



Marek Wojtaszek*, Jarosław Durak

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

* Corresponding author. E-mail: mwojtasz@metal.agh.edu.pl

Otrzymano (Received) 13.02.2008

WYKORZYSTANIE LOGIKI ROZMYTEJ DO WYZNACZANIA PARAMETRÓW PROCESU MIESZANIA PODCZAS WYTWARZANIA METODĄ METALURGII PROSZKÓW KOMPOZYTÓW UMACNIANYCH CZĄSTKAMI

Podjęto próbę oceny możliwości zastosowania logiki rozmytej do wspomagania szybkiego doboru parametrów procesu mieszania składników w układzie cząstki proszków metali-cząstki ceramiczne. Wytworzono metodą metalurgii proszków kompozyty i określono ich wybrane własności. Jako materiał osnowy wykorzystano dwa różne rodzaje proszku; cząstki proszku aluminium o rozwiniętej powierzchni oraz podsitową frakcję proszku stopu $Al_{17}Si_5Fe_3Cu_{1,1}Mg_{0,6}Zr$ o kulistym kształcie. W roli fazy umacniającej użyto cząstek węgla krzemowego, stosując zmienny ich udział objętościowy, zależny od rodzaju materiału osnowy. Takie podejście umożliwiło analizę dwóch układów, dla których mechanizmy decydujące o równomierności rozprzodzenia fazy umacniającej w osnowie podczas mieszania są różne. Próbkę do badań wytworzono, stosując mieszanie, zagęszczanie na zimno lub na gorąco oraz wyciskanie współbieżne, przy niezmiennych dla danej pary komponentów parametrach realizacji tych procesów. Określono wpływ udziału objętościowego fazy umacniającej w osnowie na wybrane własności i struktury wyrobów. Wyniki eksperymentu dały podstawę do analizy numerycznej procesu mieszania. Ich uzupełnieniem były informacje na temat tego procesu, rozumiane jako tak zwana wiedza eksperta. W wyniku tak ujętego podejścia otrzymano bazę danych, która z inżynierskiego punktu widzenia rozumiana jest jako wiedza niekompletna, ponieważ zawiera informacje niezwyfikowane na drodze eksperymentu. Została ona wykorzystana do wyznaczenia metodą logiki rozmytej korzystnych parametrów procesu mieszania składników w układzie proszek osnowy-cząstki fazy umacniającej. Do modelowania numerycznego użyto pakietu Fuzzy toolbox, będącego integralną częścią programu Matlab.

Słowa kluczowe: metalurgia proszków, logika rozmyta, analiza numeryczna, mieszanie, kompozyty umocnione cząstkami

APPLICATION OF FUZZY LOGIC TO DETERMINE SUITABLE PARAMETERS OF MIXING PROCESS FOR COMPOSITES OBTAINED FROM POWDER REINFORCED BY CERAMIC PARTICLES BY USE OF PM METHOD

An attempt to assessment the possibilities of application of a fuzzy logic aided quick determination of mixing process parameters in a metal powder particles-ceramic particles system was made. A set of composites was obtained by use of the powder metallurgy method, then a set of chosen parameters was determined. Two different powders were used as a matrix material, the first one was the aluminium particles with expanded surface, the second one was subieve-size particles fraction of the $Al_{17}Si_5Fe_3Cu_{1,1}Mg_{0,6}Zr$ alloy with a spherical shape. Particles of silicon carbide were used as a reinforcement phase. The different volume fraction depending on the matrix material was used. Such approach made possibility to analyse two systems with different mechanisms determining uniformity of the reinforcement phase distribution. Samples were obtained using mixing, densification at the room temperature or hot densification, concurrent extrusion with fixed process parameters for each pair of the components. The influence of the volume fraction of the reinforcement phase on the chosen parameters and structure of the product was determined. The influence of the powder composition on the relative porosity of composites obtained of the extruded at the temperature of $500^{\circ}C$ and with extrusion ratio $\lambda = 4.1$ compacted semi-finished products of aluminium based powders and mixtures of this powder with silicon carbide SiC_{1000} particles with several volume fractions was estimated. The influence of the composition of powders on the abrasive wear was evaluated. The results of the experiment with addition of the information about the process (expert's knowledge) were the base for a numerical analysis of the mixing process. In a result of such data acquisition a set of information was obtained. From the engineering point of view this is a incomplete knowledge because it still contains information non verified by experiments. This knowledge could be useful in combination with the artificial intelligence methods like the fuzzy logic. For the numerical analysis the Fuzzy Toolbox from Matlab package was used.

