

# Nowy sposób wytwarzania odlewów precyzyjnych ze stopu miedzi w formach ceramicznych

**E. Czekał\*, A. Karwiński, Z. Pączek, S. Pysz**

Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

\*Kontakt korespondencyjny: e-mail: czekał@iod.krakow.pl

Otrzymano 20.06.2012; zaakceptowano do druku 05.09.2012

## Streszczenie

W publikacji zaprezentowano wyniki badań odlewów wytwarzanych ze stopu miedzi (brązu aluminiowego, typu BA1044) według opracowanej w Instytucie Odlewnictwa w Krakowie technologii wykonywania odlewów precyzyjnych przy zastosowaniu kierunkowego krzepnięcia [9]. Wstępnie pokazano zasadność nowo opracowanego w Polsce sposobu wytwarzania skomplikowanych konstrukcyjnie, a zarazem wysokojakościowych (z uwagi na właściwości użytkowe) części maszyn, urządzeń i pojazdów ze stopów miedzi. Proponowane rozwiązanie jest innowacją nie tylko w skali kraju (Polski), ale również o zasięgu międzynarodowym.

**Słowa kluczowe:** Odlewanie precyzyjne, Stop miedzi, Formy ceramiczne, Kierunkowe krzepnięcie

## 1. Wprowadzenie

Tematyka kierunkowego krzepnięcia odlewów jest niezwykle istotna z punktu widzenia możliwości jej wykorzystania do produkcji różnorodnych części konstrukcyjnych. Powszechnie wiadomo, iż wykorzystanie technologii odlewniczych pozwala na wytwarzanie złożonych konstrukcyjnie detali stosowanych w maszynach i urządzeniach, aparatach pomiarowych, a także pojazdach. Biorąc pod uwagę stały rozwój konstrukcji i związane z tym coraz wyższe wymagania stosowanych komponentów (w tym odlewów), konieczne jest nieustanne prowadzenie badań materiałowych i techniczno-technologicznych. Jednym z takich zagadnień w odlewnictwie jest dążenie do uzyskania kontrolowanego przebiegu procesu krzepnięcia, co wymaga m.in. opanowania technicznych sposobów realizacji jego kierunkowości.

Mając na względzie stosowanie w praktyce szeregu sposobów wykonywania odlewów oraz wykorzystywania stopów na różnej osnowie o zmiennym składzie chemicznym, zagadnienie to jest stosunkowo złożone. W niniejszym referacie zaprezentowano wybrane

wyniki prac eksperymentalnych, mające na celu realizację kierunkowego krzepnięcia odlewów wykonywanych w formach ceramicznych.

## 2. Dotychczasowy stan zagadnienia

Rozwój techniki i przeprowadzone do tej pory badania pozwalają na głębsze poznanie procesów zachodzących podczas odlewania i krystalizacji ciekłych stopów odlewniczych. Zauważono, że w procesie krystalizacji bardzo ważną rolę odgrywa wymiana ciepła pomiędzy odlewem a materiałem, z którego wykonana jest forma odlewnicza. Tradycyjna technologia odlewania precyzyjnego, w warstwowych formach ceramicznych chłodzonych na powietrzu, nie gwarantuje optymalnego transferu ciepła z odlewu przez formę do otoczenia. W odlewie, którego czas krzepnięcia jest nadmiernie wydłużony, następuje powstanie struktury gruboziarnistej, która może być przyczyną zmniejszonej wytrzymałości i/lub plastyczności. Wolne

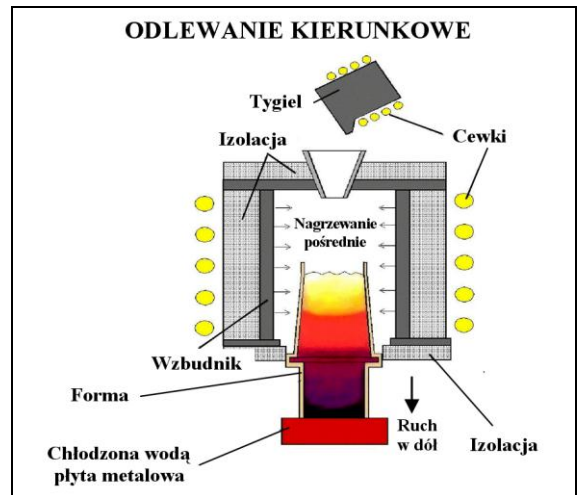
chłodzenie sprzyja ponadto pojawianiu się w odlewie rozproszonej porowatości typu gazowego.

Analiza patentów dotyczących prób sterowania kierunkowym krzepnięciem pozwoliła na porównanie skuteczności działania wprowadzonych warunków na jakość otrzymanych odlewów. W patencie niemieckim DE 3629079 A1 [1] proponuje się dokonanie zmian w samej konstrukcji form ceramicznych. Dodatkowo kieszenie, zawierające śrut stalowy, umieszczone są w obszarach, w które mają zapewnić zasady kierunkowego krzepnięcia. Zabieg ten jest jednak mało efektywny ze względu na szybkie nagrzewanie się śrutu; tym samym wymuszona wymiana ciepła z odlewu jest stosunkowo krótkotrwała. Na wdrożenie takiej technologii negatywnie wpływają też wysokie koszty oraz trudności związane z dostosowaniem technologii formy. Amerykański patent 6,622,744 B2 [2] oraz zgłoszenie patentowe US 2008/0011442 A1 [3] proponuje natomiast wykorzystanie cieczy jako medium chłodzące, powodujące bardzo szybkie odprowadzenie ciepła z odlewu poprzez formę ceramiczną. Wygrzana do odpowiedniej temperatury forma, a następnie zalana ciekłym stopem wprowadzana jest do kąpielii olejowej [2, 3]. Na granicy forma ceramiczna-ciecz chłodząca wysoki gradient temperatury i duży strumień wymiany ciepła powoduje powstanie przechłodzenia i wytworzenie się zmiennego w czasie frontu krystalizacji. Skutkiem odpowiedniego stopnia chłodzenia jest powstanie drobnoziarnistej mikrostruktury. Niedostatkami amerykańskich rozwiązań jest stosowanie palnych, mało ekologicznych chłodziw. Wymaga to prowadzenia procesów kierunkowego odlewania w zamkniętych komorach. Biorąc powyższe pod uwagę należy stwierdzić, iż najlepszy efekt można uzyskać przy chłodzeniu formy ceramicznej w odpowiednio dobranej cieczy chłodzącej.

