miedzi.

Charakterystyczne tworzywa zarówno współczesnych, jak i historycznych brązów i mosiądzów poddane analizie z punktu widzenia technologii wytapianych modeli zestawiono w tabeli 1. Spośród wielu wariantów metody wytapianych modeli wybrano najbardziej przydatne do projektów rekonstrukcji dawnych odlewów metalowych, do wytwarzania współczesnych odlewów artystycznych oraz do produkcji współczesnych odlewów przemysłowych, przeznaczonych m.in. dla energetyki.

W zależności od przeznaczenia odlewu dokonano wyboru materiałów dla modeli woskowych, materiałów na matryce oraz materiałów na odlewy. W każdym przypadku dokonany wybór musi być skorygowany z parametrami technologicznymi.

W ramach badań wykonano zestaw modeli woskowych w matrycy metalowej (rys. 2), po czym na przygotowane zestawy modelowe kolejno nakładano warstewki masy ceramicznej suszonej z odpowiednią intensywnością, w określonych ściśle zakresach temperatur.



Rys. 1. Schemat technologii wytapianych modeli [9]

Tabela 1. Wyniki składu chemicznego z eksperymentalnych wytopów miedzi (M1E) i stopów miedzi oraz średniowiecznych zabytków metalowych oraz prób rekonstrukcji historycznych stopów [wt%].

Pierwiastek	Stężenie pierwiastka [%]								
	Miedź P5	Miedź P6	Miedź P7	Miedź P8	Mosiądz RGW10706	Mosiądz RGW25006	Brąz RG202306	Mosiądz	Brąz
Fe	-	0,002	-	-	0,1	0,2	0,18	0,11	0,1
Pb	0,01	0,009	0,004	0,007	6,63	14,03	3,3	1,8	1,2
As	-	-	-	-	0,54	0,08	2,6	-	-
Bi	0,127	0,095	0,099	0,1	0,07	0,04	0,1	-	-
Sn	-	-	-	-	2,77	0,04	3,89	2,36	5,9
Zn	-	-	-	-	5,49	15,41	4,88	26,6	0,15
Sb	-	-	-	-	5,19	0,05	4,61	0,34	-
Ag	-	-	-	-	0,15	0,12	0,29	-	-
Ni	-	-	-	-	0,12	0,15	0,19	0,11	0,12
Cu	99,834	99,869	99,881	99,869	78,05	68,95	79,4	68,1	91,9
inne	0,03	0,025	0,016	0,024	0,89	0,93	0,56	0,58	0,63

Nakładanie kolejnych warstw masy ceramicznej poprzez zanurzenie w objętości przygotowanej kąpieli wirującej

w mieszalniku (rys. 3) przeprowadzano wielokrotnie dla uzyskania odpowiednio wytrzymałej skorupy ceramicznej. Po wysuszeniu formy ceramiczne umieszczano w autoklawie celem wytopienia i usunięcia masy woskowej, a następnie wygrzewano w piecu tunelowym do zalania ciekłym metalem (rys. 4).



Rys. 2. Przykładowe modele woskowe na odlewy uzwojeń pierwotnych

Topienie wsadu metalowego przeprowadzono w piecu indukcyjnym stosując miedź przewodową i katody czystej miedzi MOK1 w tygłu szamotowo grafitowym z pokryciami ochronnymi z jak i warstwy węgla drzewnego. Rafinację kąpieli metalowej przeprowadzono z zastosowaniem żużli syntetycznych.



Rys. 3. Nakładanie powłoki ceramicznej na modelach uzwojenia

W warunkach odlewni SPECODLEW przeprowadzono kolejne siedem wytopów z zastosowaniem następujących parametrów: topienie pod pokryciem ochronnym węgla drzewnego, żużel rafinujący dla usunięcia wtrąceń niemetalicznych, odtlenianie za pomocą preparatów typu CuP10 i innych z udziałem wsadu metalowego na bazie miedzi. Równolegle przeprowadzono wytopy dla charakterystycznych tworzyw na osnowie miedzi tj. brązów i mosiądzów w Odlewni Doświadczalnej Wydziału

Odlewnictwa w Katedrze Tworzyw Formierskich, Technologii Formy i Odlewnictwa Metali Nieżelaznych. Przykładowy skład chemiczny stopów użytych do badań zestawiono w tabeli 1.

