

Jerzy Sobczak¹

Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków
Instytut Transportu Samochodowego, ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa

Paweł Darlak²

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

Andrzej Wojciechowski³, Krystyna Pietrzak⁴, Dariusz Rudnik⁵

Instytut Transportu Samochodowego, ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa

WYBRANE ASPEKTY TECHNOLOGII KOMPOZYTÓW ALFA

Przedstawiono istniejące (w skali półprzemysłowej) i potencjalne (laboratoryjne) metody wytwarzania kompozytów na bazie stopów aluminium, zbrojonych materiałem odpadowym - popiołem lotnym (ALFA, ang. - Aluminium Fly Ash). W oparciu o badania prowadzone w Instytucie Odlewnictwa we współpracy z Instytutem Transportu Samochodowego i Energy of Industries, Ohio (USA) w niniejszym artykule przedstawiono wybrane aspekty technologiczne dotychczas stosowanych technik syntezy kompozytów. Ze względu na szerokie spektrum zagadnień związanych z wytwarzaniem materiałów heterogenicznych, ogromną ilością problemów technicznych zamieszczone informacje mogą stanowić znaczące źródło inspiracji do dalszego rozwoju badań nad otrzymywaniem kompozytów przeznaczonych do zastosowania zwłaszcza w przemyśle samochodowym. Przedstawiono wyniki otrzymane w trakcie prób wytworzenia kompozytu na drodze metalurgii proszków, infiltracji ciśnieniowej i mieszania mechanicznego (vortex). W trakcie badań stwierdzono występowanie wysokoenergetycznej i długotrwałej emisji fali akustycznej, której źródła emisji były zlokalizowane w nieciągłościach strukturalnych, ściśle związanych z ogólną specyfiką fazy zbrojącej. Emisja akustyczna ze względu na swój charakter i sposób propagacji została nazwana przez autorów efektem SODA.

Słowa kluczowe: popiół lotny, technologia, metalowe materiały kompozytowe, efekt SODA

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF SYNTHESIS OF ALFA COMPOSITES

Aluminum-fly ash (ALFA - ALuminium Fly Ash) composites have been developed in recent years. Fly ash is a particulate waste material formed as a result of coal combustion in power plants. The use of fly ash as a filler or reinforcement for aluminum alloys called Metal Matrix Composites, or MMCs, is therefore very desirable from an environmental standpoint. Fly ash forms at temperatures in the range of 920÷1200°C and is collected as precipitator ash (solid particles) and cenospheres (hollow microspheres) that float on collection ponds. Production of aluminum alloy-fly ash composite material is difficult due to the poor wettability of fly ash and its light weight nature. The introduction of fly ash into liquid metal for making gravity castings oftentimes does not result in a uniform distribution of fly ash particles in the alloy structure. However, further re-melting of the composite material combined with squeeze casting has been found to improve the distribution in aluminum-fly ash castings. Initial investigations employing a squeeze casting process (the application of external pressure on the molten metal) for Aluminum-fly ash MMCs has also demonstrated many advantages for this technique, i.e.: better compatibility between the metal matrix and the fly ash particles, a more improved structure of the matrix alloy, filling of some hollow particles of the fly ash with metal, and pressure activation of the fly ash-metal interface. In this work authors described some technological aspects of ALFA synthesis. The results have been considered basing on the long term collaboration between Foundry Research Institute, Motor Transport Institute and Energy of Industry Co. from Ohio, USA. Selected methods allow producing the material, which can be applied as the construction material. In a first method, powder metallurgy, fly ash was tentatively prepared (Fig. 2) and then was melted with aluminum matrix. The mechanical properties and structure were shown in Figure 3 and Table 2. The second method, pressure infiltration, needs to prepare a ceramic perform (Fig. 5), which next is infiltrated by liquid metal (Fig. 6). Obtained structures were shown in Figure 7. The third method, using liquid phase, allows producing composite with homogeneous distribution, but it still reveals unfavorable phenomena - floatation of light fly ash particles. Obtained structure was shown in Figure 10. During described research, a high energy acoustic emission was noticed, called by authors the SODA effect (available on Internet: <http://darlak.neostrada.pl/soda>).

Key words: fly ash, technology, metal matrix composites, SODA effect

WPROWADZENIE

Popioły lotne, określane w krajach anglojęzycznych mianem *fly ash*, będąc produktem odpadowym otrzymywanym w rezultacie spalania węgla w elektrociepłowniach i urządzeniach hutniczych, wymagają rozwiązań

ekologicznych, związanych z likwidacją ich składowisk. Ze względu na interesujący kompleks ich właściwości fizycznych i chemicznych oraz biorąc pod uwagę aspekty ekonomiczne i ekologiczne, popioły lotne mogą sta-

¹ prof. dr hab. inż., ² mgr inż., ^{3,4,5} dr inż.

nowić niezwykle atrakcyjną fazę zbrojącą metalowych materiałów kompozytowych [1-4]. W popiołach lotnych występują głównie tlen, krzem, glin, żelazo, wapń, magnez, sód, potas, tytan, a udział tych pierwiastków wynosi od kilku do kilkudziesięciu procent (tab. 1).