W zwykłych warunkach chłodzenia proces krzepnięcia odlewu ma często charakter krystalizację objętościowej lub mieszanej (kierunkowo-objętościowej), w której następuje powstawanie fazy stałej z ciekłego stopu odlewniczego w postaci rozproszonej – tzn. nieciągłego frontu krystalizacji. Otrzymana w takim procesie mikrostruktura charakteryzuje się stosunkowo niskimi właściwościami użytkowymi, w tym także wadami typu porowatości skurczowej. Dlatego też celem badań było uzyskanie takich parametrów wymiany ciepła na granicy stopu w stanie ciekłym i stałym, ażeby zapewnione zostały warunki do powstania odpowiedniego przechłodzenia z zachowaniem jego kierunkowości – gwarantujących wytworzenie optymalnej mikrostruktury i zwartości (mierzonej np. gęstością) odlewów. Spełnieniu tych wymagań współcześnie zapewnia zastosowanie procesu SOPHIA® [4] lub HERO Premium Casting® [5]. W obydwu tych procesach mamy do czynienia z adaptacją tradycyjnego sposobu wytwarzania łopatek turbin ze stopów żelaza, niklu czy miedzi (w tym monokrystalicznych) do kierunkowego schładzania form ceramicznych wypełnionych ciekłym stopem aluminium (niekiedy stopem tytanu). W danym przypadku forma ceramiczna wygrzewana jest w piecu do temperatury ok. 900÷950°C, tj. powyżej temperatury likwidusu dla stopów typu A356 i A357 (wg ASTM) – najczęściej wykorzystywanych w danych procesach. Odpowiednio przygotowana forma zalewana jest ciekłym stopem; wlewanie go do odpowiednio podgrzanej formy ceramicznej pozwala na wypełnienie jej cienkościennych przekrojów (niekiedy nawet znacznie poniżej 3 mm). Kolejnym etapem jest wprowadzenie formy z ciekłym metalem do zbiornika wypełnionego specjalną cieczą chłodzącą. Odpowiednio dobrana prędkość zanurzenia formy ceramicznej pozwala na kierunkowość krzepnięcia oraz większy stopień przechłodzenia – niż ma to miejsce w tradycyjnych formach

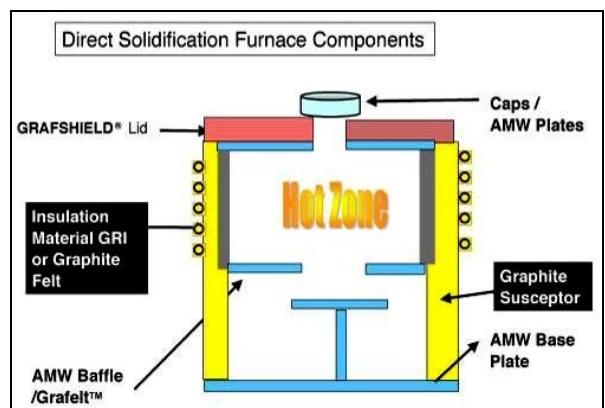
obsypywanych czy samonośnych. Odlewy otrzymane w taki sposób posiadają zwiększone (o 20÷30%) właściwości wytrzymałościowe oraz podwyższone nawet o 150% właściwości plastyczne; cechuje je także dobra gęstość struktury [6].

Idea procesów kierunkowego odlewania elementów konstrukcyjnych w formach ceramicznych ze stopów metali nieżelaznych (głównie na osnowie aluminium czy tytanu), typu SOPHIA® czy HERO Premium Casting®, została zaadaptowana ze znanych wcześniej sposobów kierunkowego odlewania łopatek turbin ze stopów żelaza, niklu czy miedzi o mono- lub polikrystalicznej strukturze kryształów słupkowych (rys. 1.).



Rys. 1. Typowy (tradycyjny) schemat kierunkowego krzepnięcia łopatek turbin ze stopów żelaza, niklu lub miedzi adaptowany do procesu SOPHIA® oraz HERO Premium Casting® [6]

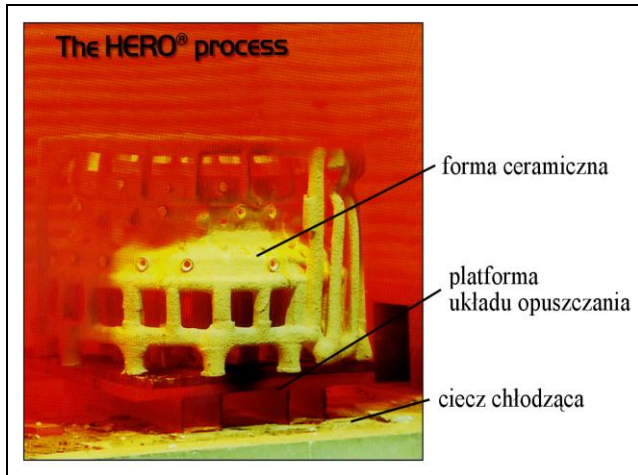
Natomiast na rysunku 2. pokazana została zasada działania urządzenia, oferowanego przez The Industrial Heat Management Group {nature of Advanced MultiWrap™ (AMW)}, do realizacji zasady kierunkowego krzepnięcia odlewów precyzyjnych w małej – co do wymiarów i wielkości produkcji – skali.



