

**Marek Wojtaszek, Jarosław Durak, Filip Pernal**

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) 06.02.2009

## BADANIE I ANALIZA METODĄ LOGIKI ROZMYTEJ PARAMETRÓW PROCESU MIESZANIA POD KĄTEM POPRAWY WŁASNOŚCI KOMPOZYTÓW OTRZYMANYCH Z PROSZKÓW

Zastosowano analizę za pomocą logiki rozmytej w roli narzędzia, pozwalającego na szybki dobór korzystnych i ekonomicznych parametrów procesu mieszania składników kompozytu w układzie cząstki stopu aluminium-cząstki ceramiczne. Do komputerowej analizy wykorzystano dane eksperymentalne. Materiałem osnowy był proszek stopu Al17Si5Fe3Cu1,1Mg0,6Zr, o kulistym kształcie i średnicy cząstek <math>< 40 \mu\text{m}</math>, a fazą umacniającą cząstki węgla krzemu o objętości względnej 10%. Mieszanie składników prowadzono przy prędkości obrotowej mieszalnika 0,2 i 0,9 s<sup>-1</sup> w czasie od 5 do 60 minut. Z przygotowanych mieszanin wykonano kompozyty, stosując w tym celu technologię zagęszczania na gorąco w matrycach zamkniętych w warunkach izotermicznych. Ocenie poddano wybrane własności kompozytów oraz przeprowadzono obserwacje ich mikrostruktur. Otrzymane zależności między przyjętymi do badań parametrami mieszania a określonymi na drodze eksperymentu własnościami wyrobów oraz jakością struktury użyto jako dane do analizy. Do ich uzupełnienia wykorzystano informacje na temat charakterystyki procesu mieszania, rozumiane jako tak zwana wiedza eksperta. Źródłem tych informacji była wiedza oparta na wynikach prowadzonych wcześniej badań oraz analizie literatury tematycznej. Przeprowadzono testową analizę z wykorzystaniem pakietu Fuzzy Toolbox, będącego częścią programu Matlab. Na podstawie jej wyników oszacowano kombinacje parametrów procesu mieszania, które umożliwiają równomierne rozproszczenie fazy umacniającej w osnowie kompozytu.

**Słowa kluczowe:** kompozyty umocnione cząstkami, stop aluminium, węgiel krzemu, proces mieszania, metalurgia proszków, logika rozmyta

## THE RESEARCH AND ANALYSIS OF MIXING PROCESS PARAMETERS WITH APPLICATION OF FUZZY LOGIC METHOD FOR THE IMPROVEMENT OF PROPERTIES OF PM COMPOSITES

The fuzzy logic method was used as a tool for quick choice of optimal and economic parameters of the mixing process in aluminium alloy particles-ceramic particles system. Experiments were the source of the input data for computer analysis. Al17Si5Fe3Cu1.1Mg0.6Zr alloy powder, with particles of diameter below 40  $\mu\text{m}$ , was used as a matrix. Particles of silicon carbide (10%) were used as a reinforcing phase. Mixing of components was carried out using several rotation speeds and mixing times. The samples of the composite were prepared from obtained mixtures by hot-compaction in a closed die at 500°C in isothermal conditions. Microstructural examinations of obtained composites were carried out and selected properties of samples were evaluated. The correct distribution of particles of the reinforcing phase in the matrix was reached at rotational speed 0.9 s<sup>-1</sup> and mixing time 45 min. For the composites prepared by hot compaction with these parameters, favourable properties and their smallest dispersion were found and the particles of reinforcing phase were uniformly distributed. Prolongation of mixing time, at the rotation speed mentioned above, didn't lead to amelioration of the product's properties. For the rotation speed equal to 0.2 s<sup>-1</sup>, an attempt of optimal time determination wasn't successful. For this purpose, a method based on knowledge engineering was proposed. The obtained relations between the parameters of mixing process and properties of the final products were used as input data for the analysis. Information about mixing process characteristics, in knowledge engineering called expert's knowledge, were the complementary data. The source of this information was the experience based on previous experiments and the data found in the literature. A set of data was prepared, which, from the point of view of knowledge engineering, was incomplete and uncertain, because a part of those data wasn't verified by experiments. Those data could be used for quick estimation of the mixing process parameters for future experiments with compound characteristics similar to those used in this experiment. A fuzzy reasoning was carried out using Fuzzy Toolbox program, which is a part of Matlab software. The mixing time for the rotation speed 0.2 s<sup>-1</sup> was estimated to be about 80 minutes.