Keywords: powder metallurgy, fuzzy logic, numerical analysis, mixing, composites reinforced by particles

WSTĘP

Stosowanie procesów opartych na metalurgii proszków umożliwia wytwarzanie wyrobów o korzystnej, drobnoziarnistej strukturze oraz dobrych własnościach, nie tylko z metali oraz ich stopów, ale również kompozytów na ich osnowie, umacnianych dyspersyjnie cząstkami lub włóknami [1]. W tym przypadku zaletą jest łatwość w komponowaniu składu i sterowaniu udziałami składników, poprzez ich mieszanie w temperaturze otoczenia. Jednak, niezależnie od niebudzących wątpliwości korzyści, stosowanie metalurgii proszków jako narzędzia wytwarzania kompozytów wiąże się z koniecznością pokonania szeregu trudności. Warunkiem uzyskania tą metodą produktów wysokiej jakości w sposób ekonomiczny jest właściwe zaprojektowanie technologii i poprawny dobór parametrów poszczególnych procesów jej realizacji [2]. W przypadku kompozytów newralgiczny punkt stanowi proces mieszania. Jego efektywność decyduje o jakości rozprowadzenia fazy umacniającej w osnowie i determinuje końcowe własności wyrobów. Występowanie w mieszaninie skupisk danego składnika lub obszarów o zaniżonym jego udziale prowadzi do osłabienia materiału, a nawet uzyskania produktu o gorszych, w porównaniu z nieumocnioną osnową, własnościach. Z kolei bezzasadne zawyżanie parametrów procesu, np. czasu mieszania, powoduje spadek wydajności, zwiększone zużycie energii, skrócenie żywotności elementów mieszalnika i może ograniczyć wielkość produkcji. W przypadku składników, które w procesie mieszania ulegają degradacji, jak kruche włókna ceramiczne, takie podejście prowadzi do pogorszenia własności produktu [2, 3].

Czynniki mające wpływ na jakość mieszaniny związane są z rodzajem mieszanych komponentów, ich morfologią oraz ze sposobem realizacji samego procesu mieszania. Z pierwszej grupy do ważniejszych zaliczyć można sposób umocnienia oraz własności komponentów, jak masa właściwa, twardość, kruchość i inne. Druga grupa czynników to przede wszystkim wielkość składników, ich kształt oraz stopień rozwinięcia ich powierzchni, a także relacje wymienionych własności między komponentami. Do ostatniej grupy należą parametry mieszania, jak czas, prędkość obrotowa, wielkość i stopień wypełnienia komory mieszalnika oraz inne, jak zastosowanie środka poślizgowego lub wprowadzenie kul do komory. Wymienione czynniki są często współzależne, w wyniku czego zamiana jednego z nich skutkuje koniecznością skorygowania innych.

Wiedza na temat zjawisk zachodzących podczas mieszania stanowi nie tylko efekt badań, ale także wynika z doświadczenia eksperta i ma charakter jakościowy, tj. pozwala na przewidzenie pewnych prawidłowości zachodzących podczas tego procesu. Przykładowo, podczas mieszania cząstek istotna różnica w ich masie właściwej spowoduje efekt segregacji grawitacyjnej. W konsekwencji nie dojdzie do prawidłowego zmie-

szania komponentów i własności produktu będą niskie. Podobny efekt nastąpi podczas mieszania komponentów o znacząco różnej wielkości, z powodu przesypywania się cząstek mniejszego składnika przez luki między większymi cząstkami. Z kolei, jeżeli duże cząstki są miękkie, a małe twarde, przy właściwie dobranych udziałach objętościowych i parametrach mieszania nastąpi nabijanie się mniejszych cząstek na większe. Gdy cząstki osnowy są duże i o silnie rozbudowanej powierzchni, a cząstki fazy umacniającej małe, będą się one mechanicznie zakleszczać na powierzchni dużych cząstek. W obu przypadkach nastąpi poprawa równomierności rozprowadzenia składników. Cechą kompozytów otrzymanych z tak przygotowanej mieszaniny jest rozlokowanie fazy umacniającej po pierwotnych granicach cząstek proszku osnowy, tj. w postaci przestrzennej siatki, o kształcie będącym wynikiem technologii wytwarzania, jak np. kucie lub wyciskanie. Prędkość mieszania poprawia równomierność rozprowadzenia składników do wartości krytycznej, a po jej przekroczeniu siła odśrodkowa ogranicza ruch składników. Prędkość krytyczna zależy od wymiarów składników, ich masy właściwej oraz od innych czynników, jak np. wielkość komory. Nadmierne wypełnienie komory mieszalnika wydłuża lub uniemożliwia mieszanie, a zbyt małe powoduje, że proces jest nieekonomiczny. Przykładów korelacji decydujących o jakości mieszaniny jest więcej.

Problem stanowi też kontrola jakości mieszanin. Analiza ilościowa lub choćby jakościowa ocena mieszaniny prowadzona z wykorzystaniem metod mikroskopii nie znajduje zastosowania, ponieważ nawet nieznaczna różnica własności fizycznych lub morfologii składników powoduje, że operacja przygotowania próbki do obserwacji wpływa znacząco na jej stan. Dlatego równomierność rozprowadzenia fazy umacniającej w osnowie można ocenić dopiero dla wyrobu, na podstawie obserwacji struktury lub badań własności. Należy też pamiętać, że uzyskanie statystycznie równomiernego rozmieszczenia fazy umacniającej w osnowie nie gwarantuje, że proces mieszania prowadzono w sposób ekonomiczny.