Rys. 2. Schemat budowy pieca z dodatkowymi elementami do kierunkowego krzepnięcia odlewów precyzyjnych [7]

Ogólny schemat przemysłowego wytwarzania złożonych odlewów precyzyjnych, w formach ceramicznych, ze stopów aluminium zgodnie

z procesem HERO Premium Casting® realizowanego w firmie TITAL® w Niemczech uwidoczniomy z kolei został na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat procesu HERO® z dolnym układem opuszczania formy ceramicznej do cieczy chłodzącej stosowanej w firmie TITAL® [8]

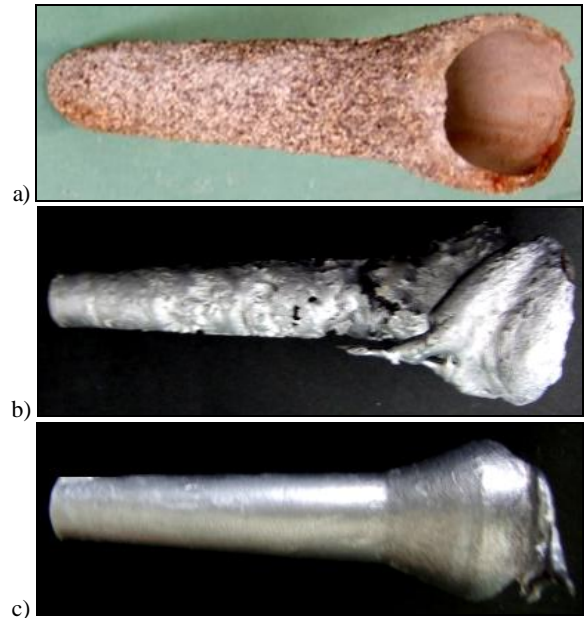
### 3. Badania własne

#### 3.1. Dobór cieczy chłodzącej

W Instytucie Odlewnictwa w Krakowie opracowany został polski wariant technologii SOPHIA® oraz HERO Premium Casting® [9]. Od znanych na świecie rozwiązań odróżnia go zastosowanie efektywnych w znaczeniu procesowym, a jednocześnie tanich i ekologicznych ciekłych chłodziw na bazie wodnych roztworów specjalnych polimerów (typu PAG, PVG, ACR czy PEO). Wybrane one zostały spośród dziesiątków cieczy przemysłowych stosowanych do: a) chłodzenia w procesach obróbki ubytkowej, b) technologii obróbki cieplnej; c) chłodzenia silników spalinowych i innych.

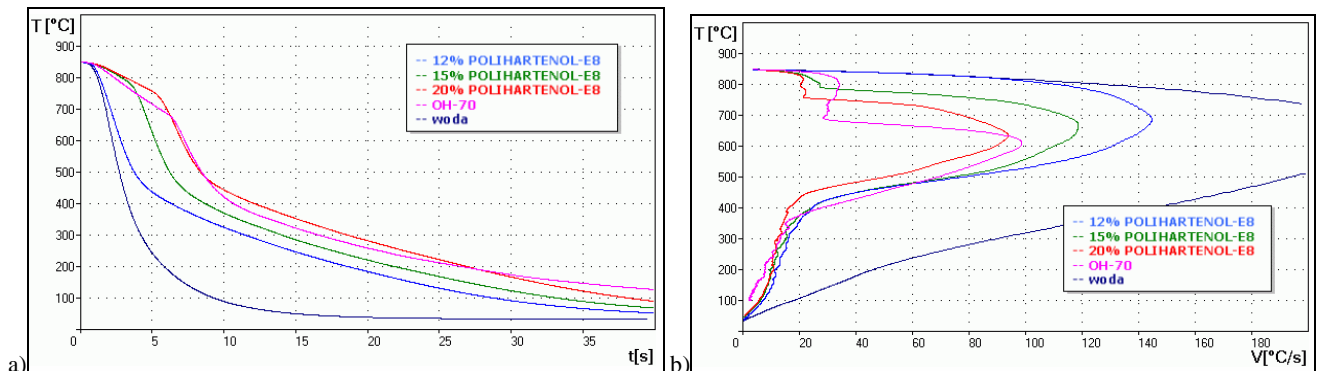
Ciecze badane było ze względu na kontakt z ciekłymi stopami (początkowo ze stopami aluminium), a także z uwagi na palność oraz ogólną zgodność z przepisami BHP.

Na fotografiach rysunku 4 pokazano wyniki kierunkowego schładzania stożkowego odlewu w formie ceramicznej, ze stopu AlSi7Mg0,3 (typu A356), w wodzie oraz specjalnie dobranej cieczy chłodzącej (na bazie wodnego roztworu ciekłego polimeru).