Temperatura odlewania miedzi mieściła się w zakresie 1150÷1180 °C, a w przypadku brązów i mosiądzów w zakresie 1050÷1150 °C. Ciekły metal odlewano do przygotowanych form ceramicznych, wygrzanych w temperaturze temperatury 850 °C przez okres 6 godzin, a następnie schłodzonych bezpośrednio przed odlewaniem do temperatury 650 °C.

Oprócz przemysłowych odlewów kontrolnych elementów uzwojenia odlewano również próbki do badań właściwości wytrzymałościowych i badań właściwości fizyko-chemicznych tworzywa.



Rys. 4. Zalewanie form ceramicznych ciekłym metalem

3. Dyskusja wyników

Szczególnie ważne dla wykonania odlewów wysokiej jakości jest utrzymanie na odpowiednim poziomie czystości kąpieli metalowej, a przede wszystkim niskiej zawartości tlenu i wodoru. Wodór tworząc porowatości gazowe zmniejsza silnie przekrój czynny odlewu, a aktywna domieszka tlenu w mikrostrukturze duże strefy eutektyki tlenowej na granicach ziaren miedzi bardzo silnie obniżają przewodnictwo elektryczne badanych odlewów.

Obecność w strukturze odlewu porowatości gazowych oraz wtrąceń niemetalicznych ma bezpośredni wpływ na przewodność. Wyniki badań zależności przewodności elektrycznej od zawartości tlenu przedstawiono w tabeli 2.

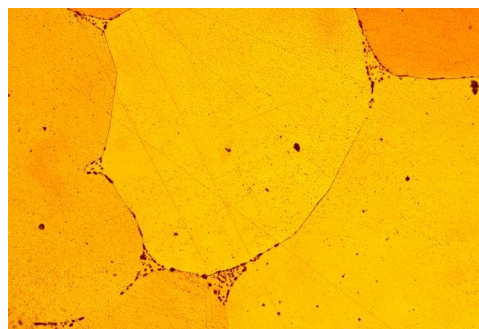
Obecność zanieczyszczeń gazowych w miedzi jest istotnym czynnikiem jakości odlewów i zawartości struktury. Duża zawartość wodoru powoduje wzrost porowatości gazowej obniżających właściwości fizyko-chemiczne, tj. obniżających gęstość, przewodnictwo cieplne, przewodnictwo elektryczne i właściwości mechaniczne, czyli powodujących obniżenie jakości odlewania.

Po zastosowaniu zabiegów odgazowania i odtleniania przeprowadzono odlewanie elementów uzwojeń pierwotnych oraz próbek do badań właściwości fizyko-chemicznych odlewu.

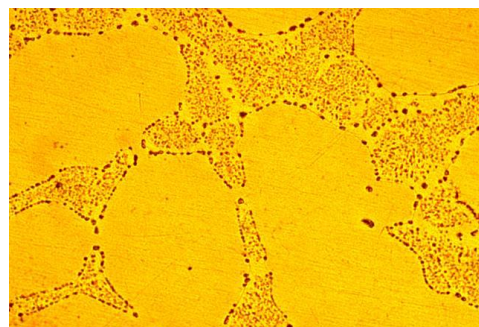
Tabela 2. Wyniki badań zawartości tlenu [ppm] i przewodności elektrycznej [MS] wykonanych odlewów miedzi.

Nr próbki	Zawartość tlenu [ppm]	Przewodność [MS]
1	75	57
2	102	52
3	104	54
4	296	53
5	325	50
6	350	48
7	200	53
8	173	54
9	305	50
10	93	55

Przykładowe mikrostruktury miedzi o różnej zawartości tlenu przedstawiono na rysunkach (5 i 6), a zależność przewodności elektrycznej od zawartości tlenu dla miedzi o stosunkowo małej zawartości tlenu charakteryzuje wykres (rys. 7).



