



Jarosław Durak, Marek Wojtaszek*

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) 28.01.2010

OCENA PRZYDATNOŚCI ADAPTACYJNYCH TECHNIK PARAMETRÓW DO WSPOMAGANIA PROCESU WYTWARZANIA KOMPOZYTÓW ALUMINIUM-WŁÓKNA CERAMICZNE

Przeprowadzono testową ocenę możliwości technik adaptacyjnych do estymacji korzystnych oraz ekonomicznych parametrów procesu formowania kompozytów w układzie cząstki stopu aluminium-cząstki ceramiczne. Jako informacje wyjściowe do przeprowadzenia testowej analizy wykorzystano wyniki pomiarów wytrzymałości na rozciąganie próbek tworzyw kompozytowych na osnowie aluminium umocnionych włóknami ceramicznymi. Próbki o zmiennym udziale objętościowym włókien były wykonane z użyciem technologii metalurgii proszków oraz przeróbki plastycznej. Wykorzystano w tym celu procesy mieszania składników, prasowania w temperaturze pokojowej proszku osnowy i mieszanin oraz wyciskania na gorąco wyprasek w warunkach izotermicznych. Wyciskanie było przeprowadzone przy różnych wartościach współczynnika wyciskania i temperatury. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie tworzyw zastosowano jako bazę danych do testowej analizy z wykorzystaniem metod opartych na narzędziach statystycznych i na sztucznej inteligencji. Do statystycznej analizy zastosowano metodę krzywych regresji, spośród narzędzi sztucznej inteligencji wykorzystano adaptacyjny neuronowo-rozmyty system wnioskowania ANFIS. Dane otrzymane w wyniku badań wartości wytrzymałości na rozciąganie okazały się wystarczające do przeprowadzenia testowej analizy. Stwierdzono zgodność wyników otrzymanych w rezultacie zastosowania proponowanej metody ANFIS z wynikami metody statystycznej, co potwierdza przydatność tego rozwiązania do wspomaganego projektowania materiałów kompozytowych. Oszacowano udział objętościowy włókien właściwy dla uzyskania najwyższej wartości parametru R_m , który dla przyjętych komponentów i technologii powinien wynosić od 4,0 do 5,5% obj.

Słowa kluczowe: kompozyty, proszek aluminium, włókna ceramiczne, metalurgia proszków, przeróbka plastyczna, wytrzymałość na rozciąganie, neuronowo-rozmyte systemy adaptacyjne

ASSESSMENT OF USEFULNESS OF THE ADAPTIVE PARAMETER SELECTION TECHNIQUES FOR SUPPORT MANUFACTURING PROCESS OF ALUMINIUM-CERAMIC FIBRES COMPOSITES

An attempt to assess the possibility of adaptive techniques to estimate the beneficial and economic parameters of the forming process of composite particles in the system aluminum alloy-ceramic particles was carried out. As the input parameters for the computer analysis, the results of measurements of tensile strength of composite plastic samples in the warp of aluminium reinforced with ceramic fibres were used. Samples with different volume share of fibres were made using powder metallurgy technology and the forming processing. Blending process, pressing of powder and mixtures at room temperature, and hot extrusion of compacts realized in isothermal conditions for this purpose were used. Extrusion was carried out at different values of extrusion ratio and temperature. Results of studies on the effects of chemical composition, temperature and extrusion ratio on tensile strength of materials were used as the database to carry out the test analysis, using statistical and artificial intelligence methods. Dependence of R_m on the share volume of fibers was estimated using curvilinear regression and adaptive neurofuzzy inference system ANFIS. This approach arose from the fact that in modern control systems to better examine the methods based on neural networks, due to the higher speed operation and flexibility. Therefore it was assumed that the proposed comparison will give information about the possibility of their use in place of classical solutions. Based on the results of the analysis, authors concluded that the data obtained from tests of tensile strength measurements, which amount was 72, were proved to be sufficient to carry out a test analysis using adaptive neurofuzzy inference system. It has been found highly compatibility of results obtained based on the proposed ANFIS method, with the results of the classical statistical analysis, carried out using the regression curves, which confirms the usefulness of this solution for computer aided design of composite materials. Based on a test analysis using the adaptive neurofuzzy system, the R_m parameter achieves the highest values when the participation of fibres in composite were between 4.0 and 5.5% by volume. The results obtained confirm the adaptive techniques allow for automated correction of predefined relationship between the input parameters such as time and speed of mixing, the mixture composition, extrusion temperature, and output such as strength or density of the sample after the bench press.

