

## ZWIĄZEK GEOMETRYCZNYCH CECH KOMPONENTÓW WZMACNIAJĄCYCH Z TECHNOLOGICZNYMI I EKSPLOATACYJNYMI WŁAŚCIWOŚCIAMI KOMPOZYTÓW ODLEWANYCH

M. CHOLEWA<sup>1</sup>, J GAWROŃSKI<sup>2</sup>  
Katedra Odlewnictwa, Politechnika Śląska,

### STRESZCZENIE

Opracowanie dotyczy odlewanych metalowych kompozytów cząstkowych. W opracowaniu przedstawiono związki modułu morfologicznego opisujące komponenty wzmacniające z podstawowymi właściwościami technologicznymi i użytkowymi. Zaprezentowano przyjęty plan eksperymentu, równania opisujące badane zależności oraz odpowiadające im wybrane wykresy.

### 1. WPROWADZENIE

Prezentowane opracowanie jest próbą doświadczalnej weryfikacji szerokiej tezy zgodnie z którą zarówno właściwości technologiczne ciekłego i krzepnącego kompozytu oraz jego eksploatacyjne właściwości zależą od kształtu i geometrycznych cech elementów zbrojących.

### 2. METODYKA BADAŃ

Analizowano kompozyty wykonane ze stopu AK11 zbrojonego cząstkami ceramicznymi - SiO<sub>2</sub> lub SiC lub Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Badaniom ilościowym poddano cząstki o zbliżonych wymiarach uzyskanych przez przesiewanie w znormalizowanym zestawie do analizy sitowej. Do badań wytypowano materiały, których cząstki posiadają kształty możliwie najbardziej zbliżone do teoretycznych brył foremnych.

---

<sup>1</sup> Dr inż. e-mail: [sekrmt3@zeus.polsl.gliwice.pl](mailto:sekrmt3@zeus.polsl.gliwice.pl)

<sup>2</sup> Prof. zw. dr inż. e-mail: [sekrmt3@zeus.polsl.gliwice.pl](mailto:sekrmt3@zeus.polsl.gliwice.pl)



c)  
Rys. 1. Cząstki a) wzorcowego piasku kwarcowego( $\text{SiO}_2$ ), b) węgliku krzemu ( $\text{SiC}$ ), c) tlenku aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). (powiększenie 5x i 10x)

Fig. 1. Particles a) model quartz sand, b) silicon carbide ( $\text{SiC}$ ), c) aluminum oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) magn. 5x & 10x

Jako podstawowy ze względu na swą dużą wielkość przyjęto wzorcowy piasek kwarcowy ( $\text{SiO}_2$ ). Pozostałe materiały zbrojące dobrano do wielkości piasku. Pomimo swych znacznych rozmiarów rzędu  $150 \mu\text{m}$  cząstki  $\text{SiO}_2$  doskonale nadają się do badań modelowych kompozytów. Analizie ilościowej poddano także cząstki  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiC}$ . Poniżej w tabelicy 1 zaprezentowano niektóre, wybrane wyniki analizy ilościowej pozwalające na określenie wielkości geometrycznych charakteryzujących cząstki.[1,2]. Natomiast na rys. 1 pokazano mikrografie badanych materiałów

Tabela 1. Zależności geometryczne w modelowych cząstkach ceramicznych  
Table 1. Geometrical dependencies in model ceramic particles

	Piasek kwarcowy		Węgiel krzemu		Tlenek aluminium	
	Średnia	Odchyl. Stand.	Średnia	Odchyl. Stand.	Średnia	Odchyl. Stand.
Powierzchnia [ $\mu\text{m}^2$ ]	31102	13401	20743	4788	16564	5959
Długość [ $\mu\text{m}$ ]	236	74	221	40	203	50
Szerokość	185	52	146	23	127	33
Obwód [ $\mu\text{m}$ ]	656	255	586	77	546	116
Liczba obiektów	49 w 12 polach		56 w 8 polach		50 w 7 polach	
<b><math>M_m</math> [<math>1/\mu\text{m}</math>]</b>	<b>0,021</b>		<b>0,028</b>		<b>0,033</b>	

