https://doi.org/10.62753/ctp.2003.25.6.6

Anna Dolata-Grosz[1], Józef Śleziona[2], Jakub Wieczorek[3]
Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

Krystyna Pietrzak[4]
Instytut Transportu Samochodowego, ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa

WYTWARZANIE I KSZTAŁTOWANIE STRUKTURY KOMPOZYTOWYCH ODLEWÓW ALUMINIOWYCH O ZAŁOŻONYM ROZMIESZCZENIU ZBROJENIA

Kompozyty o osnowie stopu aluminium wzmacniane cząstkami ceramicznymi znalazły zastosowanie w lotnictwie, w prze- myśle militarnym, ale przede wszystkim w przemyśle samochodowym. Materiały te charakteryzują się wysoką twardością, odpornością na zużycie ścierne oraz korozyjne, wykazują dobrą wytrzymałość i sztywność przy zachowaniu niskiej gęstości wyrobu. Rozmieszczenie cząstek zbrojących w osnowie, ich wielkość, kształt oraz udział objętościowy w połączeniu z metodą wytwarzania determinuje strukturę, a zatem i właściwości kompozytu. Ze względu na zastosowanie wiele wyrobów, tj.: tuleje, tłoki, cylindry czy łożyska, wymaga lokalnego rozmieszczenia zbrojenia. Jedną z metod odlewniczych, która umożliwia wytwarzanie wyrobów o lokalnym wzmocnieniu, jest metoda odlewania odśrodkowego. W opracowaniu przedstawiono możliwości kształtowania zróżnicowanego rozmieszczenia cząstek zbrojących w odlewie (rys. rys. 1-3) poprzez odpowiedni dobór parametrów procesu odlewania odśrodkowego, m.in.: prędkości obrotowej formy wirującej (rys. 4) oraz wielkości cząstek zbrojących (rys. 6). Ustalono czynniki determinujące uzyskanie tą technologią odlewu o gradientowym lub warstwowym rozmieszczeniu zbrojenia. Takie rozmieszczenie cząstek wpływa na wzrost właściwości użytkowych w wyrobie - twardości (rys. 10) i odporności na ścieranie - przy zachowaniu wysokich właściwości mechanicznych obszarów niezawierających zbrojenia. Kompozyty te mogą znaleźć zastosowanie szczególnie w skojarzeniach trybologicznych.

Słowa kluczowe: kompozyty Al-cząstki ceramiczne, odlewanie odśrodkowe, struktura

PRODUCTION AND FORMING OF STRUCTURE ALUMINIUM COMPOSITES WITH ASSUMPTION A DISTRIBUTION OF REINFORCEMENT

Particle aluminium metal matrix composites have found applications within the aerospace, military but especially in the automotive industries [1]. In general, these materials exhibit good wear and erosion resistance, higher stiffness, hardness and strength, at a lower density when compared with the unreinforced matrix material. The distribution of particles, their size and shape, and volume fraction together with method production determinates the structure and properties of composite. Many other applications of composite products, such as sleeves, rings, cylinder blocks and pistons, need only a local displacement of reinforcement. Centrifugal casting MMC's [2] is one of the methods, which can give a local: gradient or layered (Figs 1-3) particles concentration on the thickness of a mould [3-11]. In this method the structure depended on many factors, such as: rotational speed centrifugal form (Fig. 4), difference in density between the molten metal and ceramic particles, their volume fraction and reinforcement granulation (Fig. 6) as well as viscosity and crystallization conditions [12]. In this work stated that combinations of all these parameters make it possible to form the different of composites structure with any reinforcement distribution: uniform and heterogeneous with inside and outside (Fig. 8a) riched layers. Layer reinforcement of cast compositions, which is the subject of this article, allows to received good joint of special useful properties of reinforced areas - high hardness (Fig. 10) and wear resistance - with expected good mechanical properties of regions, which do not posses ceramic particles. That kind of materials will found application especially in tribological connections.

