



Paweł Darlak*, Piotr Dudek

Institut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Poland

** Corresponding author. E-mail: pawel.darlak@gmail.com*

Otrzymano (Received) 20.03.2008

PRÓBY ODLEWANIA KOMPOZYTÓW NA BAZIE STOPÓW ALUMINIUM ZBROJONYCH DYSERSYJNIE WĘGLIKIEM KRZEMU PRZY WYKORZYSTANIU METODY ODLEWANIA TIKSOTROPOWEGO

Przedstawiono wyniki prób wytworzenia odlewów z kompozytu na bazie stopu AlSi9CuFe zawierającego 20% obj. cząstek węgla krzemu, oznaczonego przez producenta symbolem F3D.20S. W celu określenia wpływu czasu mieszania i temperatury na możliwość tworzenia struktury reokast badania przeprowadzono w temperaturze mieszania odpowiednio 700, 720 i 740°C, poddając ciekły kompozyt mieszanemu mechanicznemu przez 10 i 20 s. Otrzymane wyniki badań wykazały, iż wytworzenie struktury reokast jest utrudnione ze względu na właściwości ciekłej zawiesiny kompozytowej. Odlewy wykonane z kompozytu F3D.20S charakteryzowały się widocznymi wadami, w postaci okluzji gazowych, powstających szczególnie w obszarach cienkich ścianek odlewu, w których prędkości przepływu strugi metalu przekraczały graniczne wartości dla przepływu laminarnego. Próby optymalizacji procesu przez zmianę zarówno czasów mieszania, jak i temperatury wsadu nie przyniosły zadowalającego efektu w postaci partii odlewów pozbawionych wad strukturalnych.

Słowa kluczowe: odlewanie tiksotropowe, kompozyty metalowe, struktura reokast

ATTEMPTS AT CASTING METAL MATRIX COMPOSITES REINFORCED BY SILICON CARBIDE PARTICLES USING RHEOCAST TECHNOLOGY

The main defect in castings manufactured by the common high pressure die casting process is their porosity originating from the occluded gaseous phases. This is the reason why extensive studies have been carried out on the development of technologies that would reduce the level of these defects in castings. This publication describes the results of trials on the fabrication of castings from an AlSi9CuFe alloy-based composite containing 20 vol. % (F3D.20S) of silicon carbide particles, using the thixocasting process which enables elimination of the formation of gaseous occlusions. The aim of the present studies was determination of an effect of the mixing time and temperature on the formation of rheocast structure. The studies were carried out at the temperatures of 700, 720 and 740°C, subjecting the liquid composite to mechanical stirring for a time of 10 and 20 s. Ingots prepared from F3D.20S composite and AlSi9Mg alloy were cast on a BUEHLER machine of 160T locking force, applying the operating parameters used during the manufacture of thixotropic castings from AlSi7 and AlSi9 alloys. The die designed for thixocasting had a number of channels of different cross-sections to investigate the process of die cavity filling with metal in semi-solid state. As an outcome of the research a batch of composite castings were fabricated and subjected next to mechanical tests and examinations of microstructure. The results have proved that producing a rheocast structure is quite difficult due to the properties of the liquid composite slurry. In a monolithic alloy characterised by much better castability and low viscosity, the formation of gaseous occlusions practically never takes place during the long-time mixing and at a low starting temperature. The structure of a monolithic alloy subjected to mixing within the range of solidus-liquidus temperature bears some visible traces of changes in the morphology of phase α and correlates with the process parameters, i.e. the time of mixing and the starting temperature. Castings made from F3D.20S composite were characterised by some well-visible defects in the form of gaseous occlusions, formed especially in the thin-wall casting sections, where the metal flow rates exceeded the boundary values of a laminar flow. Even raising the temperature and reducing the time of mixing could not give satisfactory results, i.e. a batch of castings which would be entirely free from the structural defects. The defects directly influence the drop of casting strength. The mechanical tests as well as the examinations of casting microstructure confirmed the formation of rheocast structure in castings made from both monolithic alloys and composite materials. No immediate interrelation with the casting hardness has been reported.