Rys. 5. Mikrostruktura miedzi o zawartości tlenu 190 ppm, pow. 200x

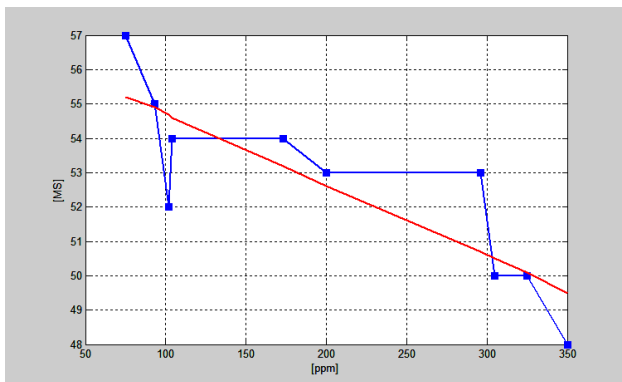


Rys. 6. Mikrostruktura miedzi o różnej zawartości tlenu 1830 ppm, pow. 200x

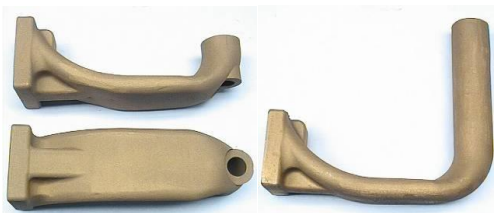
Przykładowe odlewy z miedzi wykonane metodą wytapianych modeli przedstawiono na rysunkach 8 i 9.

Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono przykładowo charakterystyczne wady powierzchniowe i wewnętrzną, jakie pojawiają się w przypadku badanych odlewów przygotowanych technologią wytapianych modeli.

Przytoczone wady pojawiają się w przypadku negatywnego oddziaływania zanieczyszczeń gazowych w miedzi, głównie wodoru, tlenu i wtrąceń tlenkowych, które inicjują nieciągłości struktury w odlewie.



Rys. 7. Wykres zależności przewodności elektrycznej [MS] od zawartości tlenu w miedzi [ppm]



Rys. 8. Odlewy uzwojenia pierwotnego z miedzi wykonane metodą wytapianych modeli



Rys. 9. Odlew uzwojenia pierwotnego z miedzi

Dlatego właściwe przygotowanie materiałów wsadowych i przeprowadzenie wytopu oraz procesu uszlachtniania, jak i dobór parametrów odlewania, w istotnym stopniu decydują o jakości odlewów w technologii wytapianych modeli, a szczególnie o jego właściwościach użytkowych [10, 11, 12].



Rys. 10. Wady powierzchniowe powstałe w procesie odlewania miedzi



Rys. 11. Porowatość w przekroju odlewu z miedzi wykonanego metodą wytapianych modeli z wytopów bez zastosowania zabiegów uszlachtniania kąpielą metalową

Omawiana metoda spełnia się również w przypadku odlewów artystycznych. Przeprowadzone eksperymenty w zakresie odlewania współczesnych wyrobów artystycznych, jak również nad odtwarzaniem dawnych procesów odlewniczych, rekonstrukcji stopów i odlewów. Przykładowe odlewy z brązu i mosiądzu wykonano w Laboratorium Odlewnictwa Metali Nieżelaznych Wydziału Odlewnictwa AGH (rys. 12 i 13).



Rys. 12. Odlew artystyczny św. Floriana i odlew precyzyjny statuetki Diamenty AGH



Rys. 13. Odlew artystyczny popiersia z mosiądzu

3. Wnioski

Odpowiednio dobrane parametry procesu technologicznego zapewniają wykonanie odlewu o najwyższych właściwościach użytkowych, co zostało potwierdzone w oparciu o badania.

Zarówno badania składu chemicznego i mikrostruktury ukazały prawidłowe ukształtowanie mikrostruktury odlewu, bez

widocznych wad w postaci mikroporowatości. Zarówno wyniki przewodności elektrycznej, jak i pomiar zawartości tlenu potwierdzają wpływ jakości procesu technologicznego na jakość odlewu.