Rys. 4. Wyniki kierunkowego chłodzenia ciekłego stopu AlSi7Mg0,3: a) w formie ceramicznej; b) w wodzie; c) w specjalnie dobranej cieczy

Z przedstawionych na rysunku 4. fotografii b) i c) wynika, że porowata forma ceramiczna sprzyja penetracji wody oraz zagazowaniu – przez parę wodną – odlewu nie tylko w strefie przypowierzchniowej, ale także „na wylot”. Zastosowanie natomiast wodnego roztworu specjalnego ciekłego polimeru (zawierającego 75÷90% H<sub>2</sub>O) radykalnie zmienia sytuację; odlew ma gładką i błyszczącą zewnętrzną powierzchnię, a jednocześnie jest zwarty (gęsty) wewnętrznie.



Rys. 5. Charakterystyki zdolności chłodzących roztworów wodnych POLIHARTENOL-E8 oraz ich odniesienie do wody i oleju typu OH-70 [10]: a) krzywe chłodzenia; b) zmiany szybkości chłodzenia w funkcji temperatury



Poza innymi, bardzo dobrze zarekomendowała się w tym względzie produkowana w Polsce ciecz hartownicza pod nazwą POLIHARTENOL-E8 [10]. Zdolności chłodzące POLIHARTENOL-E8, określone w oparciu o międzynarodową normę ISO 9950, przedstawione są na wykresach rysunku 5a. i 5b. Dla celów porównawczych podano też krzywe chłodzenia wody oraz oleju hartowniczego typu OH-70.

Nowoczesne polimerowe chłodziwa hartownicze typu POLIHARTENOL stosowane są jako alternatywa dla wody i – głównie – oleju. Umożliwiają zastąpienie niebezpiecznych (palnych) olejów stosowanych głównie do obróbki cieplnej (hartowania) stali, staliw i żeluz z szybkościami chłodzenia pośrednimi pomiędzy olejem a wodą (rys. 5). Niepalność kąpieli, ochrona środowiska oraz atrakcyjna cena to zespół czynników, który kształtują zainteresowanie chłodziwami polimerowymi. POLIHARTENOL-E8 jest niepalnym, wodnym roztworem polimerowych stymulatorów zdolności chłodzącej, inhibitorów korozji, środków bakteriobójczych i grzybobójczych oraz środków wspomagających odwracalne wydzielanie polimeru na powierzchniach chłodzących. Nie zawiera przy tym, jak zapewnia polski producent [10], żadnych trucizn ani środków szkodliwych. POLIHARTENOL-E8 wytwarzany jest w postaci koncentratu; najczęściej stosowane są wodne roztwory o stężeniu od 10 do 25%. Przeprowadzone w Instytucie Odlewnictwa Krakowie badania [6] wskazują na inne – nieznanе dotąd w Polsce i na świecie – możliwości technologicznego wykorzystania ciekłych chłodziw polimerowych, związane z bezpośrednim schładzaniem metali i stopów ze stanu ciekłego [10].

### 3.2. Prototypowe stanowisko do kierunkowego odlewania

Idee kierunkowej krystalizacji zaprezentowane na rysunkach 1. i 2. posłużyły do opracowania w Instytucie Odlewnictwa w Krakowie i zbudowania – wspólnie z PUH Jacek Bochenek (Kraków) – prototypowego stanowiska (rys. 6.), pozwalającego na wykonywanie precyzyjnych odlewów na skalę laboratoryjno-przemysłową (wielkość komory roboczej 400 x 400 x 400 mm).

Zgodnie z założeniami projektowymi [6] stanowisko winno się ono składać z dwóch podstawowych modułów: 1) termicznego – tj. pieca do podgrzewania, przetrzymywania i zalewania form ceramicznych; 2) układu chłodzenia, zawierającego stosunkowo duży zbiornik z cieczą chłodzącą. Od schematu podanego na rysunku 3 zasadniczo odróżnia go górný układ opuszczania formy znajdującej się w specjalnym perforowanym (o prześwicie dochodzącym do 90%) metalowym koszu. Etapy nagrzewania, przetrzymywania, a także opuszczania kosza do cieczy chłodzącej zostały zautomatyzowane. Na fotografiach rysunku 6 widać, iż urządzenie jest mobilne, tj. można z nim podjechać do dowolnej jednostki topialnej hali laboratoryjnej i/lub produkcyjnej. Zbudowane stanowisko spełnia praktycznie wszystkie wymagania procesów SOPHIA® czy HERO Premium Casting®; w pewnych aspektach nawet je przewyższa: np. wstępne podgrzanie form ceramicznych, przed zalaniem ciekłym stopem, może być realizowane w szerokim zakresie – od 20 do 900°C.



a)



b)

Rys. 6. Ogólny widok do badania procesów kierunkowego, szybkiego krzepnięcia odlewów aluminiowych w formach ceramicznych [6]: a) od strony układu sterowania i b) strony przeciwnej

### 3.3. Praktyczna realizacja odlewania na prototypowym stanowisku

Przed przystąpieniem do odlewania na prototypowym stanowisku (vide rys. 6.) wykonane zostały woskowe zestawy modelowe. Na ich podstawie wytworzona została forma ceramiczna. Z uwagi na zwiększone obciążenia cieplne (szybkie chłodzenie w cieczy) oraz potrzebę wyboru temperatury początkowej zalewania, formę ceramiczną wykonywano na osnowie glinokrzemianowego syntetycznego molochitu – o nazwie Refracoarse firmy Capital Refractories Limited (W. Brytania). Wyjściowe parametry kierunkowego odlewania były następujące: 1) temperatura formy ceramicznej przed zalaniem – 500°C; 2) temperatura ciekłego stopu BA1044 – 1250°C; 3) prędkość opuszczania formy do cieczy – 10 mm/s.

