

## KOMPOZYTY ALFA WYTWORZONE METODĄ MECHANICZNEJ SYNTEZY - ANALIZA ROZKŁADU FAZY ZBROJĄCEJ ZA POMOCĄ MIKROTOMOGRAFII KOMPUTEROWEJ

### ALFA COMPOSITES FABRICATED BY MECHANICAL ALLOYING - ANALYSIS OF THE REINFORCING PHASE DISTRIBUTION BY COMPUTED MICROTOMOGRAPHY

*Piotr Długosz, Paweł Darlak, Aleksandra Siewiorek, Jerzy J. Sobczak*

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

#### **Streszczenie**

*W pracy prezentowane są wyniki badań próbek kompozytowych, w których zbrojenie stanowią odpadowe popioły lotne z elektrowni, natomiast osnową jest czyste aluminium (A8). Uzyskaną na drodze mechanicznej syntezy zaprawę kompozytową poddano konsolidacji plastycznej na zimno w celu scalenia proszków w materiał lity, a uformowane w ten sposób wypraski nagrzewano do temperatury 430–450°C i wyciskano z nich pręty o średnicy 14 mm. Uzyskane próbki cylindryczne poddano analizie tomograficznej, w wyniku której stwierdzono zadowalający poziom dystrybucji fazy zbrojącej, przy zawartości 25% wag. popiołu, oraz brak obszarów o zbyt dużej koncentracji cząsteczek ceramicznych, mogących być początkiem powstawania niekorzystnego zjawiska aglomeracji. Zaobserwowano poprawę właściwości mechanicznych próbek kompozytowych w porównaniu do właściwości próbek wykonanych wyłącznie z materiału osnowy.*

*Słowa kluczowe:* kompozyty ALFA, popioły lotne, mechaniczna synteza, tomografia komputerowa

#### **Abstract**

*The paper presents the results of examinations of composite samples in which the reinforcement is waste fly ash from power plants, while matrix is an aluminium (A8). The agglomerates of master composite obtained by mechanical alloying were subjected to hot plastic consolidation to transform the powder into a solid material, and thus formed compacts were heated to a temperature of 430-450°C and squeezed into 14 mm diameter rods. Thus obtained cylindrical samples were analysed by computed tomography, which revealed a satisfactory level of the distribution of the reinforcing phase at a 25 wt.% fly ash concentration, and absence of the areas characterised by too high concentration of ceramic particles, which may act as a source of the adverse phenomenon of agglomeration. An improvement in the mechanical properties of composite samples compared made from the sole matrix material.*

*Key words:* ALFA composites, fly ash, mechanical alloying, computed tomography

## Wstęp

Kompozyty ALFA od lat wzbudzają zainteresowanie w środowisku materiałoznawców, głównie ze względu na unikatowe właściwości z zakresu: wytrzymałości na rozciąganie, wytrzymałości zmęczeniowej, doskonałych charakterystyk trybologicznych, podwyższonego przewodnictwa cieplnego i odporności na szoki cieplne. Materiały tego typu mogą znaleźć zastosowanie przy produkcji odpowiedzialnych elementów w przemyśle motoryzacyjnym, kolejowym i lotniczym.

Pośród wielu materiałów ceramicznych, używanych w syntezie kompozytów, popioły lotne z elektrowni węglowych, stanowią niezwykle atrakcyjny surowiec wyjściowy, biorąc pod uwagę obniżoną gęstość oraz interesujący kompleks właściwości fizycznych, chemicznych i mechanicznych [1]. Nie bez znaczenia jest też czynnik ekologiczny (utyliczacja materiałów odpadowych) i ekonomiczny (niski koszt ich pozyskania).

Popioły lotne ze spalania węgla kamiennych czy brunatnych otrzymywane są w konwencjonalnych procesach paleniskowych. Są one zawarte w powstałej po spalaniu węgla mieszaninie pyłowo-gazowej, z której frakcja pyłowa (a więc popiół lotny) jest wytrącana głównie elektrostatycznie (w elektrofiltrach) [2]. Zdeponowane na składowiskach, często pozostające bez odpowiedniego zabezpieczenia przed działaniem czynników zewnętrznych, popioły stanowią niestety bardzo duże zagrożenie dla środowiska naturalnego, dlatego też poszukuje się nowych sposobów ich wykorzystania głównie w przemyśle budowlanym, jak również w metalurgii. Prognozuje się, że przy światowym poziomie wykorzystania węgla do produkcji energii elektrycznej na poziomie od 25% do 40% nastąpi w najbliższym trzydziestoleciu wzrost ilości spalanego węgla do ok. 10 560 mln ton w 2030 roku, co przełoży się bezpośrednio na wzrost ilości ubocznych produktów spalania węgla do około 950 mln ton [3]. Obecnie uboczne produkty spalania, zwłaszcza popioły lotne, należą do najbardziej uniwersalnych surowców będących źródłem glinokrzemianów, koncentratów metali, paliw i wypełniaczy, itp., których właściwości użytkowe zależą między innymi od rodzaju i jakości paliwa, warunków spalania i sposobów oczyszczania spalin [4].