**Keywords:** composites reinforced with particles, aluminium alloy, silicon carbide, mixing process, powder metallurgy, fuzzy logic

## WSTĘP

Kompozyty na osnowie metali i ich stopów umacniane cząstkami ceramicznymi są najczęściej wytwarzane metodami odlewniczymi lub metalurgii proszków. Wsad w postaci proszku umożliwia uzyskanie drobnoziarnistej mikrostruktury i dobrych właściwości mechanicznych. Zaletą technologii jest również łatwość w zestawianiu składników oraz ich udziałów w kompozycie. Ponieważ wytwarzanie materiałów kompozytowych jest kosztowne, koniecznym ekwiwalentem musi być uzyskanie tworzyw o korzystniejszych, w porównaniu do nieumocnionej osnowy, właściwościach. Technologia powinna być ekonomiczna i prowadzić do wytworzenia wyrobu o wysokiej jakości. Metody metalurgii proszków wymagają poprawnego procesu mieszania składników, gwarantującego równomierność rozłożenia cząstek fazy umacniającej w osnowie. Czynniki wpływające na końcowy efekt umocnienia wynikają z właściwości poszczególnych składników, morfologii ich cząstek oraz parametrów procesu mieszania [1, 2].

Duża liczba czynników utrudnia bezpośrednią korektę parametrów procesu mieszania w zależności od rodzaju składników i ich zawartości w mieszaninie. Brak jest również możliwości kontroli jakości procesu mieszania. W efekcie informacje o jakości mieszaniny można uzyskać dopiero na podstawie badań mikrostruktur lub własności otrzymanych z nich wyrobów. Należy pamiętać, że uzyskanie jednorodnej mieszaniny nie gwarantuje, że proces był prowadzony w sposób ekonomiczny. Rozwój metod analitycznych daje możliwość ich wykorzystania do wspomaganego doboru parametrów procesu mieszania. Ze względu na specyfikę problemu duże znaczenie mają metody oparte na inżynierii wiedzy.

W inżynierii wiedzy do opisu procesu mieszania mogą być wykorzystane wyniki badań oraz informacje określające zależności występujące podczas tego procesu, zestawione w formie zrozumiałej dla systemu. Jednym z narzędzi pozwalającym na przeprowadzenie analizy tak ujętego zagadnienia jest logika rozmyta. Zastosowanie metody logiki rozmytej do wspomaganego projektowania procesów technologicznych jest przedmiotem prowadzonych w świecie badań [1-5].

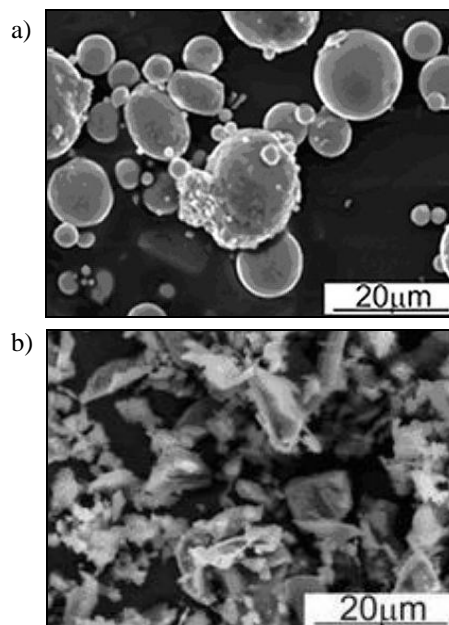
## BADANIA WŁASNE

### Materiał i metodyka badań

Materiałem osnowy jest rozpylany proszek stopu  $\text{Al}_{17}\text{Si}_5\text{Fe}_3\text{Cu}_{1,1}\text{Mg}_{0,6}\text{Zr}$  (rys. 1a), natomiast fazą umacniającą węgiel krzemu  $\text{SiC}_{1000}$  (rys. 1b). Rozmiary cząstek obydwu składników  $< 40 \mu\text{m}$ .