Przeprowadzona analiza ilościowa oraz wyznaczone wartości modułów posłużyły utworzeniu macierzy planu eksperymentu, w której jako podstawowe wynikowe czynniki technologiczne przyjęto zakresy temperatur i czasów krzepnięcia. Natomiast jako podstawowe właściwości eksploatacyjne przyjęto: twardość Brinella, wytrzymałość na ścislenie – jako jedyny dopuszczalny stan obciążenia w narażonych na zużycie parach kinematycznych oraz odwrotność wielkości zużycia zapisaną tutaj jako odporność na zużycie. Jako podstawowe czynniki wejściowe w procesie wytwarzania uznano udział wagowy komponentu zbrojącego, temperaturę wytwarzania kompozytu w stanie ciekłym oraz moduł morfologiczny charakteryzujący ciepło-geometryczne właściwości zbrojenia. W tabelicy 2 zamieszczono poszczególne wartości wejściowe oraz wyjściowe po trzykrotnym przeprowadzeniu każdego z trzynastu doświadczeń posłużono się częściowym, trójpoziomym planem Hartley'a

Prezentowane wyniki stanowią wartości średnie wyznaczone na podstawie znormalizowanych pomiarów z trzech odlewów próbných. Bezpośrednio poniżej tabelicy planu eksperymentu zamieszczono tablicę odchyleń standardowych badanych

wielkości. Do analizy właściwości technologicznych kompozytu posłużono się analizą termiczną i derywacyjną. Wyznaczono w ten sposób dwa podstawowe parametry zakres temperatur krzepnięcia oraz zakres czasów krzepnięcia. Wybór takich czynników został podyktowany brakiem informacji co do ogólnych zasad projektowania układów zasilania dla odlewów kompozytowych. Poza koniecznością zbadania reologicznych właściwości ciekłych kompozytów, które z pewnością także powinny zależeć od wielkości modułu morfologicznego, obecnie określono podstawowe wielkości cieplne związane z krzepnięciem.

Tabela 2. Macierz planu eksperymentu  
Table 2. Matrix of experimental design

L.p.	Moduł morf.	Udział wagowy zbrojenia	Temp. tworzenia kompozytu	Zakres temp. krzepn.	Zakres czasów krzepn.	Odporność na zużycie cierne	Twardość	Wytrzym. na ściskanie
	[1/μm]	%	[°C]	[°C]	[s]	[1/mm <sup>3</sup> ]	[HB]	[MPa]
1	0,028	1	720	10,1	155,6	17,5	42,4	256,4
2	0,028	3	680	10,2	180,3	4,2	47,6	319,8
3	0,021	1	720	9,0	146,3	1,8	46,8	221,3
4	0,021	3	700	11,2	146,4	4,4	49,3	291,0
5	0,032	1	700	5,0	97,2	1,6	49,3	225,1
6	0,032	3	700	5,6	121,5	31,9	43,4	268,2
7	0,028	2	700	13,6	266,1	5,3	47,2	279,2
8	0,021	2	700	6,6	121,8	2,4	51,1	232,0
9	0,032	2	680	4,3	139,9	2,4	46,9	304,5
10	0,032	2	700	4,7	200,7	2,1	49,7	297,1
11	0,032	2	720	6,4	113,5	17,2	41,1	221,9

Tablica 3 Wartości odchyłeń standardowych badanych wielkości wyjściowych z tabl. 2.  
Table 3. Standard deviation values of researching output quantity from table 2