Key words: composites Al-ceramic particles, centrifugal casting, structure

WPROWADZENIE

Przedstawione w opracowaniu wyniki oraz wnioski stanowią kontynuację prac wcześniej publikowanych, m.in. [5-10]. Dotyczą one cyklu badań związanych z tematem kształtowania struktury kompozytów Al-cząst-ki ceramiczne w procesie odlewania odśrodkowego. Pod-czas wytwarzania z kompozytów takich wyrobów, jak: tłoki, tuleje, łożyska, cylindry, koła pasowe, które wymagają poprawy właściwości ciernych jedynie warstwy wierzchniej i przypowierzchniowej, należy dążyć do stosowania kompozytu o gradientowym rozmieszczeniu zbrojenia. Takie rozmieszczenie, zwłaszcza przy zbrojeniu twardymi cząstkami ceramicznymi (Al_2O_3 i SiC), jest korzystne, gdyż poprawia właściwości warstwy wierzchniej (twardość, odporność na ścieranie) przy za-chowaniu wysokich właściwości mecha-

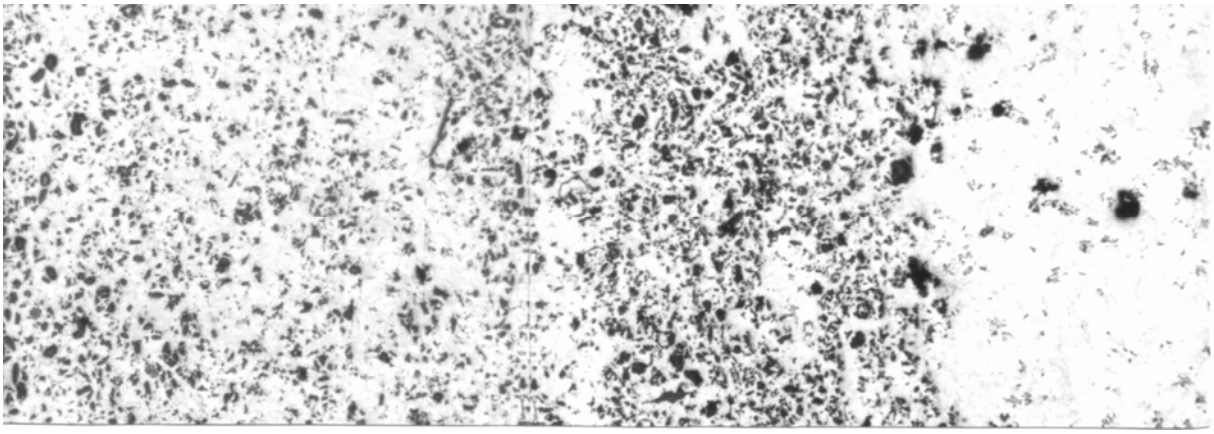
[1, 3] mgr inż., [2] dr hab. inż., prof. PŚ, [4] dr inż.

nicznych i plastycznych rdzenia. Wymagania te w technologiach wy-twarzania kompozytów spełniane są obecnie za pomocą nadlewów kompozytowych na wybrane powierzchnie wyrobu lub poprzez infiltrację preform ceramicznych [2]. Rozwiązaniem alternatywnym, umożliwiającym wzrost ilości zbrojenia w obszarach zewnętrznych odlewów kompozytowych, jest zaproponowane odlewanie zawiesiny kompozytowej do form wirujących. Wskutek różnicy gęstości pomiędzy ciekłym metalem a cząstkami ceramicznymi oraz poprzez działanie siły odśrodkowej podczas odlewania możliwe jest uzyskanie zwiększonego udziału objętościowego cząstek zbrojących w wybranych strefach roboczych odlewu [3-12].

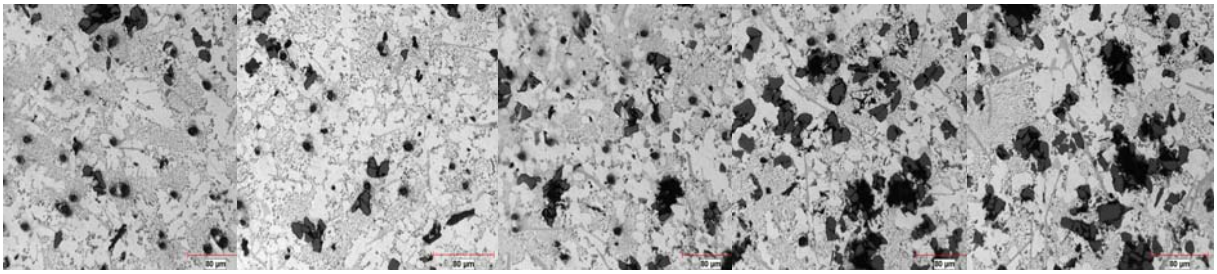
Zależność, podana przez Kocha [13], określająca prędkość cząstki w cieczy pod wpływem działania siły odśrodkowej