W literaturze funkcjonują różne kryteria podziału popiołów, głównie ze względu na ich skład chemiczny, zawartość części palnych oraz różne nazewnictwo poszczególnych składników. W przypadku popiołów pochodzących z krajów europejskich warto zwrócić uwagę na prace zespołu pod kierownictwem N. Moreno, który dokonał starannej analizy próbek pochodzących z największych elektrowni i ciepłowni węglowych na starym kontynencie, natomiast wyniki tych analiz zawarł w pracy [5]. Można również znaleźć dane dotyczące badań popiołów amerykańskich [6], izraelskich [7], indyjskich [8], tureckich [9,10], a nawet koreańskich [11]. Ogólnie wiadomo, że popioły lotne mają bardzo zróżnicowany skład chemiczny [2]. Większość pierwiastków występuje w postaci związanej. Najczęściej skład chemiczny popiołów podaje się w formie tlenkowej [1]. Podstawowym składnikiem popiołów jest faza szklista, którego zawartość przekracza nawet 80% wag. Szkło w popiołach lotnych jest zbliżone do szkła krzemionkowego, także do krzemianowo-glinowego przypominającego szkło żuźlowe [12]. Poza  $\text{SiO}_2$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$  istotne znaczenie mają także wapń, magnez, niewielkie ilości żelaza, alkalia i siarka. Dodatkowo popioły lotne zawierają ogromną liczbę pierwiastków, które ze względu na udział można określić jako śladowe, a ich zawartość oscyluje od kilku do kilkudziesięciu części na milion cząsteczek [ppm].

W popiołach stwierdza się także obecność pierwiastków radioaktywnych. Wśród faz krystalicznych jako najważniejsze podaje się: kwarc, mullit, metakaolinit, magnetyt, hematyt, spinele Al-Mg, wusyt, pirotyt [1, 5, 7, 9, 10]. Z węgla kamiennego z reguły uzyskuje się popioły zasobne w  $\text{SiO}_2$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , a z węgla brunatnego - na ogół bogatsze w CaO. Cząstki popiołów są najczęściej kuliste, o średnicy zwykle w przedziale 1–100  $\mu\text{m}$ , przy czym wielkość cząstek silnie zależy od surowca węglowego. Wielu autorów uważa jednak, że pod względem mikrostrukturalnym proszek pyłu lotnego stanowi heterogeniczną mieszaninę dwóch typów cząsteczek: mikrogranulek i mikrosfer. S. Diamond [13] dopuszcza wręcz kilka rodzajów cząsteczek. T. Ratajczak [14] dzieli cząstki na sześć postaci morfologicznych. Popioły pod względem składu fazowego są bardzo zróżnicowane nawet w obrębie poszczególnych ziaren. W elektrowniach użytkujących węgiel kamienny uzyskiwane są z reguły popioły zasobne w  $\text{SiO}_2$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (rodzaj *k*). Popioły otrzymywane ze spalania węgla brunatnych, wykazując dużą zawartość CaO i  $\text{SO}_3$ , odpowiadają rodzajowi *w* (wapniowemu), z czego część reprezentuje rodzaj *g* (glinowy), wykazując przy tym wysoką zawartość  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Zdecydowana większość otrzymywanych obecnie popiołów lotnych w Polsce to popioły rodzaju *k* (krzemianowe) wytwarzane w elektrowniach, gdzie spalany jest węgiel kamienny, i wykorzystywane gospodarczo niemal w 100% [3].

Możliwości zastosowania popiołu lotnego z węgla kamiennego zależą także w dużym stopniu od jego fizycznych właściwości. Szczególnie istotna jest duża powierzchnia właściwa, rzędu 2000–3000, a niekiedy nawet do 6000  $\text{m}^2/\text{kg}$ , przez co materiał ten charakteryzuje się dobrą aktywnością pucolanową (niekiedy są one nazywane sztuczną pucolaną) [2]. Właściwości pucolanowe są szczególnie istotne w takich zastosowaniach, jak: produkcja kruszyw, cementów, betonów czy spoiw niskocementowych.