Keywords: thixotropic castings, metal matrix composites, rheocast structure

WPROWADZENIE

Odlewy ze stopów aluminium wykonywane są wszystkimi klasycznymi metodami odlewniczymi, takimi jak: odlewanie grawitacyjne do form ceramicznych

(piaskowych), odlewanie do form metalowych (kokil), odlewanie ciągłe, odlewanie niskociśnieniowe, ale przede wszystkim stosowana jest klasyczna technologia

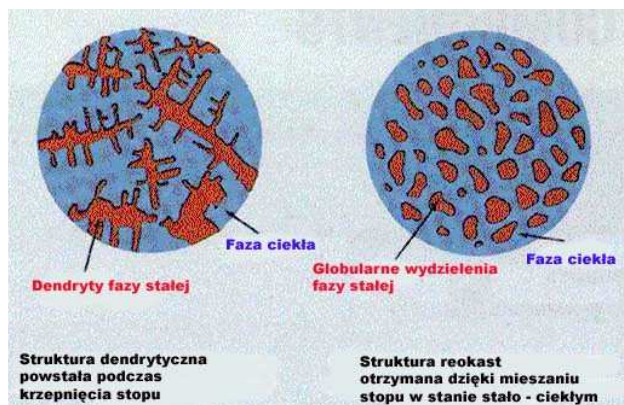
odlewania ciśnieniowego, a ostatnio odlewanie z fazy stało-ciekłej (*Semi Solid Metal Casting*). Coraz większe zastosowanie znajduje technologia prasowania w stanie ciekłym (*squeeze casting*) zwłaszcza do odlewania tłoków ze stopów klasycznych i kompozytów. Technologia odlewania ciśnieniowego (i jej odmian) wykonuje się około 70% odlewów ze stopów aluminium i 95÷98% odlewów ze stopów magnezu i cynku. Odlewanie do form ciśnieniowych charakteryzuje się dużą wydajnością; jest też ekonomiczne w przypadku wielkoseryjnej produkcji.

Podstawową wadą odlewów wykonywanych klasyczną technologią ciśnieniową jest ich porowatość, która pochodzi z zaokludowania fazy gazowej. Porowatość gazowa, zwłaszcza podpowierzchniowa, jest spowodowana zmianą rozpuszczalności gazów w niższej temperaturze. Okluzja fazy gazowej zachodzi bezpośrednio w komorze maszyny ciśnieniowej oraz we wnętrzu formy w czasie jej wypełniania, ze znaczną prędkością, ciekłym stopem. Ta kardynalna wada ogranicza bardzo wyraźnie zakres zastosowania odlewów ciśnieniowych do przypadków, gdy nie jest konieczne zachowanie ich szczelności. Uniemożliwia również przeprowadzenie obróbki cieplnej odlewów, a tym samym nie ma możliwości podniesienia ich właściwości mechanicznych [1].

Te ujemne cechy odlewania ciśnieniowego eliminuje nowa technologia wykonywania odlewów - technologia odlewania tiksotropowego. Cechą charakterystyczną tej metody jest ograniczenie fazy ciekłej stopu (do około 40÷60%). Uzyskiwanie odlewów tiksotropowych składa się zasadniczo z dwóch etapów. Etap pierwszy polega na uzyskaniu w stopie odpowiedniej, globularnej mikrostruktury materiału (tak zwanej struktury reokast - ang. *Rheocast*; rys. 1) poprzez mechaniczne lub magnetohydrodynamiczne (MHD) mieszanie stopu, etap drugi to uzyskanie z tego stopu - po jego ponownym nagrzeniu do temperatury w zakresie likwidus-solidus - odlewu z wykorzystaniem np. maszyny ciśnieniowej. Wstępnie nagrzane wlewki są wkładane do przekonstruowanej komory prasowania maszyny ciśnieniowej. Na skutek siłowego działania tłoka zachodzi zjawisko „upłynnienia” stopu, który zostaje przetłoczony przez układ wlewowy do wnętrza komory i krzepnie w warunkach działania ciśnienia doprasowania.

Aby zatem proces można było nazwać formowaniem tiksotropowym, muszą być spełnione dwa warunki. Pierwszy dotyczy temperatury stopu, która musi mieścić się w przedziale między temperaturą solidus i likwidus, a zatem zapewniać współistnienie fazy ciekłej i stałej w odpowiednich proporcjach. Stąd też, stosowane mogą być stopy o dużym zakresie temperatury krzepnięcia, np. AlSi7, AlSi20 (z grupy stopów odlewniczych), lub stopy przeznaczone do przeróbki plastycznej, np. gatunku PA. Do technologii tej nie nadają

się natomiast czyste metale i stopy o składzie eutektycznym. Drugim koniecznym warunkiem jest wspomniana wyżej struktura reokast w przetwarzanym materiale.