$$v = \frac{d_2 \gamma_p}{18\eta} \cdot \omega^2 \cdot R_o \qquad (1)$$

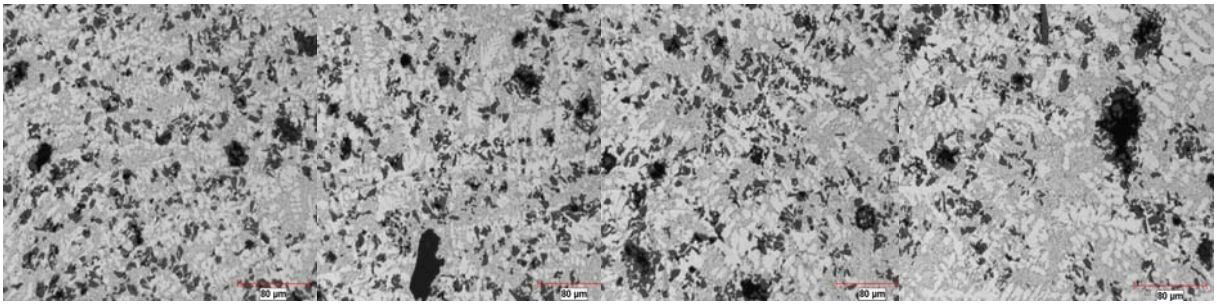
wskazuje, że zależy ona od wielkości i ciężaru właściwego cząstki, jej położenia w stosunku do osi obrotu oraz lepkości cieczy. Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń, przy różnicy masy właściwej pomiędzy zastosowanymi cząstkami fazy zbrojącej a osnową metalową ($\gamma_p > \gamma_m$) oraz pod wpływem siły odśrodkowej cząstki powinny przechodzić do strefy zewnętrznej odlewu. Ponadto, krótki czas przejścia cząstek wskazuje na pełną możliwość uzyskiwania odlewów z zewnętrznymi strefami zbrojonymi [8, 9].



Rys. 1. Rozmieszczenie zbrojenia w tulei AK12-SiC (50 μm) z kompozytową warstwą zewnętrzną, v = 1500 obr/min, pow. 100x
Fig. 1. Distribution of reinforcement in the composite sleeve AK12-SiC (50 μm) with the outer layer, v = 1500 r.p.m., mag. 100x



Rys. 2. Struktura przekroju tulei kompozytowej AK12-SiC (30 μm) odlanej do formy wirującej z prędkością v = 3000 obr/min
Fig. 2. Structure on the cross section of the composite sleeve AK12-SiC (30 μm), obtained at 3000 r.p.m., mag. 250x



Rys. 3. Struktura przekroju tulei kompozytowej AK12-SiC (10 μm) odlanej do formy wirującej z prędkością 1000 obr/min, pow. 250x
Fig. 3. Structure on the cross section of the composite sleeve AK12-SiC (10 μm), obtained at 3000 r.p.m., mag. 250x

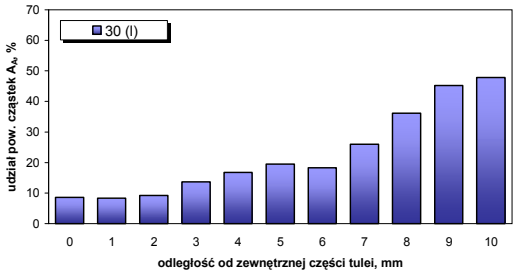
BADANIA WŁASNE

Odlewanie odśrodkowe

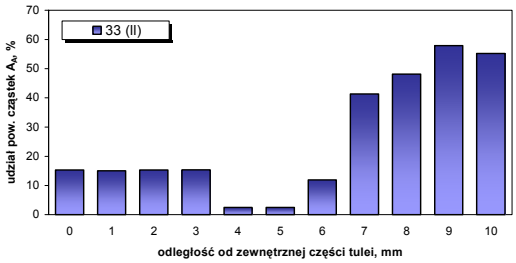
Przeprowadzone badania eksperymentalne, prezentowane m.in. w pracach [5-10], w trakcie których zastosowano odlewanie odśrodkowe zawiesin kompozytowych (AK12+Al_2O_3 i AK12+SiC) w układzie z osią poziomą, wykazały, że takie rozmieszczenie rzeczywiście występuje, jednakże pojawia się również zupełnie inna lokalizacja zbrojenia ceramicznego. Pojawiają się dodatkowo strefy wewnętrzne, a nawet pośrednie. Uzyskane efekty przeanalizowano i przedstawiono w niniejszym artykule dla układu stop Al-cząstki ceramiczne SiC. Zróżnicowane rozmieszczenie cząstek na przekroju odlewanych tulei, pokazane na rysunkach 1-3, otrzymano, stosując zmienne parametry technologiczne, tj.:

- cztery prędkości obrotowe formy odlewniczej: I - 750 obr/min, II - 1000 obr/min, III - 1500 obr/min, IV - 3000 obr/min,
- trzy średnice wewnętrzne form: 45, 60, 100 mm,
- trzy różne udziały objętościowe cząstek ceramicznych: 5, 10 oraz 15%,
- trzy wielkości cząstek ceramicznych: 10, 30, 50 μm.