Najciekawsze z punktu widzenia zastosowań odlewniczych właściwości fizyczne popiołów lotnych to: gęstość i właściwości termiczne. Niska masa właściwa, w porównaniu z alternatywnymi materiałami, pozwala na obniżanie gęstości kompozytu złożonego z układu: metal/popiół lotny. Wysokie temperatury topnienia, mięknięcia i niski współczynnik przewodzenia ciepła dają natomiast możliwość zastosowania do wytwarzania mas formierskich i mikrosferowych mieszanin izolacyjnych [1]. Występująca niestabilność składu chemicznego i mineralogicznego popiołów, która zależy od wielu czynników: począwszy od rodzaju surowca, temperatury spalania kotłowego, miejsca składowania odpadów - stanowi jednak dość istotną przeszkodę w przemysłowym wdrożeniu rozwiązań kompozytowych. Każda doba kontaktu z wilgocią atmosferyczną i gazami obecnymi w powietrzu może powodować zmiany w strukturze i chemizmie popiołów [4]. Dodatkowym czynnikiem niekorzystnie rzutującym na właściwości gotowych wyrobów kompozytowych jest obecność w popiołach frakcji organicznych lub węgla niezwiązanego. Wysoka temperatura procesu powoduje ich utlenianie lub rozkład, którym towarzyszy emisja gazów prowadzących do pojawienia się różnego rodzaju wad odlewniczych, porowatości gazowej i aglomeracji cząsteczek zbrojenia kompozytu. Niezależnie od tego popiół lotny jako produkt odpadowy powstały w procesie spalania węgla staje się obecnie istotnym problemem dla środowiska naturalnego. Z drugiej strony, popiół lotny to unikalny, naturalny materiał służący do ekonomicznej produkcji nowoczesnych, lekkich materiałów. Dlatego też informacje na temat reaktywności popiołu lotnego z różnymi rodzajami stopionych metali mają ogromne praktyczne znaczenie zarówno dla przemysłu, jak i dla energetyki.

W przemyśle kompozytów metalowych osiągnięto już istotny poziom specjalizacji a producenci wykorzystują różnorodne metody ich wytwarzania. Najczęściej

stosowana jest infiltracja ciśnieniowa ceramicznych kształtek porowatych, tzw. preform, metody metalurgii proszków oraz mieszanie mechaniczne i procesy napawania [15]. Prowadzone od wielu lat w Instytucie Odlewnictwa badania nad rozwojem metalowych kompozytów odlewniczych zbrojonych pyłami lotnymi typu ALFA zaowocowały pomyślnym przeprowadzeniem prób wytworzenia takich kompozytów na drodze: mieszania mechanicznego, prasowania w stanie ciekłym, infiltracji ciśnieniowej porowatych preform popiołu lotnego oraz metalurgii proszków. Jak dotychczas, najlepiej udokumentowanym procesem odlewniczego wytwarzania kompozytów ALFA jest prasowanie w stanie ciekłym, m.in. z uwagi na fakt, że zapewnia on maksymalnie jednorodny charakter otrzymywanych mikrostruktur oraz minimalizuje efekt ewentualnych nieciągłości materiałowych, rzutuujących na końcowe właściwości użytkowe gotowych wyrobów. Uważa się ponadto, że jest to również najbardziej opłacalny i wszechstronny proces otrzymywania kompozytów na bazie stopów aluminium.

Sposób wytwarzania kompozytów ALFA zastosowany w niniejszej pracy zwany jest mechanicznym stopowaniem. Jest to wieloetapowy proces oparty na metalurgii proszków, wstępujący w wielu wariantach, jak opisano w pracach [16–19]. Mechaniczne stopowanie polega na syntezie składników kompozytu w specjalnie skonstruowanych młynach, często zwanych attritorami.

W przypadku procesu mechanicznego stopowania istotne jest dobranie odpowiednich parametrów w celu otrzymania wyrobu o zadanym składzie, strukturze i właściwościach mechanicznych. Do parametrów tych należą: udział wagowy poszczególnych składników wsadu, atmosfera ochronna i temperatura, ważna jest również prędkość obrotowa i materiał narzędzi roboczych młyna (np. mielników).

Do niewątpliwych zalet mechanicznego stopowania, wymienianych w literaturze, należą:

- jednorodna drobnoziarnista struktura gotowych wyrobów;
- homogeniczny rozkład bardzo drobnych ziaren (o średnicy nawet poniżej 1  $\mu\text{m}$ );
- możliwość uzyskiwania stopów metali o niskiej wzajemnej rozpuszczalności w stanie stałym, jak i w ciekłym;
- możliwość stopowania materiałów niebezpiecznych, łatwopalnych (z uwagi na niską temperaturę pracy oraz obecność atmosfer ochronnych) [16,18,19].