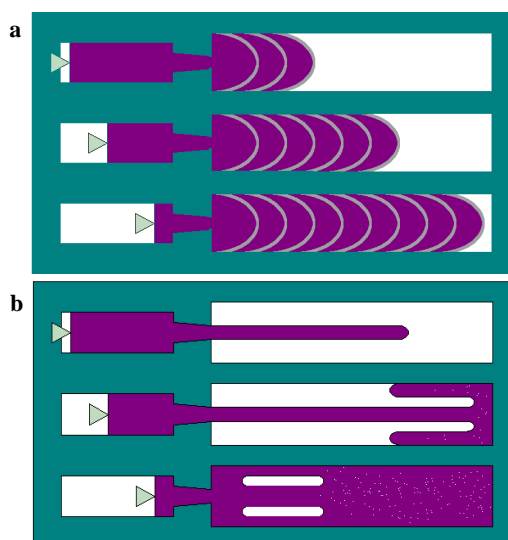
Rys. 1. Porównanie struktur dendrytycznej i reokast [1]

Fig. 1. Comparing dendrite and rheocasting structure [1]

PORÓWNANIE ODLEWANIA TIKSOTROPOWEGO Z TRADYCYJNYM ODLEWANIEM CIŚNIENIOWYM

Podczas klasycznego odlewania pod ciśnieniem występuje burzliwe (turbulentne) wypełnienie wnęki formy. Burzliwemu wypełnianiu wnęki formy towarzyszą zjawiska rozbijania, rozpylania i zawirowywania strugi ciekłego metalu, wskutek czego następuje zaokludowanie w odlewie fazy gazowej znajdującej się w formie i w układzie wlewowym.

Za najbardziej prawidłowy, uzasadniony teoretycznie i potwierdzony w latach sześćdziesiątych doświadczalnymi badaniami modelowymi przez Kostera i Gohringa, a także przez American Die Casting Institute, przyjmuje się fromerowski model ruchu metalu [1]. Według tej teorii, dotyczącej cieczy rzeczywistej, strumień metalu wydostający się ze szczeliny wlewowej do wnęki formy przebiega przez nią swobodnie, następnie uderza o przeciwległą ściankę, traci znaczną część swej energii kinetycznej i rozdziela się na strumienie poruszające się wzdłuż ścian bocznych w kierunku przeciwnym do strumienia zasilającego. Przepływowi strumieni wzdłuż ścianek towarzyszy powstawanie wirów, w których podczas krzepnięcia odlewu okludowana jest atmosfera znajdująca się we wnętrzu formy. Prowadzi to do znacznego zagazowania odlewu, w związku z czym nie jest możliwa obróbka cieplna odlewów ciśnieniowych (uwięziony pod dużym ciśnieniem w odlewie gaz powoduje puchnięcie odlewu i w konsekwencji jego pęknięcie podczas obróbki cieplnej) oraz ich spawanie. Inaczej jest w przypadku odlewania tiksotropowego, gdzie występuje laminarne (warstwowe) wypełnienie wnęki formy. Schemat wypełnienia turbulentnego i laminarnego przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Schemat wypełnienia turbulenta (a) i laminarnego (b) wnęki formy maszyny ciśnieniowej

Fig. 2. Scheme of the turbulent (a) and laminar (b) cavity mould filling

ZALETY I WADY ODLEWANIA TIKSOTROPOWEGO

Głównymi zaletami odlewania tiksotropowego w porównaniu z klasycznym odlewaniem ciśnieniowym są:

- zwiększenie trwałości formy ze względu na niższą temperaturę pracy;
- zmniejszenie skurczu podczas krzepnięcia, co umożliwia produkowanie części o złożonym kształcie i dużym zróżnicowaniu grubości ścianek;
- dobra szczelność dzięki zmniejszeniu porowatości odlewów: 3,2% dla odlewów ciśnieniowych, 1,7% w odlewach tiksotropowych;
- zmniejszenie skłonności do pęknięć na gorąco;
- zmniejszenie ryzyka powstawania mikropęknięć;
- możliwość obróbki cieplnej;
- polepszenie właściwości mechanicznych;
- możliwość uzyskania małych grubości ścianek do 1,7 mm, a przeciętnie 3 mm;
- możliwość uzyskania dużych grubości ścianek;
- doskonała zgrzewalność dzięki niskiej zawartości gazów i małej porowatości odlewów.