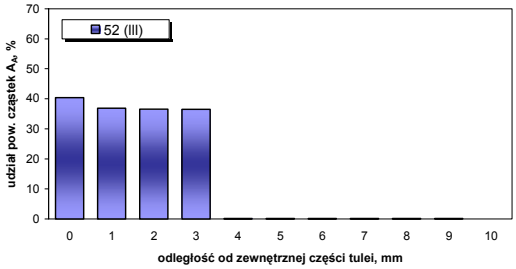
a)



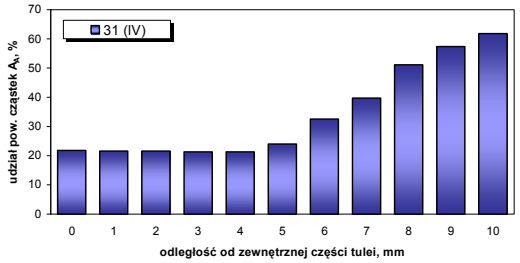
b)



c)



d)



Rys. 4. Udział powierzchniowy cząstek zbrojących w tulejach kompozytowych AK12-SiC (50 μm) odlewanych przy różnych prędkościach formy wirującej: a) 750 obr/min, b) 1000 obr/min, c) 1500 obr/min, d) 3000 obr/min

Rys. 4. Superficial reinforcement concentration of AK12-SiC 50 μm in the composite sleeves obtained at different rotational speed of centrifugal casting mould: a) 750 r.p.m., b) 1000 r.p.m, c) 1500 r.p.m., d) 3000 r.p.m.

Odlano również tuleje odlewane odśrodkowo AK12--10%SiC, zawierające w swej objętości cząstki o różnej wielkości - 30, 50, 100 μm i udziale 1:1:1 oraz w celach porównawczych.

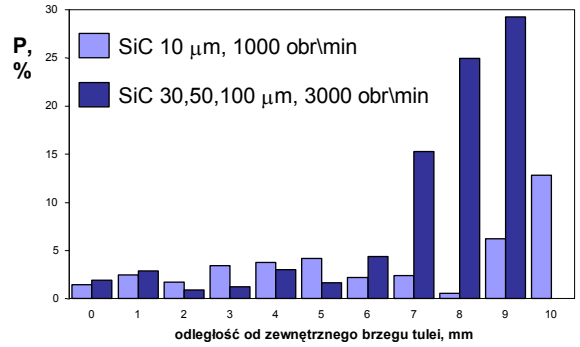
Badania ilościowe struktury

W trakcie badań ilościowych określono szereg parametrów geometrycznych, spośród których do analizy wpływu zastosowanej technologii odlewania odśrodkowego na rozmieszczenie zbrojenia ceramicznego w wytworzonych tulejach kompozytowych wybrano:

- udział powierzchniowy - A_A,
- średnią średnicę Fereta - $d_{śr}$,
- porowatość występującą w badanym materiale.

Stwierdzono, że wraz ze wzrostem prędkości wirowania formy wzrasta tendencja do powstawania w odlewach warstw zewnętrznych o zwiększonym udziale zbrojenia (rys. 4). Równocześnie zwiększa się w kompozycie obszar niezawierający zbrojenia (rys. 4c) lub zawierający go w niewielkim udziale objętościowym (rys. 4b).