W pracy podjęto próby oceny zastosowania logiki rozmytej jako narzędzia doboru parametrów procesu mieszania proszków stopu  $\text{Al}_{17}\text{Si}_5\text{Fe}_3\text{Cu}_{1,1}\text{Mg}_{0,6}\text{Zr}$  i węgla krzemu  $\text{SiC}$  podczas wytwarzania kompozytów metodami metalurgii proszków. Przeprowadzono badania eksperymentalne, których wyniki oraz wiedza eksper-

ka były podstawą do analizy numerycznej. Wytworzono mieszaniny składników materiału kompozytowego przy zmiennych parametrach procesu mieszania. Mieszaniny zagęszczano na gorąco w matrycach zamkniętych. Określono wybrane właściwości mechaniczne wytworzonych kompozytów. W analizie komputerowej zastosowano moduł Fuzzy Logic pakietu Matlab.



Rys. 1. Proszek: a) stop  $\text{Al}_{17}\text{Si}_5\text{Fe}_3\text{Cu}_2\text{Mg}_{0,6}\text{Zr}$ , b) węgiel krzemu  $\text{SiC}_{1000}$

Fig. 1. Powder: a)  $\text{Al}_{17}\text{Si}_5\text{Fe}_3\text{Cu}_2\text{Mg}_{0,6}\text{Zr}$  alloy, b) silicone carbide  $\text{SiC}_{1000}$

### Wykonanie próbek

Przygotowano próbki proszków stopu  $\text{Al}_{17}\text{Si}_5\text{Fe}_3\text{Cu}_{1,1}\text{Mg}_{0,6}\text{Zr}$  i węgla krzemu  $\text{SiC}$  w ilościach koniecznych do wytworzenia kompozytów o objętości względnej fazy umacniającej 10%. Proces mieszania składników prowadzono w mieszalniku dwustopniowym w temperaturze pokojowej, na sucho i bez środków poślizgowych. Stosowano prędkości obrotowe mieszalnika 0,2 i 0,9  $\text{s}^{-1}$  oraz czas mieszania od 5 do 60 minut. Przyjęte do badań kombinacje parametrów mieszania i oznaczenia próbek zestawiono w tabeli 1.

TABELA 1. Parametry procesu mieszania  
TABLE 1. Parameters of mixing process

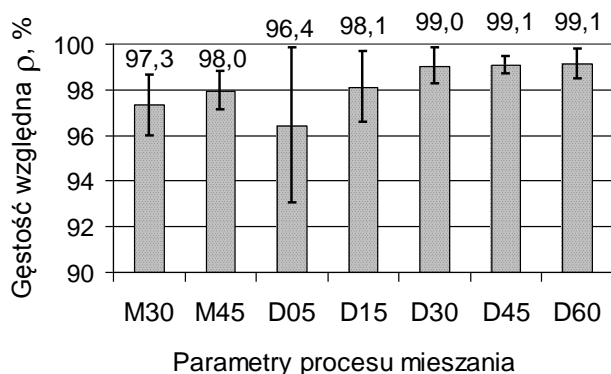
Oznaczenie próbki	Prędkość obrotowa mieszalnika, $\text{s}^{-1}$	Czas mieszania min
M30	0,2	30
M45		45
D05	0,9	5
D15		15
D30		30
D45		45
D60		60

W celu określenia wpływu parametrów procesu mieszania na równomierność rozproszczenia cząstek fazy umacniającej SiC w osnowie wykonano próbki przez zagęszczanie na gorąco w matrycach zamkniętych, w warunkach izotermicznych. Mieszanki proszków nagrzewano w matrycy do temperatury 500°C i wygrzewano. Czas nagrzewania i wygrzewania wynosił 15 minut. Zagęszczanie na gorąco prowadzono przy ciśnieniu 150 MPa w czasie 5 minut. Wykonano próbki o średnicy 37 mm i masie 100 g.

Wyznaczono gęstość względną wytworzonych kompozytów oraz ich wytrzymałość na ściskanie i wytrzymałość na zginanie. Ocenę równomierności rozłożenia węgla SiC w osnowie prowadzono w badaniach mikrostruktury.