Na fotografiach rysunku 7. uwidoczniło wyjściowy stan formy ceramicznej przed- oraz po procesie odlewania.



a)



b)

Rys. 7. Stan molochitowej formy ceramicznej do odlewania łopatek ze stopu miedzi typu BA1044 [11]: a) przed odlewaniem; b) po odlewaniu (z lewej strony – chłodzonej kierunkowo w 20-procentowy wodnym roztworze POLIHARTENOL-E8, po prawej – forma samonośna)

Przy zalewaniu do form ceramicznych obsypywanych czy samonośnych ich stan jest w zasadzie podobny do stanu wyjściowego (przed procesem odlewania). W przypadku wymuszonego chłodzenia

(rys. 7b.) widoczne jest efekt zwiększonej wymiany ciepła na granicy ciekły metal – forma ceramiczna – chłodziwo oraz pewnej reakcji z cieczą chłodzącą. Ogólny stan zewnętrzny odlewu po procesie kierunkowego krzepnięcia jest zadowalający, co potwierdzają fotografie rysunku 8.

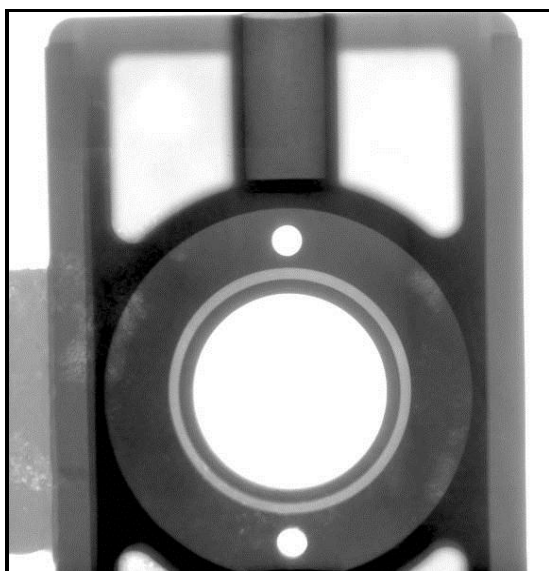


Rys. 8. Przykładowy stan powierzchni zewnętrznej odlewu precyzyjnego, ze stopu miedzi typu BA1044, uzyskany na stanowisku prototypowym do kierunkowego krzepnięcia chłodzonego w cieczy polimerowej [11]

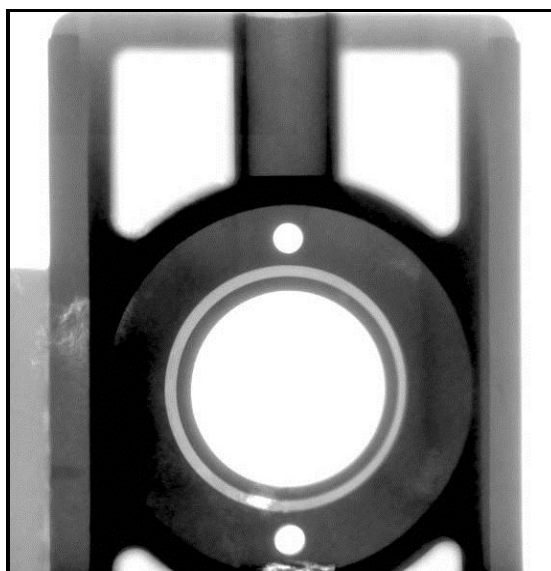
Doświadczalne odlewy precyzyjne łopatek, ze stopu miedzi typu BA1044, poddano prześwietleniu rentgenowskiemu. Badania wykonano w Instytucie Odlewnictwa w Krakowie przy pomocy defektoskopu DOF 300 firmy SCANRAY. Warunki badania dobierano zgodnie z normą PN-EN 444 „Badania nieniszczące. Ogólne zasady badań materiałów metalowych za pomocą promieni X i gamma”. Radiogramy oceniano, wykorzystując do tego celu negatoskop, zgodnie z PN-EN 25580. Wyniki prześwietleń rentgenograficznych łopatek odlanej tradycyjnej formie samonośnej oraz chłodzonej kierunkowo w polimerowej cieczy pokazane zostały na rysunku 9.

W obydwu przypadkach uzyskano dobre wyniki prześwietleń, jednakże łopátka chłodzona w cieczy charakteryzuje się bardziej równomiernym rozkładem struktury (rys. 9a i 9b).





a)



b)

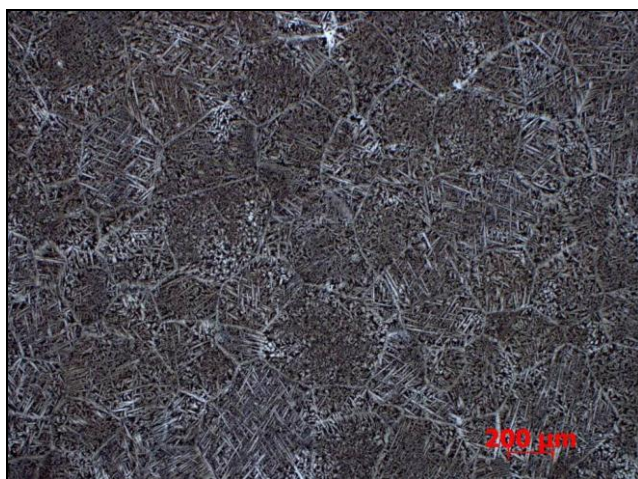
Rys. 9. Wyniki badań radiograficznych odlewów ze stopu miedzi [11]: a) wykonanych w formie samonosnej; b) wykonanych na stanowisku prototypowym z zastosowaniem wymuszonego kierunkowego chłodzenia w cieczy polimerowej