TABELA 1. Typowy uśredniony skład chemiczny pyłów lotnych (podany w formie udziału tlenków) [3]
TABLE 1. Typical average chemical composition of fly ash compounds (given in form of oxides mass fractions) [3]

Tlenek	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Mn ₂ O ₃	SrO
Zawartość % wag.	55,9	30,2	5,4	2,7	1,3	1,0	1,6	0,2	0,4	0,1	0,1

Badania prowadzone od wielu lat w Instytucie Odlewnictwa pod kątem przydatności popiołów lotnych jako materiału zbrojącego stopy aluminium dały pozytywne wyniki i prawdopodobnie w niedługim czasie będzie możliwe wytwarzanie odlewów z tego nowego tworzywa. We współpracy z firmą Energy Industries of Ohio i Instytutem Transportu Samochodowego z Warszawy podjęto próby wytworzenia wyrobów z kompozytów ALFA na potrzeby przemysłu samochodowego. Kompozyty ALFA mogą stanowić zamiennik stosowanych dotychczas trudno obrabialnych kompozytów DURALCAN na tarcze hamulcowe i tłoki silników spalinowych (rys. 1). Do zalet materiałowych tego nowego tworzywa należy podwyższona odporność na zużycie i szoki (zmęczenie) cieplne, obniżony współczynnik rozszerzalności, obniżone przewodnictwo cieplne i znacznie podwyższona twardość i sztywność (oceniana wartościami modułu Younga) [3].

W niniejszym artykule przedstawiono wybrane aspekty technologiczne dotychczas stosowanych technik syntezy kompozytów aluminiowych zawierających popioły lotne.

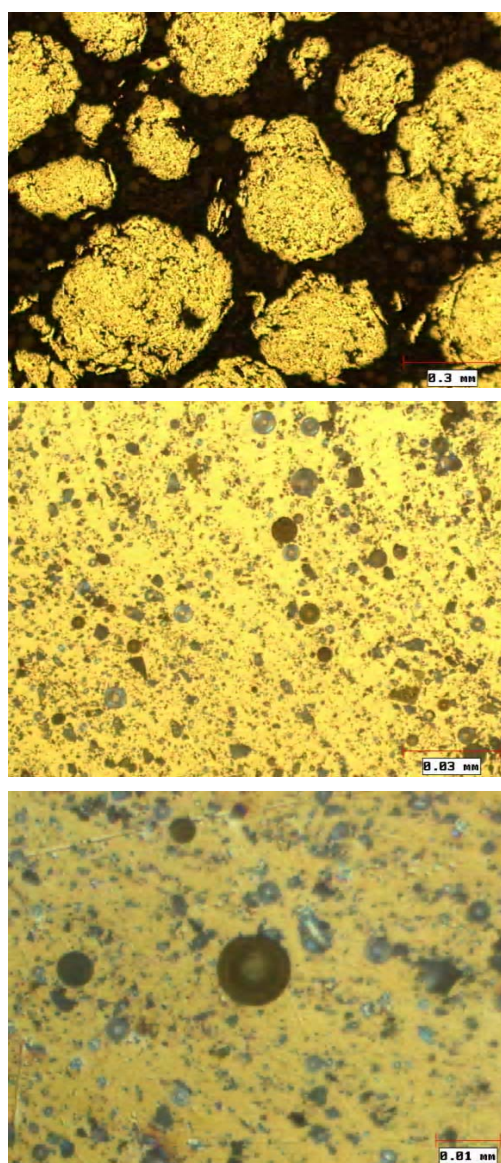


Rys. 1. Tłoki wykonane z kompozytu ALFA metodą prasowania w stanie ciekłym

Fig. 1. Pistons made from ALFA composite by means of squeeze casting method

SYNTEZA KOMPOZYTÓW ALFA Z WYKORZYSTANIEM METOD METALURGII PROSZKÓW

Proszek popiołu lotnego przygotowywano w oparciu o metody mechanicznej syntezy (MA - *mechanical alloying*) według sposobu opracowanego w Politechnice Śląskiej [5]. Wybrane frakcje popiołu lotnego z Elektrociepłowni *Dayton Power & Light* (USA) o wyselekcjonowanych rozmiarach cząstek 53÷150 μm mieszano z proszkiem czystego aluminium i poddawano kilkogodzinnemu mieleniu w młynie obrotowo-wibracyjnym według technologii opisanej w pracy [5]. Jako produkt końcowy otrzymano aglomeraty metalowo-ceramiczne z udziałem objętościowym popiołu lotnego szacowanego na 30÷50% obj. w osnowie aluminiowej (rys. 2).