Z istniejących opracowań literaturowych wynika, że materiały kompozytowe otrzymane drogą mechanicznego stopowania wykazują wyższą umowną granicę plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie oraz lepsze właściwości plastyczne w porównaniu z materiałami odlewanyymi [20]. Istnieją przesłanki do stwierdzenia, że w warunkach odpowiednio dużych i dynamicznie zmieniających się obciążeń w młynie kulowym następuje dokładne wymieszanie składników stopu osnowy z frakcją pyłową. Powstaje drobnoziarnista struktura kompozytu o homogenicznym rozkładzie fazy zbrojącej w osnowie stopu.

Przeprowadzone na wytworzonych kompozytach ALFA badania stworzyły okazję przetestowania zupełnie nowej zaawansowanej techniki, mającej swój precedens w inżynierii materiałowej, choć nie na tak dużą skalę, jak to ma miejsce w naukach medycznych – tomografii komputerowej. Wykorzystane do badań urządzenie NANOTOM jest tomografem komputerowym wysokiej rozdzielczości stosowanym w badaniach struktur materiałów monolitycznych, kompozytów oraz struktur biologicznych i geologicznych. Tomografia komputerowa jest narzędziem użytecznym także w analizie

materiałów stykowych oraz połączeń spawanych. Wykorzystując metodę tomografii komputerowej, uzyskano możliwość obrazowania przestrzennego (3D) badanych materiałów kompozytowych.

## Materiały i metodyka badań

Sprowadzony z elektrociepłowni Skawina odpadowy popiół lotny poddano wstępnej obróbce cieplnej (wyprażanie w temperaturze 900°C przez okres 12 godzin), mającej na celu usunięcie wilgoci oraz pozostałych substancji palnych. Użyty do syntezy kompozytu ALFA popiół lotny w chwili dostarczenia cechował się następującym składem chemicznym i właściwościami fizykochemicznymi (tab. 1):

*Tabela 1. Skład chemiczny i właściwości fizykochemiczne popiołu lotnego z elektrociepłowni Skawina (ul. Piłsudskiego 10, 32-050 Skawina)*

*Table 1. Chemical composition and physico-chemical properties of fly ash from Skawina Power Plant (Piłsudskiego Str., 32-050 Skawina, Poland)*

Lp.	Oznaczenie	Jednostka	Wartość
1	SiO <sub>2</sub>	% wag.	44,01
2	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		12,28
	w przeliczeniu na Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>		12,48
	w przeliczeniu na Fe		9,27
3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		26,83
4	CaO		5,04
5	MgO		2,21
6	SO <sub>3</sub>		0,67
7	straty w prażeniu		3,03
8	wilgotność	0,11	
9	gęstość	g/cm <sup>3</sup>	2,23

Popiół po obróbce cieplnej został umieszczony wraz z proszkiem aluminiowym w wysokoenergetycznym młynie kulowym (rys. 1) w celu wzajemnego wymieszania i połączenia według zasad mechanicznej syntezy. Wstępne próby prowadzone w trakcie badań z uwzględnieniem różnych parametrów pracy młyna, przy założeniu maksymalnego udziału fazy zbrojącej w otrzymanym materiale, pokazały, iż możliwe będzie wprowadzenie około 25% wag. popiołu lotnego przy czasie stopowania dochodzącym do 24 godzin. Wykorzystując możliwości urządzenia, mielenie prowadzono w atmosferze ochronnej, ograniczającej w znacznym stopniu efekt utleniania ziaren proszku metalu, który mógł wydatnie osłabić efekt łączenia się proszku metalu z cząsteczkami popiołu lotnego.



Uwzględniając parametry pracy urządzenia, maksymalne obciążenie oraz pojemność komór roboczych, pojedynczy wsad proszku metalu i popiołu lotnego wynosił 1 kg, przy ciężarze kul mielących (tzw. mielników) wynoszącym 4,5 kg. Próby syntezy materiału przy większych zawartościach fazy zbrojącej nie dały zadowalającego rezultatu, ze względu na brak oznak pojawienia się zjawiska łączenia ziaren proszku metalu, niezbędnego do powstania granulatu zawierającego fazę ceramiczną.



a)

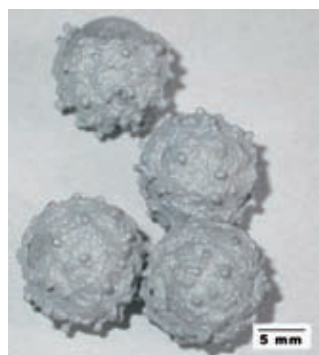


b)

Rys. 1. Wysokoenergetyczny młyn kulowy (a) z widocznym ramieniem roboczym (b)

Fig. 1. High-energy ball mill (a) with well-visible operating arm (b)

W trakcie procesu mielenia proszku aluminium z popiołem lotnym zaobserwowano zjawisko przywierania wsadu do elementów roboczych młyna. W efekcie następowało zmniejszenie wydajności procesu, ze względu na pozostawanie części otrzymanego materiału na ściankach komory, jak również na kulach stalowych (rys. 2).