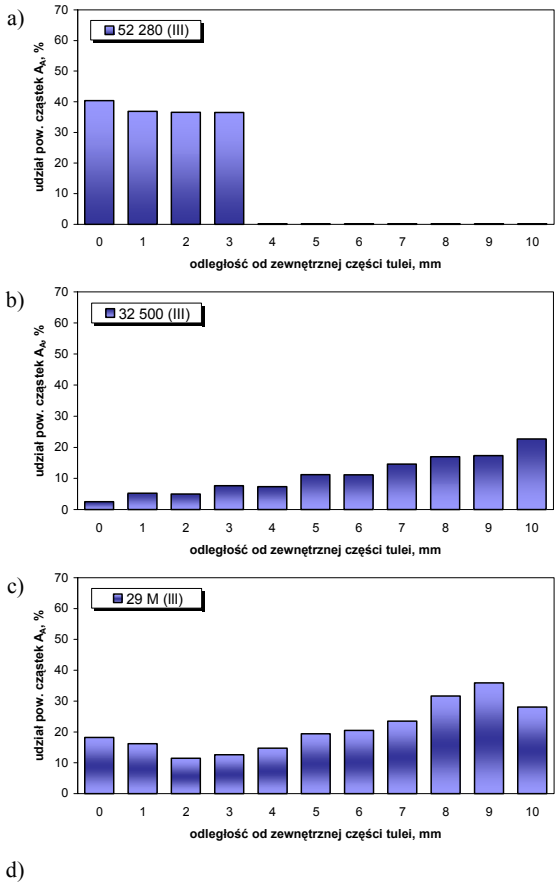
Maksymalne wartości udziału powierzchniowego czą-stek w tulejach kompozytowych występują w pobliżu obszarów zewnętrznych lub wewnętrznych odlewanych tulei. Z kolei część środkowa odlewu zawiera znikome ilości zbrojenia (rys. 4b, c). Strefy wewnętrzne natomiast zawierają zarówno cząstki, jak i pory. W niektórych przypadkach łączny ich udział powierzchniowy dochodzi nawet do 60% (rys. 4b, d), przy czym rzeczywisty udział cząstek jest jednak znacznie niższy i nie przekracza 30%. Stwierdzono, że porowatość odlewów wzrasta wraz z rosnącą odległością od zewnętrznego brzegu tulei, co pokazano na rysunku 5 dla wybranych odlewów wzmacnianych cząstkami SiC o różnej wielkości.

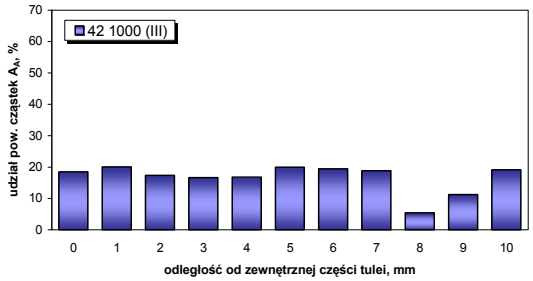


Rys. 5. Porowatość kompozytów AK12-SiC w funkcji odległości od zewnętrznego brzegu tulei

Fig. 5. Distribution of porous in AK12-SiC composites dependent on distance from the outer layer on the sleeve

Obok prędkości wirowania formy, następnym parametrem determinującym rozkład cząstek ceramicznych w stopie aluminium jest ich wielkość. Zaobserwowano, że w przypadku różnej wielkości cząstek ceramicznych, przy tej samej prędkości obrotowej formy, stosowanej podczas wytwarzania kompozytów, wywołuje różny skutek i odmienną lokalizację zbrojenia w osnowie (rys. 6).



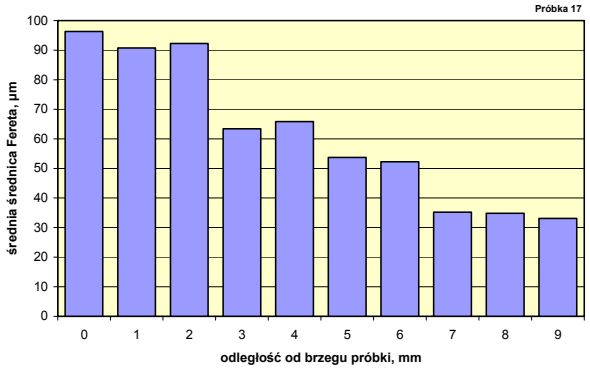


Rys. 6. Udział powierzchniowy zbrojenia w kompozytach AK12-SiC na grubości odlanych tulei w zależności od wielkości cząstek ceramicznych: a) 50 μm, b) 30 μm, c) 30, 50, 100 μm, d) 10 μm; prędkość wirowania formy v = 1500 obr/min

Fig. 6. Superficial reinforcement concentration of AK12-SiC on the thickness composite sleeves,dependent on ceramic particles size: a) 50 μm, b) 30 μm, c) 30, 50, 100 μm, d) 10 μm, obtained at 1500 r.p.m.

