

INNOWACYJNA METODA WYTWARZANIA PRĘTÓW KOMPOZYTOWYCH ZBROJONYCH MATERIAŁAMI ODPADOWYMI

Piotr Długosz, Paweł Darlak¹, Włodzimierz Bochniak²

¹Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

²Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Metali Nieżelaznych, ul. A. Mickiewicza 30,
30-059 Kraków

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań próbek materiału kompozytowego, w którym fazę zbrojącą stanowi popiół lotny będący produktem ubocznym pracy elektrowni, podczas gdy osnową jest aluminium (99,98% wag.). Aglomeraty kompozytu podstawowego uzyskane drogą syntezy mechanicznej poddano procesowi konsolidacji plastycznej na gorąco w celu przekształcenia proszku w materiał stały. Tak utworzone wypraski ogrzewano w temperaturze 350–400°C i poddawano wyciskaniu metodą KOBO®. Uzyskane cylindryczne próbki analizowano za pomocą tomografii komputerowej, która ujawniła zadowalający poziom rozkładu fazy zbrojącej przy stężeniu popiołu lotnego rzędu 25% wag. oraz brak obszarów o zbyt wysokim stężeniu cząstek ceramicznych, które mogą działać jako źródło występowania niekorzystnego zjawiska aglomeracji. Uzyskano poprawę właściwości mechanicznych próbek materiału kompozytowego w porównaniu z samym materiałem osnowy.

Słowa kluczowe: popiół lotny, kompozyty ALFA®, metoda KOBO®

Wprowadzenie

Celem niniejszej publikacji jest zaprezentowanie efektów prac badawczych związanych z wykorzystaniem technologii KOBO® do przetwórstwa kompozytów metalowych zbrojonych popiołami lotnymi. Dotychczasowe badania nad rozwojem kompozytów typu ALFA® i MAGFA® zaowocowały pomyślnym przeprowadzeniem prób wytworzenia tego typu materiałów na drodze: mieszania mechanicznego, prasowania w stanie ciekłym, infiltracji ciśnieniowej porowatych preform, metalurgii proszków oraz procesów przeróbki plastycznej. Potencjalne znaczenie w kwestii wytwarzania metalowych kompozytów może mieć szereg innych metod, w tym metody SPD (**S**evere **P**lastic **D**eformation), do których należy KOBO®. Opracowana na AGH metoda KOBO® polega na wywoływaniu w odkształcanym materiale cyklicznych zmian drogi odkształcenia wskutek cyklicznych zmian schematu odkształcenia [1, 2]. W konsekwencji, występuje permanentna destabilizacja struktury i dominacja zlokalizowanego plastycznego płynięcia w cyklicznie przecinających się pasmach ścinania. Według tej procedury możliwe jest prowadzenie niskotemperaturowych („na zimno”) procesów kształtowania plastycznego z prędkością

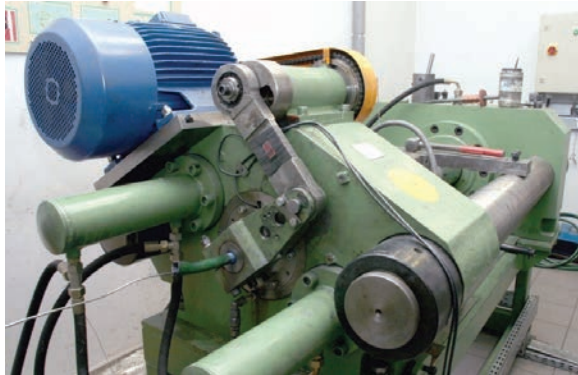
i stopniem przerobu znacznie wyższym niż w procesach wysokotemperaturowych, zaś produkt uzyskuje drobnoziarnistą, jednorodną strukturę i korzystne właściwości mechaniczne. Metoda KOBO® może być stosowana podczas plastycznego kształtowania materiałów trudno odkształcalnych, do których należą kompozyty ALFA® i MAGFA®, w typowych procesach przeróbki plastycznej, takich jak: wyciskanie, prasowanie, kucie, walcowanie czy ciągnięcie [2]. Technologia KOBO® może być wykorzystana do bezpośredniego przetwarzania złomu aluminiowych puszek do postaci drutów (z pominięciem fazy ciekłej) [3]. Z powodzeniem prowadzono próby przetwarzania odpadów: po obróbce wiórowej, folii, a nawet materiałów proszkowych lub rozdrobnionych [4].

Kompozyty typu ALFA® (z ang. **AL** – *aluminium* - **FA** – *fly ash*) i MAGFA® (z ang. **MAG** – *magnesium* - **FA** – *fly ash*) składają się z fazy zbrojącej zbudowanej z odpadowych popiołów lotnych z elektrowni oraz osnowy zbudowanej odpowiednio ze stopów aluminium i stopów magnezu [5]. Ze względu na niską gęstość oraz interesujący kompleks właściwości fizycznych, chemicznych (duża zawartość krzemionki i tlenku glinu) i mechanicznych, popioły lotne stanowią doskonały surowiec na materiał fazy zbrojącej w kompozytach metalowych. Otrzymywane w konwencjonalnym procesie spalania węgla popioły znajdują się w mieszaninie pyłowo-gazowej, z której frakcja pyłowa (a więc popiół lotny) jest wytrącana elektrostatycznie (w elektrofiltrach) [6]. 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. Znane są skuteczne metody unieszkodliwiania i gospodarczego wykorzystania tych odpadów, stosowane z powodzeniem w kraju i za granicą. Korzysta z nich między innymi przemysł budowlany i drogownictwo. Zupełnie nowym podejściem do zagospodarowania popiołów lotnych jest wytwarzanie kompozytów metalowych metodami odlewniczymi oraz przy użyciu takich metod przeróbki plastycznej, jak kucie czy też wyciskanie współbieżne [7]. Kompozyty typu ALFA® cechują: podwyższona odporność na szoki cieplne, obniżony współczynnik rozszerzalności cieplnej, wysoki poziom właściwości tribologicznych, obniżone przewodnictwo cieplne, obniżony ciężar właściwy, podwyższona twardość i sztywność, niskie koszty wytwarzania, wynikające z faktu korzystania z materiałów odpadowych [8]. Wadą kompozytów ALFA®, zwłaszcza tych o dużej zawartości popiołów, wytwarzanych w stanie ciekłym jest kruchość obniżająca właściwości wytrzymałościowe, natomiast znaczna porowatość cechuje kompozyty uzyskane w procesie mechanicznego stopowania [9], której nie da się wyeliminować zwykłym prasowaniem, natomiast spiekanie nie zapewnia korzystnych warunków łączenia i dopasowywania cząstek materiału. Korzystnym zatem wydaje się być wsparcie procesów metalurgii proszków procesami przeróbki plastycznej lub wręcz zastąpienie, na przykład procesu spiekania, przeróbką plastyczną na gorąco.