L.p.	Odch. st. ΔT	Odch. st. Δt	Odch. st. Rt	Odch. St HB	Odch. st. Rc
1	1,89	12,30	16,51	4,92	57,23
2	2,43	38,92	2,60	1,80	6,98
3	1,38	33,69	0,07	4,70	57,43
4	1,78	28,96	10,60	1,20	42,81
5	0,69	8,35	0,11	0,70	56,50
6	0,33	19,46	36,66	5,09	32,32
7	1,64	55,92	1,56	2,17	63,26
8	2,52	18,54	0,23	1,36	57,23
9	0,90	24,26	0,23	2,73	1,31
10	1,24	8,13	0,09	1,61	1,65
11	2,09	12,98	16,75	3,63	46,77

gdzie:

Moduł morfologiczny:

$$M_z = F_z / V_z = O_z / S_z \text{ [1/m]} \quad (1)$$

F, V, O, S – odpowiednio: powierzchnia zewnętrzna, objętość cząstek zbrojących, obwód i pole powierzchni przekroju zbrojenia,

Indeks „z” odnosi się do zbrojenia

Na podstawie otrzymanych wyników utworzono funkcje opisujące w badanym zakresie zależności wybranych parametrów technologicznych i eksploatacyjnych:

**a) Zakres temperatur krzepnięcia osnowy kompozytu:**

$$\Delta T = -17 - 2,63 \cdot 10^{-6} \cdot M^6 \cdot I \cdot Tm + 0,5678 \cdot I^{-0,5} + 4,82 \cdot 10^{-5} \cdot Tm^2$$

współczynnik korelacji R=0,86

test Fischera F=5,82

test wiarygodności W=2,61

wartość średnia SY=7,30;

odchylenie standardowe Y=1,60 %.

**b) Zakres czasów krzepnięcia osnowy kompozytu:**

$$\Delta t = 977,97 - 1,18 \cdot Tm$$

współczynnik korelacji R=0,92

test Fischera F=19,65

test wiarygodności W=5,14

wartość średnia SY=289,60;

odchylenie standardowe Y=63,25 %.

**c) Wskaźnik odporności na zużycie cierne:**

$$Rt = 2,98 - 21,52 \cdot M + 0,642 \cdot I^2 - 1,89 \cdot 10^{-3} \cdot I \cdot Tm$$

współczynnik korelacji R=0,99

test Fischera F=227,81

test wiarygodności W=114,41

wartość średnia SY=2,71;

odchylenie standardowe Y=0,11 %.

**d) Wytrzymałość na ściskanie:**

$$Rc = 302,11 + \frac{I \cdot (19,04 - 2,71 \cdot 10^{-2} \cdot Tm)}{M}$$

współczynnik korelacji R=0,96

test Fischera F=29,38 test wiarygodności W=10,46

wartość średnia SY=7,45;

odchylenie standardowe Y=0,56 %.

**e) Twardość Brinella:**

$$HB = 193,57 - M(352,4 - 63,23 \cdot I) - 0,19 \cdot Tm$$

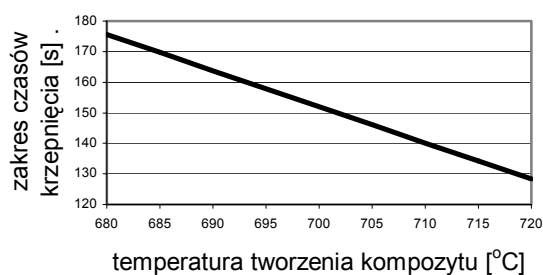
współczynnik korelacji  $R=0,89$

test Fischera  $F=8,39$

test wiarygodności  $W=3,46$

wartość średnia  $SY=46,51$ ;

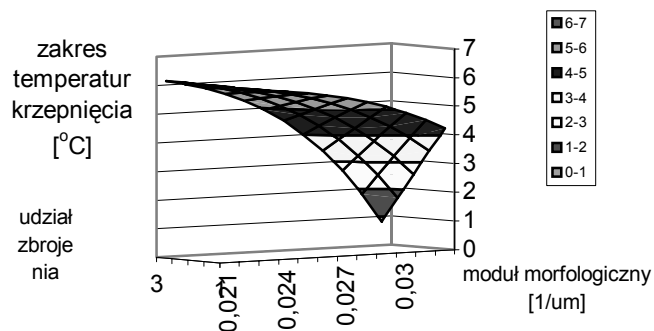
odchylenie standardowe  $Y=1,740\%$ .