Rys. 2. Kule mielące (mielniki) z widoczną osadzoną na ich powierzchni warstwą kompozytu ALFA25

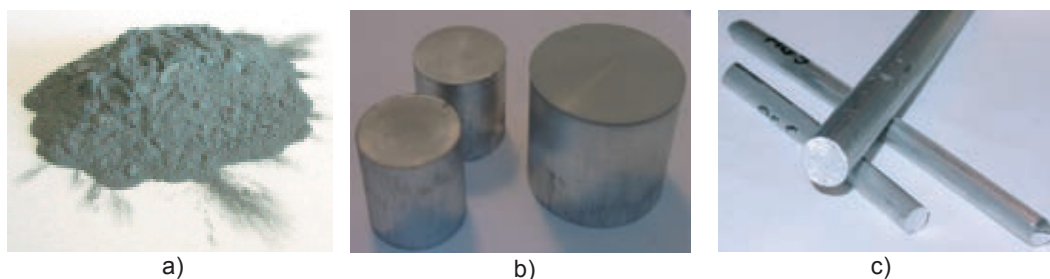
Fig. 2. Milling balls with well visible layer of ALFA 25 composite deposited on their surface

Niezbędne stało się oczyszczanie wnętrza komór roboczych oraz mielników, co wydłużało czas eksperymentu. W literaturze nie znaleziono sposobów rozwiązania tego problemu. W procesie mechanicznej syntezy otrzymano materiał kompozytowy, zawierający do 25% wag. popiołu lotnego.

## Synteza metodami przeróbki plastycznej

Zaprawę kompozytową przygotowano zgodnie z procedurą przedstawioną na wstępie poprzedniego rozdziału. Do przygotowania zaprawy kompozytywnej jako osnowę wybrano sproszkowane z gatunku aluminium A8 o czystości 99,998%, stosowane w przeróbce plastycznej. Następnie, wykorzystując metodę wyciskania na gorąco, w której temperatura, ciśnienie i odkształcenie materiału powodują scalenie się proszków w materiał lity, wytworzono próbki kompozytowe w postaci drutów. Proces wyciskania współbieżnego prowadzono na prasie hydraulicznej o sile maksymalnej 600 kN, przy użyciu specjalnie zaprojektowanych i wykonanych narzędzi. W skład zestawu narzędziowego wchodziły: matryca do wstępnego zagęszczania materiału na zimno o średnicy 40 mm oraz narzędzie do wyciskania współbieżnego na gorąco wyposażone w recypient o średnicy 44 mm oraz zestaw matryc dla prętów o średnicach od 8 do 12 mm.

Proces konsolidacji plastycznej na gorąco przebiegał dwuetapowo. Proszki były w pierwszej kolejności zagęszczane, prasowane na zimno w matrycy stalowej (siła prasowania około 400 kN). Następnie wypraski były formowane we „wlewki”, zamknięte w koszulce ze stopu aluminium, do procesu wyciskania współbieżnego. „Wlewki” te nagrzewano do temperatury 430–450°C i wyciskano z nich pręty o średnicy 12 mm (siła wyciskania około 200–300 kN). Schemat (etapy) procesu konsolidacji plastycznej przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Etapy konsolidacji plastycznej na gorąco (a - mieszanina proszków Al (A8) i popiół lotny, b - wlewki przygotowane do procesu wyciskania, c - pręty wyciśnięte)

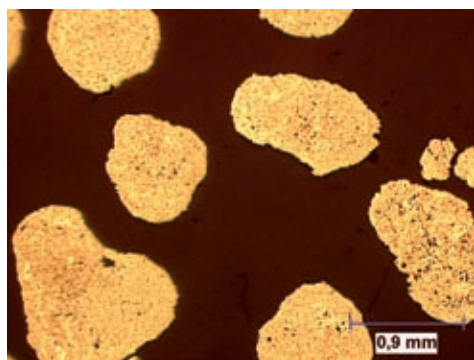
Fig. 3. Individual stages of hot plastic consolidation (a - mixture of powdered Al (A8) and fly ash b - billets ready for the extrusion process, c - extruded rods)

Konsolidacja plastyczna na gorąco stosowana jest do wytwarzania materiałów, które produkowane tradycyjnymi metodami metalurgicznymi nie spełniają wymagań, jakie są im stawiane bądź nie jest możliwe wytworzenie ich w inny sposób.