## WYNIKI BADAŃ

Analiza uzyskanych wartości gęstości kompozytów, określona metodą Archimedes'a (rys. 2), pozwala na stwierdzenie, że zależy ona od parametrów procesu mieszania. Dla prędkości obrotowej mieszalnika 0,9 s<sup>-1</sup> ze zwiększeniem czasu mieszania do 30 min występuje wzrost gęstości kompozytów. Dalsze zwiększanie czasu mieszania nie powoduje już dużych zmian ich gęstości. Dla prędkości mieszalnika 0,2 s<sup>-1</sup> zwiększenie czasu mieszania z 30 do 45 minut prowadzi do poprawy zagęszczenia kompozytów.

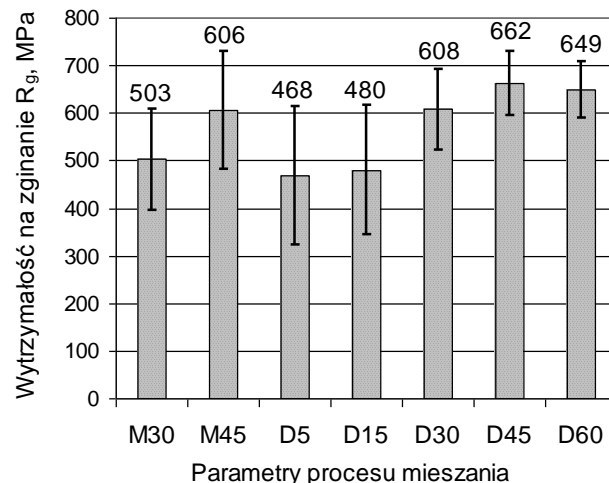


Rys. 2. Wpływ parametrów procesu mieszania na gęstość względną kompozytów na osnowie Al17Si5Fe3Cu2Mg0,6Zr umocnionych węglikiem SiC. Objętość względna SiC = 10%

Fig. 2. Influence of the parameters of mixing process on the density of the composites based on Al17Si5Fe3Cu2Mg0.6Zr, reinforced by SiC carbide. Relative volume of SiC = 10%

Wytrzymałość na zginanie wytworzonych kompozytów określono w próbie trójpunktowej. Stwierdzono, że wytrzymałość na zginanie kompozytów na osnowie Al17Si5Fe3Cu1,1Mg0,6Zr umocnionych SiC zależy od warunków procesu mieszania (rys. 3). Zwiększenie czasu mieszania do 45 minut powoduje wzrost średniej wartości wytrzymałości na zginanie kompozytów  $R_g$  dla obu prędkości mieszania. Dla prędkości obrotowej 0,9 s<sup>-1</sup> zwiększenie czasu mieszania od 45 do 60 min nie wpływa na wytrzymałość na zginanie kompozytów.

Ustalono, że dla jednakowych czasów mieszania mniejszą wytrzymałość na zginanie kompozytów uzyskano dla procesu mieszania ich składników przy prędkości obrotowej mieszalnika 0,2 s<sup>-1</sup>. Rozrzut wartości pomiarów wykazuje wyraźną tendencję do ich zmniejszania ze wzrostem prędkości obrotowej mieszania, a dla próbek z mieszanin wykonanych przy większej prędkości obrotowej z wydłużaniem czasu mieszania.