Wadami odlewania tiksotropowego są:

- wąski zakres temperatury, w którym prowadzi się proces. Udział fazy stałej i lepkość w stanie stało-ciekłym są bardzo wrażliwe na zmianę temperatury. Zakres temperatury formowania powinien zapewnić udział fazy ciekłej w ilości około 50%;
- segregacja składu chemicznego i składników struktury stopu;
- technologia formowania tiksotropowego wymaga specjalistycznego wyposażenia, co czyni ją technologią bardzo drogą w początkowym etapie produkcji. Jednak możliwości, jakie daje ta technologia, rekompensuje częściowo te koszty.

METODYKA I WYNIKI BADAŃ

W celu określenia wpływu czasu mieszania i temperatury ciekłego wsadu na możliwość tworzenia się struktury reokast badania przeprowadzono w temperaturze mieszania odpowiednio 700, 720 i 740°C, poddając ciekły stop i zawieszinę kompozytową mieszanemu mechanicznemu przez 10 i 20 s. Prowadzenie procesu przy niższej temperaturze początkowej lub dłuższych czasach mieszania było praktycznie niemożliwe ze względu na zbyt małą zawartość fazy ciekłej w objętości materiału wsadowego, której brak wydatnie utrudniał wykonanie kompletnego odlewu na maszynie ciśnieniowej. Górna temperatura procesu mieszania ustalona była na poziomie temperatury granicznej rozkładu fazy zbrojącej, określonej przez producenta dla danego typu materiału. Zachodząca reakcja pomiędzy ciekłym stopem a fazą zbrojącą z węglika krzemu powoduje tworzenie się kruchej fazy węglika glinu, obniżającej właściwości wytrzymałościowe kompozytu. Badania przeprowadzono, wykorzystując także materiał osnowy, stop na bazie aluminium (AlSi9Mg), dla którego otrzymane wyniki pozwoliły porównać poziom uzyskiwanych właściwości mechanicznych w stosunku do kompozytu F3D.20S wytworzonego na bazie stopu Al-Si9CuFe zawierającego 20% obj. cząsteczek węglika krzemu. Mieszanie przeprowadzono z wykorzystaniem urządzenia umożliwiającego w sposób automatyczny wykonać cały proces sferoidyzacji z zachowaniem parametrów czasowo-temperaturowych, niezmiernie istotnych dla poprawnego przeprowadzenia szeregu doświadczeń w wąskim przedziale wybranych parametrów. Widok urządzenia oraz wybrane etapy zostały zaprezentowane na rysunku 3. Wykonywanie odlewów było podzielone na dwa etapy. W pierwszym z nich ciekły wsad przelewano z pieca topialnego do wstępnie podgrzanego i izolowanego cieplnie tygla, który następnie był niezwłocznie umieszczany w stojaku maszyny mieszającej. W drugim etapie do tak przygotowanego wsadu metalowego wprowadzana była główica mieszająca o temperaturze około 100°C. W trakcie zanurzania się główicy w ciekłym stopie pozostawała ona w spoczynku, w celu przyspieszenia procesu krystalizacji, dopiero w momencie osiągnięcia dolnego położenia wprowadzana była w ruch obrotowy z jednoczesnym posuwem do góry. W trakcie tego etapu utworzone dendryty ulegały rozdrobnieniu z jednoczesną ich sferoidyzacją.

Wlewki z kompozytów F3D.20S i stopu AlSi9Mg odlano na maszynie ciśnieniowej firmy BÜHLER, stosując parametry pracy wykorzystywane przy wytwarzaniu odlewów tiksotropowych ze stopów typu AlSi7, AlSi9. Zaprojektowana forma do odlewania tiksotropowego posiadała szereg kanałów ze zmiennym przekrojem poprzecznym w celu określenia skuteczności wypełniania wnęki formy przez materiał znajdujący się w stanie ciekło-stałym.

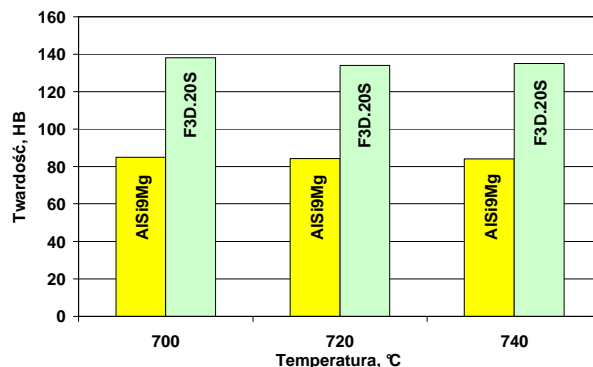


Rys. 3. Wybrane etapy wytwarzania struktury tiksotropowej
 Fig. 3. Selected stages of creating a rheocast structure