Złożoność czynników mających wpływ na poprawność procesu mieszania oraz trudności w bieżącej ocenie jej jakości powodują, że dobór parametrów gwarantujących uzyskanie w sposób ekonomiczny jednorodnej mieszaniny dla składników nowych lub przy zmianie ich proporcji jest trudne. Dlatego celowe jest poszukiwanie nowych rozwiązań, które cechuje elastyczność oraz zdolność ich implementacji w różnych warunkach. Jednym z możliwych jest wykorzystanie technologii informatycznych [3].

Spośród kierunków rozwoju informatyki przemysłowej, jeden z wiodących skupia się na tworzeniu oraz doskonaleniu systemów naśladujących funkcjonowanie

umysłu człowieka poprzez prace badawcze w takich obszarach, jak sztuczna inteligencja czy inżynieria wiedzy. W przypadku inżynierii wiedzy, która jest coraz szerzej wykorzystywana do wspomagania procesów technologicznych, wiedza rozumiana jest jako zbiór związków i relacji występujących w zbiorach danych. Aby wiedza źródłowa była postrzegana przez system i nadawała się do analizy, musi zostać sformalizowana za pomocą odpowiednich narzędzi matematycznych, do których należy między innymi logika rozmyta. Jest to metoda, która znajduje zastosowanie do analizy procesów, o których informacje pochodzące z eksperymentu są niekompletne, a do ich uzupełnienia konieczna jest inżynierska wiedza eksperta. Wykorzystanie logiki rozmytej jako narzędzia wspomagania procesów wytwarzania jest przedmiotem prowadzonych w świecie badań [4], także z zakresu analizy procesów metalurgii proszków [5].

BADANIA WŁASNE

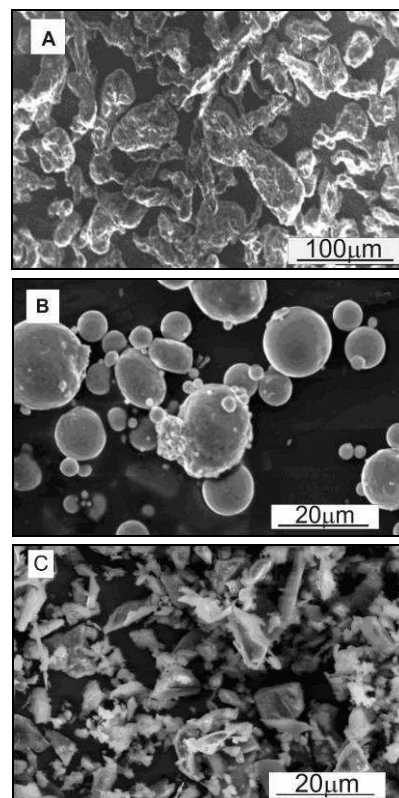
Cel badań i zakres przeprowadzonych badań

Podjęto próbę wykorzystania logiki rozmytej jako narzędzia komputerowego wspomagania doboru parametrów procesu mieszania w układzie cząstki proszku osnowy - cząstki fazy umacniającej. Celem było numeryczne opracowanie parametrów wytworzenia wsadu do kształtowania kompozytów technologią łączącą metody metalurgii proszków i przeróbki plastycznej, którego jakość, przy właściwie prowadzonym procesie dalszego formowania, pozwoli uzyskać tworzywa o korzystnej strukturze i własnościach. Zakres badań obejmował część eksperymentalną i opartą na uzyskanych wynikach analizy numerycznej. Eksperyment objął wytworzenie półwyrobów z proszków i określenie ich wybranych własności. Analizę numeryczną procesu mieszania przeprowadzono z wykorzystaniem programu Matlab Fuzzy toolbox.

Przygotowanie materiału do badań

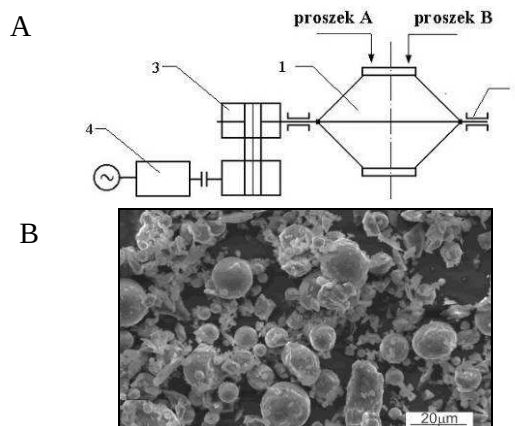
Materiał do badań dobrano w taki sposób, aby uzyskać dane do symulacji mieszania dwóch układów o różnych relacjach między własnościami składników. W tym celu w roli osnowy zastosowano dwa rodzaje proszku; rozpylany proszek aluminium RAl-1 o silnie rozwiniętej powierzchni i wielkości cząstek w zakresie $90\div 560\text{ }\mu\text{m}$ (rys. 1A) oraz podsitową frakcję rozpylanego proszku stopu $\text{Al}_{17}\text{Si}_5\text{Fe}_3\text{Cu}_{1,1}\text{Mg}_{0,6}\text{Zr}$ o kulistym kształcie cząstek i ich wielkości poniżej $40\text{ }\mu\text{m}$ (rys. 1B). Do umocnienia osnowy użyto w obu przypadkach cząstek węgla krzemowego SiC_{1000} o nieregularnym kształcie i wielkości poniżej $40\text{ }\mu\text{m}$, przy zmiennym jego udziale objętościowym, który był zależny od rodzaju proszku osnowy (rys. 1C).