Keywords: composites, aluminium powder, ceramic fibres powder metallurgy, metal forming, mixing process, tensile strength, adaptive neuro-fuzzy systems

WSTĘP

Otrzymywanie lekkich materiałów kompozytowych na osnowie aluminium umocnionych włóknami ceramicznymi metodami metalurgii proszków pozwala na łatwe wprowadzanie fazy umacniającej do osnowy, a proces formowania prowadzony jest w temperaturach znacznie niższych od temperatury topnienia metalu osnowy. Stosowanie procesów przeróbki plastycznej do formowania porowatych wyrobów umożliwia otrzymanie produktu o gęstości zbliżonej do litego materiału i wysokich własnościach, determinowanych poprzez skład chemiczny, sposób wytwarzania, parametry technologiczne, ewentualną obróbkę cieplną itp. Jednak, oprócz niewątpliwych zalet, stosowanie przeróbki plastycznej porowatego wsadu jako narzędzia do wytwarzania kompozytów powoduje szereg komplikacji. Niewłaściwe ich rozwiązanie na danym etapie kształtowania skutkuje pogorszeniem właściwości otrzymanych w ten sposób wyrobów lub sprawia, że w końcowym rachunku proces jest nieekonomiczny. Problemem tym zajmowali się autorzy szeregu prac, między innymi [1, 2]. Wyznaczenie parametrów technologicznych formowania, właściwych dla założonych komponentów i przyjętych ich udziałów w kompozycie, można realizować na drodze eksperymentalnej, jednak wiąże się to z koniecznością prowadzenia czasochłonnych i kosztownych badań. Ograniczenie ich zakresu do niezbędnego minimum umożliwia zastosowanie do wspomagania projektowania procesu technologicznego metod numerycznych, do których należy między innymi logika rozmyta [3, 4] lub adaptacyjna technika doboru, będąca połączeniem logiki rozmytej i sieci neuronowych.

Spośród metod sztucznej inteligencji, stosowanych w roli narzędzia doboru parametrów procesu sterowania nim oraz jego diagnostyki, obecnie coraz częściej wykorzystuje się sztuczne sieci neuronowe i logikę rozmytą. Zaletą sztucznych sieci neuronowych jest możliwość ich uczenia i adaptacji. Do ich stosowania nie jest konieczna szczegółowa wiedza o procesie czy znajomość dokładnego matematycznego modelu obiektu. Sieć neuronowa jest w stanie nauczyć się odwzorowania praktycznie dowolnej nieliniowości na podstawie sygnałów wejściowych i wzorcowych wartości. Wadą metody jest brak dostępu do nabytej wiedzy, która jest rozproszona w sieci. Problem ten nie dotyczy systemów pracujących w oparciu o logikę rozmytą, jednak w tym przypadku zależności pomiędzy sygnałami wejściowymi a wyjściowymi muszą być znane już na etapie projektowania i muszą pochodzić od eksperta, bez możliwości uczenia systemu. Nie jest jednak wymagana znajomość matematycznego opisu zależności pomiędzy wejściem a wyjściem systemu. W odróżnieniu od układów analitycznych, logika rozmyta posługuje się wiedzą jakościową, a nie ilościową. Odpowiednie decyzje są podejmowane przez układ w oparciu o bazę reguł, zapisanych w postaci implikacji IF-THEN. Najprostszym podejściem do projektowania takich układów jest wyznaczenie reguł wejścia-wyjścia i funkcji przynależ-

ności na podstawie wiedzy eksperta, co zostało przez autorów z powodzeniem zastosowane [4, 5]. Jednak w przypadku tej metody przy zmianie składników w układzie osnowa-faza umacniająca konieczna jest ręczna korekta doboru parametrów. Jest to możliwe, gdyż struktura systemu rozmytego jest jawna. Wadą układów jest też brak możliwości uczenia i adaptacji.