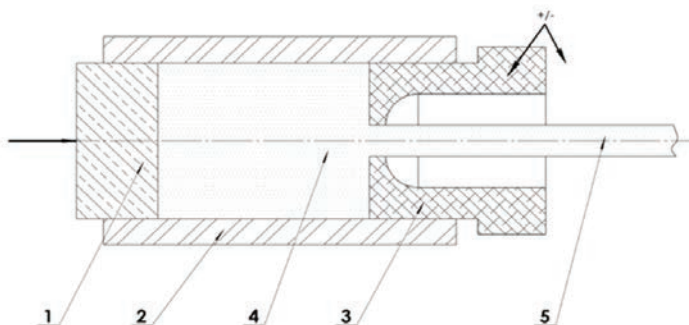
Przedstawiona w niniejszym artykule procedura dotyczy realizacji procesu przetwórstwa metalowych kompozytów zbrojonych popiołami lotnymi metodą KOBO® obejmującą przeróbkę plastyczną drogą wyciskania z zastosowaniem matrycy poruszanej rewersyjnie wokół swej osi. Zastosowany wariant technologii został wybrany na podstawie opisanych w literaturze przesłanek, dotyczących heterogenicznego odkształcenia w warunkach zmiennych obciążeń oraz jego wpływu na jakość kształtowanej struktury. Proces nie był optymalizowany, gdyż nigdy wcześniej nie realizowano wyciskania kompozytów typu ALFA® i MAGFA® poprzez cyklicznie obracaną matrycę.

Metodyka

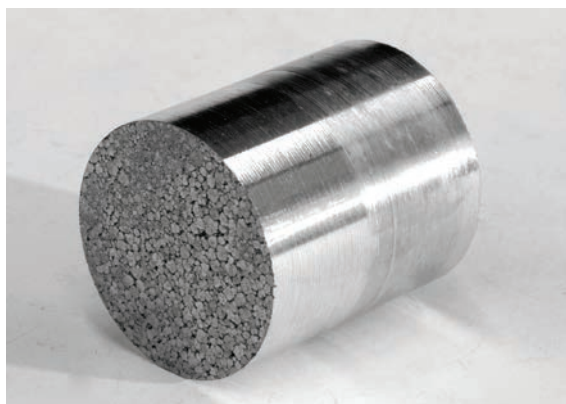
W procesie mechanicznej syntezy otrzymano materiał kompozytowy, składający się z osnowy aluminiowej (Al z gatunku A8 o czystości 99,998%) oraz zbrojenia w postaci popiołu (do 25% wag.). Materiał ten poddano konsolidacji plastycznej na gorąco, na specjalnie przygotowanym stanowisku w celu scalenia proszków na materiał lity. Uformowane wypraski o średnicy 40 mm (rys. 3) nagrzewano do temperatury 350 i 400°C i poddawano wyciskaniu współbieżnemu, na prasie z rewersyjnie skręcaną matrycą typu KOBO® (rys. 1, 2). W procesie wyciskania, w którym stopień przerobu wynosił $\lambda = 45$, realizowano dodatkowy ruch matrycy z częstotliwością 5 Hz, natomiast kąt skręcenia ustalono na 8°, przy prędkości liniowej stempla $V = 0,5$ mm/s, w pierwszym wariancie i odpowiednio $V = 1$ mm/s w drugim. Uzyskane próbki cylindryczne (rys. 4) o średnicy 6 mm poddano badaniom mikrostruktury na mikroskopie optycznym, a także analizie tomograficznej z wykorzystaniem urządzenia NANOTOM. Próbki badano również pod względem wytrzymałości w statycznej próbie rozciągania.



Rys. 1. Stanowisko do przetwórstwa materiałów metalicznych metodą KOBO®



Rys. 2. Schemat procesu wyciskania metodą KOBO®: 1 – tłok, 2 – pojemnik, 3 – matryca rewersyjnie skręcana, 4 – wsad, 5 – gotowy pręt



Rys. 3. Widok gotowego do wyciskania wsadu



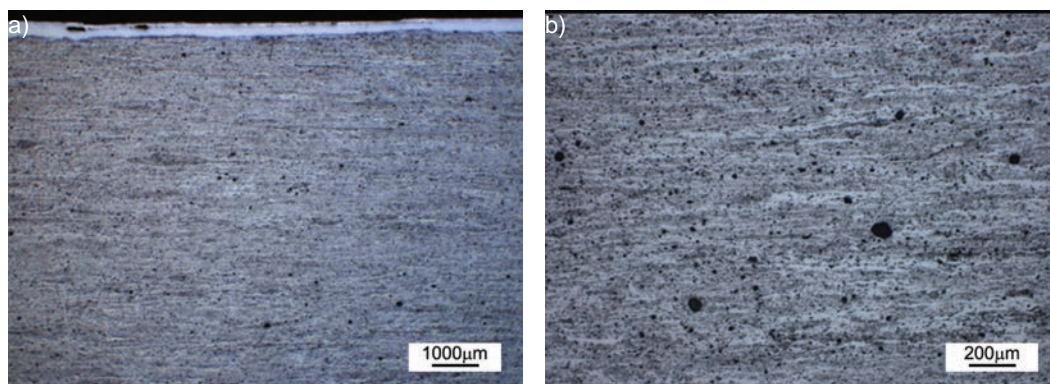
Rys. 4. Widok prętów kompozytowych wytworzonych metodą KOBO®