Do badań odważono próbki proszków osnowy oraz cząstek węgla krzemowego w ilościach pozwalających na otrzymanie mieszanin o zawartościach fazy umacniającej wynoszących dla aluminium 5 i 10% objętościowych, a dla proszku stopu $\text{Al}_{17}\text{Si}_5\text{Fe}_3\text{Cu}_{1,1}\text{Mg}_{0,6}\text{Zr}$ 5, 10 i 20% objętościowych. Materiały mieszano na sucho w mieszalniku dwustożkowym, którego budowę przedstawiono schematycznie na rysunku 2.



Rys. 1. Morfologia cząstek proszków: A) aluminium, B) $\text{Al}_{17}\text{Si}_5\text{Fe}_3\text{Cu}_2\text{Mg}_{0,6}\text{Zr}$, C) węgla krzemowego SiC_{1000}

Fig. 1. Morphology of powders particles: A) aluminium, B) $\text{Al}_{17}\text{Si}_5\text{Fe}_3\text{Cu}_2\text{Mg}_{0,6}\text{Zr}$, C) silicone carbide SiC_{1000}



Rys. 2. (A) Schemat mieszalnika dwustożkowego: 1 - komora mieszania, 2 - łożyska, 3 - przekładnia, 4 - napęd; (B) Morfologia mieszaniny proszku stopu $\text{Al}_{17}\text{Si}_5\text{Fe}_3\text{Cu}_2\text{Mg}_{0,6}\text{Zr}$ i cząstek węgla krzemowego SiC_{1000} , w ilości 10% objętościowych

Fig. 2. (A) Two-conical mixer diagram: 1 - mixing chamber, 2 - bearings, 3 - transmission, 4 - drive; (B) Morphology of mixtures of $\text{Al}_{17}\text{Si}_5\text{Fe}_3\text{Cu}_2\text{Mg}_{0,6}\text{Zr}$ alloy powder and 10% by volume of silicone carbide SiC_{1000} particles

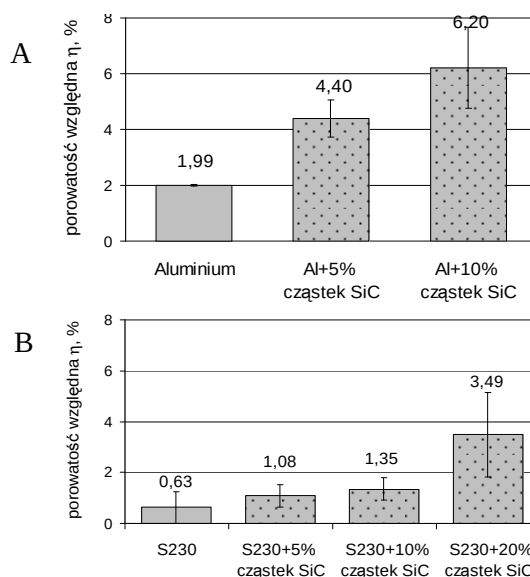
W każdym przypadku proces mieszania prowadzono w czasie 30 minut, z prędkością obrotową $0,9 \text{ s}^{-1}$ i przy wypełnieniu komory poniżej 50%. Zdjęcie przykładowej mieszaniny przedstawiono na rysunku 2B. W celu umożliwienia oceny wpływu operacji mieszania na własności kompozytów z przygotowanych mieszanin wykonano próbki do badań poprzez wstępne zagęszczanie i wyciskanie na gorąco otrzymanych półwyrobów. Dla porównania wytworzono próbki z proszków wyjściowych, stosując tę samą procedurę jak dla mieszanin. Dla aluminium i jego mieszanin zagęszczanie prowadzono w temperaturze otoczenia. Ze względu na brak możliwości sprasowania proszku stopu $\text{Al}_{17}\text{Si}_5\text{Fe}_3\text{Cu}_{1,1}\text{Mg}_{0,6}\text{Zr}$ na zimno, spowodowany jego niską plastycznością i złą formowalnością, materiał ten i jego mieszaniny zagęszczano w temperaturze 500°C . Wstępnie zagęszczone półwyroby nagrzewano do temperatury 500°C , wyciskano współbieżnie ze współczynnikiem wyciskania $\lambda = 4,1$ i chłodzono na powietrzu.

Wyznaczono porowatość i odporność na zużycie ścierne materiałów. Jakość rozmieszczenia fazy umacniającej w osnowie kompozytów oceniono na podstawie obserwacji ich struktur.