Rys. 2. Mikrostruktury aglomeratów Al-popioł lotny, wytworzone metodą mechanicznej syntezy w Politechnice Śląskiej (dzięki uprzejmości dra inż. B. Formanka)

Fig. 2. Microstructures of Al-fly ash agglomerations, made by mechanical alloying method in Silesian University (courtesy of Dr B. Formanek)

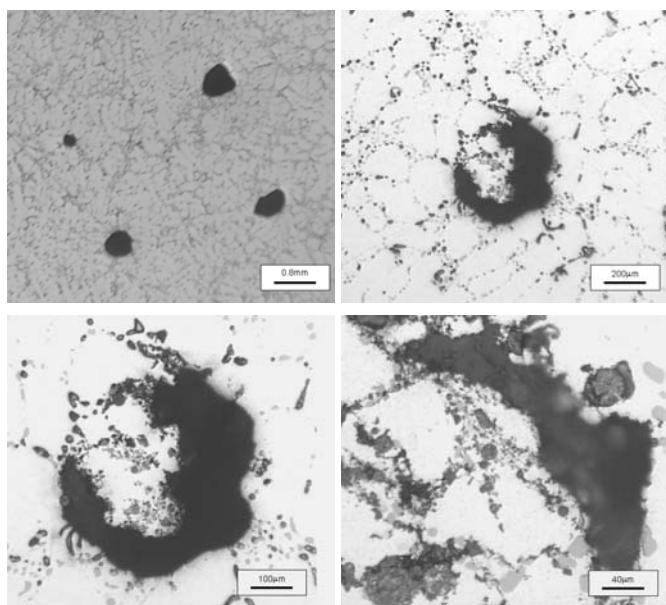
Przygotowane aglomeraty wprowadzano w temperaturze 760°C do ciekłych stopów w gatunku A356 (Al-Si7Mg) i A206 (AlCu5MnMgTi).

Ilość stopu w obydwu przypadkach wynosiła 5,00 kg, ilość wprowadzonego aglomeratu 0,504 kg (dla zawartości popiołu lotnego 4,5% wag.). Czas mieszania zawiesiny 4 min, temperatura odlewania 750°C. Odlewano próbki wytrzymałościowe w formie piaskowej, które po obróbce cieplnej typu utwardzania wydzieleniowego poddano badaniom mechanicznym (tab. 2) i strukturalnym (rys. 3).

TABELA 2. Właściwości mechaniczne kompozytu ALFA o różnej osnowie, syntetyzowanego z wykorzystaniem stopowania mechanicznego odlanego do formy piaskowej (po obróbce cieplnej)

TABLE 2. Mechanical properties of composite ALFA (A356/4.5 wt.% fly ash) and composite ALFA 4.5 (A206/4.5 wt.% fly ash) poured into sand mould (after heat treatment)

Stop	Właściwość	Wytrzymałość na rozciąganie MPa	Granica plastyczności (0,2%) MPa	Wydłużenie %	Twardość Brinella HB
A356/4,5% wag. popiołu lotnego		210	179	2,0	90
A206/4,5% wag. popiołu lotnego		227	187	3,3	92,0



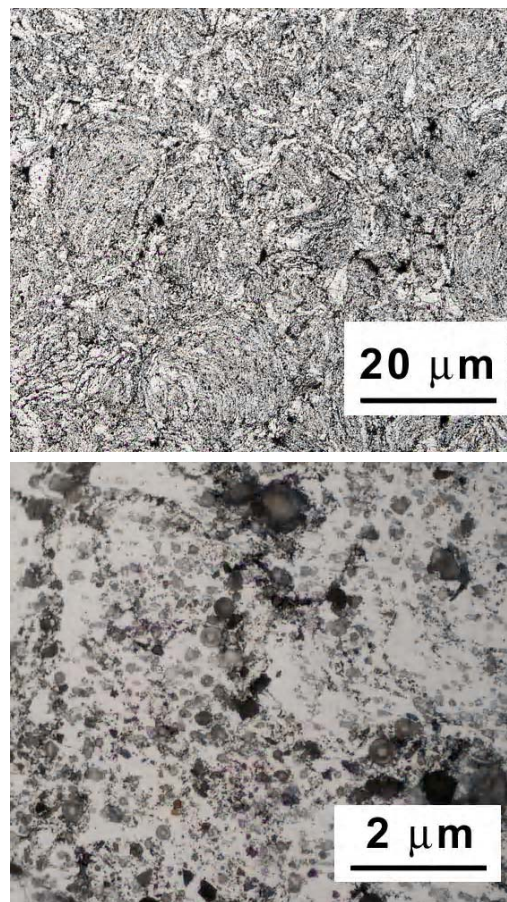
Rys. 3. Mikrostruktura kompozytu ALFA 4,5 (A356/4,5% wag. popiołu lotnego) odlanego do form piaskowych (po obróbce cieplnej typu T6)

Fig. 3. Microstructures of ALFA 4.5 (A356/4.5 wt.% fly ash) composite, poured into sand mould (after heat treatment T6)

Przyczynę niewystarczającego poziomu właściwości mechanicznych otrzymanych kompozytów należy upatrywać w niedostatecznym stopniu destrukcji aglomeratów Al-popiół lotny w cieczy metalowej. Jednakże prace w danym obszarze badawczym winny być bezwarunko-

wo kontynuowane, albowiem metody mechanicznej syntezy prowadzą do wytworzenia fazy zbrojącej w nanoskali, a więc w stosunkowo prosty sposób wiodą do kreacji nanokompozytów.