### 3.4. Wyniki badań metalograficznych

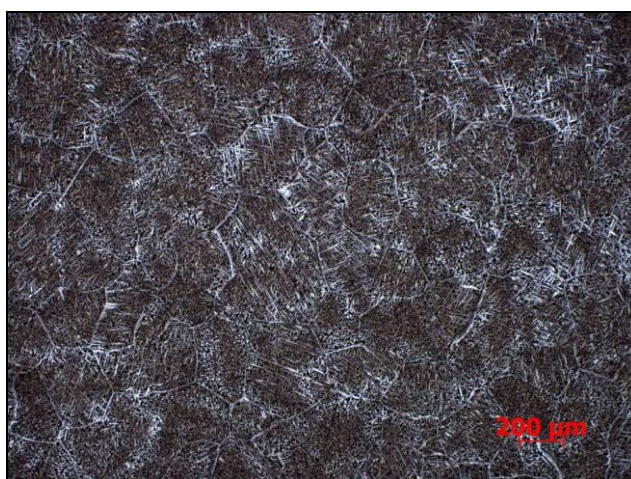
Obserwacje mikroskopowe oraz ich rejestracje przeprowadzone były na mikroskopie metalograficznym AXIO OBSERVER Z1m w Zespole Laboratoriów Badawczych (ZLB) Instytutu Odlewnictwa w Krakowie. Zgłady metalograficzne przygotowywane były zgodnie

z instrukcją ZLB nr TBM/001; do trawienia zgładów wykorzystywano odczynnik Mi17Cu, zgodnie z normą PN-61/H-04503. Materiał do badań metalograficznych był pobrany z odlewów próby wytrzymałościowej.

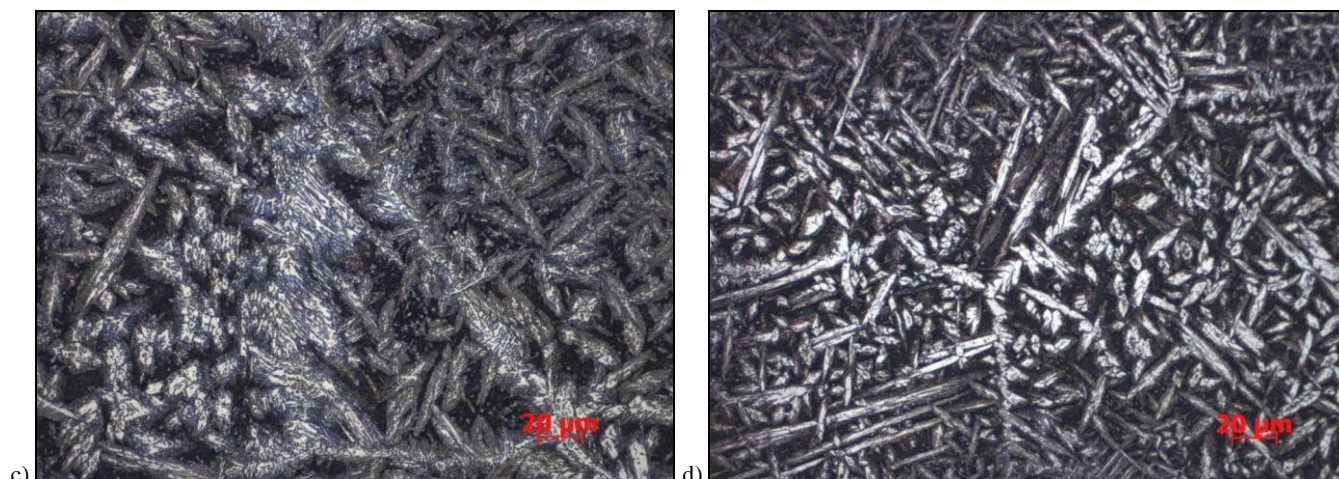
Mikrostrukturę badanych próbek brązu BA1044, w zależności od sposobu (intensywności) chłodzenia, przedstawiono na rysunku 10.



a)

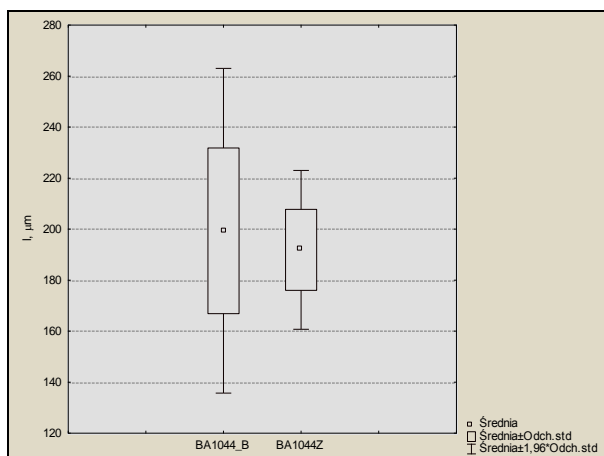


b)



Rys. 10. Mikrostruktura brązu aluminiowego typu BA1044 (traw. Mi17Cu) [11]: a) i c) stan lany do podgrzanej (500°C) samonośnej molochitowej formy ceramicznej (chłodzonej na powietrzu); b) i d) chłodzony w 20-procentowym wodnym roztworze ciekłego polimeru POLIHARTENOL-E8