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Porowatość

Porowatości tworzyw w stanie po wyciskaniu określono metodą Archimedes'a. Wyniki pomiarów zestawiono na rysunku 3. Stwierdzono, że proszek $\text{Al}_{17}\text{Si}_5\text{Fe}_3\text{Cu}_{1,1}\text{Mg}_{0,6}\text{Zr}$ o kulistym kształcie i małej wielkości cząstek cechuje znacząco lepsza prasowalność w porównaniu do cząstek proszku aluminium. Wymiernym tego efektem jest znacznie niższa porowatość wyrobów z tego proszku i kompozytów na jego osnowie. W wyniku wprowadzenia do proszku aluminium cząstek fazy umacniającej porowatość wyrobów silnie rośnie (rys. 3A) i dla kompozytu o zawartości 10% węgla krzemu osiąga wartość 6,2%. Porowatość materiałów wytworzonych z proszku $\text{Al}_{17}\text{Si}_5\text{Fe}_3\text{Cu}_{1,1}\text{Mg}_{0,6}\text{Zr}$ (rys. 3B) lub na jego osnowie utrzymuje się na niskim poziomie do 10% udziału cząstek węgla krzemu. Przy 20% fazy umacniającej następuje wzrost porowatości, przy czym jej wartość nie przekracza 3,5%. Obserwowany dla materiałów na bazie proszku aluminium błąd pomiaru porowatości przyrasta proporcjonalnie ze wzrostem udziału fazy umacniającej. Dla tworzyw otrzymanych z wykorzystaniem proszku stopowego obserwuje się zbliżone wartości błędów do 10% cząstek fazy umacniającej i jego przyrost przy 20%. Taki charakter rozrzutu wyników pomiaru porowatości może wskazywać na stopniowy wzrost niejednorodności mieszanin wskutek podwyższania udziału objętościowego fazy umacniającej przy zachowaniu stałych parametrów mieszania.



Rys. 3. Wpływ składu chemicznego na porowatość względną wyciskanych w temperaturze 500°C i ze współczynnikiem wyciskania 4,1 wstępnie zagęszczonych półwyrobów z: A) proszku aluminium oraz mieszanin tego proszku i cząstek węgla krzemu SiC_{1000} , B) proszku stopu $\text{Al}_{17}\text{Si}_5\text{Fe}_3\text{Cu}_{1,1}\text{Mg}_{0,6}\text{Zr}$ i jego mieszanin z cząstkami węgla krzemu SiC_{1000}

Fig. 3. Influence of the chemical composition on the relative porosity of composites obtained of the extruded at the temperature of 500°C and with extrusion ratio $\lambda = 4.1$ compacted semi-finished products of: A) aluminium powder and mixtures of this powder with silicon carbide SiC_{1000} particles, B) $\text{Al}_{17}\text{Si}_5\text{Fe}_3\text{Cu}_{1,1}\text{Mg}_{0,6}\text{Zr}$ powder and mixtures of this powder with silicon carbide SiC_{1000} particles

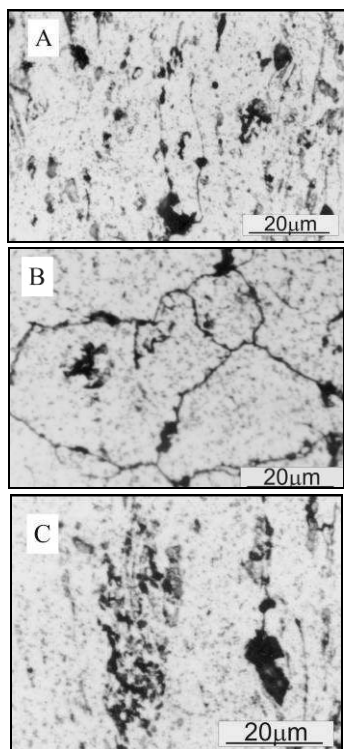
Badania metalograficzne

Dla oceny wpływu udziału objętościowego cząstek fazy umacniającej na jakość jej rozprowadzenia w osnowie przy stałych parametrach procesu mieszania, dla wyrobów z obu przyjętych do badań układów komponentów przeprowadzono badania metalograficzne. Obserwacje prowadzono metodą mikroskopii świetlnej na zglądach wzdłużnych po ich wytrawieniu. Przykładowe mikrostruktury kompozytów otrzymanych na osnowie proszku aluminium zestawiono na rysunku 4, a na osnowie proszku stopu $\text{Al}_{17}\text{Si}_5\text{Fe}_3\text{Cu}_{1,1}\text{Mg}_{0,6}\text{Zr}$ na rysunku 5.