Przeprowadzono udane próby syntezy kompozytów ALFA bezpośrednio z aglomeratów Al-popiół lotny (rys. 4).



Rys. 4. Mikrostruktura kompozytu ALFA prasowanego pod ciśnieniem 3 GPa

Fig. 4. Microstructures of ALFA composite compacted under 3 GPa

SYNTEZA KOMPOZYTÓW ALFA METODAMI INFILTRACJI CIŚNIENIOWEJ

W celu uzyskania nowego materiału typu ALFA został opracowany sposób wykonania porowatych preform (kształtek), zawierających mikrosfery krajowego popiołu lotnego (uzyskanego z Elektrociepłowni ŁĘG-Kraków), które zostały spojone preparatem Glifos F. Porowatość preform utrzymywano na poziomie 50% obj. Po wysuszeniu na powietrzu preformy wypalano w piecu sylitowym w temperaturze 800°C w ciągu 6 godzin (rys. 5).

Infiltrację ciśnieniową porowatych preform prowadzono na stanowisku do prasowania w stanie ciekłym wykorzystującym prasę hydrauliczną PHM-160C. Preformy o temperaturze 700°C umieszczano w dolnej części formy do prasowania w stanie ciekłym, zalewano

ciekłym stopem AK12 (AlSi12CuNiMg) i poddawano infiltracji ciśnieniowej według następujących parametrów: temperatura ciekłego metalu 720÷740°C, końcowe ciśnienie zewnętrzne 100 MPa. Temperatura formy wynosiła 180÷200°C (górną/dół). Gęstość preform po infiltracji ciśnieniowej zawierała się w granicach 1,60÷1,88 g/cm³. Tak infiltrowane preformy z mikrosfer, stanowiące lekki materiał konstrukcyjny, są określane mianem pian syntaktycznych (rys. 6). Dodatkowe badania z wykorzystaniem wyselekcjonowanych mikrosfer z Elektrociepłowni *Dayton Power & Light* wykazały, że istnieje możliwość syntezy pian syntaktycznych o gęstości mniejszej od gęstości wody.



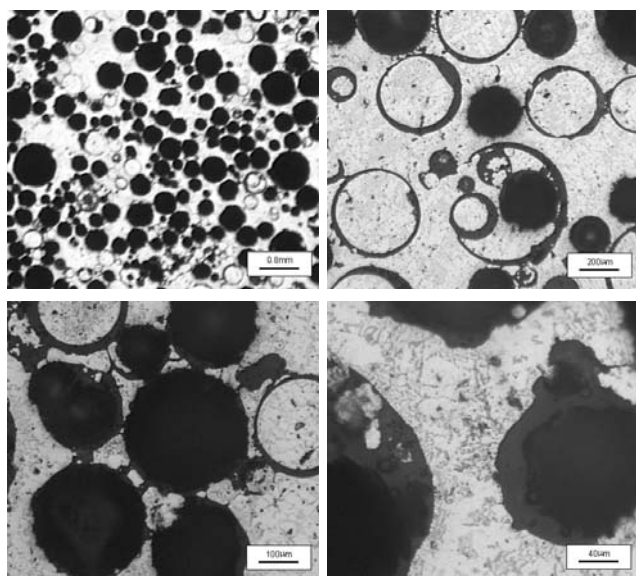
Rys. 5. Preformy wykonane z mikrosfer popiołu lotnego (średnica 80 mm, wysokość 40÷50 mm)

Fig. 5. Preforms made from fly ash microsphere (diameter 80 mm, high 40÷50 mm)



Rys. 6. Piana syntaktyczna AK12/50% obj. mikrosfer o gęstości 1,88 g/cm³ (po skórowaniu)

Fig. 6. Syntactic foam made of AK12/50 vol.%, microsphere, density 1.88 g/cm³ after machining



Rys. 7. Mikrostruktura piany syntaktycznej AK12/50% obj. mikrosfer o gęstości 1,60 g/cm³

Fig. 7. Syntactic foam microstructure of AK12/50 vol.%, microsphere, density 1.60 g/cm³

Wyrywkowo badano właściwości mechaniczne piany syntaktycznej o gęstości 1,60 g/cm³ (w stanie lanym). Wytrzymałość na ściskanie danej piany wyniosła ok. 30 MPa. W porównaniu z modułem Younga czystej osnowy ($E_{AK12} = 70\div 80$ GPa) sztywność otrzymanej piany mieściła się w zakresie $E_{AK12}^{50\%} = 20\div 30$ GPa, co z dokładnością poczynionych oszacowań odpowiadało relacji Gibson-Ashby. Twardość Brinella wyniosła 45÷50 HB (po obróbce cieplnej typu T6 spadła do poziomu 40÷45 HB - wyjaśnienie zaobserwowanego spadku twardości wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań). Typowe struktury otrzymanych pian syntaktycznych pokazano na rysunku 7.