Synteza obu metod sztucznej inteligencji daje możliwość połączenia zdolności uczenia i mocy obliczeniowej sieci neuronowych ze sposobem funkcjonowania na wzór rozumowania ludzkiego układów z logiką rozmytą. Próby dokonania takiego powiązania stały się w ciągu ostatnich lat przedmiotem intensywnych badań. W ten sposób powstały konstrukcje wykorzystujące ideę rozumowania rozmytego wraz ze zdolnością uczenia, zwane sieciami neuronowymi rozmytymi (ang. neuro-fuzzy) lub adaptacyjnymi neuronowo-rozmytymi systemami wnioskowania (ang. ANFIS). Do zalet takich układów należy możliwość przetworzenia wiedzy eksperta o procesie i zjawiskach na topologię sieci i podział zbiorów rozmytych, dzięki czemu otrzymujemy szybsze dopasowanie układu przy wykorzystaniu znacząco mniejszej ilości danych koniecznych do jego wytrenowania. Wykorzystanie danych trenujących pozwala zmniejszyć niezbędną liczbę reguł, w porównaniu do klasycznej logiki rozmytej, co czyni system bardziej zwartym i zwykle szybszym w działaniu. Użycie metody wstecznej propagacji błędów pozwala na automatyczne dostosowywanie układu, a wbudowane mechanizmy interpolacyjne na wygładzenie jego charakterystyki.

Do istotnych wad rozwiązania zaliczyć można to, iż przeprowadzenie zbyt gęstego podziału zmiennych wejściowych na zbiory rozmyte może prowadzić do oscylacji wokół punktów oraz zbyt dużej ilości reguł, których liczba rośnie eksponentalnie. Systemy typu ANFIS stosowane są z powodzeniem w sterowaniu i diagnostyce oraz, co z punktu widzenia autorów jest szczególnie interesujące, do przewidywania właściwości materiałów otrzymywanych metodą metalurgii proszków [6, 7].

BADANIA WŁASNE

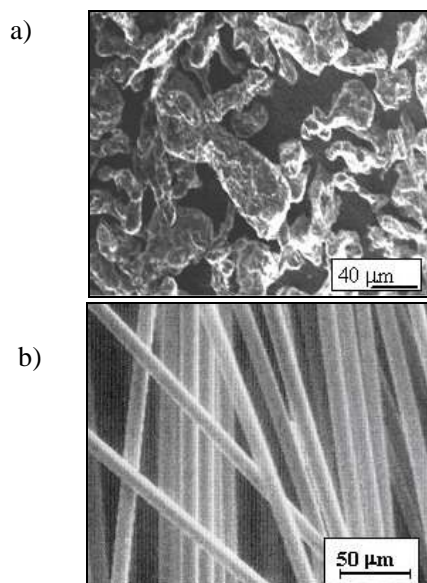
Cel i zakres badań

Celem przeprowadzonych badań była próba zastosowania adaptacyjnej techniki doboru do wyznaczenia korzystnych parametrów formowania tworzyw kompozytowych otrzymanych technologią metalurgii proszków. Jako informacje wyjściowe do przeprowadzenia testowej analizy wykorzystano wyniki własnych badań, stanowiących część pracy [2]. Zakres zaimplementowanych danych obejmował wyniki pomiarów wytrzymałości na rozciąganie próbek tworzyw kompozytowych na osnowie aluminium umocnionych włóknami ceramicznymi. Próbkę o zmiennym udziale objętościowym włókien wykonano, stosując technologie metalur-