Strukturę kompozytów na bazie proszku aluminium charakteryzuje równomierne rozmieszczenie fazy umacniającej do 5% jej udziału w osnowie (rys. 4A). Przy 10% widoczne są skupiska cząstek fazy umacniającej i obszary o zmniejszonym jej udziale (rys. 4C). Przy tym zestawieniu komponentów podczas operacji mieszania małe cząstki węgla krzemu blokowały się na silnie rozwiniętej powierzchni dużych cząstek proszku aluminium, co powodowało ich rozmieszczenie wzdłuż pierwotnych granic cząstek. Efekt ten jest szczególnie widoczny podczas obserwacji niewyciśniętej części kompozytu (rys. 4B). W przypadku próbek o zawartości do 5% fazy umacniającej kierunkowe płynięcie materiału podczas wyciskania spowodowało poprawę równomierności rozmieszczenia cząstek węgla krzemu w osnowie (rys. 4A). W wyniku zwiększenia zawartości cząstek fazy umacniającej w osnowie do

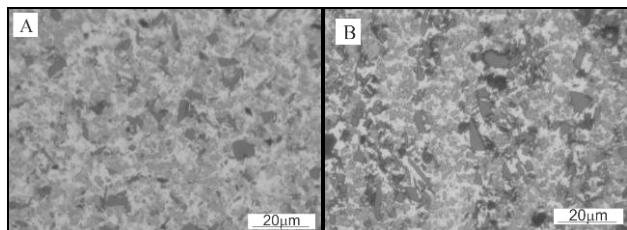
10% obserwowano jedynie rozciągnięcie ich konglomeratów zgodnie z kierunkiem płynięcia (rys. 4B).

Struktura tworzyw na osnowie stopu $\text{Al17Si5Fe3Cu1,1Mg0,6Zr}$ przy zawartości do 10% cząstek węgla krzemu jest drobnoziarnista i regularna (rys. 5A). Wprowadzenie 20% fazy umacniającej skutkuje powstawaniem jej skupisk w postaci pasm, ułożonych w kierunku wyciskania (rys. 5A). Zbliżona wielkość komponentów umożliwiła bardziej równomierne rozmieszczenie fazy umacniającej w osnowie w porównaniu do tworzyw na bazie aluminium.



Rys. 4. Struktury wyciskanych w temperaturze 500°C i ze współczynnikiem wyciskania 4,1 wstępnie zagęszczonych mieszanin proszku aluminium i cząstek węgla krzemu SiC_{1000} , w ilości: A, B) 5% objętościowych, C) 10% objętościowych. A, C) część wyciśnięta, B - obszar niewyciśnięty. Zgłady wzdłużne, trawione

Fig. 4. Structures of the extruded at 500°C and with extrusion ratio $\lambda = 4.1$ semi-finished products of compacted mixtures of aluminium powder and SiC_{1000} particles, in quantity: A, B) 5% by volume, C) 10% by volume, A,C) extruded area, B) not extruded area. Longitudinal sections, after etching

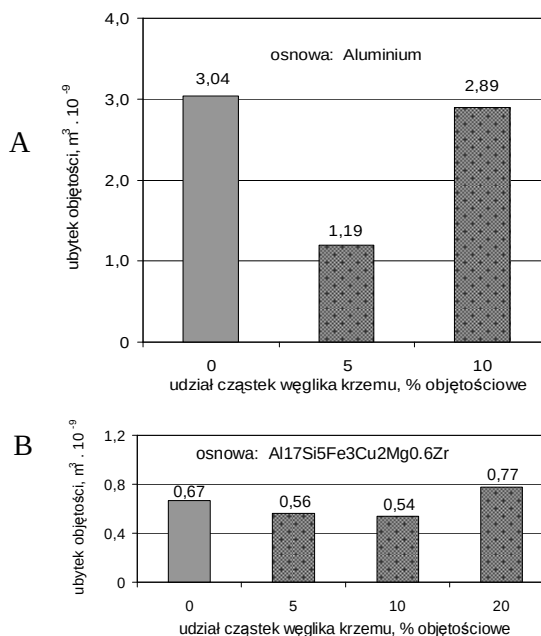


Rys. 5. Struktury wyciskanych w temperaturze 500°C ze współczynnikiem wyciskania 4,1 wstępnie zagęszczonych mieszanin proszku $\text{Al17Si5Fe3Cu1,1Mg0,6Zr}$ i cząstek SiC , w ilości: A) 10%, B) 20% objętościowych. Zgłady wzdłużne, trawione

Fig. 5. Structures of the extruded at 500°C and with extrusion ratio $\lambda = 4.1$ semi-finished products of compacted mixtures of $\text{Al17Si5Fe3Cu1,1Mg0,6Zr}$ powder and SiC_{1000} particles, in quantity: A) 10%, B) 20%. Longitudinal sections, after etching

Badania zużycia ściernego

Przeprowadzono badania porównawcze zużycia ściernego wyrobów. Do badań zastosowano tarczę o twardości 68 HRC, średnicy 125 mm i grubości 4 mm. Ścieranie prowadzono na drodze 5000 m przy prędkości obrotowej tarczy 110 obr/min. Wyniki zestawiono na rysunku 6.