Rys. 2. Zakres czasów krzepnięcia osnowy około eutektycznego stopu Al-Si w funkcji temperatury tworzenia kompozytu w stanie ciekłym.

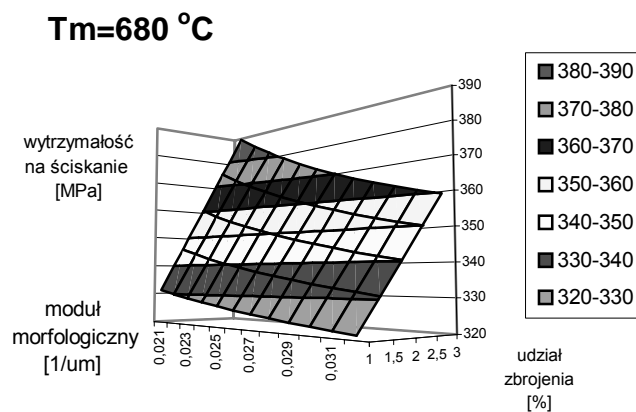
Fig. 2. Range of crystallization times of by eutectic Al. – Si alloy in function of temperature composite formatting in liquid

**$T_m=680\text{ }^{\circ}\text{C}$**



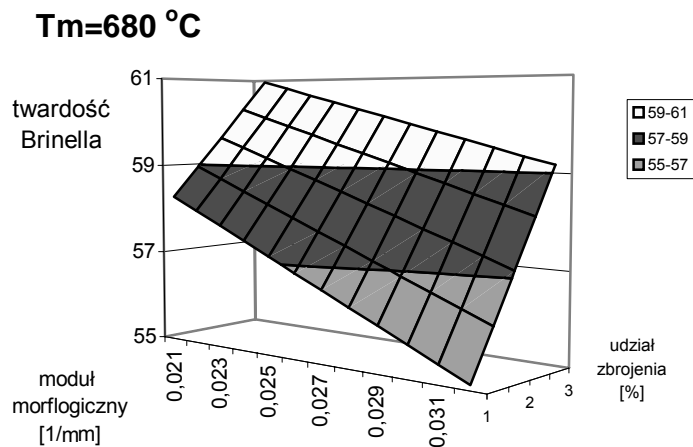
Rys. 3. Zakres temperatur krzepnięcia osnowy około eutektycznego stopu Al-Si w funkcji udziału wagowego zbrojenia i wielkości modułu morfologicznego przy stałej temperaturze tworzenia kompozytu w stanie ciekłym.

Fig. 3. Range of crystallization times of by eutectic Al. – Si alloy in function of reinforcement mass fraction and morphological modulus quantity in constant temperature composite formatting in liquid



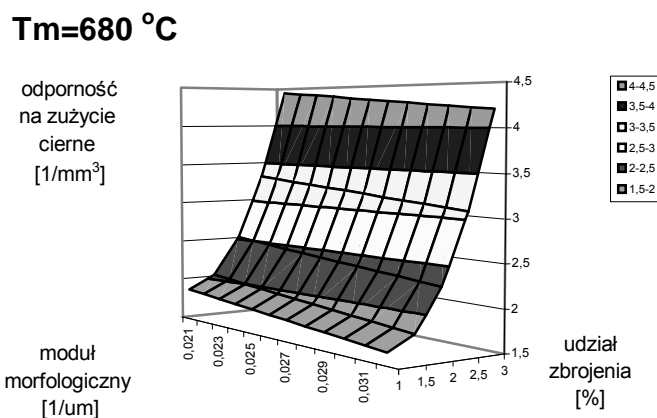
Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie kompozytu w funkcji udziału wagowego zbrojenia i wielkości modułu morfologicznego zbrojenia przy stałej temperaturze tworzenia kompozytu w stanie ciekłym.