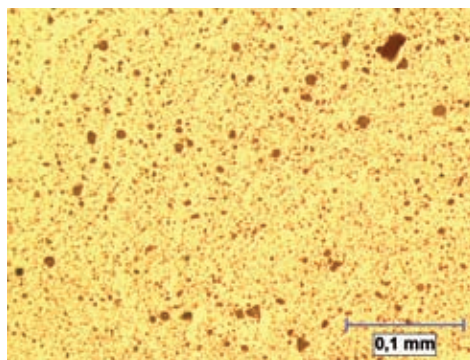
## Wyniki badań

### *Analiza struktury metodą mikroskopii optycznej*

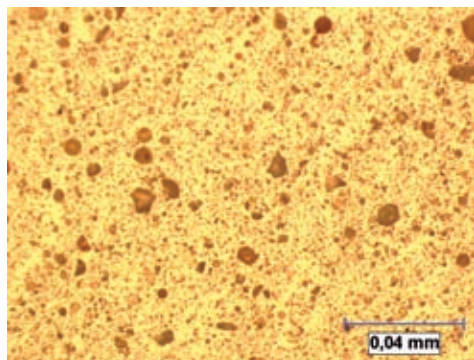
Wykonane badania strukturalne wykazały równomierny rozkład fazy zbrojącej w otrzymanym materiale (rys. 4). Nie stwierdzono występowania obszarów charakteryzujących się zbyt dużą koncentracją cząsteczek ceramicznych, mogących być początkiem powstawania niekorzystnego zjawiska aglomeracji na etapie wprowadzania granulatu do ciekłego metalu. Na obrazach mikrostruktur widoczne są obszary z cząsteczkami popiołów o takich samych rozmiarach jak w materiale wyjściowym, co świadczy o ograniczonej możliwości rozdrobnienia zbrojącej fazy ceramicznej pomimo wielogodzinnego procesu mechanicznego stopowania w wysokoenergetycznym młynie kulowym.



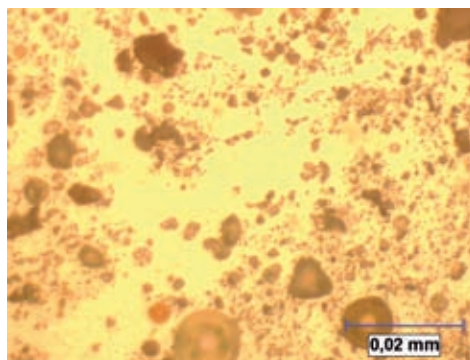
a)



b)



c)



d)

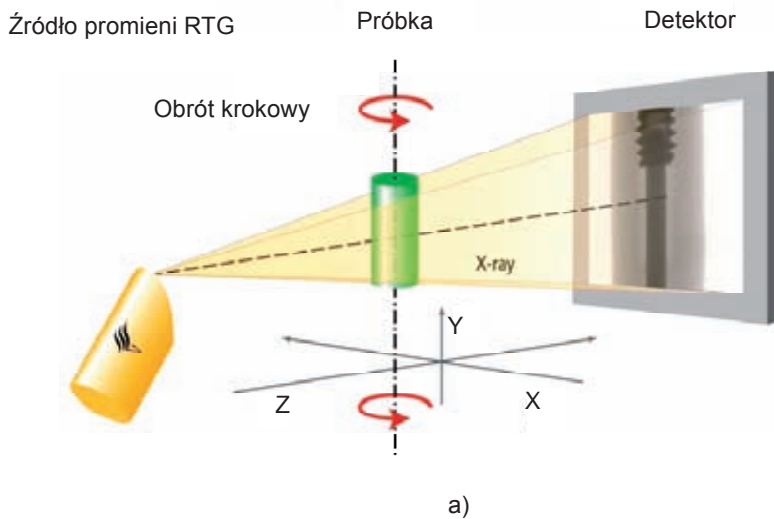
Rys. 4. Mikrostruktura kompozytu ALFA25 otrzymanego metodą mechanicznej syntezy przy różnych powierzchniach

Fig. 4. Microstructure of ALFA 25 composite fabricated by mechanical synthesis of products with different surface areas



*Analiza mikrostruktury metodą tomografii komputerowej (CT)*

Próbki cylindryczne o średnicy 12 mm i długości 120 mm, powstałe w wyniku procesu konsolidacji plastycznej na gorąco, prześwietlono za pomocą urządzenia NANOTOM (rys. 5). Stosowano napięcie przyspieszające o wartości 120 kV oraz natężenie 14  $\mu$ A. Czas ekspozycji wynosił 50 minut, rozdzielczość przestrzenną ustalono na poziomie 14  $\mu$ m. Obraz badanej próbki zrekonstruowano z 800 zdjęć (rys. 6).



b)

Rys. 5. Urządzenie NANOTOM służące do przestrzennego obrazowania struktury kompozytów [21]: a - schemat prześwietlania, b - widok ogólny urządzenia

Fig. 5. NANOTOM device used for spacial imaging of composite structure [21]: a – X-raying scheme, b – general view of the tool