Składnikami mikrostruktury badanych próbek, z brązu BA1044, były roztwór stały  $\alpha\text{Cu}$ , eutektoid  $\alpha\text{Cu} + \gamma$  oraz drobne wydzielenia międzymetalicznej fazy z metalami przejściowymi (żelaza i niklu) (rys. 14.). Stopień dyspersji zarówno ziaren jak i morfologia składników fazowych w badanych próbkach odzwierciedlają oddziaływanie warunków chłodzenia próbki. Zarówno ziarno (rys. 10a i 10b górne mikrografie), jak i wydzielenia składników fazowych – roztworu stałego  $\alpha\text{Cu}$  i fazy międzymetalicznych Fe i/lub Ni (rys. 10c i d) – ulegały rozdrobnieniu w wyniku szybszego chłodzenia. Rozdrobnienie ziaren przy szybszym chłodzeniu potwierdzają również specjalne (o charakterze statystycznym) metalograficzne badania zaprezentowane na rys. 11.



Rys. 11. Wynik pomiaru średniej liniowej długości rzutu dla ziaren (wielkości ziarna) w próbkach ze stopu BA1044 [11]:  
 BA1044\_B – próbka formy samonośnej bez dodatkowego chłodzenia;  
 BA1044\_Z – próbka z wymuszonym chłodzeniem w cieczy polimerowej

Wyniki pomiaru średniej długości rzutu pokazują różnicę w wielkości ziaren występujących mikrostrukturze stopu BA1044 w zależności od sposobu chłodzenia (rys. 11.). Kontrolowane

chłodzenie w cieczy wpłynęło na znaczne zmniejszenie stopnia rozproszenia wyników charakteryzowane odchyleniem standardowym (na poziomie ufności 95%), co świadczy o wzroście jednorodności struktury. Badania przeprowadzone na innych tworzywach (stopach) odlewniczych pokazały, że szybkość chłodzenia w znacznie większym stopniu wpływa na odległości ramion dendrytów II-go rzędu (SDAS – ang. *Second Dendrite Arms Specimens*).

### 3.5. Wyniki badań fizyko-mechanicznych

Gęstość określano metodą hydrostatycznego ważenia, z wykorzystaniem specjalistycznego zestawu firmy RADWAG® (Radom, Polska) typu AS 220/C/2. Do pomiaru gęstości wykorzystywano cylindryczne próbki wycinane z „główek” próby wytrzymałościowej.

W odróżnieniu od innych stopów, np. na osnowie aluminium czy żelaza (staliwo, żeliwo), w przypadku stopu miedzi BA1044 (a także B555 i MO59) nie obserwowano zwiększenia zwartości odlewów (tabela 1).

Tabela 1. Wyniki pomiarów gęstości próbek z doświadczalnego stopu BA1044, w zależności od sposobu odlewania [11]

Lp.	Oznaczenie próbki	Gęstość, [g/cm <sup>3</sup> ]	Lp.	Oznaczenie próbki	Gęstość, [g/cm <sup>3</sup> ]
1.	BA1044_B	7,458	2.	BA1044_Z	7,444

**Uwaga:** BA1044\_B – próbka formy samonośnej bez dodatkowego chłodzenia; BA1044\_Z – próbka z chłodzeniem w cieczy polimerowej

Nieco mniejsza gęstość szybko chłodzonych odlewów ze stopów miedzi, w odniesieniu do wolniej chłodzonych w formach samonośnych, wymaga dodatkowego wyjaśnienia na poziomie mikrostrukturalnym.

Statyczną próbę rozciągania przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 100002-1:2004. Szybkość odkształcania w trakcie rozciągania wynosiła 1 mm/min; temperatura otoczenia



– w przybliżeniu była równa 200C. Do badań stosowano maszynę wytrzymałościową typu INSTRON 8800M.

Badania twardości przeprowadzana na poprzecznych przekrojach „główek” próby wytrzymałościowej; z uwagi na stosunkowo małą ich powierzchnię postanowiono twardość oznaczać sposobem Vickersa (HV30). Pomiary twardości, wykonywano zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1:2007, na twardościomierzu uniwersalnym typu ZWICK/ROELL ZHU 3000 TOP prod. ZWICK GmbH & Co. Wielkość obciążenia wynosiła 294,2 N, czas działania obciążenia – 12 s; temperatura – pokojowa (ok. 20°C).

Zestawienie wyników badań właściwości mechanicznych brązu aluminiowego, typu BA1044, w zależności od sposobu odlewania (bez obróbki cieplnej – w stanie F), zaprezentowano w tabeli 2.

Tabela 2.

Wyniki badań właściwości mechanicznych stopu BA1044 w zależności od sposobu odlewania (w stanie F) [11]

Lp.	Oznaczenie próbki	Właściwości mechaniczne				
		$R_m$ , [MPa]	$R_{p0,2}$ , [MPa]	$A_5$ , [%]	$Z$ , [%]	$HV30$ [HV]
1.	<b>BA1044_B</b>	<b>672</b>	<b>205</b>	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>232</b>
2.	<b>BA1044_Z</b>	<b>686</b>	<b>236</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>253</b>

**Uwaga:** BA1044\_B – próbka formy samonośnej bez dodatkowego chłodzenia; BA1044\_Z – próbka z chłodzeniem w cieczy polimerowej

Z danych tabeli 2. wynika, że szybsze chłodzenie wpływa na poprawę wytrzymałościowych parametrów, przy jednoczesnym obniżeniu plastycznych właściwości. Jednocześnie następuje istotny wzrost twardości mierzony sposobem Vickersa. Należy mieć jednak na uwadze fakt, iż podane wielkości odnoszą się do stanu lanego (tj. bez obróbki cieplnej). Charakterystyka właściwości stopu BA1044\_Z odpowiada danym literaturowym dotyczącym stopu po przesycaniu; odlewanie z chłodzeniem w cieczy zapewnia bowiem szybką krystalizację i jednoczesne przeschłodzenie w stanie stałym. Wyraźna zmiana we właściwościach mechanicznych tych stopów może być następstwem ich starzenia.