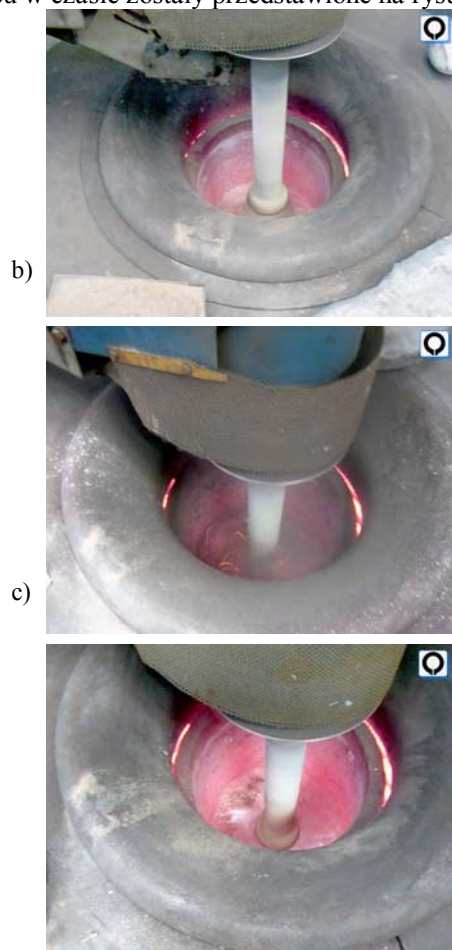
Przedstawiony sposób syntezy metalu z mikrosferową porowatą kształtką ceramiczną pozwala na otrzymywanie lekkiego materiału konstrukcyjnego o wystarczających właściwościach mechanicznych do potencjalnych zastosowań wszędzie tam, gdzie wymagana jest lekkość konstrukcji, podwyższona zdolność do tłumienia drgań i dźwięków oraz pochłaniania innych rodzajów energii. Pod względem poziomu właściwości mechanicznych piana syntaktyczna znacznie przewyższa inne znane struktury komórkowe, w tym monolityczne i kompozytowe piany metalowe, i może być porównana z kompleksem charakterystyk mechanicznych tzw. gazarów aluminiowych (czy aluminiowych struktur typu „lotos”).

SYNTEZA KOMPOZYTÓW ALFA METODĄ MIESZANIA MECHANICZNEGO (VORTEX METHOD)

W danym przypadku fazę zbrojącą stanowił popiół lotny z Elektrociepłowni Skawina. Wybrane frakcje poddano wstępnej obróbce cieplnej (wyprażanie w temperaturze 500°C), mającej na celu usunięcie wilgoci oraz pozostałych substancji palnych.

Masa stosowanego stopu AG10 (AlMg10) użytego do syntezy w każdym doświadczeniu wynosiła 20 kg. W trakcie badań wprowadzano do 10% wag. popiołu lotnego. Do wytworzenia kompozytów zaadaptowano istniejące w Instytucie Odlewnictwa urządzenie do rafinacji i modyfikacji stopów aluminium typu URM-1. Czas mieszania zawiesiny zawierał się w przedziale 10÷30 min w temperaturze zalewania wynoszącej 750°C. Stosowano ochronną atmosferę azotu, a równoczesne podawanie gazu obojętnego wraz z popiołem lotnym miało z założenia zapobiegać procesom utleniania magnezu oraz korzystnie wpływać na jednorodny rozkład fazy zbrojącej w całej objętości kompozytu. Przepływ azotu został ustalony na poziomie 1 dm³/min, jednak później został podwyższony do wartości 10 dm³/min ze względu na niską przyswajalność ceramiki przez ciekły metal. Ciekła zawiesina była odlewana do formy metalowej

(kokili) o temperaturze 200°C. Kolejne etapy realizacji wytopu w czasie zostały przedstawione na rysunku 8.



Rys. 8. Kolejne etapy wprowadzania popiołu lotnego do ciekłego metalu za pomocą urządzenia URM-1