Wyniki badań i ich dyskusja

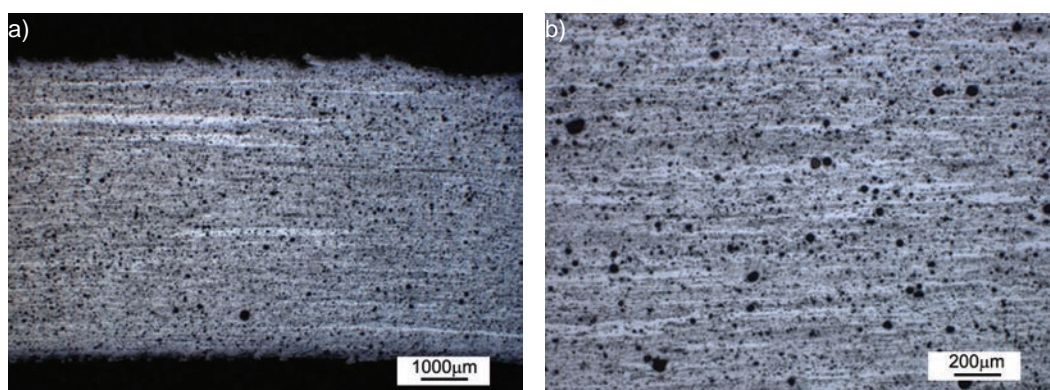
Na podstawie przeprowadzonych prób technologicznych stwierdzono, że podczas wyciskania metodą KOBO® w temperaturze 350 i 400°C zachodzą korzystne mechanizmy odkształceniowe o charakterze dynamicznym. Wskutek dodatkowego, obustronnego obracania matrycy realizowane jest znacznie większe odkształcenie, niż wynikałoby to jedynie z uwzględnienia współczynnika λ . Przemieszczające się i przecinające pasma ścinania przyczyniają się do likwidacji większych skupisk cząstek popiołów lotnych oraz rozdrobnienia niektórych dużych cząstek (rys. 7a, b), które w konwencjonalnym wyciskaniu zachowywałyby niezmienną postać. Przedstawiona na rysunkach 5–7 mikrostruktura próbek kompozytowych odznacza się dużą jednorodnością rozmieszczenia cząsteczek popiołu lotnego w osnowie z aluminium, której ziarna zostały silnie wydłużone w procesie wyciskania. Rysunki 8–9, stanowiące tomograficzną rekonstrukcję objętości kompozytów, potwierdzają dobre rozproszenie fazy zbrojącej. W badanych próbkach nie stwierdzono obecności aglomeratów fazy zbrojącej obniżających właściwości wytrzymałościowe kompozytów ALFA®, jednakże na rysunku 9 widoczne są zarzewia pęknięć

propagujących na zewnątrz badanych prętów. Defekty, o których mowa, zostały przedstawione również na rysunku 4. Występują one najczęściej na powierzchni wyciskanych kształtowników w postaci charakterystycznych złuszczeń i pęknięć, i można przyjąć, że są skutkiem intensywnej lokalizacji plastycznego płynięcia oraz niekorzystnym doborem prędkości i temperatury wyciskania. Takie negatywne efekty pojawiają się nie tylko podczas końcowego etapu rozciągania, kiedy powstanie złomu rozdzielczego jest czymś zupełnie oczywistym, ale także w trakcie walcowania czy nawet wyciskania, pomimo panującego w tym procesie trójosiowego stanu naprężeń ściskających.

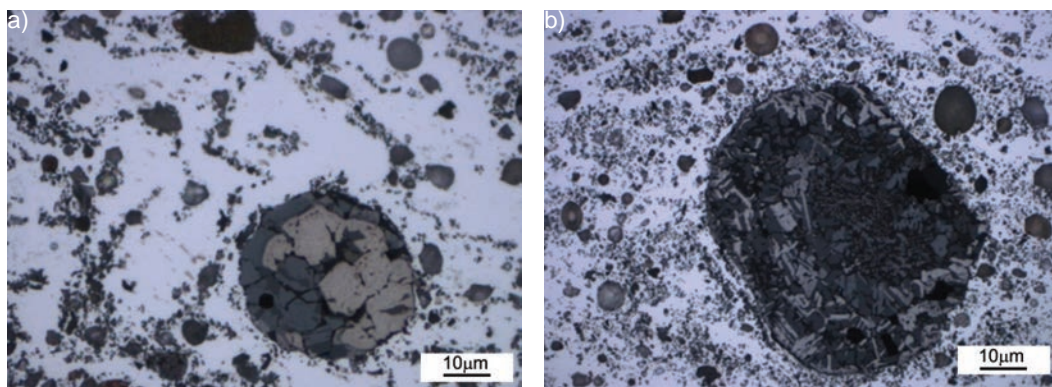
Wybrane wyniki badań wytrzymałościowych uzyskane w statycznej próbie rozciągania umieszczono w tabeli 1 oraz na wykresie porównawczym przedstawionym na rysunku 10. Na ich podstawie stwierdzono wzrost wytrzymałości oraz uplastycznienie próbek kompozytowych typu ALFA25 wyciskanych na prasie KOBO®, względem próbek wykonanych wyłącznie z metalu osnowy, oraz próbek kompozytowych typu ALFA25 wyciskanych konwencjonalnie, a więc bez dodatkowego skręcania matrycy.



