https://doi.org/10.62753/ctp.2001.07.1.1

Katarzyna N. Braszczyńska[1], Andrzej Bochenek [2]
Politechnika Częstochowska, Instytut Inżynierii Materiałowej, al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa

PROBLEMY Z KORELACJĄ POMIĘDZY STRUKTURĄ A WŁASNOŚCIAMI ODLEWANYCH KOMPOZYTÓW METALOWYCH UMACNIANYCH CZĄSTKAMI CERAMICZNYMI

Przedstawiono szeroką analizę czynników strukturalnych warunkujących często pojawiające się niezgodności wyników eksperymentalnych z modelami teoretycznymi, opisującymi własności kompozytów metalowych umacnianych cząstkami ceramicznymi. Do opisu matematycznego własności mechanicznych tego typu materiałów kompozytowych zaproponowano zaadaptowanie funkcji Maxwella, poszerzonej o parametr wprowadzony przez Halpina i Tsaia. Model ten znalazł bardzo dobre potwierdzenie w wynikach badań eksperymentalnych wytrzymałości na rozciąganie oraz umownej granicy plastyczności określonej dla kompozytów MgAl5-SiC.

PROBLEMS WITH CORRELATION BETWEEN THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF METAL CAST COMPOSITES REINFORCED WITH CERAMIC PARTICLES

While considering metal composites reinforced with ceramic particles, which are frequently obtained by casting, one cannot apply models developed for fibre composites to search for correlations, especially the ones involving mechanical properties. The relationships derived on basis of the additivity laws are not valid here, either for the assumption of constant stress or constant strain.

Basic factors modelling the structure and properties of such composites, which should be selected while designing the specified material, are presented in Fig. 1. In the case of cast composites the greatest concern is given to the obtaining of the proper volume fraction of the particles within the matrix volume, the fraction being frequently corrected according to the actual one. Then the constant level of other factors is assumed for considering the composite. This leads to the neglecting of many dependent variables, the following being counted to them:

- **changes of chemical composition of the matrix caused by introduced particles or other additions (Fig. 2),**
- **differences in the character of the joint between components, which greatly affect the obtained level of mechanical properties (Fig. 3),**
- **uniformity (or the lack of it) of arrangement of the particles in the matrix,**
- **changes in the matrix grain size due to introducing various volume fractions of ceramic particles of different size,**
- **various degree of porosity (Fig. 4).**

Due to the presented numerous factors determining the structure of the cast metal composites reinforced with ceramic particles, reasons of frequently occurring inadequation of numerical models and experimental data seems to be obvious.

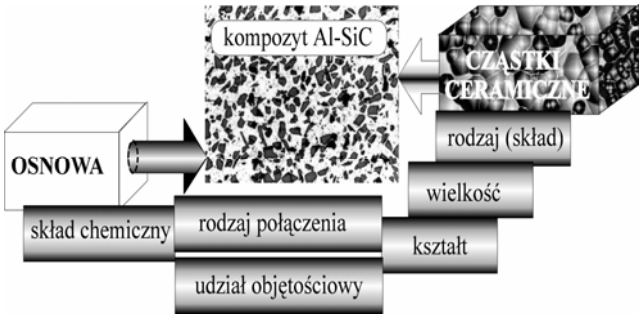
After a series of analyses and experiments on composites reinforced with particles it seems that the most adequate model would be the one adopting Maxwell's relationship between a parameter (a property) and the volume fraction, properties of components, and their interaction. This function shown in a general form by Eq. (1) has found rather strict confirmation in the results of experiments performed for Mg/SiC composites. Fig. 5 presents experimental data as compared with theoretical values obtained from Eq. (1) for tensile strength and yield strength versus SiC volume fraction.

Obszar badań nad kształtowaniem własności kompozytów jest obecnie bardzo szeroki i obejmuje wiele zagadnień. Najbardziej rozwinięte modele i zależności teoretyczne, korelujące właściwości poszczególnych komponentów z uwzględnieniem cech geometrycznych fazy zbrojącej, dotyczą przede wszystkim kompozytów umacnianych włóknami. Adaptowanie mechanizmów umocnieniowych wyprowadzonych dla kompozytów włóknistych, jak i dla wydzieleń, nie spełnia swojej roli w przypadku materiałów umacnianych cząstkami. Przy rozważaniu kompozytów metalowych umacnianych cząstkami ceramicznymi, otrzymywanych często metodami odlewniczymi, dodatkowe trudności powoduje szereg zjawisk i procesów fizykochemicznych występujących podczas wytwarzania tych materiałów. Do poszukiwania korelacji zwłaszcza z własnościami mechanicznymi nie można stosować tu zależności wynikających z prawa addytywności, przy założeniu zarówno stałości naprężeń, jak i stałości odkształceń. Bardzo często bowiem w przypadku takich materiałów własności kompozytu nie stanowią wielkości wynikowej, będącej funkcją odpowiedniej kompozycji materiałowej. Dlatego też autorzy niniejszej pracy podjęli próbę zbiorczego opisu czynników wpływających na różnorodne relacje struktura-własności w odlewanych kompozytach metalowych z cząstkami ceramicznymi.