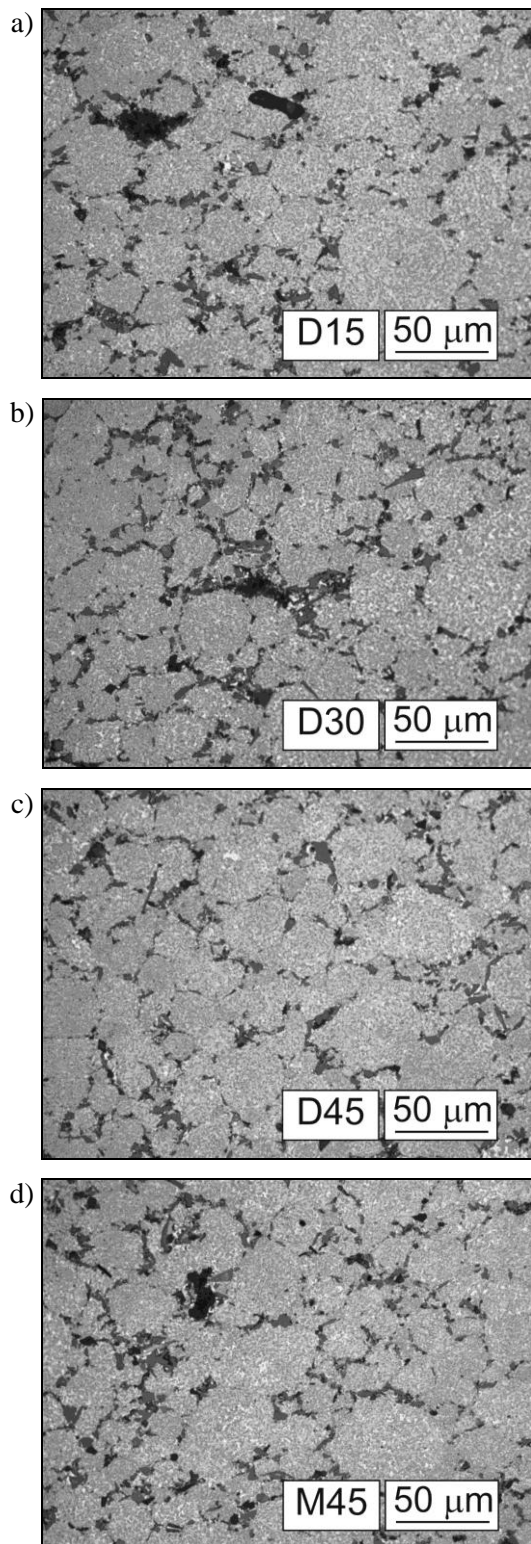


Rys. 3. Wpływ parametrów procesu mieszania na wytrzymałość na zginanie kompozytów na osnowie Al17Si5Fe3Cu2Mg0,6Zr umocnionych węglikiem SiC. Objętość względna SiC = 10%

Fig. 3. Influence of the parameters of mixing process on the bending strength of the composites based on Al17Si5Fe3Cu2Mg0.6Zr, reinforced by SiC carbide. Relative volume of SiC = 10%

Obserwacje mikrostruktur prowadzono metodą mikroskopii świetlnej na zglądach wzdłużnych po polerowaniu. Zdjęcia mikrostruktur kompozytów otrzymanych przy różnych parametrach procesu mieszania zestawiono na rysunku 4.

Badania mikroskopowe kompozytów wytworzonych przy różnych warunkach procesu mieszania pozwoliły stwierdzić, że dla prędkości obrotowej mieszalnika 0,9 s<sup>-1</sup> i przy czasie mieszania do 30 min w mikrostrukturze występują duże skupiska węgla krzemu (rys. 4a i 4b), przy czym zwiększenie czasu mieszania prowadzi do zmniejszenia niejednorodności rozłożenia węglików. Po zwiększeniu czasu mieszania do 45 minut (rys. 4c) cząstki węgla krzemu są równomiernie rozmieszczone w osnowie. Obserwuje się niewielkie skupiska cząstek fazy umacniającej w obszarach pierwotnych granic cząstek proszku osnowy. Zwiększenie czasu mieszania od 45 do 60 minut nie powoduje zmiany w rozłożeniu węglików. Dla prędkości obrotowej mieszalnika 0,2 s<sup>-1</sup> i czasu mieszania do 45 minut nie uzyskano równomiernego rozmieszczenia węglików w osnowie, przy czym zwiększenie czasu od 30 do 45 minut (rys. 4d) prowadzi do zmniejszenia niejednorodności. Rozmieszczenie węgla w osnowie po mieszanii w czasie 45 min z prędkością obrotową mieszalnika 0,2 s<sup>-1</sup> jest porównywalne do otrzymanego w czasie 30 minut i z prędkością obrotową 0,9 s<sup>-1</sup> (rys. 4b oraz 4d).

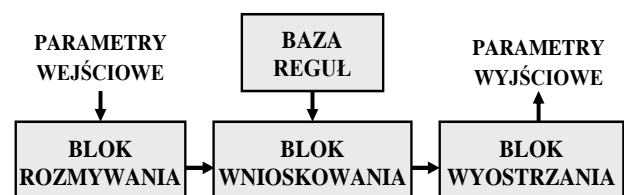


Rys. 4. Mikrostruktury kompozytu stop  $\text{Al}_{17}\text{Si}_5\text{Fe}_3\text{Cu}_2\text{Mg}_0,6\text{Zr} + 10\%$  SiC po zagęszczeniu przy temperaturze  $500^\circ\text{C}$  w matrycach zamkniętych, w zależności od prędkości obrotowej mieszalnika i czasu mieszania: a)  $0,9 \text{ s}^{-1}$ , 15 min, b)  $0,9 \text{ s}^{-1}$ , 30 min, c)  $0,9 \text{ s}^{-1}$ , 45 min, d)  $0,2 \text{ s}^{-1}$ , 45 min. Zgłady wzdłużne, polerowane