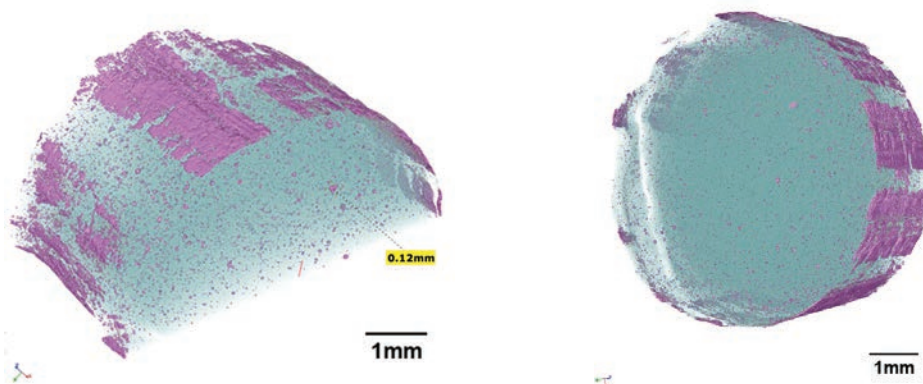
*Rys. 5. Mikrostruktura kompozytu ALFA25: a) KOBO® w temperaturze 350°C, pow. 12,5x
b) KOBO® w temperaturze 350°C, pow. 50x*



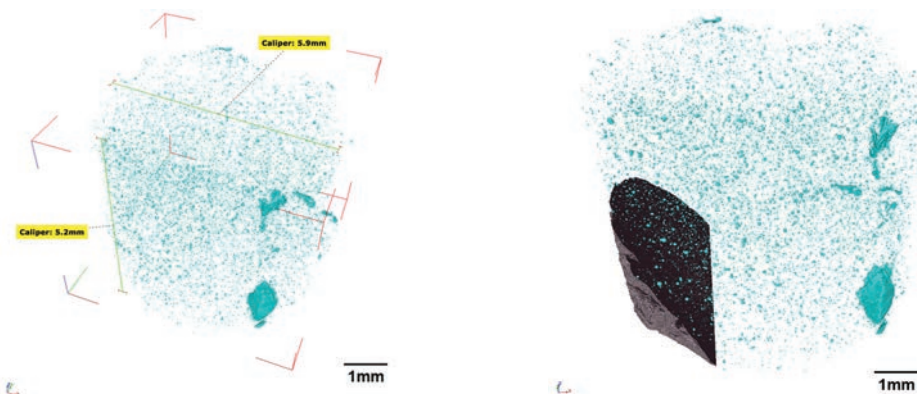
*Rys. 6. Mikrostruktura kompozytu ALFA25: a) KOBO® w temperaturze 400°C, pow. 12,5x
b) KOBO® w temperaturze 400°C, pow. 50x*



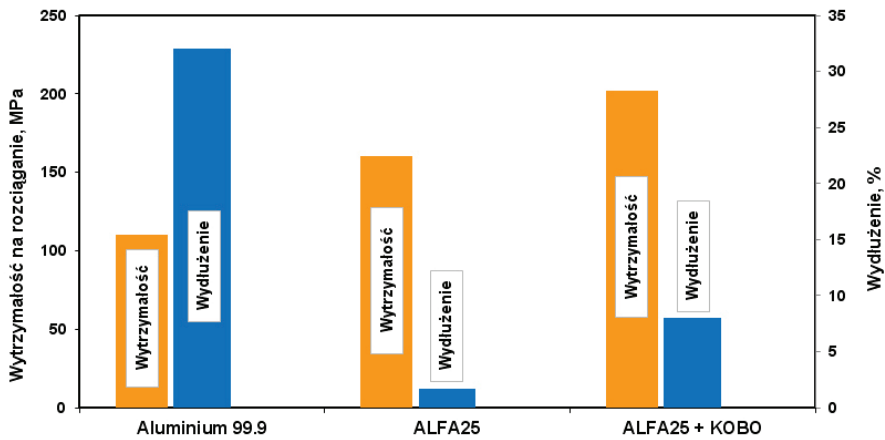
Rys. 7. Mikrostruktura kompozytu ALFA25: a) KOB0® w temperaturze 400°C, pow. 1600x
b) KOB0® w temperaturze 400°C, pow. 1000x



Rys. 8. Rekonstrukcja objętości uzyskana po analizie tomograficznej kompozytu ALFA25 plus KOB0® (350°C)



Rys. 9. Rekonstrukcja objętości uzyskana po analizie tomograficznej kompozytu ALFA25 plus KOB0® (400°C)



Rys. 10. Wybrane właściwości fizyczne prętów z czystego aluminium i kompozytu ALFA25 wyciskanego konwencjonalnie oraz metodą KOBO®

Tabela 1. Parametry wytrzymałościowe wybranych prętów kompozytowych wytworzonych metodą KOBO®

Lp.	Próbka	R_m , MPa	Odształcenie przy maks. sile, %	Odształcenie przy zerwaniu, %	$R_{p0,2}$, MPa
1.	1a KOBO® 350°C	201,95	8,00	8,42	87,68
2.	1b KOBO® 350°C	194,73	6,87	6,93	192,53
3.	5 KOBO® 400°C	211,71	12,42	12,79	4,81

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań strukturalnych, tomograficznych oraz mechanicznych stwierdzono, że w warunkach cyklicznie zmieniających się obciążeń wywołanych poprzez dodatkowy rewersyjny ruch matrycy możliwe jest uzyskanie gotowego wyrobu kompozytowego (druetu) o dużej jednorodności rozkładu fazy zbrojącej. Należy przy tym podkreślić, że przy tak dużej zawartości popiołów lotnych uzyskano materiał o wysokiej wytrzymałości oraz plastyczności względem materiałów wstępnie konsolidowanych plastycznie oraz wyciskanych w sposób tradycyjny. Nie zmienia to faktu, że przeprowadzony proces typu KOBO® miał charakter pilotażowy, a więc niewykluczający obecności wad, w tym przypadku wad powierzchniowych w postaci złuszczeń i pęknięć. Zarejestrowano również pewną rozbieżność w wynikach badań właściwości mechanicznych. Rozwiązanie tego typu problemów mieści się w zakresie dalszych badań obejmujących projektowanie i wykonanie narzędzi do wyciskania oraz dobór parametrów ich pracy. Otwarty zostaje przy tym nowy obszar związany z wykorzystaniem niezwykle atrakcyjnej technologii do powtórnego wykorzystania i przetwarzania materiałów odpadowych.