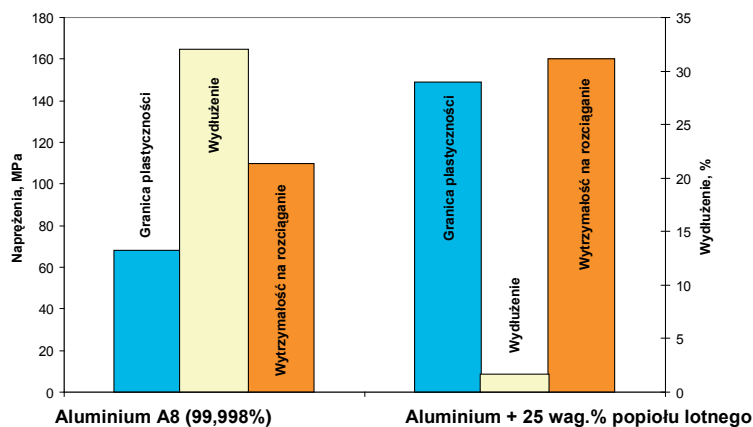
Rys. 6. Przestrzenny rozkład (3D) fazy zbrojącej w kompozycie ALFA25

Fig. 6. Spatial distribution (3D) of reinforcing phase in ALFA25 composite

Na podstawie obrazu 3D próbki cylindrycznej, stwierdzono nagromadzenie fazy zbrojącej w pobliżu osi prętów kompozytowych. W skali makro może to być spowodowane specyfiką procesu zastosowanej przeróbki plastycznej. Rozkład fazy zbrojącej w określonym obszarze ma charakter jednorodny, co wpływa na wzrost właściwości mechanicznych kompozytu w porównaniu do materiałów osnowy. Przymuszczenie dalsze rozproszenie fazy zbrojącej w przekroju mogłoby spowodować dalszy wzrost właściwości.

#### *Badania właściwości mechanicznych*

Porównawcze badania wytrzymałościowe czystego aluminium i kompozytu ALFA25 poddanego stopowaniu w młynie kulowym wykazały istotny wzrost parametrów wytrzymałościowych (rys. 7). W stosunku do osnowy kompozytu stwierdzono wzrost wartości granicy plastyczności prawie o 100% a wytrzymałości o około 50%. Spadek wydłużenia do bardzo niskiego poziomu spowodowany jest najprawdopodobniej wysokim udziałem fazy zbrojącej, obniżającej właściwości plastyczne materiału w trakcie odkształcenia plastycznego. Tak istotny wzrost właściwości wytrzymałościowych materiału, praktycznie nieosiągalny innymi metodami, może być spowodowany nie tylko ultradispersyjnym rozdrobnieniem osnowy oraz fazy zbrojącej, ale również przebiegiem reakcji, w wyniku których tworzą się nanowydzielania krystalicznego tlenku glinu, umacniającego materiał na poziomie nanokrystalicznym [20].



Rys. 7. Wybrane właściwości fizyczne aluminium i kompozytu ALFA25 (czas stopowania 12 h) po przeróbce plastycznej na gorąco

Fig. 7. Selected physical properties of aluminium and ALFA25 composite (alloying time - 12 h) after hot plastic consolidation

## Wnioski

Jednym z podstawowych problemów wytwarzania metalowych materiałów kompozytowych zbrojonych dyspersyjnie jest uzyskanie jednorodnego rozkładu fazy zbrojącej w osnowie metalowej. Dyspersyjna faza zbrojąca ma tendencję do gromadzenia się w skupiska stykających się ze sobą cząstek. Takie skupiska zawierające zazwyczaj od kilkunastu do kilkudziesięciu cząsteczek nazywane są aglomeratami, a zjawisko ich powstawania - aglomeracją. Niezależnie od przyczyny, wywołującej niejednorodny rozkład fazy zbrojącej, owa niejednorodność niekorzystnie wpływa na właściwości kompozytu, zwłaszcza na jego właściwości wytrzymałościowe, ponieważ powstawanie obszarów o wysokiej gęstości cząstek ceramicznych sprzyja pękaniu. Materiał kompozytowy badany w niniejszej pracy, otrzymany metodą mechanicznego stopowania, charakteryzuje się dobrym rozkładem fazy zbrojącej w całej objętości. Otrzymany w procesie przeróbki plastycznej na gorąco materiał posiada wyraźnie wyższe właściwości wytrzymałościowe (granica plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie) w porównaniu z materiałami monolitycznymi otrzymanymi w procesach odlewniczych.