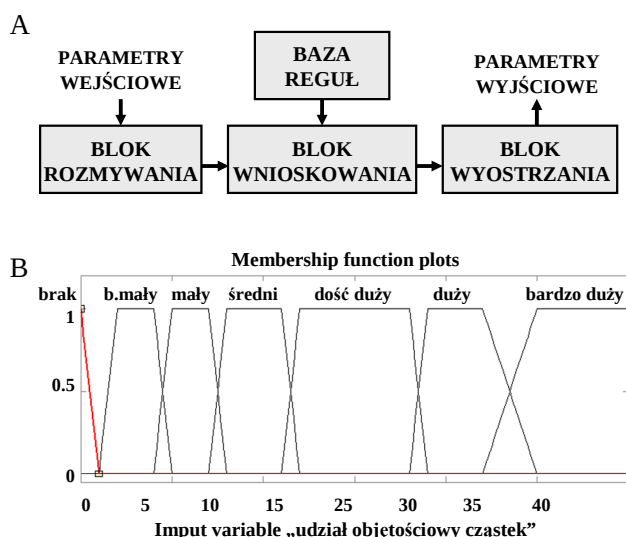
Rys. 6. Wpływ składu chemicznego na zużycie ściernie wyciskanych w temperaturze 500°C i ze współczynnikiem wyciskania 4,1 wstępnie zagęszczonych półwyrobów z: A) proszku aluminium oraz mieszanin tego proszku i cząstek węgla krzemu SiC_{1000} , B) proszku stopu $\text{Al17Si5Fe3Cu2Mg0,6Zr}$ i jego mieszanin z cząstkami węgla krzemu SiC_{1000}

Fig. 6. Influence of the chemical composition on the abrasive wear of the extruded at the temperature of 500°C and with extrusion ratio $\lambda = 4.1$ compacted semi-finished products of: A) aluminium powder and mixtures of this powder with silicon carbide SiC_{1000} particles, B) $\text{Al17Si5Fe3Cu1,1Mg0,6Zr}$ powder and mixtures of this powder with silicon carbide particles

Zużycie ściernie tworzywa otrzymanego z nieumocnionego proszku aluminium jest w przybliżeniu 4,5-krotnie większe, w porównaniu z materiałem wytworzonym z proszku stopu $\text{Al17Si5Fe3Cu1,1Mg0,6Zr}$. Wprowadzenie do aluminium osnowy 5% objętościowych cząstek węgla krzemu spowodowało obniżenie zużycia ściernego, a zwiększenie jego udziału do 10% ponowny jego wzrost (rys. 6A). Podobny jakościowo przebieg zmian zużycia ściernego wskutek zmian udziału fazy umacniającej obserwowano dla tworzyw na osnowie stopu $\text{Al17Si5Fe3Cu1,1Mg0,6Zr}$, przy czym w tym przypadku wtórne zwiększenie zużycia nastąpiło przy zawartości 20% cząstek w osnowie (rys. 6B). Badania zużycia ściernego stanowią potwierdzenie wyników obserwacji struktur. Dla obu przyjętych do badań zestawień składników wtórny wzrost zużycia ściernego stwierdzono przy udziałach objętościowych fazy umacniającej w osnowie, dla których, w przyjętych do badań parametrach, obserwowano pojawienie się w strukturze konglomeratów.

ANALIZA NUMERYCZNA PROCESU MIESZANIA Z UŻYCIEM LOGIKI ROZMYTEJ

Do analizy numerycznej wykorzystano pakiet Matlab Fuzzy toolbox ze względu na prosty graficzny interfejs, umożliwiający szybkie testowanie i implementację hipotez oraz użyteczność dostarczanych w pakiecie Matlab bibliotek programistycznych. Schemat działania systemu Matlab Fuzzy toolbox do numerycznej analizy przedstawiono schematycznie na rysunku 7A. Zgodnie z zasadami logiki rozmytej zależności między parametrami opisano przez zbiór reguł rozmytych, opartych na zdaniach warunkowych typu IF...THEN, które stanowią model lingwistyczny decydujący o funkcjonowaniu systemu. Bazę reguł opracowano na podstawie eksperymentu, danych literaturowych i informacji będących wiedzą ekspercką. Aby dane wejściowe oraz wyjściowe informacje były zrozumiałe dla systemu, definiowano je za pomocą zmiennych lingwistycznych, np. *udział objętościowy cząstek*. Graficzny zapis tego parametru przedstawia rysunek 7B.



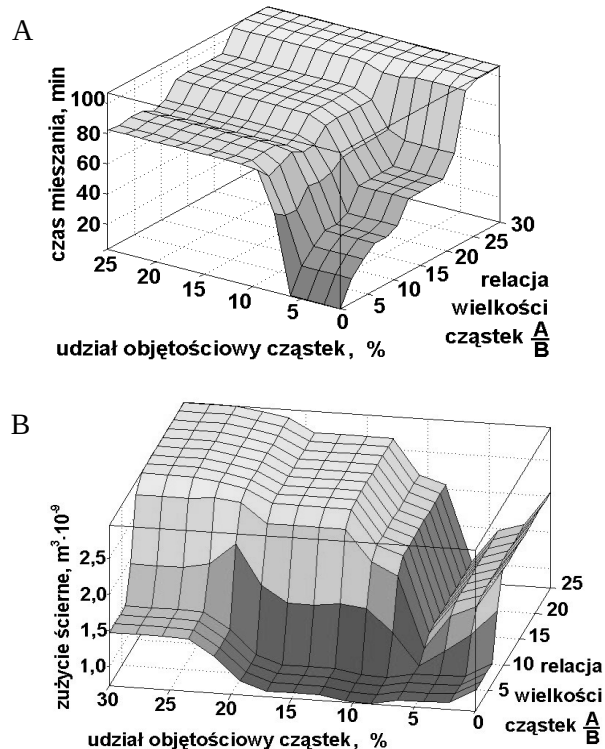
Rys. 7. A) Schemat systemu Matlab Fuzzy toolbox; B) graficzne przedstawienie parametru *udział objętościowy cząstek* jako zmiennej lingwistycznej