Fig. 4. Microstructures of the composite  $\text{Al}_{17}\text{Si}_5\text{Fe}_3\text{Cu}_2\text{Mg}_0,6\text{Zr}$  alloy + 10% SiC after compaction at  $500^\circ\text{C}$  in a closed - die, depending on rotational speed and time of mixing: a)  $0,9 \text{ s}^{-1}$ , 15 min, b)  $0,9 \text{ s}^{-1}$ , 30 min, c)  $0,9 \text{ s}^{-1}$ , 45 min, d)  $0,2 \text{ s}^{-1}$ , 45 min. Longitudinal sections, after polishing

## ZASTOSOWANIE LOGIKI ROZMYTEJ DO OSZACOWANIA PARAMETRÓW MIESZANIA

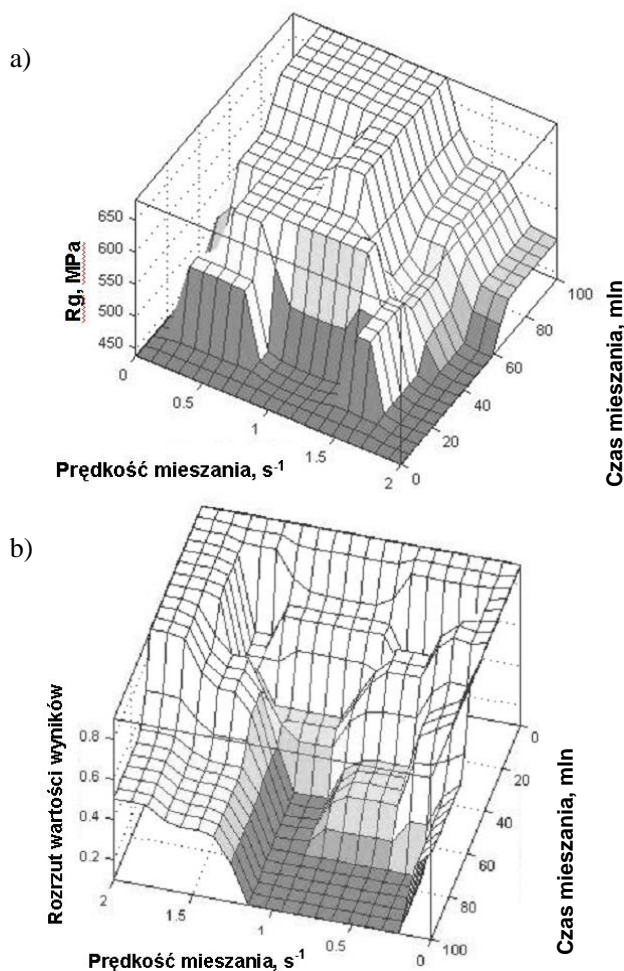
Analiza wyników badań i mikrostruktur kompozytów na osnowie  $\text{Al}_{17}\text{Si}_5\text{Fe}_3\text{Cu}_1,1\text{Mg}_0,6\text{Zr}$  umocnionych SiC po procesie mieszania z prędkością obrotową  $0,2 \text{ s}^{-1}$  nie pozwala na określenie czasu mieszania gwarantującego dobrą jakość wyrobów. Prowadzenie badań jest kosztowne oraz czasochłonne. Stąd w dalszej części zastosowano metody logiki rozmytej do oceny i doboru parametrów procesu mieszania składników kompozytu. Do analizy wykorzystano pakiet Matlab Fuzzy Toolbox. Schemat poszczególnych bloków systemu funkcjonowania pakietu przedstawiono na rysunku 5 [3].