Wyniki badań ilościowych wykazały, że cząstki duże ($d_{śr} \geq 50$ μm) lokują się w warstwach zewnętrznych (rys. 6a). Z kolei w miarę obniżania się wielkości cząstek ($d_{śr} \leq 30$ μm) ich położenie przesuwa się od zewnętrznych do wewnętrznych obszarów odlewu kompozytowego (rys. 6b). Zależność końcowa zróżnicowanej lokalizacji cząstek zbrojących w odlewie od ich rozmiaru uwidacznia się jednoznacznie w kompozytach, w których zastosowano trzy różne wielkości cząstek ceramicz- nych, odpowiednio 30, 50, 100 μm (rys. 6c). Zgodnie

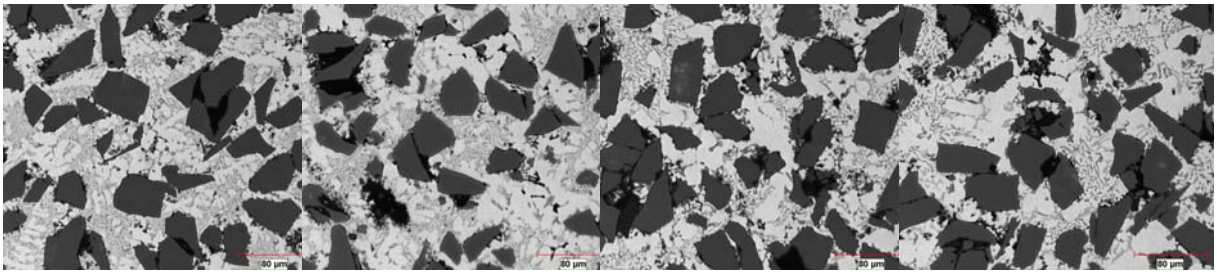
z wykonanymi pomiarami średnich średnic Fereta, stwierdzono, że w warstwach zewnętrznych lokowały się cząstki duże o wielkości około 100 μm, natomiast w warstwie wewnętrznej małe o wielkości zbliżonej do 30 μm (rys. 7). Z kolei w obszarach środkowych odlewów zidentyfikowano cząstki o pośrednich wymiarach około 50 μm. Podobną tendencję zaobserwowano we wszystkich badanych kompozytach, niezależnie od zastosowanej prędkości obrotowej formy, co było zgodne z rozważaniami teoretycznymi dotyczącymi omawianego problemu.



Rys. 7. Rozkład średniej średnicy Fereta na grubości tulei AK12-SiC przy ziarnistości 30, 50, 100 μm

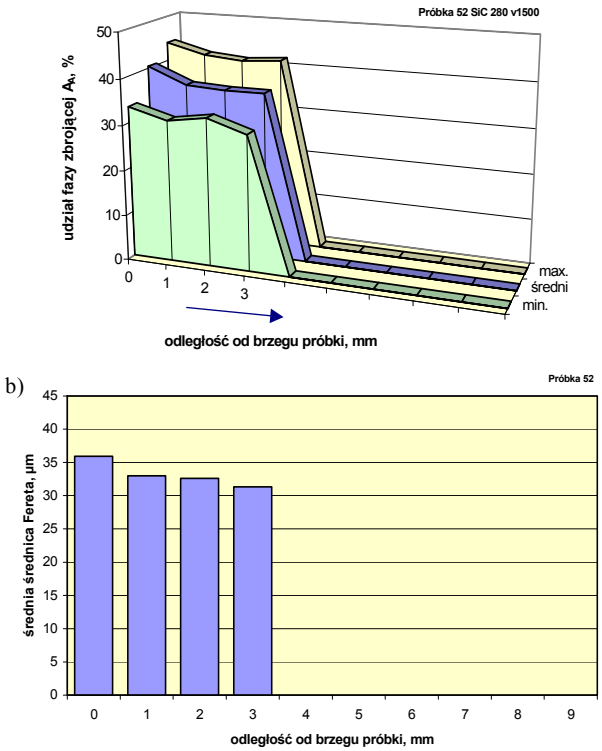
Fig. 7. Distribution of Feret diameter on the thickness of AK12-SiC 30, 50, 100 μm composite sleeve

a)



Rys. 9. Mikrostruktura warstwy zewnętrznej o grubości 4 mm uzyskanej w tulei kompozytowej AK12-SiC (50 µm) odlanej do formy wiru-jącej z prędkością obrotową 1500 obr/min

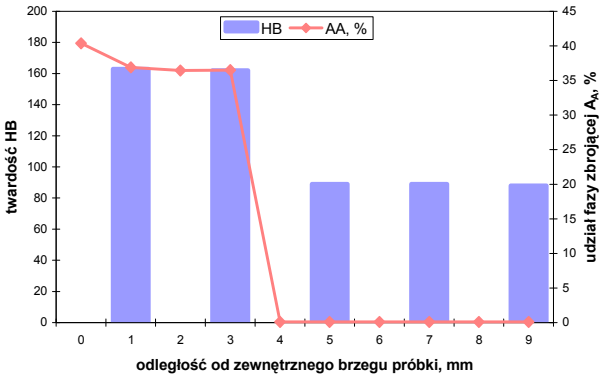
Fig. 9. Microstructure 4 millimeters outer layer in AK12- SiC (50 µm) composites sleeve, obtained at the 1500 r.p.m.