Podstawowe czynniki (rys. 1) kształtujące strukturę i własności kompozytów metalowych umacnianych

[1] dr inż., [2] prof. dr hab. inż.

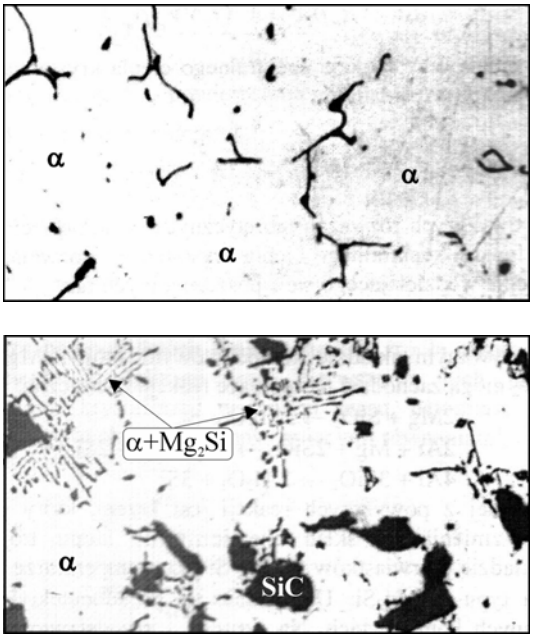
cząstkami ceramicznymi dobierane są poprzez projektowanie określonego materiału. W przypadku kompozytów odlewanych największą uwagę zwraca się na uzyskanie odpowiedniego udziału objętościowego cząstek w objętości osnowy. Częste niedopełnienie zakładanego poziomu tego czynnika spowodowane jest trudnościami wprowadzania niezwilżalnej ceramiki do ciekłego stopu osnowy. Dlatego też bardzo często udział objętościowy cząstek skorygowany jest rzeczywistą wartością uzyskaną w wyniku eksperymentu. Rozważając następnie kompozyt, zakłada się już stały poziom pozostałych czynników.



Rys. 1. Schemat czynników zakładanych dla określonego materiału kompozytowego

Fig. 1. Scheme of factors assumed for a specific composite material

Traktowanie natomiast składu chemicznego osnowy jako założonej i niezmiennej stałej może prowadzić do występowania poważnych błędów. W przypadku wielu kompozytów występują bowiem istotne różnice w składzie chemicznym osnowy kompozytu i stopu wyjściowego. Efekt taki osiągnięto przykładowo dla kompozytów wytworzonych na osnowie stopu AlMg5 umacnianego cząstkami SiC, pokrywanymi warstwą SiO_2, w celu zabezpieczenia węglika krzemu przed destrukcyjnym wpływem ciekłego aluminium (i tworzeniem węglika Al_4C_3) [1]. W wyniku tego uzyskano istotne zmiany strukturalne, poprzez pojawienie się pseudoeuktektyki typu α+Mg_2Si, przy jednofazowej budowie stopu osnowy (rys. 2). Ponadto należy zaznaczyć, że udział objętościowy dodatkowego składnika strukturalnego jest zmienną zależną zarówno od grubości warstwy SiO_2, udziału objętościowego cząstek SiC, jak również warunków wytwarzania kompozytu. W przypadku takich materiałów najczęstsze korelacje typu: własności mechaniczne-udział objętościowy cząstek. obarczone są istotnym błędem wywołanym zmiennością składu stopu osnowy. Dodatkowo bardzo często pomijane w badaniach są zmiany składu osnowy w wyniku zarówno wprowadzania pierwiastków ułatwiających procesy zwilżania, jak i zjawisk utleniania czy parowania składników stopu w trakcie wytwarzania kompozytów odlewanych, co ma istotne znaczenie zwłaszcza przy stosowaniu stopów lekkich.