gii proszków oraz przeróbki plastycznej. Wykorzystano w tym celu procesy mieszania cząstek proszku i włókien, prasowania w temperaturze pokojowej i wyciskania na gorąco w warunkach izotermicznych. Wyciskanie było przeprowadzone przy różnych temperaturach oraz współczynnikach wyciskania. Otrzymane w próbie rozciągania w temperaturze pokojowej wyniki badań nad wpływem składu chemicznego i parametrów procesu wyciskania na wytrzymałość na rozciąganie tworzyw stanowiły bazę danych, wystarczającą do przeprowadzenia analizy porównawczej z wykorzystaniem metod opartych na klasycznych narzędziach statystycznych oraz na sztucznej inteligencji. Do statystycznej analizy zastosowano metodę krzywych regresji, a spośród narzędzi sztucznej inteligencji wykorzystano adaptacyjny neuronowo-rozmyty system wnioskowania. Takie podejście wynika z faktu, że w nowoczesnych systemach sterowania lepiej sprawdzają się metody oparte na sieciach neuronowych ze względu na większą szybkość funkcjonowania i elastyczność np. przy zmianie typu stosowanych włókien. Dlatego przyjęto założenie, iż proponowane porównanie da informacje o możliwości ich stosowania w miejsce klasycznych rozwiązań.

Dane do analizy

Wykonanie materiału. Na osnowy kompozytów stosowano rozpylany proszek aluminium o gęstości 2700 kg/m^3 i wielkości cząstek poniżej $40 \text{ }\mu\text{m}$. Do umocnienia osnowy użyto ciętych włókien ceramicznych o nazwie handlowej Belcotex, typ 55 tex, wyprodukowanych przez firmę Belchem Fibre Materials GmbH, Niemcy ($94,5\% \text{ Al}_2\text{O}_3$, $4,5\% \text{ SiO}_2$, $<0,5\% \text{ Na}_2\text{O}$, $<0,5\%$ inne). Ciężar właściwy włókien wynosił 2100 kg/m^3 . Średnia średnica włókien zawierała się w przedziale $8\div 10 \text{ }\mu\text{m}$, a średnia ich długość wynosiła 6 mm . Kształt cząstek proszku osnowy oraz włókien przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Morfologia: a) proszek aluminium, b) włókna Belcotex
Fig. 1. Morphology of: a) aluminium powder, b) Belcotex fibres

Przygotowanie mieszanin. Do badań przyjęto udziały włókien w osnowie wynoszące odpowiednio 1,2; 2,5; 5 oraz 10% obj. Proszek osnowy i włókna mieszano w czasie 30 minut z prędkością obrotową $0,9 \text{ s}^{-1}$ oraz przy wypełnieniu komory mieszalnika poniżej 50%. Dla uniknięcia powstawania konglomeratów włókna rozprawdzano w zawieszinie proszku aluminium RAl-1 w metanolu CZ.D.A (CH_3OH).

Wykonanie materiału do badań. Proszek osnowy i mieszaniny prasowano w temperaturze pokojowej. Wypraski wyciskano współbieżnie w warunkach izotermicznych w temperaturach 400 i 500°C oraz stosując współczynniki wyciskania 4,1 i 13,3. Produkty chłodzono na powietrzu.

Wytrzymałość na rozciąganie. Próbę rozciągania prowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron 4502, w temperaturze pokojowej i z prędkością $0,083 \text{ mm/s}$. Wpływ składu chemicznego badanych próbek oraz zastosowanego współczynnika wyciskania na otrzymane wartości R_m zestawiono w tabelach 2 i 3.