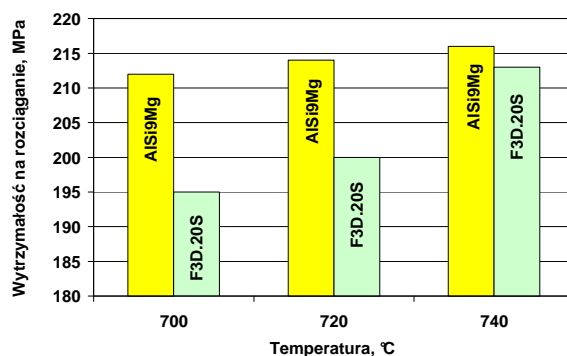
Wybrane wyniki badań przedstawiono w postaci przykładowej fotografii ilustrującej wady strukturalne otrzymanych odlewów (rys. 4), wykresów twardości (rys. 5) i wytrzymałości na rozciąganie w funkcji czasu mieszania i temperatury początkowej ciekłego wsadu (rys. rys. 6, 7) oraz przykładów obrazów (rys. rys. 8-11) mikrostruktury otrzymanych odlewów.



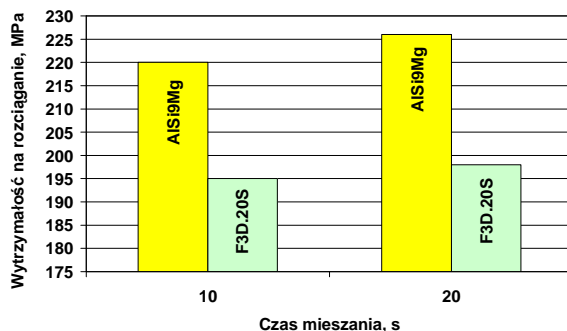
Rys. 4. Przykładowy odlew kompozytowy z widocznymi wadami strukturalnymi w przekroju poprzecznym
 Fig. 4. Selected composite cast with visible defects in cross section



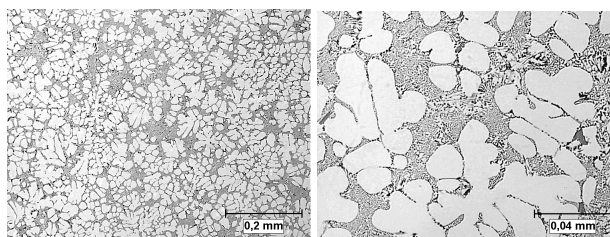
Rys. 5. Zmiany twardości kompozytu F3D.20S i stopu AISi9Mg w funkcji temperatury przy czasie mieszania 10 s
 Fig. 5. The relationship of hardness on temperature at stirring time 10 s for F3D.20S composite and AISi9Mg alloy



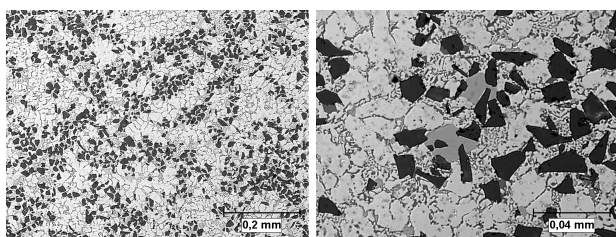
Rys. 6. Zmiany wytrzymałości na rozciąganie kompozytu F3D.20S i stopu AISi9Mg w funkcji temperatury przy czasie mieszania 10 s
 Fig. 6. The relationship of UTS on temperature at stirring time 10 s for F3D.20S composite and AISi9Mg alloy



Rys. 7. Zmiany wytrzymałości na rozciąganie kompozytu F3D.20S i stopu AISi9Mg w funkcji czasu mieszania przy temperaturze początkowej 720°C
 Fig. 7. The relationship of UTS on stirring time at 720°C for F3D.20S composite and AISi9Mg alloy

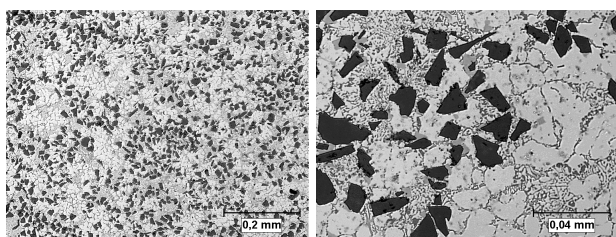


Rys. 8. Mikrostruktura stopu AISi9 mieszanego od temperatury 700°C przez okres 10 s
 Fig. 8. Microstructure of the AISi9 alloy - stirring time 10 s at 700°C