Fig. 7. A) Matlab Fuzzy toolbox system flowchart; B) graphical presentation of the particles volume fraction parameter as an linguistic variable

W analogiczny sposób opisano pozostałe parametry wyjściowe, jak *równomierność rozmieszczenia* i *relacja wielkości cząstek* oraz wyjściowe parametry: *zużycie ściernie*, *czas mieszania* i *porowatość*. Tym nieprecyzyjnym określeniom przypisano odpowiednie funkcje kształtu. Wyostrażanie prowadzono metodą środka ciężkości. Przykładowe zależności będące wynikiem symulacji zestawiono na rysunku 8. Mimo pewnego braku precyzji metody, czego wymiernym efektem są skokowe zmiany zależności prezentowanych na wykresach (rys. 8), w wyniku przeprowadzonej analizy numerycznej uzyskano zadowalające rezultaty. Otrzymane dane

mogą stanowić podstawę do projektowania lub modyfikacji parametrów procesu mieszania.

Dla weryfikacji wyników uzyskanych z użyciem logiki rozmytej celowe wydaje się przeprowadzenie dalszych badań z zastosowaniem zmiennego czasu mieszania składników.



Rys. 8. Przykładowe zależności uzyskane w wyniku analizy procesu mieszania cząstek metodą logiki rozmytej

Fig. 8. Examples of relationships, as the result of fuzzy logic method application for the mixing process

WNIOSKI

W świetle wyników badań nad możliwością zastosowania logiki rozmytej do wyznaczania parametrów mieszania komponentów w układzie proszek osnowy-cząstki fazy umacniającej stwierdzono, że:

1. Przyjęte do badań parametry mieszania były poprawne odpowiednio dla kompozytów na osnowie aluminium o zawartości do 5% objętościowych cząstek węgla krzemu oraz do 10% fazy umacniającej w przypadku kompozytów na osnowie stopu $\text{Al}_{17}\text{Si}_5\text{Fe}_3\text{Cu}_{1,1}\text{Mg}_{0,6}\text{Zr}$. Przy tych składach chemicznych uzyskano materiał o wysokiej gęstości względnej, korzystnej strukturze oraz podwyższonej, w porównaniu do materiału osnowy, odporności na zużycie ściernie. Dalsze zwiększenie udziału cząstek w osnowie przy niezmiennych parametrach procesu mieszania powodowało tworzenie się konglomeratów cząstek węgla krzemu, zwiększenie porowatości oraz wtórny wzrost zużycia ściernego.

2. Uzyskane w wyniku eksperymentu informacje można wykorzystać do numerycznej analizy procesu mieszania metodą fuzzy logic, a komercyjny pakiet Matlab Fuzzy toolbox dobrze nadaje się do tego celu.
3. Stosując metodę logiki rozmytej do analizy parametrów mieszania, nie jest konieczna ilościowa znajomość wszystkich czynników mających wpływ na jakość mieszaniny. Z pomocą zmiennych lingwistycznych można uzyskać zadowalający opis parametrów tego procesu.
4. Proponowana metoda analizy numerycznej mieszania umożliwia szybką modyfikację parametrów decydujących o jego poprawności przy zmianie składników, ich proporcji lub innych czynników. Mimo że elastyczność rozwiązania skutkuje spadkiem jego precyzji, w przypadku analizowanego procesu mieszania operowanie zmiennymi lingwistycznymi wystarcza do uzyskania zadowalających wyników.

Podziękowania

Praca realizowana w ramach BW prowadzonych w 2008 r. w AGH.

LITERATURA

- [1] O'Donnell G., Looney L., Production of aluminium matrix composite components using conventional PM technology, *Materials Science and Engineering* 2001, A303, 292-301.
- [2] Wojtaszek M., Wpływ kształtowania na gorąco na własności kompozytów aluminiowych wzmocnionych włóknami ceramicznymi, *Rozprawa doktorska*, Kraków 2000.
- [3] Wojtaszek M., Durak J., The application of fuzzy logic analysis to assessing the significance of mixing parameters for the PM metal - ceramic composites, *Metallurgy and Foundry Engineering* 2007, 3, 1, 23-31.
- [4] Dubois D., Prade H., *Fuzzy sets and systems - Theory and applications*, Academic Press, New York 1980.
- [5] Ramanathan S., Karthikeyan R., Gupta M., Development of processing maps for Al/SiC composite using fuzzy logic, *Journal of Materials Processing Technology* 2007, 183, 104-110.
- [6] Hopgood A.A., *Intelligent Systems for Engineers and Scientists* ed. 2, CRC Press, Boca Raton 2001.