Metoda wytapianych modeli szczególnie sprawdza się w odniesieniu do odlewów artystycznych, wykonywanych zarówno z brązu, jak i mosiądzu.

Literatura

- [1] Piaskowski, J., (1981). *Technologia dawnych odlewów artystycznych*. Kraków
- [2] Czekaj, E., Garbacz- Klempka, A., Karwiński, A., Leśniewski, W. (2006). Krótki rys historyczny odlewania metodą wytapianych modeli oraz jej współczesne formy związane z otrzymywaniem założonych konstrukcyjnie i o wysokim stopniu jednorodności struktury precyzyjnych odlewów ze stopów aluminium, In IX Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Odlewnictwa Metali Nieżelaznych „Nauka i Technologia”, Mikorzyn 2006 (pp. 31-41) Kraków.
- [3] Sękowski, K. (1996). Odlewnictwo w Starożytnej Grecji i Rzymie. *Przegląd Odlewnictwa*. Vol. 12, 355-359.
- [4] Głowa, W., Garbacz-Klempka A. (2010). Z badań nad wytwórczością średniowiecznych ozdób, *Krzysztofory: zeszyty naukowe Muzeum Historycznego Miasta Krakowa*. Vol. 28 (2), 97-100.
- [5] Garbacz-Klempka, A. & Rządkosz, S. (2009) *Metallurgy of copper in the context of metallographic analysis of archaeological materials excavated at the market square in Krakow*. Archives of Metallurgy and Materials, vol. 54 (iss. 2),
- [6] Rządkosz, S., Garbacz-Klempka, A., Piękoś, M., Kopyciński Ł. (2012). Tradycje ludwisarskie w Krakowie, In *Nauka i technologia: XV międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna odlewnictwa metali nieżelaznych Stary Wiśnicz 2012* (pp. 67-72) Kraków.
- [7] Rządkosz, S. (2013). *Odlewnictwo miedzi i jej stopów*. Kraków: Wydawnictwo „Akapit”.
- [8] Górny, Z., *Odlewanie w formach wirujących*, WNT, Warszawa 1966
- [9] Allendorf, H. (1960). *Odlewnictwo precyzyjne za pomocą modeli wytapianych*, Warszawa: PWT.
- [10] Pączek, Z., Przybylski, J., Stachańczyk, J. (1996) Nowoczesna odlewnia precyzyjna wytwarzająca odlewy metodą wytapianych modeli, *Przegląd Odlewnictwa*. Vol 12, 344-348.
- [11] Zych, J., Kolczyk, J. & Snopkiewicz, T. (2012) Badania właściwości mieszanek woskowych stosowanych w technologii wytapianych modeli – nowe metody badań. *Archives of Foundry Engineering*, vol. 12 spec. iss. 1, 199–204.
- [12] Kolczyk, J. (2011). Technologia wytapianych modeli w produkcji odlewów dla przemysłu lotniczego. In Marcin Kuczer (Eds.), *Monografia 2011. T. 1* (pp. 48-52). Kraków Creativetime.

Investment Casting Technology Applied to Copper Alloys

Abstract

Investment casting technology belongs to the oldest casting techniques. Historically, it was used for casting tools, weapons and ornaments. A model, made from beeswax, was covered in loam, dried and fired. The casts obtained were characterised by high surface smoothness, accuracy and precision of its ornaments. This method was used for relatively small casts as well as for big monuments. Nowadays, this technology is used in many fields of manufacturing, both artistic and industrial, especially in armaments, aviation, automotive, power, construction and even space industry.

This work presents the results of research and experiments conducted in the field of casting technology of copper and copper alloys, applying the investment casting method, both in its historical aspect and modern industrial practice. An exemplary analysis was presented of the chosen elements of the old technologies, moulds and casts, as well as the results of casts made currently for the power industry. The casts quality was evaluated based on the research of their microstructure, chemical composition, electrical conductivity and oxygen content.