Fig. 4. Torsional strength of composite in function of reinforcement mass fraction and morphological modulus quantity in constant temperature composite formatting in liquid



Rys. 5. Twardość Brinella osnowy kompozytu w funkcji udziału wagowego zbrojenia i wielkości modułu morfologicznego zbrojenia przy stałej temperaturze tworzenia kompozytu w stanie ciekłym.

Fig. 5. Brinell hardness of composite matrix in function of reinforcement mass fraction and morphological modulus quantity in constant temperature composite formatting in liquid



Rys. 6. Odporność na zużycie cierne kompozytu w funkcji udziału wagowego zbrojenia i wielkości modułu morfologicznego zbrojenia przy stałej temperaturze tworzenia kompozytu w stanie ciekłym.

Fig. 6. Abrasive wear resistant of composite in function of reinforcement mass fraction and morphological modulus quantity in constant temperature composite formatting in liquid

### 3. DYSKUSJA WYNIKÓW

Spośród badanych czynników szczególną uwagę poświęcono związkowi modułu morfologicznego z badanymi wielkościami wyjściowymi. Jak wynika z prezentowanych wyników wzrost wartości modułu wskazujący na wielkość powierzchni przypadającej na jednostkę objętości zbrojenia powoduje skrócenie zakresu temperatur krzepnięcia, co następuje przy rosnącym udziale wagowym zbrojenia. Stwierdzono brak związku między modułem a zakresem czasu krzepnięcia osnowy kompozytu. Potwierdzony został w ten sposób efekt przeanalizowany uprzednio w wyniku komputerowych symulacji krzepnięcia mikroobszarów kompozytowych [3].

Wśród analizowanych właściwości użytkowych moduł wyraźnie jest związany z wytrzymałością na ściskanie oraz z twardością Brinella osnowy. W obu przypadkach maleją one ze wzrostem wartości modułu, co można tłumaczyć efektem działania karbu, któremu odpowiada wzrost modułu. W badanym zakresie stwierdzono niewielki związek modułu z odpornością na zużycie cierne. Najsilniejszy wpływ wykazuje tutaj ilość zbrojenia.

W świetle uzyskanych wyników wydaje się niezbędne przeprowadzenie dalszych badań przy większych zawartościach zbrojenia



**LITERATURA**

- [1] Cholewa M., Gawroński J: *Morfologia cząstek zbrojących SiC i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> w odlewanych kompozytach odpornych na zużycie*. Międzyn. Konf. "Teoria i praktyka procesów odlewniczych" Kom. Odlewn. PAN Katowice, Pol. Łódzka, Bielsko - Biała 05. 1997r.
- [2] Cholewa M., Gawroński J.: *Analiza ruchu ciepła w mikroobszarze kompozytu zbrojonego cząstkami SiC*, Mat. Konf. Krzepnięcie Metali i Stopów, PAN Katowice, 1998
- [3] Cholewa M.: *Korelacje między cieplno-geometrycznymi właściwościami zbrojenia w kompozytach dyspersyjnych* Mat. Konf. Krzepnięcie Metali i Stopów, PAN Kielce, 2000

**GEOMETRICAL CHARACTERISTICS OF REINFORCEMENT  
COMPONENT WITH TECHNOLOGICAL AND EXPLOITATION  
PROPERTIES CONNECTION OF CAST COMPOSITES**

**SUMMARY**

Study concern metal casting particles components. In this study morphological modulus describing reinforcement components with basic technological and using properties connection are presented. Moreover experiment design, equation describing researching dependencies and diagrams corresponding with them are presented.

Reviewed by prof. Stanisław Jura