Rys. 2. Różnice składu osnowy wywołane wprowadzeniem cząstek ceramicznych [1]

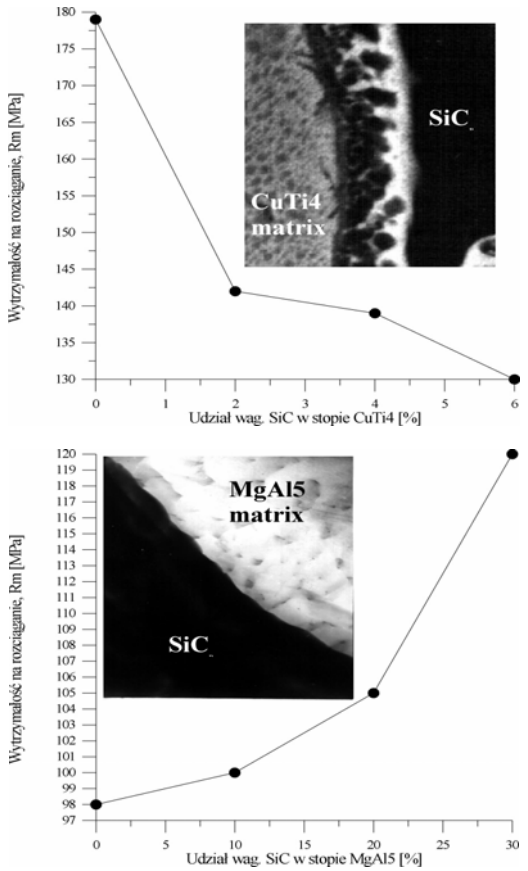
Fig. 2. Differences in matrix composition due to introducing ceramic particles [1]

Obecne możliwości projektowania kompozytów pozwalają na przewidywanie rodzaju połączenia pomiędzy komponentami. Należy jednak zaznaczyć, że jest on często zmienną zależną nie tylko od składu chemicznego komponentów, ale również warunków wytwarzania kompozytu. Dlatego też powinien być korygowany ze stanem faktycznym osiągniętym w rozważanym kompozycie. Jak wykazują badania eksperymentalne, charakter połączenia pomiędzy komponentami ma podstawowy wpływ na możliwości kreowania własnoś-ci materiału kompozytowego (rys. 3). Uwarunkowany jest bezpośrednio zjawiskami zwilżalności i wiąże się często z ograniczeniem możliwości wprowadzania określonych udziałów objętościowych cząstek do ciekłej osnowy [2, 3].

Podczas poszukiwania korelacji między strukturą a własnościami kompozytu pomija się również szereg dodatkowych czynników strukturalnych, zmiennych w funkcji rodzaju, wielkości i udziału objętościowego cząstek. Poza opisaną powyżej możliwością istotnych zmian składu stopu osnowy do czynników tych można zaliczyć: rozmieszczenie cząstek w osnowie oraz wielkość ziarna osnowy.

Generalnie podczas wytwarzania materiału kompozytowego dąży się do uzyskania jednorodnego rozmieszczenia fazy umacniającej w objętości osnowy (poza materiałami o zaprojektowanym gradientowym rozkładzie cząstek uzyskiwanym przykładowo poprzez odlewanie odśrodkowe). Dla typowych kompozytów równomierność rozkładu cząstek jest jednak podstawowym czynnikiem gwarantującym jednorodność właściwości materiału. Uzyskanie jednorodnej struktury kompozytu

uzależnione jest jednak od zjawisk (głównie zwilżalności) występujących w procesie wytwarzania oraz od parametrów samego procesu. Wykazano ponadto, że rozkład cząstek w osnowie uzależniony jest również od ich wielkości [4, 5].

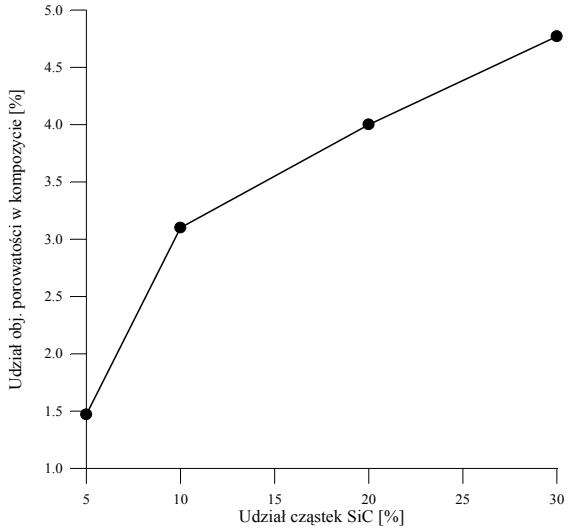


Rys. 3. Zmiany wytrzymałości na rozciąganie R_m w funkcji udziału cząstek SiC wraz z mikrostrukturą połączenia komponentów: a) kompozyt CuTi4-SiC o słabym połączeniu reakcyjnym, SEM, b) kompozyt MgAl5-SiC o silnym połączeniu adhezyjnym, TEM