Rys. 8. Tuleja kompozytowa AK12-10% SiC (50 µm) odlana do formy wirującej z v = 1500 obr/min: a) rozmieszczenie fazy zbrojącej, b) rozkład średniej średnicy Fereta na grubości badanej tulei

Fig. 8. AK12-10% SiC (50 µm) composite sleeve obtained at the 1500 r.p.m.: a) distribution of reingforcement, b) distribution of Feret diameter on the thickness composite sleeve

Przy zachowaniu odpowiednio dobranych parametrów procesu odlewania odśrodkowego (1500 obr/min, średnica cząstki 50 µm, temperatura zawiesiny kompozytowej 760°C, średnica formy wirującej 60 mm, temperatura formy 300°C) w odlewach uzyskano strefowy wzrost udziału cząstek, od wewnętrznej powierzchni nawet do 40% w zewnętrznych obszarach przypowierzchniowych (rys. 8a). Strukturę uzyskanej zewnętrznej warstwy kompozytowej z równomiernie rozmieszczonymi cząstkami ceramicznymi pokazano na rysunku 9.



Rys. 10. Twardość *HB* i udział fazy zbrojącej na przekroju poprzecznym w funkcji odległości od zewnętrznego brzegu próbki dla kompozytu AK12-SiC (50 µm) odlanego z prędkością obrotową 1500 obr/min

Fig. 10. Hardness *HB* and superficial reinforcement concentration on the cross section composite sleeve AK12-SiC (50 µm) dependent on the distance of the outer layer, v = 1500 obr/min

Grubość warstwy kompozytowej w omawianych odlewach wynosiła 4 mm, co stanowi wystarczającą powierzchnię roboczą, która zapewnia, jak wykazały wyniki przeprowadzonych badań, pożądane właściwości użytkowe kompozytu, takie jak: wysoka twardość (rys. 10) oraz odporność na zużycie zewnętrznej, współpracującej powierzchni odlewu.

DYSKUSJA WYNIKÓW

Biorąc pod uwagę wyniki badań oraz analizę teoretyczną zachowania się cząstek podczas odlewania, stwierdzono, że na kształtowanie się struktury odlewu, obok czynników technologicznych odlewania odśrodkowego, decydujący wpływ mają dwa procesy, tj. proces krystalizacji zawiesiny, rozpoczynający się od powierzchni formy, i proces segregacji cząstek, wywołany działaniem siły odśrodkowej. Obydwa procesy rozpoczynają się równocześnie, ale w przeciwnych kierunkach. Wprowadzona do wirującej formy ciekła zawiesina kompozytowa podlega rozłożeniu na całej jej powierzchni zewnętrznej. Od tego momentu rozpoczyna się proces krzepnięcia od zewnętrznej części formy i transportu cząstek ceramicznych od wewnętrznej części odlewu. Cząstki napotykają na swojej drodze rosnące kryształy fazy stałej, gdzie następnie zostają wyłapane

przez krzepnące ramiona dendrytów osnowy. Ruch cząstek w kierunku fazy krystalicznej hamowany jest również wzrastającą lepkością cieczy metalicznej, wynikającą z obniżania temperatury fazy ciekłej, która dodatkowo determinuje tworzenie się zróżnicowanej struktury warstwowej w odlewie. W ten sposób cząstki małe poruszają się z mniejszą prędkością i lokują się bliżej wewnętrznej części tulei. Zagazowanie zawiesiny, powstałe wskutek znacznie mniejszej gęstości, obejmuje często aglomeraty cząstek ceramicznych, które zostają wypychane do wewnętrznej części odlewu. Stąd w końcowym stadium uzyskuje się odlew zawierający zewnętrzną, nieporowatą warstwę kompozytową, środkową warstwę bez zbrojenia lub z jego niewielką ilością i wewnętrzną warstwę zawierającą znaczne ilości porów i cząstek ceramicznych.

Analiza teoretyczna tego zagadnienia, przedstawiona w pracy [14], może tłumaczyć powstawanie zróżnicowanej struktury rozmieszczenia zbrojenia w badanych kompozytach od równomiernego rozkładu poprzez gradientowy aż do kształtowania się warstw przypowierzchniowych, a zarazem pośrednich charakteryzujących się zwiększonym udziałem cząstek ceramicznych w osnowie.

PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań można wyróżnić główne czynniki kształtujące strukturę i rozmieszczenie cząstek w badanych kompozytach. Stwierdzono, że w celu właściwego sterowania procesem rozmieszczenia zbrojenia w tulejach należy uwzględnić nie tylko wpływ prędkości wirowania, w tym średnicę formy, ale również:

- wpływ jakości zawiesiny (wielkość cząstek, ich udział objętościowy, obecność zagazowań),
- wpływ warunków cieplnych odlewania (temperatura formy, temperatura zawiesiny, czas zalewania, sposób zalewania).

W związku z uzyskaniem zróżnicowanego rozmieszczenia zbrojenia w osnowie, a przede wszystkim kształtowaniem się warstw wewnętrznych, składających się z cząstek i porów, w zastosowaniach aplikacyjnych konieczne jest bardzo dobre odgazowanie zawiesiny kompozytowej w trakcie procesu jej wytwarzania, a w technologii topienia kompozytów i ich odlewania odśrodkowego niezbędne jej zabezpieczenie przed zagazowaniem.

Przedstawione wyniki badań dotyczące wytwarzania, jak i własności użytkowych kompozytowych odlewów odśrodkowych, pozwalają przypuszczać, że materiały te mogą stanowić konkurencję zarówno dla tradycyjnych materiałów konstrukcyjnych (m.in. stopów aluminium), jak również dla obecnie stosowanych materiałów kompozytowych zbrojonych lokalnie z zastosowaniem preform ceramicznych. Z kolei zaproponowana i zastosowana technologia odlewania odśrodkowego zawiesin kompozytowych, która, jak wykazano, pozwala uzyskiwać lokalne zbrojenie wybranych obszarów w odlewach, może - dla niektórych wyrobów - stać się alternatywnym i ekonomicznym rozwiązaniem.

LITERATURA

[1] Eliasson J., Sandström R., Applications of Aluminium Matrix Composites, Key Eng. Mat. 1995, 104-107, 3-36.
[2] Górny Z., Odlewanie w formach wirujących, WNT, Warszawa 1966.
[3] Tomczyński S., Zbrojone strefowo odlewy kompozytowe, Przegląd Odlewnictwa 1999, 8-9.
[4] Braszczyński J., Zyska A., Tomczyński S., Rozkład cząstek ceramicznych w obszarach powierzchniowych kompozytu odlewanego odśrodkowo o osi pionowej, IV Międzynarod. Konf. nt. Zjawiska powierzchniowe w procesach odlewniczych, Poznań-Kołobrzeg 1998, 35-42.
[5] Śleziona J., Myalski J., Dolata-Grosz A., Wieczorek J., Odśrodkowe odlewanie kompozytów Al - cząstki ceramiczne, IV Międzynarod. Konf. nt. Zjawiska powierzchniowe w pro-cesach odlewniczych, Poznań-Kołobrzeg 1998.
[6] Śleziona J., Dolata-Grosz A., Wieczorek J., Centrifugal casting of the aluminium alloy - Al_2O_3 particle composites, II Cast Composites Conference'98, Polanica Zdrój 1998.
[7] Śleziona J., Hyla I., Dolata-Grosz A., Urantówka G., Wieczorek J., Odlewy kompozytowe o warstwowym rozmieszczeniu zbrojenia, Inżynieria Materiałowa 1999, 3-4, 158-162.
[8] Śleziona J., Grosz A., Wieczorek J., Rozmieszczenie zbroje-
nia w odśrodkowych odlewach kompozytowych AK12-SiC i AK12-Al_2O_3, IV Seminarium PTMK Kompozyty 2000 - Teoria i praktyka, Jaszowiec 2000, 260-267.
[9] Dolata-Grosz A., Wieczorek J., Dyzia M., Śleziona J., Struktura kompozytowych odlewów otrzymywanych odśrodkowo, Kompozyty 2001, 1, 2, 141-143.
[10] Dolata-Grosz A., Śleziona J., Wieczorek J., Dyzia M., Struktura strefowa kompozytów AK12-Al_2O_3 i AK12-SiC kształtowana w procesie odlewania odśrodkowego, Kompozyty 2002, 2, 5, 305-308.
[11] Gao J.W., Wang C.Y., Modeling the solidification of functionally graded materils by centrifugal casting, Materials Science and Engineering 2000, A292, 207-215.
[12] Dolata-Grosz A., Kształtowanie struktury kompozytów Al-cząstki ceramiczne w procesie odlewania odśrodkowego, Rozprawa doktorska, Katowice 2002.
[13] Koch R., Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej, Skrypt Pol. Wrocławskiej, Wrocław 1984.

Recenzent
Katarzyna Pietrzak