Fig. 8. Stages insert of fly ash into melting metal with using URM-1 device

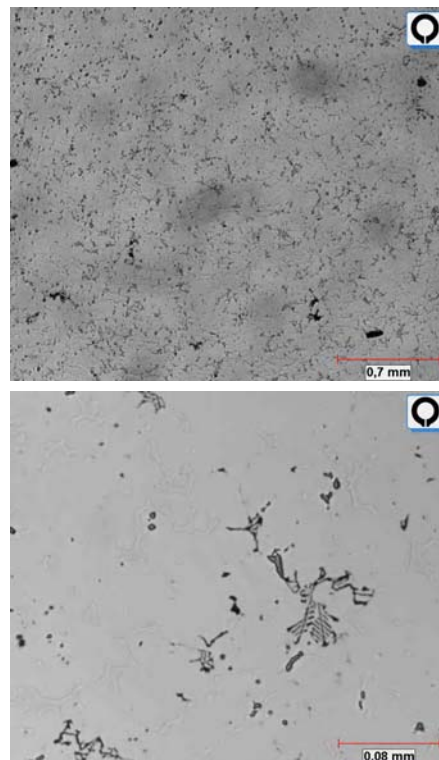
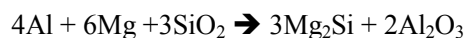
W czasie wykonywania doświadczeń zaobserwowano następujące zjawiska:

1. Tylko niewielka ilość wprowadzanego popiołu lotnego pozostawała w ciekłym stopie. Po wprowadzeniu około 2÷3% wag. dalsze mieszanie wiąże się z dużymi stratami fazy zbrojącej wskutek wydmuchiwania jej przez azot użyty jako medium wspomagające homogenizację zbrojenia.
2. Zaobserwowano tworzenie się na powierzchni „kożucha” (rys. 8b), pozostałego z nieprzyswojonego popiołu, co może potwierdzać, w danych warunkach eksperymentu, jego niską zwilżalność przez ciekły metal.

Otrzymany materiał został poddany badaniom strukturalnym. Poniżej, dla porównania zamieszczono struktury monolitycznego stopu AG10, przed wprowadzeniem popiołu lotnego (rys. 9), a na rysunku 10 przedstawiono strukturę kompozytu ALFA, zawierającą 10% wag. popiołu lotnego.

Wykonana analiza EDS (rys. 11) wybranej fazy, widocznej w świetle spolaryzowanym jako żółtawe „wy-

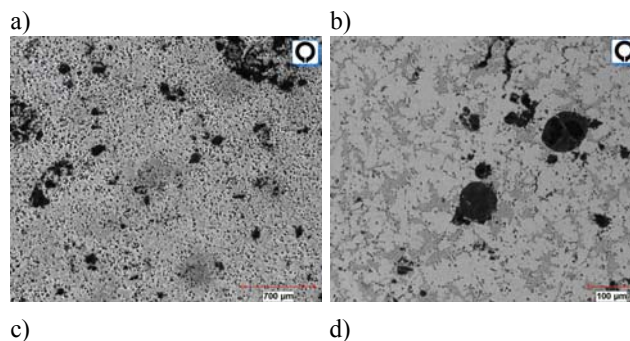
sepki”, została zidentyfikowana jako faza międzymetaliczna Mg_2Si . Wzrost udziału tej fazy międzymetalicznej wynika zapewne z oddziaływania chemicznego zachodzącego w kąpieli metalowej według następującej reakcji:

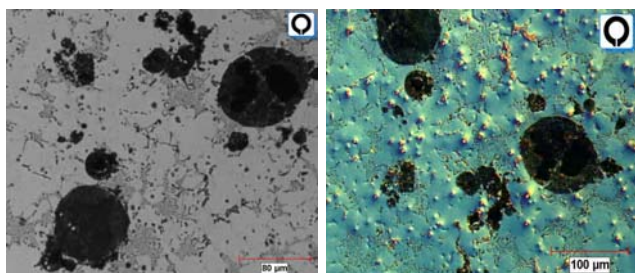


Rys. 9. Mikrostruktura stopu AG10

Fig. 9. Microstructure of AG10 alloy

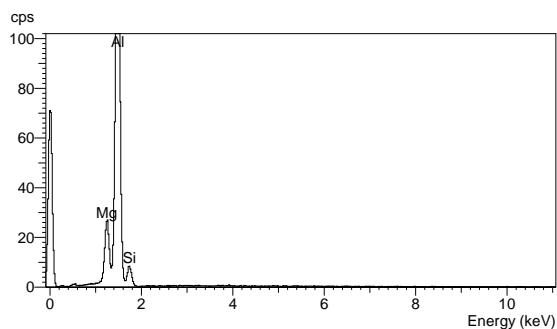
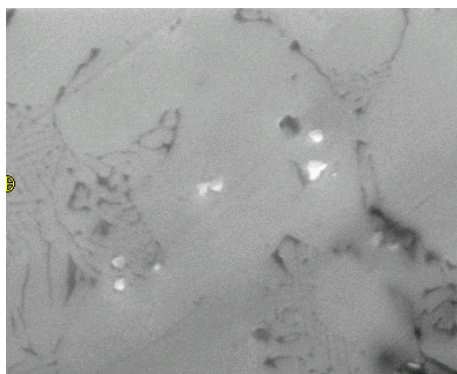
Tworzenie fazy Mg_2Si efektywnie umacniającej osnowę jest ściśle związane z czasem mieszania ciekłej zawiesiny kompozytowej. Dlatego też otrzymane właściwości wytrzymałościowe materiału mogą być regulowane poprzez sterowanie czasem mieszania.