Podziękowania

Praca została wykonana w ramach Zadania V.6.1 „Zaawansowane materiały kompozytowe na bazie metali lekkich typu MAGFA i ALFA zbrojone popiołami lotnymi” realizowanego w projekcie „Zaawansowane Materiały i Technologie ich Wytwarzania” ZAMAT, współfinansowanym przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

Literatura

1. *Sposób wyciskania materiałów*, Korbel A., Bochniak W., Polska, 30.12.1995, Patent nr 168018.
2. *Method of plastic forming of materials*, Korbel A., Bochniak W., USA, 14.04.1998, U.S. Patent No. 5,737,959; EU, 23.08.2000, European Patent No. 0711210.
3. Stalony-Dobrzański F., Ostachowski P., Bochniak W.: *Utylizacja aluminiowych puszek po napojach*. Recykling, 2006, Vol. 6, nr 9, s. 40–42.
4. Korbel A., Bochniak W.: *Wytwarzanie wyrobów w procesie wyciskania wiór odpadowych*. Materiały z konferencji „Teoretyczne i praktyczne problemy zagospodarowania odpadów hutniczych”. Krynica, maj 2001.
5. Sobczak J.J., Sobczak N., Przysaś G.: *Zastosowanie materiałów odpadowych w odlewnictwie na przykładzie popiołów lotnych. Stan aktualny i perspektywy zastosowania*. Instytut Odlewnictwa, Kraków, 1999.
6. Galos K., Uliasz-Bocheńczyk A.: *Źródła i użytkowanie popiołów lotnych ze spalania węgla w Polsce*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 2005, Vol. 21, nr 1, s. 23–42.
7. Długosz P., Darlak P., Siewiorek A., Sobczak J.J.: *Kompozyty ALFA wytworzone metodą mechanicznej syntezy – Analiza rozkładu fazy zbrojącej za pomocą mikrotomografii komputerowej*. Prace Instytutu Odlewnictwa, 2010, Vol. L, nr 3, s. 39–51.
8. Rohatgi P.K., Kim J.K., Gupta N., Alaraj S., Daoud A.: *Compressive characteristics of A356/fly ash cenosphere composites synthesized by pressure infiltration technique*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006, Vol. A37, No. 3, pp. 430–437.
9. Guo R.Q., Rohatgi P.K., Nath D.: *Preparation of aluminium-fly ash particulate composite by powder metallurgy technique*. Journal of Material Science, 1997, Vol. 32, No. 15, pp. 3971–3974.

AN INNOVATIVE METHOD FOR THE FABRICATION OF COMPOSITE RODS REINFORCED WITH WASTE MATERIALS

Piotr Długosz, Paweł Darlak¹, Włodzimierz Bochniak²

¹*Foundry Research Institute, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Cracow, Poland*

²*University of Science and Technology, Department of Non-Ferrous Metals, ul. A. Mickiewicza 30, 30-059 Cracow, Poland*

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 aluminum (99,98 wt.%). 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 350–400°C and extruded by KOBO® method. The obtained cylindrical samples were analyzed 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 characterized 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 was achieved compared with the sole matrix material.

Keywords: fly ash, ALFA® composites, KOBO® method

Introduction

The purpose of this publication is to present the results of research related with the KOBO® technology for processing metal matrix composites reinforced with fly ash. Previous research on the development of ALFA® and MAGFA® composites resulted in successful trials of the fabrication of this type of materials by mechanical mixing, squeeze casting, pressure infiltration of porous preforms, powder metallurgy and plastic forming processes. Potential importance in the fabrication of metal matrix composites can have numerous other methods, like SPD (Severe Plastic Deformation), which includes the KOBO® process. KOBO® method invented at the AGH consists in developing in the processed material cyclic changes in the deformation path due to cyclic changes in the deformation pattern [1, 2]. The result is a permanent destabilization of the structure with the dominance of localized plastic flow in the shear bands intersecting in cycles. By this procedure it is possible to carry out low-temperature („cold”) processes of plastic forming at a speed and with the processing ratio much higher than in the high-temperature

processes, obtaining – moreover - a product with fine-grain, homogeneous structure and favorable mechanical properties. KOBO® method can be used for the plastic forming of hardly deformable materials, which include ALFA® and MAGFA® composites, when formed by the conventional processes such as extrusion, pressing, forging, rolling or drawing. [2] KOBO® technology can be used for direct processing of aluminum can scrap to the form of wire (omitting the liquid phase) [3]. Tests were successfully carried out on processing of waste chips from the machining process, foils, and even powders or particulate materials [4].

ALFA® composites (**AL** – *aluminum* - **FA** – *fly ash*) and MAGFA® composites (**MAG** – *magnesium* - **FA** – *fly ash*) consist of a reinforcing phase, which is the waste fly ash from power plants, and a matrix composed of aluminum or magnesium alloys, respectively [5]. Due to the low density and interesting complex of the physical, chemical (high content of silica and alumina) and mechanical properties, fly ash is excellent raw material for the reinforcing phase in metal matrix composite materials. Obtained in a conventional coal combustion process, fly ash is present in a mixture of dust and gas, from which the dust fraction (and hence fly ash) is electrostatically precipitated (in electrofilters) [6]. Unfortunately, deposited in landfills, and often resting there without adequate protection against the effect of external factors, the ash creates a serious threat to the environment, and therefore, new ways to use it are looked for. There are effective and economic methods of disposal of this waste, applied successfully in the country and abroad. It is used, among others, in the construction industry and in road building. A completely new approach to the management of the waste fly ash is the fabrication of metal matrix composites by casting methods or using such methods of plastic forming as forging and direct extrusion [7]. ALFA® composites feature increased resistance to thermal shocks, low coefficient of thermal expansion, high tribological properties, low thermal conductivity, low specific gravity, increased hardness and stiffness, and low manufacturing costs, resulting from the use of waste materials [8]. The disadvantage of ALFA® composites produced in liquid form, especially when the content of ash is high, is brittleness reducing the strength properties. On the other hand, a significant level of porosity is typical in the composites obtained by mechanical alloying [9]. It cannot be eliminated by regular pressing, while sintering does not provide favorable conditions for linking and matching of material particles. Therefore, it seems advantageous to support the processes of powder metallurgy with plastic forming processes, or even replace some of them, for example, the sintering process replaced with hot plastic working.