Fig. 3. Changes in tensile strength R_m dependent on the SiC and the character of joint between components: a) CuTi4/SiC composite with weak reactive joint, SEM; b) MgAl5/SiC composite with strong adhesive joint, TEM

Powszechnie znane mechanizmy umocnieniowe warunkują szereg własności materiału od wielkość ziarna. Jak wykazały badania własne autorów, wielkość ziarna stopu osnowy w kompozytach odlewanych może być zmienną uzależnioną zarówno od udziału, jak i wielkości wprowadzonych cząstek ceramicznych [4, 5]. Wykazano doświadczalnie, że przy zachowaniu tych samych warunków procesu przygotowania oraz krzepnięcia suspensji kompozytowej Mg-SiC wielkość ziarna osnowy istotnie maleje przy wzrastającym udziale objętościowym cząstek o średnicy 40 μm (około 50% zmniejszenie ziarna Mg po wprowadzeniu 20% SiC), podczas gdy cząstki SiC o średnicy 4 μm nie powodują zmian tej wielkości. Zachowanie to uwarunkowane jest znanymi możliwościami oddziaływania frontu krzepnięcia z cząstkami ceramicznymi.

Dodatkowymi czynnikami kształtującymi strukturę kompozytów są zanieczyszczenia oraz porowatość. Często większy stopień zanieczyszczenia kompozytu w stosunku do analogicznego stopu osnowy spowodowany jest trudniejszym procesem wytwarzania kompozytu. Bardziej skomplikowany proces wytwarzania materiału kompozytowego wpływa również na udział porowatości w strukturze kompozytu. Dodatkowo jednak wydaje się, że istotną rolę odgrywa również odmienna wielkość skurczu podczas krzepnięcia kompozytu. Zaobserwowano bowiem wzrost porowatości wraz ze wzrostem udziału cząstek ceramicznych (rys. 4).



Rys. 4. Zmiana udziału porowatości w funkcji udziału cząstek SiC w kompozytach magnezowych

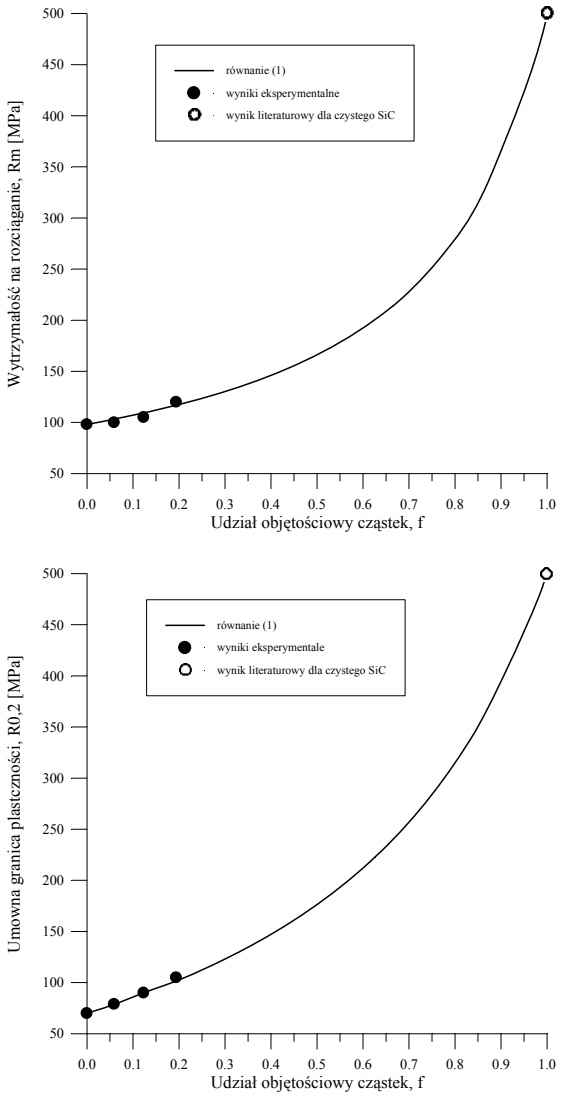
Fig. 4. Changes of porosity versus SiC fraction in magnesium composites