TABELA 1. Wpływ składu chemicznego i parametrów procesu na wytrzymałość na rozciąganie materiałów, otrzymanych w procesie wyciskania na gorąco wyprasek z proszku aluminium i sprasowanych mieszanin proszek aluminium - włókna Al_2O_3

TABLE 1. The effect of manufacturing temperature and chemical composition on the tensile strength of materials obtained by means of hot extrusion process of aluminium powder compacts and compacted aluminium powder - Al_2O_3 fibres mixtures

Udział włókien % obj.	Lp.	Temperatura wyciskania 400°C		Temperatura wyciskania 500°C	
		współczynnik wyciskania 4,1	współczynnik wyciskania 13,3	współczynnik wyciskania 4,1	współczynnik wyciskania 13,3
		R_m , MPa	R_m , MPa	R_m , MPa	R_m , MPa
0	1	121,9	119,7	121,3	119,7
	2	119,0	121,2	125,8	121,2
	3	121,3	120,9	126,0	120,9
0,6	1	132,9	129,2	124,2	128,2
	2	130,4	128,9	127,9	132,2
	3	130,9	131,4	128,1	132,7
1,2	1	137,6	140,8	137,6	140,5
	2	138,0	134,9	132,9	144,2
	3	134,0	135,6	135,2	141,1
2,5	1	142,6	147,7	140,9	152,9
	2	138,7	146,2	141,8	155,3
	3	145,4	147,6	144,6	151,8
5	1	142,6	148,8	150,2	160,6
	2	147,4	153,7	149,6	161,3
	3	148,5	150,7	145,7	159,1
10	1	117,8	134,0	130	134,2
	2	126,3	132,9	125	137,9
	3	128,6	128,6	134,7	134,9

Z danych otrzymanych w próbie rozciągania wynika, iż wprowadzenie włókien do osnowy lub zwiększenie ich zawartości w osnowie do 5% obj. powodowało wzrost wytrzymałości na rozciąganie tworzyw w przyjętych do badań warunkach ich formowania. W efekcie

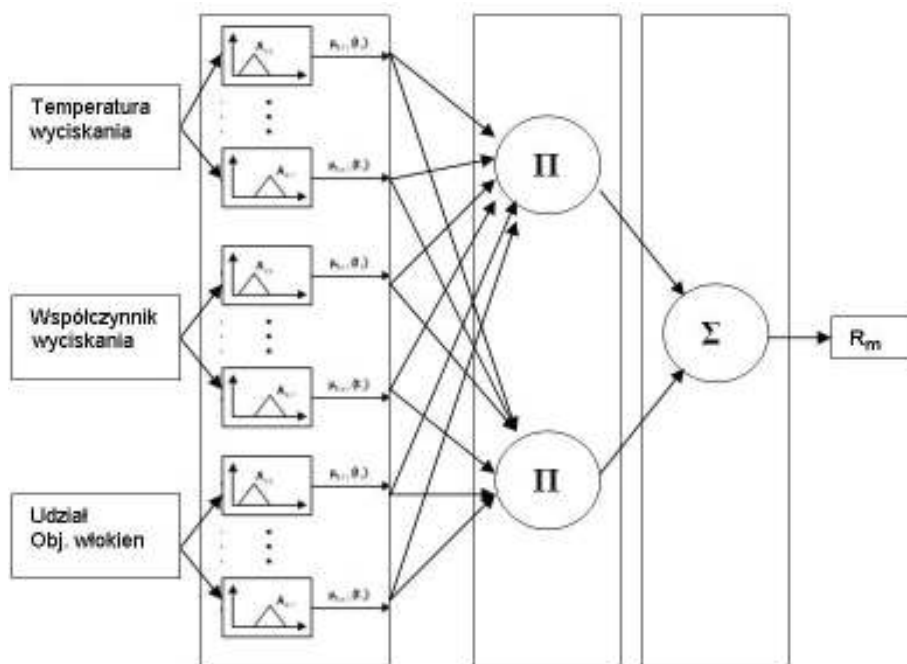
wprowadzenia do osnowy 10% włókien obserwowano zmniejszenie wartości wytrzymałości na rozciąganie wyrobów. Kompozyty wyciskane ze współczynnikiem 13,3 i w temperaturze 500°C miały wyższą wytrzymałość niezależnie od zawartości włókien, a w temperaturze 400°C powyżej 2,5% włókien. Dla materiałów kształtowanych ze współczynnikiem 13,3 zwiększenie temperatury wyciskania z 400 do 500°C skutkowało wzrostem wartości R_m . W przypadku wyciskania ze współczynnikiem 4,1 wytrzymałość na rozciąganie była wyższa dla materiałów wytworzonych w temperaturze 400°C przy zawartości włókien 0,6 i 1,2%, a przy wyższym ich udziale w osnowie w temperaturze 500°C.

