

Anna Dolata-Grosz<sup>1\*</sup>, Werner Hufenbach<sup>2</sup>, Józef Śleżiona<sup>3</sup>, Maik Gude<sup>4</sup>, Andrzej Czulak<sup>5</sup>

<sup>1,3</sup> Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Katedra Technologii Stopów Metali i Kompozytów  
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Poland

<sup>2,4,5</sup> Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK), TU Dresden, 01062 Dresden, Germany

\* Corresponding author. E-mail: anna.dolata-grosz@polsl.pl

Otrzymano (Received) 24.02.2009

## ZASTOSOWANIE KOMPOZYTOWEGO MIESZADŁA SiC/C W UKŁADACH MIESZANIA ZAWIESIN

Główny cel podjętych badań, przedstawionych w artykule, dotyczył zaprojektowania, wykonania i weryfikacji technologicznej mieszadła z włókien węglowych i ceramicznej osnowy (SiC) w zastosowaniu do wytwarzania zawiesin kompozytowych. Założono, że zalety włóknistych kompozytów o osnowie ceramicznej, takie jak: odporność na oddziaływania cieplne, mechaniczne i chemiczne, poprawia trwałość mieszadła w stosunku do dotychczas stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych (metal, grafit). Projekt mieszadła (2D i 3D) wykonano w programie Solid Works. Analizę stanu naprężeń łopatkki wraz z fragmentem osi kompozytowej wykonano metodą elementów skończonych (MES). Do wytworzenia poszczególnych elementów mieszadła zastosowano metody nawijania, laminowania ręcznego, a następnie technologię infiltracji i pirolizy polimerowo-ceramicznym prekursorem (PIP). Testy laboratoryjne zaprojektowanego i wykonanego w ILK (TU Dresden) kompozytowego mieszadła w układzie SiC/C potwierdziły założenia projektowe dotyczące jego odporności cieplnej, mechanicznej i chemicznej. Badania zrealizowano w ramach współpracy polsko-niemieckiej pomiędzy Instytutem Konstrukcji Lekkich i Technologii Polimerowych w TU Dresden a Katedrą Technologii Stopów Metali i Kompozytów w Politechnice Śląskiej.

**Słowa kluczowe:** CMC, mieszadło SiC/C, wytwarzanie zawiesin, właściwości

## APPLICATION OF SiC/C COMPOSITE STIRRER IN SUSPENSION MIXING SYSTEMS

Among the factors that have a considerable influence on the quality of metal composites reinforced with ceramic particles or short fibre, obtained via liquid-phase technologies, the most significant one is the quality of the composite suspension intended for casting. Its quality is determined by such factors as: the degree of gassing, a uniform reinforcing phase distribution and absence of chemical or solid impurities. In a mechanical stirring process, the quality of the mixture depends on a number of elements, the most important ones including the thermodynamic conditions (stable temperature and process pressure), physiochemical conditions (furnace atmosphere, chemical composition of the metal bath and reinforcing phase), and mechanical conditions (whirling speed, vortex shape and limitation of flow turbulence, and proper distribution of the reinforcing phase), the latter being the most difficult to implement and maintain their repeatability. The type of stirrer used in the process is responsible for the overall mechanical conditions. Its shape, durability and chemical resistance determine, to a large degree, the quality of the composite mixture obtained. In article were presented assumptions and choose results of investigations connected with material selection and technology production of prototype's ceramic stirrer with destination to work in environment of liquid metal. Main aim of undertake investigations concerned designing, realization and technological verification of carbon fibres and ceramic matrix (SiC) stirrer used to production of composite suspensions. It was made an assumption that advantages of fibres composites with ceramic matrix, such as: thermal, mechanical and chemical will increase durability of stirrer in comparison with so far constructional solutions applied (metal, graphite). Project of stirrer (2D and 3D) was made in Solid Works programme. State of tensions analysis in blade with part of composites axis was executed with Finished Elements Method (MES). To producing of each elements of stirrer methods the winding, hand laminating and then polymer infiltration and pyrolysis technique, (PIP) were applied. Further laboratory tests of the SiC/C composite stirrer, designed and developed in the ILK (TU Dresden) have confirmed rightness of the design, assumptions regarding the thermal, mechanical and chemical resistance of the stirrer. Investigation was made within the confines of German-Polish cooperation between Institute of Lightweight Engineering and Polymer Technology in TU Dresden and Department of Alloys and Composite Materials Technology in the Silesian University of Technology.