The procedure disclosed in this article relates to a method for processing the metal matrix composites reinforced with fly ash in KOBO® process, including plastic forming by extrusion using a die moving in reverse way around its axis. The applied variant of the technology has been selected on the basis of the conditions described in the literature for heterogeneous deformation under variable loads and its impact on the quality of the shaped structure. The process was not optimized, because never before ALFA® and MAGFA® composites had been extruded through a die reversed in cyclic movement.

Methodology

In the process of mechanical alloying, a composite material consisting of an aluminum matrix (aluminum of A8 grade with 99.998% purity) and the reinforcement in the form of fly ash (25 wt.%) was produced. This material was subjected to the hot plastic consolidation on a specially designed stand to obtain from powder a solid material. The formed compacts with a diameter of 40 mm (Fig. 3) were preheated to 350°C and 400°C and subjected to direct extrusion on a press with reversed twisted KOBO®-type die (Figs. 1 and 2). In the extrusion process with a ratio of $\lambda = 45$, the die was performing an additional movement at a frequency of 5 Hz, and the rotation angle was set at 8°, with the linear punch speed $V = 0.5$ mm/s and $V = 1$ mm/s in variants I and II, respectively. The resulting cylindrical samples (Fig. 4) with a diameter of 6 mm were examined for microstructure on an optical microscope and also analyzed by computed tomography using a NANOTOM device. Samples were also tested for mechanical properties in a static tensile test.

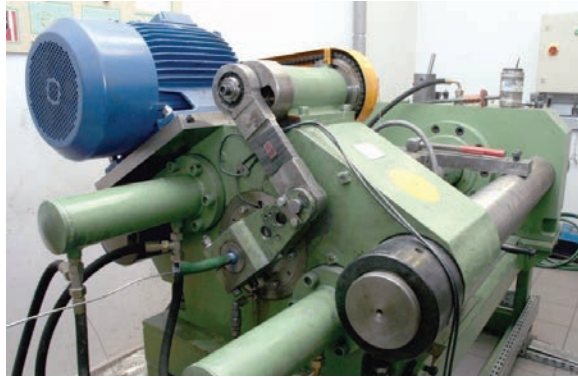


Fig. 1. Stand for processing of metallic materials by KOBO® method

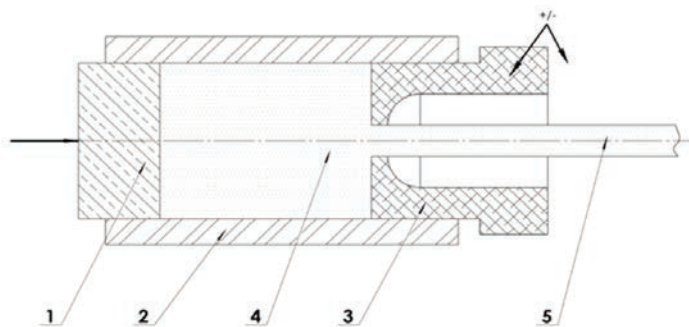


Fig. 2. Schematic diagram of the extrusion process by KOBO® method: 1 – punch, 2 – container, 3 – reversed twisted die, 4 – stock, 5 – extruded rod

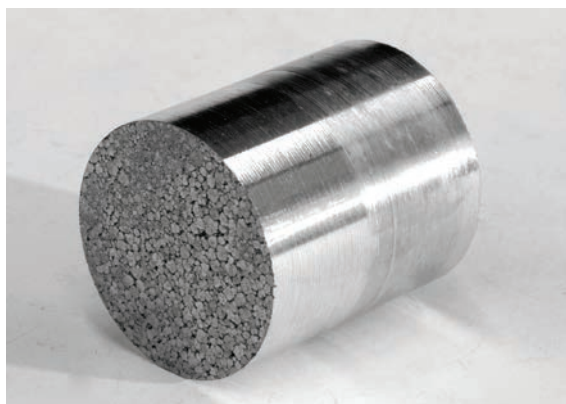


Fig. 3. Stock ready for extrusion



Fig. 4. A view of composite rods produced by KOBO® method

Results and discussion

On the basis of technological tests, it was found that during the extrusion by KOBO® method at a temperature of 350°C and 400°C, the beneficial strain mechanisms of a dynamic character occur. Owing to the additional bilateral die rotation, much greater strain is obtained than the one resulting only from the value of the λ ratio. The moving and intersecting shear bands contribute to the elimination of large concentrations of the fly ash particles and induce fragmentation of some large particles (Fig. 7a, b), which in a conventional extrusion process would preserve an unaltered form. The composite sample microstructure shown in Figures 5–7 is characterized by a high uniformity of the distribution of the fly ash particles in an aluminum matrix, the grains of which have acquired a distinctly elongated shape in the extrusion process. Figures 8–9, which are tomographic reconstructions of composite volume, confirm good dispersion of the reinforcing phase. The examined samples did not reveal the presence of the clusters of a reinforcing phase, deteriorating the mechanical properties of ALFA® composites, although Figure 9 shows the onset of cracks propagating to the outside of the examined

rods. The defects referred to are also visible in Figure 4. They occur most often on the surface of extruded profiles in the form of typical spallings and cracks, and it can be assumed that they are the result of local intensive plastic flow and missed choice of the extrusion speed and temperature. Such adverse effects occur not only during the final stage of stretching, when the creation of intermediate fracture is quite obvious, but also during rolling or even extrusion, in spite of the triaxial state of compressive stresses existing in the latter processes.

Some results obtained in the static tensile test are shown in Table 1 and compared graphically in Figure 10. Based on these results, an increase in strength and plastic behavior of ALFA25 composite samples extruded on a KOBO® press was stated, compared with samples made of the sole matrix metal and composite samples of ALFA25 type conventionally extruded without the additional twisting of die.