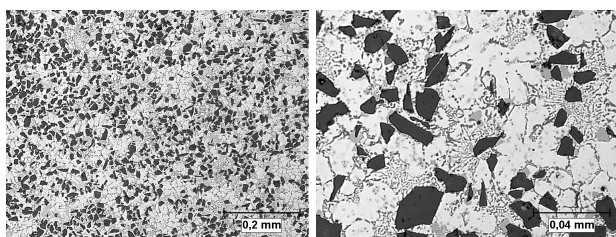
Rys. 9. Mikrostruktura kompozytu F3D.20S mieszanego od temperatury 700°C przez okres 10 s

Fig. 9. Microstructure of the F3D.20S composite - stirring time 10 s at 700°C



Rys. 10. Mikrostruktura kompozytu F3D.20S mieszanego od temperatury 740°C przez okres 10 s

Fig. 10. Microstructure of the F3D.20S composite - stirring time 10 s at 740°C



Rys. 11. Mikrostruktura kompozytu F3D.20S mieszanego od temperatury 740°C przez okres 20 s

Fig. 11. Microstructure of the F3D.20S composite - stirring time 20 s at 740°C

PODSUMOWANIE

Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki, można stwierdzić, iż istnieje możliwość sterowania zarówno strukturą stopu monolitycznego, jak i kompozytu, jednakże uzyskanie zadowalających efektów jest utrudnione ze względu na właściwości ciekłej zawiesiny kompozytovej. W przypadku stopu monolitycznego, charakteryzującego się dużo lepszą lejnością i niską lepkością, tworzenie gazowych okluzji praktycznie nie występuje przy długich czasach mieszania i niskiej temperaturze początkowej. Struktura stopu monolitycznego zawiera widoczne zmiany morfologii fazy α i koreluje w stosunku do parametrów procesu - czasu mieszania i tem-

peratury początkowej. Odlewy wykonane z kompozytu F3D.20S charakteryzowały się widocznymi wadami, w postaci okluzji gazowych, powstających szczególnie w obszarach cienkich ścianek odlewu, w których prędkości przepływu strugi metalu przekraczały graniczne wartości dla przepływu laminarnego. Nawet podwyższenie temperatury i skracanie czasu mieszania nie przyniosły zadowalającego efektu w postaci partii odlewów pozbawionych wad strukturalnych. Wady te mają bezpośredni wpływ na spadek wytrzymałości odlewu. Zarówno właściwości wytrzymałościowe, jak również wykonane badania mikrostrukturalne potwierdziły fakt tworzenia się struktury reokast w przypadku odlewów ze stopu monolitycznego i materiału kompozytovej, jednak jej wpływ na właściwości wytrzymałościowe jest stosunkowo niewielki. Prawdopodobnie spowodowane było to zbyt małym zakresem pomiędzy temperaturą likwidus i solidus dla tego stopu, która bezpośrednio determinuje podatność danego materiału na modyfikację.

Podziękowania

Prace wykonano w ramach realizacji projektu badawczego zamawianego PBZ/KBN/114/T08/2004 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (Zadanie II.5.3. Prowadzenie prób technologicznych wytwarzania odlewów kompozytowych dostępnymi technikami odlewniczymi z wykorzystaniem oprzyrządowania i urządzeń w Iod., w tym w skali półprzemysłowej).

Autorzy składają również podziękowania dla Koleżanek i Kolegów z Instytutu Transportu Samochodowego w Warszawie za pomoc w przeprowadzeniu badań strukturalnych częściowo wykorzystanych w danej publikacji.

LITERATURA

- [1] Białożbrzeski A., *Odlewnictwo ciśnieniowe*, WNT, Warszawa 1992.
- [2] Kopp R., Winning G., *Thixoforging of aluminium alloys*, www.rwth-aachen.de
- [3] *New diecasting technologies - markets and applications*, Foundry Trade Journal 1997, January, 14-19.
- [4] Gräf T., Jürgens R., *Sichere Prozesssteuerung Bem Thixoforging*, Giesserei 1999, 86, 1-18 Januar, 84-87.
- [5] Merton C., *Flemings: Moulage a l'état visqueux et a l'état semi-solid, procédés et produits*, Hommes et Fonderie 2003, Avril, 333, 15-28.