Badania wykonane za pomocą tomografu komputerowego próbek kompozytów ALFA25 zbrojonych odpadowymi popiołami lotnymi wykazały homogeniczny rozkład cząstek fazy ceramicznej w całej objętości badanej próbki. Nie stwierdzono obecności aglomeratów fazy zbrojącej, obniżających właściwości wytrzymałościowe kompozytów ALFA. Badania próbek kompozytowych tomografem komputerowym potwierdziły brak defektów strukturalnych oraz większych nieciągłości w badanych kompozytach.

## Podziękowania

Praca została wykonana w ramach projektu strategicznego nr POIG.01.01.02-00-015/09 pt.: „Zaawansowane materiały i technologie ich wytwarzania”, realizowanego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka w latach 2007–2013. Szczególne podziękowania dla Pana mgr inż. Adama Tchórzeza za wykonanie badań tomograficznych.

## Literatura

1. Sobczak J., Sobczak N., Przysaś G.: Zastosowanie materiałów odpadowych w odlewnictwie na przykładzie popiołów lotnych. Stan aktualny i perspektywy zastosowania, Instytut Odlewnictwa, 1999
2. Galos K., Eliaszy-Bocheńczyk A.: Źródła i użytkowanie popiołów lotnych ze spalania węgla w Polsce, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 2005, T. 21, z. 1
3. Hycnar J.J., Szczygieski T.: Perspektywy energetyki opartej o spalanie węgla, Międzynarodowa Konferencja Eurocoalash, 2008, s. 75-88
4. Żygadło M., Wodniak M.: Obserwacje zmian właściwości popiołów powęglowych w procesach wietrzeniowych, *Energetyka i Ekologia*, XI 2009
5. Moreno N., Querol X., Andres J.M., Stanton K., Towler M., Nugteren H., Janssen-Jurkovicova M., Jones R.: Physico-chemical characteristics of European pulverized coal combustion fly ashes, *Fuel*, 2005, Vol. 84, no. 11, pp. 1351–1363
6. Hower J.C., Robertson J.D., Thomas G.A., Wong A.S., Schram W.H., Graham U.M., Rathbone R.F., Robl T.L.: Characterization of fly ash from Kentucky power plants, *Fuel*, 1996, Vol. 75, no. 4
7. Nathan Y., Dvorachek M., Pelly I., Mimran U.: Characterization of coal fly ash from Israel, *Fuel*, 1999, Vol. 78, no. 2, pp. 205–213
8. Ahmaruzzaman M.: A review on the utilization of fly ash, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010, Vol. 36, no. 3, pp. 327–363
9. Erol M., Demirler U.: Characterization investigations of glass-ceramics developed from Seyitomer thermal power plant fly ash, *Journal of the European Ceramic Society*, 2003, Vol. 23, no. 5, pp. 757–763
10. Erol M., Kucubayrak S., Ersoy-Mericboyu A.: Characterization of coal fly ash for possible utilization in glass production, *Fuel*, 2007, Vol. 86, pp. 706–714
11. Lee S.H., Sakai E., Daimon M., Bang W.K.: Characterization of fly ash directly collected from electrostatic precipitator, *Cement and Concrete Research*, 1999, Vol. 29, no. 11, pp. 1791–1797
12. Kudowski W.: *Chemia cementu*, PWN, Warszawa, 1990
13. Diamond S.: The characterization of fly ashes, MRS Annual Meeting, Boston, 1981, pp. 12-23
14. Ratajczak T., Gaweł A., Górnica K., Muszyński M., Szydłak T., Wyszomirski P.: Charakterystyka popiołów lotnych ze spalania niektórych węgla kamiennych i brunatnych, *Materiały Sesji Naukowej, Masy popiołowo-mineralne i ich wykorzystanie w górnictwie węglowym*, Polskie Towarzystwo Mineralogiczne, Kraków, 1999, s. 9–34
15. Sobczak J., Wojciechowski A., Rudnik D.: Infiltracja ciśnieniowa w wytwarzaniu materiałów kompozytowych, *Studium analityczno-literaturowe*, Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa, 2008
16. Soni P.R.: *Mechanical Alloying, Fundamentals and Applications*, Cambridge International Science Publishing, 2001
17. El-Eskandarany M.S.: *Mechanical alloying for fabrication of advanced engineering materials*, William Andrew Publishing, 2001

18. Iwasaki T.: Evaluation of Mechanical Energy Applied to Powders in Dry Processes and its Application for Design and Preparation of Functional Particulate Materials, Chemical Engineering Research Trends, Leon P. Berton, 2007, pp. 71–126
19. Suryanarayana C.: Mechanical Alloying and Milling, Marcel Dekker, New York, 2004
20. Sobczak J., Darlak P., Purgert R.M., Sobczak N., Wojciechowski A.: The technological aspects of ALFA composites synthesis, Solidification Processing of Metal Matrix Composites, 2006
21. <http://www.phoenix-xray.com/en/products/nanotom/nanotom.html>