## 4. Wnioski końcowe

- Przeprowadzone badania pokazały, że dobrane wodno-polimerowe chłodziwo w odniesieniu do stopów aluminium zupełnie nieźle sprawdza się również w przypadku stopów miedzi.
- Wykorzystanie opracowanej technologii precyzyjnego odlewania, będącej polskim wariantem procesów SOPHIA® czy HERO Premium Casting®, pozwala na wytwarzanie prostych i bardzo skomplikowanych konstrukcyjnie detali, w warunkach kierunkowego bądź objętościowego szybkiego chłodzenia.
- Większe prędkości chłodzenia odlewów w formach ceramicznych wpływają na zmianę mikrostruktury, a zatem fizyko-mechaniczne właściwości. Najczęściej, w tych warunkach, następuje rozdrobnienie mikrostruktury oraz bardziej jednorodny jej charakter. Zmiany te uwarunkowane są ponadto wyborem zarówno osnowy stopu, jak też konkretnego jego składu chemicznego.
- W przypadku stopu BA1044 obserwowano bardzo dobry stan powierzchni zewnętrznej odlewów oraz ich ogólnej zwartości (pomimo nieco mniejszej gęstości), a także wzrost – w odniesieniu

do tradycyjnego odlewania w ceramicznych formach samonośnych – parametrów wytrzymałościowych ( $R_m$ ,  $R_{p0,2}$ ,  $HV$ ).

- Odpowiedni poziom plastyczności (mierzony  $A_5$  i/lub  $Z$ ) może zapewnić zastosowanie obróbki cieplnej – polegającej na sztucznym starzeniu w odpowiednio wysokiej temperaturze. Szybsze chłodzenie w polimerowej cieczy może ograniczyć potrzebę stosowania drogiego i długotrwałego (zazwyczaj) procesu przesycania odlewów precyzyjnych.
- Zaprezentowany proces precyzyjnego odlewania stopów miedzi, typu SOPHIA® czy HERO Premium Casting®, jest innowacyjny nie tylko na skalę krajową, ale także międzynarodową. Wymagane są dalsze prace badawczo-rozwojowe nad jej doskonaleniem, a także zastosowania – dla przemysłu lotniczego, samochodowego, budowy maszyn i aparatury – na złożone konstrukcyjnie detale pracujące w złożonych warunkach eksploatacyjnych.

## Literatura

- [1] Eberhard F. (Thyssen industrie AG, Essen): Verfahren zum Vergießen von Gußstücken nach dem Feingußverfahren in eine keramische Formschale. Patent DE 3629079 A1, Offenlegungstag: 3.2.88.
- [2] Song S.G.: Rapid solidification investment casting. United States Patent, No. US 6,622,744 B2, Date of Patent: Sep. 23, 2003, Appl. No.: 10/008,912 Filed: Dec. 6, 2001.
- [3] United States Patent Application Publication No. US 2008/0011442 A1, Jan. 17, 2008. Appl. No. 11/690,414; Filed: Mar. 23, 2007.
- [4] Gabriel J.: Entwicklungen bei Aluminium-Feinguss-Moeglichkeiten des SOPHIA®-Verfahrens. Konstruieren + Giessen, 1996, Jg. 21, Nr 1, S. 4-10.
- [5] Liesner Ch., Gerke-Cantow R.: Aluminium-Feinguß nach dem HERO Premium Casting® – Verfahren. Konstruieren + Gießen 27 (2002), Nr 2, S. 41-44.
- [6] Czekaj E. (kier.) i zespół.: Projekt badawczy pt. „Badania procesu otrzymywania odlewów precyzyjnych ze stopów aluminium o złożonej konstrukcji i wysokim stopniu jednorodności struktury”, realizowanego w Instytucie Odlewnictwa w Krakowie, w latach 2006-2008, na zlecenie MNiSzW (Nr projektu: 3 T08B 033 29), Kraków 2009.
- [7] <http://www.graftech.com>.
- [8] <http://www.tital.de>.
- [9] Czekaj E., Karwiński A.: Zgłoszenie w sprawie uzyskania patentu na wynalazek pt.: Sposób wytwarzania odlewów precyzyjnych. Zgłoszenie patentowe: P.396030 z dnia 19 sierpnia 2011 r.
- [10] POLIHARTENOL – nowoczesne polimerowe chłodziwa hartownicze. Prospekt firmy PROIMP® (<http://www.proimp.com.pl>).
- [11] Karwiński A. (kier.), Czekaj E., Pysz S., Pączek Z. i in.: Opracowanie innowacyjnej technologii wytwarzania odlewów z zastosowaniem kierunkowego krzepnięcia. Zadanie 1 – Badania przemysłowe. Zadanie 2 – Badania rozwojowe. Projekt inwestycyjny. Zleceniodawca: SPECODLEW Sp. z o.o. Przedsiębiorstwo Innowacyjne Odlewnictwa, Kraków 2010/2011.