Ze względu na przedstawioną dużą ilość czynników charakteryzujących strukturę odlewanych kompozytów metalowych umacnianych cząstkami ceramicznymi oczywista wydaje się częsta niezgodność modeli numerycznych z danymi eksperymentalnymi. Wydaje się bowiem, że objęcie jedną funkcją matematyczną takiej ilości wzajemnie powiązanych zmiennych jest wręcz nierealne. Niemniej jednak przy eliminacji pewnych czynników, takich jak: porowatość, zanieczyszczenia czy zmiana składu osnowy, oraz ustaleniu pozostałych czynników na określonym poziomie poszukuje się ogólnych modeli korelujących strukturę z własnościami.

W wyniku szeregu analiz i badań kompozytów umacnianych cząstkami wydaje się bowiem, że najbardziej adekwatnym modelem jest zaadaptowanie wyprowadzonej przez Maxwella [6] zależności parametru (własności) od udziału objętościowego, własności komponentów oraz ich wzajemnego oddziaływania w postaci

$$y_C = y_O \cdot \left[\frac{y_P + 2 \cdot S \cdot y_M + 2 \cdot f\left(y_P - y_M\right)}{y_P + 2 \cdot S \cdot y_M - f \cdot \left(y_P - y_M\right)} \right] \qquad (1)$$

gdzie *y* oznacza wyznaczaną właściwość, np. R_m, $R_{0,2}$, E, J_{IC}, *f* - udział objętościowy cząstek, natomiast indeksy *C*, *M*, *P* odnoszą się odpowiednio do kompozytu, osnowy i cząstek, *S* - dodatkowy współczynnik, wprowadzony do równania Maxwella przez Halpina i Tsaia [7].



Rys. 5. Zależności R_m oraz $R_{0,2}$ od udziału cząstek w kompozycie (krzy-we teoretyczne i wyniki doświadczalne)

Fig. 5. Dependence of R_m and $R_{0,2}$ from particle fraction in a composite (theoretical curves and experimantal data)

Funkcja ta, przedstawiona ogólnie w równaniu (1), znalazła dość ścisłe potwierdzenie w wynikach badań eksperymentalnych dla kompozytów Mg-SiC. Należy zaznaczyć, że materiały te charakteryzują się przede wszystkim równomiernym rozmieszczeniem cząstek, bardzo spójnym i wytrzymałym połączeniem komponentów oraz niezależnością składu stopu osnowy od udziału cząstek SiC [3]. Na rysunku 5 przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych w porównaniu z war-tościami teoretycznymi wyliczonymi z równania (1) dla wytrzymałości na rozciąganie oraz umownej granicy plastyczności w funkcji udziału objętościowego cząstek SiC. Dodatkowy współczynnik *S* określono, adaptując model ścinania na granicy osnowa-faza umacniająca (*the shear lag model* [7]).

LITERATURA

[1] Zyska A., Braszczyńska K.N., Wpływ warstwy SiO_2 pokrywającej cząstki SiC na strukturę kompozytów AlMg5-SiC, Krzepnięcie Metali i Stopów 2000, 42, 181-190.

[2] Braszczyńska K., Bochenek A., Wpływ struktury osnowy na własności mechaniczne kompozytu CuTi-SiC, Inżynieria Materiałowa 1996, 4, 117-121.

[3] Bochenek A., Braszczyńska K.N., Structural Analysis of the MgAl5 Matrix - SiC Particles Cast Composites, Mater. Sci. Eng. 2000, A290, 122-127.

[4] Bochenek A., Braszczyńska K., Proces krzepnięcia kompozytów odlewanych magnez-cząstki SiC, Archives of Mechanical Technology and Automatization, Poznań 1998, 18, 23--33.

[5] Braszczyńska K.N., Bochenek A., Contribution of the silicon carbide particles to the formation of the structure of magnesium cast composites, La Revue de Metallurgie - CIT/Science et Génie des Matériaux 2000, 12, 1-8.

[6] Maxwell J.C., A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. 1, Reprinted by Oxford University Press, London 1892.

[7] Hull D., Clyne T., An Introdution to Composite Materials, Cambridge University Press, Cambridge 1996.

Recenzent
Michał Szweycer