Analiza z wykorzystaniem metody adaptacyjnego neuronowo-rozmytego systemu wnioskowania (ANFIS)

Na rysunku 2 przedstawiono schemat budowy adaptacyjnego systemu wykorzystującego neuronowo-rozmyty system wnioskowania ANFIS, który został przygotowany dla przedmiotowego zagadnienia. Parametry wejściowe do obliczeń zostały przedstawione w postaci zbiorów rozmytych. Podobnie jak ma to miejsce w przypadku typowego systemu rozmytego, są one opisane za pomocą funkcji przynależności. Jednak w przypadku proponowanej metody w miejsce jasno sprecyzowanych zmiennych lingwistycznych, np. „*zbyt mała*”, „*wysoka*” itp., stosuje się podział wartości analizowanego parametru na tzw. partycje. Wynika to z faktu, iż w miarę uczenia się sieci neuronowych przebieg funkcji jest modyfikowany, nie można więc na tym etapie jednoznacznie go określić. Dodatkowo, w odróżnieniu od systemu rozmytego, rządzące procesem regu-

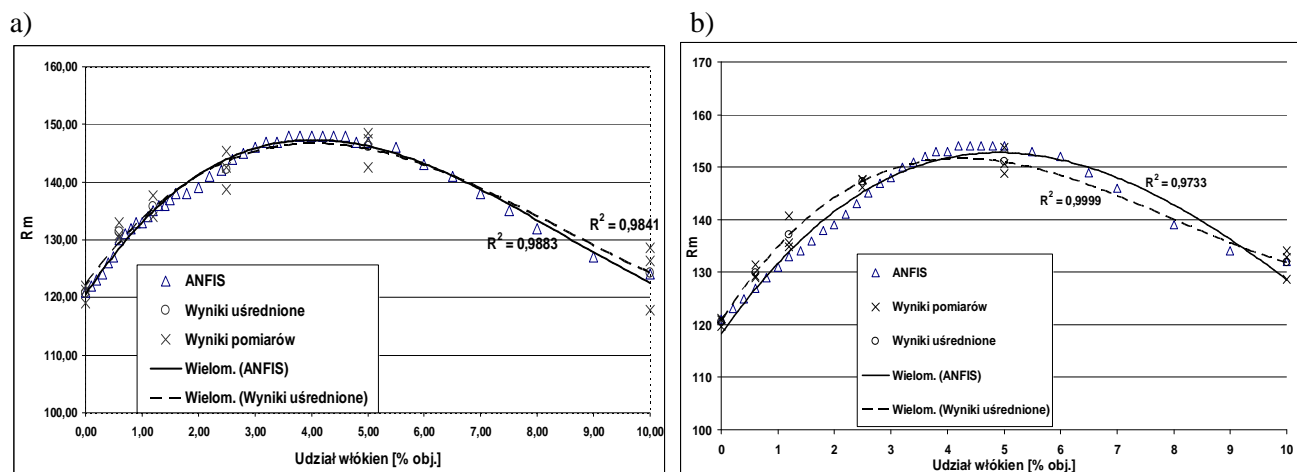
ły nie są wprowadzane przez eksperta, lecz są tworzone przez system w trakcie analizy.