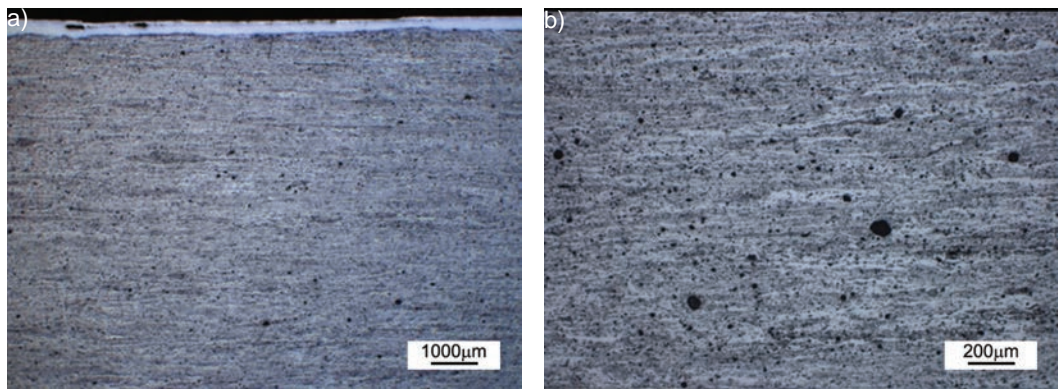


Fig. 5. Microstructure of ALFA25 composite: a) KOBO® at a temperature of 350°C, at a magnification of 12.5x, b) KOBO® at a temperature of 350°C, at a magnification of 50x

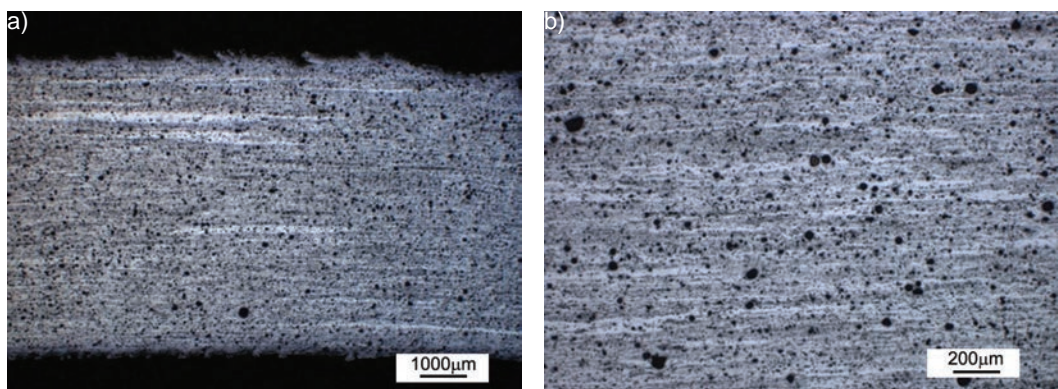


Fig. 6. Microstructure of ALFA25 composite: a) KOBO® at a temperature of 400°C, at a magnification of 12.5x, b) KOBO® at a temperature of 400°C, at a magnification of 50x

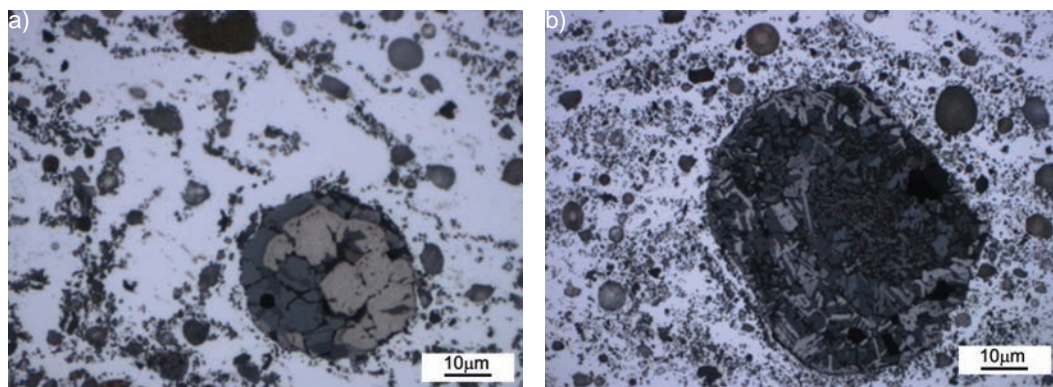


Fig. 7. Microstructure of ALFA25 composite: a) KOB0® at a temperature of 400°C, at a magnification of 1600x, b) KOB0® at a temperature of 400°C, at a magnification of 1000x

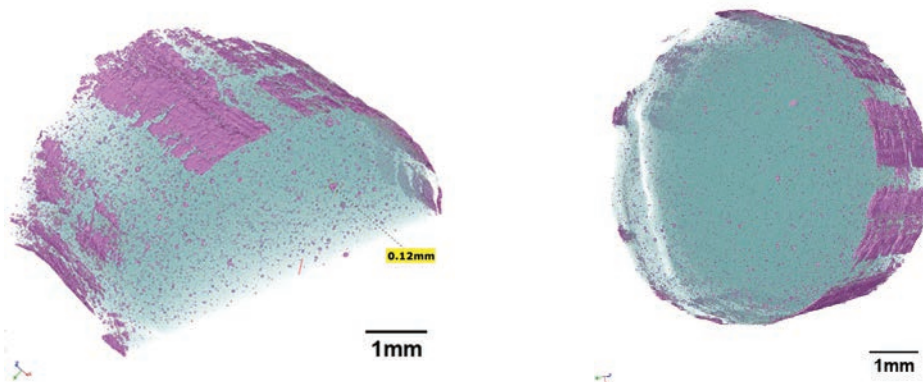


Fig. 8. Volume reconstruction after computed tomography done on ALFA25 composite plus KOB0® (350°C)