Rys. 5. Schemat działania systemu Matlab Fuzzy Toolbox

Fig. 5. Matlab fuzzy Toolbox system flowchart

Do opisu danych stosowano zmienne lingwistyczne. Zmiennymi wejściowymi były: *prędkość mieszania* oraz *czas mieszania*, natomiast wyjściowymi *gęstość względna*, *wytrzymałość na zginanie* oraz *rozrzut wartości wyników*. Zależności między parametrami opisano za pomocą zbioru reguł rozmytych. Zdania warunkowe typu JEŻELI...WTEDY stanowią model lingwistyczny, będący podstawą funkcjonowania systemu. Bazę reguł opracowano na podstawie wyników eksperymentu, danych literaturowych oraz wiedzy eksperckiej, dotyczącej wpływu różnych czynników na przebieg i efekt procesu mieszania. Poszczególne parametry opisano, przypisując im odpowiednie funkcje kształtu. Uzyskano zależności pomiędzy parametrami procesu mieszania i oszacowanymi właściwościami wyrobów (rys. 6). Kształt powierzchni zmienia się skokowo, co spowodowane jest małą liczbą wprowadzonych danych. Dokładność obliczeń jest wystarczająca do charakterystyki procesu mieszania oraz ustalenia występujących zależności i tendencji. Otrzymane wyniki pozwalają także na oszacowanie właściwości kompozytów przy danych wartościach czasu i prędkości obrotowej mieszalnika. Na podstawie wyników otrzymanych metodą logiki rozmytej można wyznaczyć czas mieszania, konieczny do poprawnego przygotowania mieszaniny składników kompozytu, w zależności prędkości obrotowej mieszalnika. Ustalono, że szacowany minimalny czas mieszania dla prędkości obrotowej  $0,2 \text{ s}^{-1}$  wynosi ok. 80 minut.



Rys. 6. Otrzymane metodą logiki rozmytej zależności wytrzymałości na zginanie  $R_g$  (a) i rozrzutu wartości wyników (b) w zależności od prędkości obrotowej mieszalnika i czasu mieszania

Fig. 6. Obtained as the result of fuzzy logic method relationships of the bending strength (a) and scatter of results (b), depending on rotational speed and time of mixing

## WNIOSKI

Na podstawie analizy wyników badań i zastosowania metody logiki rozmytej dla oceny wpływu parametrów procesu mieszania składników na właściwości kompozytu na osnowie stopu Al17Si5Fe3Cu1,1Mg0,6Zr umocnionego przez 10% SiC stwierdzono, że:

1. Równomierne rozłożenie w osnowie cząstek fazy umacniającej SiC zapewnia prędkość obrotowa mieszalnika  $0,9 \text{ s}^{-1}$  i czas mieszania 45 minut. W pro-

cesie zagęszczania na gorąco tak przygotowanej mieszaniny uzyskano kompozyt o dobrych właściwościach.

2. Prędkość obrotowa mieszalnika wynosząca  $0,2 \text{ s}^{-1}$  nie zapewnia równomiernego rozmieszczenia cząstek fazy umacniającej przy przyjętych podczas badań wartościach czasu procesu mieszania.
3. Dane doświadczalne stosowano do zaprojektowania i przeprowadzenia analizy procesu mieszania metodą logiki rozmytej. Otrzymane wyniki umożliwiają dobór parametrów procesu zapewniających uzyskanie jednorodnej mieszaniny składników kompozytu. Dla prędkości obrotowej mieszalnika  $0,2 \text{ s}^{-1}$  czas procesu oszacowano na ok. 80 minut.
4. Zastosowanie metody logiki rozmytej pozwala ograniczyć liczbę czynników, wpływających na jakość kompozytu. Wykorzystanie zmiennych lingwistycznych powoduje zmniejszenie dokładności wyników, jednak są one wystarczające dla doboru parametrów procesu mieszania składników kompozytu.

## Podziękowania

Praca zrealizowana w ramach badań własnych finansowanych przez MNiSW, nr projektu w AGH 10.10.110.864.

## LITERATURA

- [1] 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.
- [2] Wojtaszek M., Durak J., Wykorzystanie logiki rozmytej do wyznaczania parametrów procesu mieszania podczas wytwarzania metodą metalurgii proszków kompozytów umacnianych cząstkami, *Kompozyty (Composites)* 2008, 4, 390-396.
- [3] Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L., *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*, WN PWN, Warszawa 1997.
- [4] Mrzygłód B., *Elementy reprezentacji wiedzy w zakresie wad powierzchni wyrobów metalowych*, Rozprawa doktorska, AGH, Kraków 2006.
- [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.