Zdefiniowano funkcje przynależności, stanowiące element informacji o procesie, odpowiednio trzy dla udziału objętościowego oraz po dwie dla temperatury i współczynnika wyciskania. Dla rozpatrywanego przypadku dane uczące zawierały 64 wyniki pomiarów, które zostały losowo wybrane z 72 dostępnych wyników. Pozostałe 8 punktów pomiarowych wykorzystano do testowania układu. Otrzymane w wyniku przeprowadzenia analizy zależności wytrzymałości na rozciąganie R_m od udziału objętościowego włókien Belcotex w osnowie aluminium w zależności od parametrów procesu wyciskania zestawiono odpowiednio na rysunkach 3 i 4. Dla porównania na wykresach zamieszczono też dane pomiarowe oraz ich uśrednione wartości. Ilość wykorzystanych danych, zbyt mała, aby otrzymać zadowalające dopasowanie przy użyciu zwykłych sieci neuronowych, okazała się w pełni wystarczająca do przeprowadzenia analizy opartej na systemie ANFIS. Otrzymane wielomiany opisujące linie trendu mają bardzo wysoki współczynnik dopasowania R , wynoszący odpowiednio od 0,98 do 0,9999 dla danych otrzymanych z układu ANFIS i od 0,973 do 0,99 dla punktów będących średnimi wartościami pomiarowymi właściwymi dla danego składu. Obserwuje się dużą zgodność przebiegu krzywych otrzymanych dla wartości pomiarowych oraz będących wynikiem analizy z wykorzystaniem systemu ANFIS. Dla wyników otrzymanych z użyciem adaptacyjnego systemu ANFIS błąd dopasowania nie przekroczył 3,2%. Biorąc pod uwagę uzyskany podczas eksperymentu rozrzut wyników pomiarowych R_m , sięgający nawet 8%, jest to wartość zadowalająca.



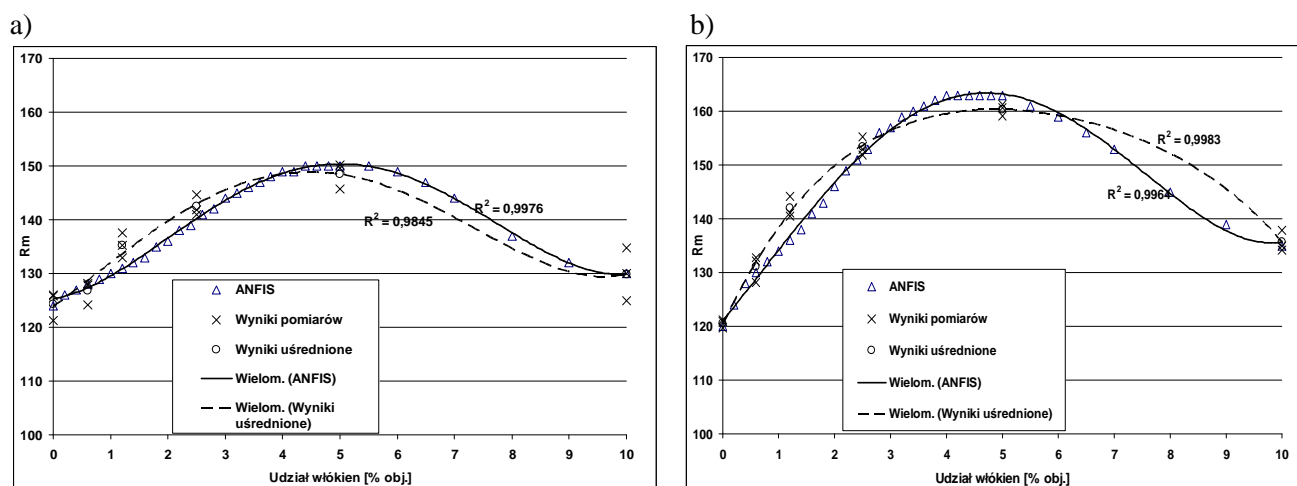
Rys. 2. Schemat struktury adaptacyjnego neuronowo-rozmytego systemu wnioskowania do wyznaczenia parametru R_m na podstawie udziału włókien, współczynnika wyciskania oraz temperatury procesu wyciskania

Fig. 2. Structure of adaptive neuro-fuzzy inference system determining R_m parameter based on the participation of fibres, extrusion rate and temperature of extrusion process