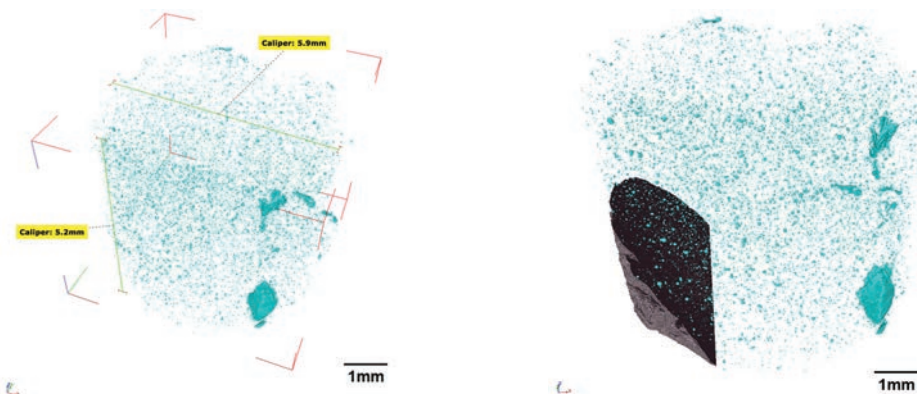


Fig. 9. Volume reconstruction after computed tomography done on ALFA25 composite plus KOB0® (400°C)

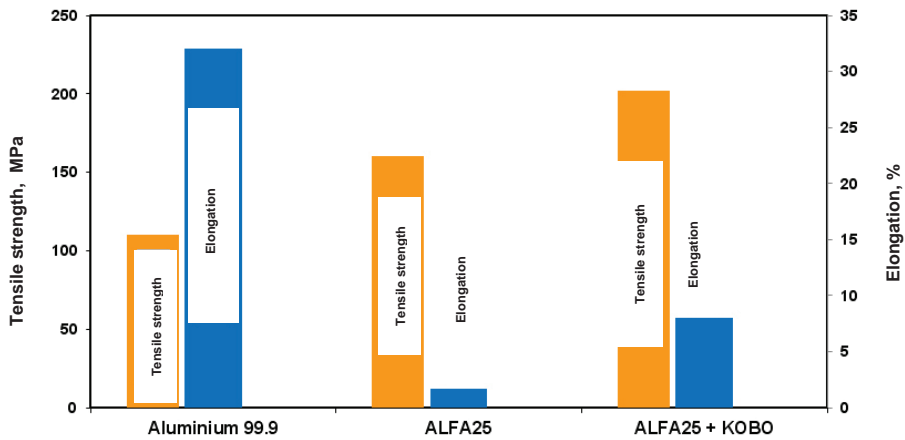


Fig. 10. Selected physical properties of rods made from pure aluminum and from ALFA25 composite extruded by conventional process vs KOBO®

Table 1. Strength parameters of selected composite rods made by KOBO® method

No.	Sample	R_m , MPa	Strain at maximum force, %	Strain at rupture, %	$R_{p0.2}$, MPa
1.	1a KOBO® 350°C	201.95	8.00	8.42	87.68
2.	1b KOBO® 350°C	194.73	6.87	6.93	192.53
3.	5 KOBO® 400°C	211.71	12.42	12.79	4.81

Conclusions

Based on the results of the structural, tomographic and mechanical studies it was stated that under the conditions of loads changing in cycles caused by an additional reversing motion of the die it is possible to obtain a finished composite product (wire) with a highly uniform distribution of the reinforcing phase. It should be noted that in spite of the fly ash content so high, the obtained material was characterized by high strength and ductility compared with materials subjected to plastic pre-consolidation and extruded in a conventional manner. This does not change the fact that the conducted KOBO® process was of a pilot character, and as such did not exclude the possible presence of defects, in this case in the form of spallings and cracks. A discrepancy in the results of the obtained mechanical properties was also reported. A solution to these problems lies in further studies involving the design and manufacture of extrusion tools and the choice of proper parameters of their operation. This means opening a new area associated with the use of an extremely attractive technology for recycling and processing of waste materials.

Acknowledgements

This study was done within the framework of Task V.6.1 “Advanced fly ash-reinforced, light metals-based composite materials referred to as MAGFA and ALFA composites”, performed under the project “Advanced Materials and Technologies of Their Manufacturing” (ZAMAT), co-financed by the European Union through the European Regional Development Fund.

References

1. *Method of extrusion of materials*, Korbel A., Bochniak W., Poland, 30.12.1995, Patent No. 168018.
2. *Method of plastic forming of materials*, Korbel A., Bochniak W., USA, 14.04.1998, U.S. Patent No. 5,737,959; EU, 23.08.2000, European Patent No. 0711210.
3. Stalony-Dobrzański F., Ostachowski P., Bochniak W.: *Recycling of aluminum beverage cans*. Recykling, 2006, Vol. 6, No. 9, pp. 40–42.
4. Korbel A., Bochniak W.: *Manufacture of products by the extrusion of waste chips*. Proceedings of the Conference on “Theoretical and practical aspects of the management of metallurgical waste”. Krynica, May 2001.
5. Sobczak J.J., Sobczak N., Przysaś G.: *The use of waste materials in foundry on the example of fly ash. Current status and prospects of application*. Foundry Research Institute, Kraków, 1999.
6. Galos K., Uliasz-Bocheńczyk A.: *The sources and the disposal of fly ash from coal combustion in Poland*. Mineral Resources Management, 2005, Vol. 21, No. 1, pp. 23–42.
7. Długosz P., Darlak P., Siewiorek A., Sobczak J.J.: *ALFA composites fabricated by mechanical alloying – Analysis of the distribution of reinforcing phase by computed microtomography*. Transactions of Foundry Research Institute, 2010, Vol. L, No. 3, pp. 39–51.
8. Rohatgi P.K., Kim J.K., Gupta N., Alaraj S., Daoud A.: *Compressive characteristics of A356/fly ash cenosphere composites synthesized by pressure infiltration technique*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006, Vol. A37, No. 3, pp. 430–437.
9. Guo R.Q., Rohatgi P.K., Nath D.: *Preparation of aluminium-fly ash particulate composite by powder metallurgy technique*. Journal of Material Science, 1997, Vol. 32, No. 15, pp. 3971–3974.