Rys. 10. Mikrostruktura kompozytu ALFA z 10% wag. popiołu lotnego

Fig. 10. Microstructure of ALFA composite with 10 wt.% fly ash

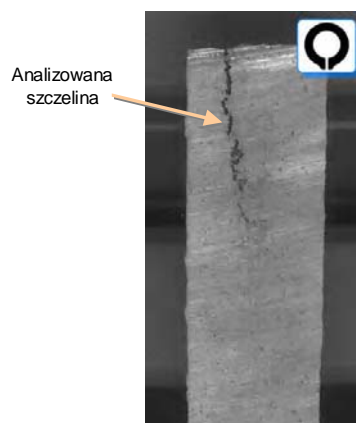


Rys. 11. Analiza EDS wybranego obszaru próbki kompozytu ALFA (10% wag. popiołu lotnego)

Fig. 11. EDS analysis of selected specimen area of ALFA composite with 10 wt.% fly ash

ZJAWISKO EMISJI AKUSTYCZNEJ (EFEKT SODA)

W trakcie prowadzenia doświadczeń nad syntezą kompozytów ALFA metodą ciekło-fazową stwierdzono występowanie wysokoenergetycznej i długotrwałej emisji fali akustycznej, pojawiającej się zwłaszcza po przeprowadzeniu obróbki cieplnej. Zjawisko to, ze względu na specyficzną charakterystykę dźwięku, nazwano efektem SODA. Zarejestrowane nagrania efektu dźwiękowego, uwzględniające różne warunki panujące podczas rejestracji (próbka w temperaturze pokojowej, podwyższonej i obniżonej), są aktualnie dostępne w Internecie pod adresem: <http://feniks.one.pl/guest/>

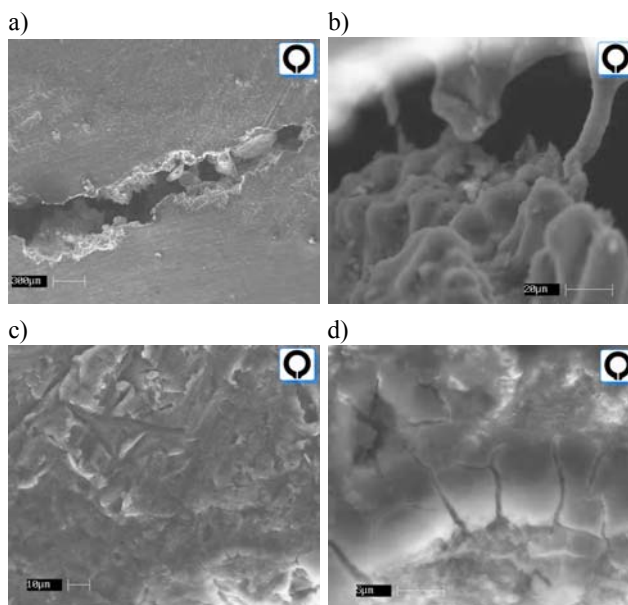


Rys. 12. Przekrój wzdłużny odlewu, w którym wystąpił efekt SODA

Fig. 12. Longitudinal section of cast in which an SODA effect has been occurred

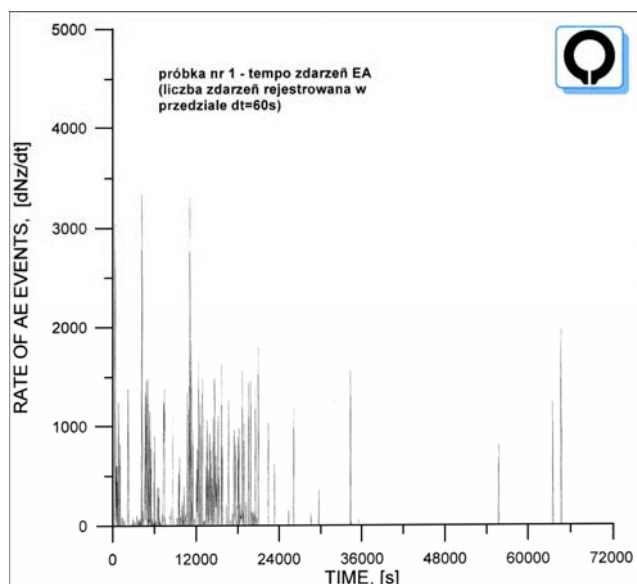
Zarejestrowana fala akustyczna, generowana także w zakresie słyszalnym, zlokalizowana była głównie w obszarach nieciągłości strukturalnych, szczególnie o dość dużej powierzchni rozwiniętej (rys. 12).

Kompozyt poddano wstępnym badaniom strukturalnym na mikroskopie skaningowym w obszarze powstałego pęknięcia wewnątrz odlewu kształtowego (rys. 13).