Rys. 3. Otrzymany w wyniku analizy z wykorzystaniem układu ANFIS i statystycznej analizy przebieg zależności wytrzymałości na rozciąganie R_m od udziału objętościowego włókien. Na podstawie danych otrzymanych w próbie rozciągania kompozytów wyciskanych przy temperaturze 400°C i ze współczynnikiem wyciskania: a) 4,1, b) 13,3

Fig. 3. Obtained as the result of using of ANFIS system and statistic method relationships between volume fraction of Al_2O_3 fibres and the bending strength. On the basis of results obtained for materials after extrusion at 400°C, with extrusion ratio: a) 4.1, b) 13.3



Rys. 4. Otrzymany w wyniku analizy z wykorzystaniem układu ANFIS i statystycznej analizy przebieg zależności wytrzymałości na rozciąganie R_m od udziału objętościowego włókien. Na podstawie danych otrzymanych w próbie rozciągania kompozytów wyciskanych przy temperaturze 500°C i ze współczynnikiem wyciskania: a) 4,1, b) 13,3

Fig. 4. Obtained as the result of using of ANFIS system and statistic method relationships between volume fraction of Al_2O_3 fibres and the bending strength. On the basis of results obtained for materials after extrusion at 500°C, with extrusion ratio: a) 4.1, b) 13.3

WNIOSKI

Na podstawie wyników badań wytrzymałości na rozciąganie kompozytów na osnowie aluminium umocnionych włóknami ceramicznymi i wyników przeprowadzonej z ich wykorzystaniem analizy, z użyciem metody statystycznej oraz adaptacyjnego neuronowo-rozmytego systemu wnioskowania ANFIS, stwierdzono, że:

1. Wyznaczone w próbie jednoosiowego rozciągania wyniki pozwoliły na określenie wpływu składu chemicznego i parametrów wyciskania na wytrzymałość na rozciąganie badanych kompozytów. Najwyższe wartości R_m stwierdzono dla kompozytu o zawartości do 5% obj. włókien, w stanie po wyciskaniu przy temperaturze 500°C i ze współczynnikiem wyciskania 13,3.
2. Dane otrzymane z badań wartości wytrzymałości na rozciąganie, w ilości 72 wyników, okazały się wystarczające do przeprowadzenia testowej analizy z użyciem adaptacyjnego neuronowo-rozmytego systemu wnioskowania ANFIS.
3. Stwierdzono dużą zgodność wyników otrzymanych w rezultacie zastosowania proponowanej metody ANFIS z wynikami metody statystycznej, przeprowadzonej z wykorzystaniem krzywych regresji, co potwierdza przydatność tego rozwiązania dla potrzeb wspomagania projektowania materiałów kompozytowych.
4. Wyniki analizy z użyciem adaptacyjnego neuronowo-rozmytego systemu testowania ANFIS pozwalają szacować, że dla uzyskania najwyższej wartości parametru R_m udział włókien w kompozycie powinien wynosić od 4,0 do 5,5% objętościowych.

Podziękowania

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

LITERATURA

- [1] Teer Har J.H., Duszczyk J., Degradation of δ -alumina fibre during extrusion of Al-20Si-X powder metallurgical composite, *Journal of Materials Science* 1997, 32, 10, 2781-2788.
- [2] Wojtaszek M., Wpływ kształtowania na gorąco na własności kompozytów aluminiowych wzmocnionych włóknami ceramicznymi, *Rozprawa doktorska*, Kraków 2000.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Khalifehzadeha R., Forouzanb S., Aramib H., Prediction of the effect of vacuum sintering conditions on porosity and hardness of porous NiTi shape memory alloy using ANFIS, *Computational Materials Science* 2007, 40, 3, 359-365.
- [6] Chris Harris, Xia Hong, Qiang Gan, *Adaptive modelling, estimation, and fusion from data: a neurofuzzy approach*, Springer-Verlag, Heidelberg 2002.
- [7] Srinivasan K., Lakshmi P., *Adaptive neuro-fuzzy controller for non-linear mixing process*, *Control, Automation, Robotics and Vision* 2002, ICARCV 2002, 7th International Conference.