Rys. 13. Mikrostruktura kompozytu ALFA w pobliżu nieciągłości strukturalnej

Fig. 13. Microstructure of ALFA composite nearby the structure discontinuity



Rys. 14. Rozkład występowania liczby zdarzeń w funkcji czasu (po 6 godzinach od chwili wygenerowania efektu SODA)

Fig. 14. Distribution of quantity events in time function (after 6 hours from the generation moment of SODA effect)

Na podstawie otrzymanych danych można wstępnie wnioskować, że generowanie fali dźwiękowej i jej emisja jest zależna od kształtu nieciągłości, a także składu chemicznego wierzchniej warstwy pęknięcia. Przypuszcza się, że po przesyleniu materiału zachodzące wewnątrz zmiany, wynikające z niestabilności układu fazowego (swoiste „starzenie naturalne”), wytwarzają naprężenia o dużym potencjale energetycznym, którego energia pozwala na propagację pęknięć w istniejącej sieci połączeń dendrytów na podobieństwo „stalaktytów” i „stalagmitów”.

We współpracy z Instytutem Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN w Krakowie przeprowadzono analizę rozkładu natężenia emisji fali w zależności od czasu. Badanie opierało się na komputerowym pomiarze występowania natężenia fali akustycznej przekraczającej pewien zadany próg przy częstotliwości próbkowania wynoszącej 60 Hz. Pozwoliło to określić rozkład natężenia, intensywność oraz czas trwania emisji. W wyniku przeprowadzonej analizy otrzymano wykres zależności przedstawiony na rysunku 14.

Szczególną uwagę należy zwrócić nie tylko na wartości ilości zdarzeń, ale także na czas propagacji dochodzący do 24 h. Jak dotąd, na podstawie otrzymanych danych eksperymentalnych nie udało się w pełni wyjaśnić mechanizmu tego nowego zjawiska.

WNIOSKI

1. Mimo stwierdzonych trudności eksperymentalnych, mających charakter dotychczas mało efektywnego sposobu dyspergowania i ujednorodnienia rozkładu fazy zbrojącej, metoda mechanicznej syntezy jest po-

tencjalnie jednym z lepszych rozwiązań technologicznych w odniesieniu do wytwarzania kompozytów aluminiowych zawierających popiół lotny.

- Zaproponowany sposób wytwarzania pian syntaktycznych pozwala na otrzymywanie lekkiego materiału konstrukcyjnego o wystarczających właściwościach mechanicznych do potencjalnych zastosowań zwłaszcza na ultralekkie części, od których wymagana jest podwyższona zdolność tłumienia wszelkich rodzajów energii. Na podstawie porównawczych prac studialnych można stwierdzić, że pod względem poziomu właściwości mechanicznych piana syntaktyczna znacznie przewyższa inne znane struktury komórkowe, w tym monolityczne i kompozytowe piany metalowe.
- Metoda otrzymywania kompozytu z zastosowaniem urządzenia mieszającego pozwala na otrzymywanie materiału o stosunkowo jednorodnym rozkładzie rozmieszczenia fazy zbrojącej, jednak ze względu na trudności pojawiające się w trakcie syntezy (unoszenie pyłu lotnego) wymaga wykonania dodatkowego oprzyrządowania zmniejszającego występowanie tego niekorzystnego zjawiska.
- Stwierdzone w pracy zjawisko określane mianem „efektu SODA”, polegające na występowaniu rejestrowanej słyszalnej fali akustycznej, wymaga dalszych pogłębionych badań z rozszerzeniem metodologicznym na inne grupy materiałowe. Do tej pory w dostępnej literaturze specjalistycznej nie napotkano na opis podobnego fenomenu.
- Kompozyty ALFA mogą z powodzeniem znaleźć zastosowanie w rozwiązaniach konstrukcyjno-materiałowych w przemyśle samochodowym, głównie na lekkie części spełniające wymóg odporności na zużycie, szoki cieplne, zachowanie stabilności wymiarowej z uwzględnieniem ekonomicznej racjonalności ich wykonywania.

LITERATURA

- 1990 Coal Combustion By-Product. American Coal Ash Association, Revision No. 1, June 13, 1992, Washington DC.
- Nonavinakere S., Reed B.E., Use of Ash to Treat Metal Bearing Waste Streams, Proceedings of the 10th International Ash Use Symposium, Vol. 1, EPRI TR-101774, January 1993, 120.
- Sobczak J., Sobczak N., Przysaś G., Zastosowanie materiałów odpadowych w odlewnictwie na przykładzie popiołów lotnych, Instytut Odlewnictwa, Kraków 1999.
- Rohatgi P.K., Guo R., Keshavaram B.N., Golden D.M., Cast Aluminium - Fly Ash Composites for Engineering Applications, AFS Transactions 1995, 575-586.
- Formanek B., Szopiński K., Olszówka-Myalska A., Kompozytowe proszki Al-Al₂O₃ i Al-SiC otrzymywane metodą mechanicznego stopienia MA, III Seminarium Kompozyty'98 - Teoria i praktyka, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1998.

Recenzent
Zbigniew Konopka