**Keywords:** CMC, SiC/C stirrer, suspension manufacturing, properties

## WPROWADZENIE

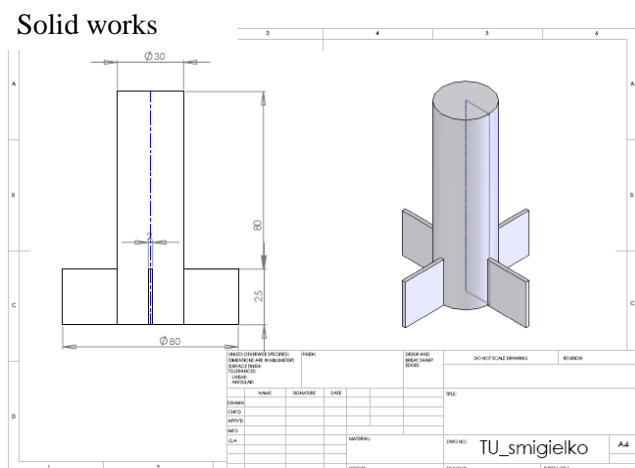
Trudności dotyczące trwałości, a także problemy związane z obróbką ubytkową dotychczas stosowanych mieszadeł grafitowych, wykorzystywanych w procesach

mieszania ciekłego metalu i wytwarzania zawiesin kompozytowych, były powodem do poszukiwania nowych rozwiązań materiałowych i technologicznych [1-

-7]. W ramach współpracy polsko-niemieckiej pomiędzy Instytutem Konstrukcji Lekkich i Technologii Polimerowych w TU Dresden a Katedrą Technologii Stopów Metali i Kompozytów w Politechnice Śląskiej zaproponowano nowe, alternatywne rozwiązanie, które oparto na wykorzystaniu kompozytu z grupy materiałów CMC [1]. Doboru rodzaju i postaci komponentów w zaprojektowanym mieszadle (osnowy i zbrojenia) dokonano z uwzględnieniem znanych zalet materiałów ceramicznych, takich jak: mała gęstość, wysoka wytrzymałość i sztywność, dobra stabilność temperaturowa, dobra wytrzymałość zmęczeniowa, odporność na szoki termiczne, bardzo dobre własności trybologiczne, stabilność kształtu oraz odporność chemiczna [8]. Założono, iż powyższe cechy tworzyw ceramicznych pozwolą na ich wykorzystanie w konstrukcji układu mieszania pracującego w środowisku ciekłego metalu. Bazując na doświadczeniu współpracujących jednostek naukowych, zaprojektowano i wykonano mieszadło z materiału kompozytowego o osnowie ceramicznej SiC wzmocnianej ciągłym włóknem węglowym (SiC/C). Produkt końcowy podjętych badań to prototyp mieszadła, które zastosowano w rzeczywistych warunkach wytwarzania zawiesin kompozytowych w skali laboratoryjnej.

## PROJEKT MIESZADŁA

Projekt mieszadła (modele 2D i 3D) wykonano w programie Solid Works. Na podstawie rysunku wykonawczego, w którym zwymiarowano projektowane mieszadło kompozytowe w układzie SiC/C, możliwe było wytworzenie jego poszczególnych elementów, łopatek i osi (rys. 1).



Rys. 1. Rysunek techniczny kompozytowego mieszadła SiC/C wykonany w programie Solid Works

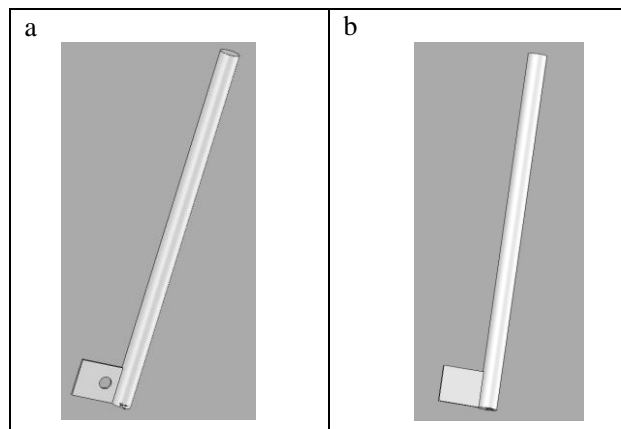
Fig. 1. Technical drawing of SiC/C composite stirrer prepared in the Solid Works programme

Optymalny kształt mieszadła zaprojektowano, biorąc pod uwagę możliwości technologiczne Instytutu Konstrukcji Lekkich i Technologii Polimerowych (ILK TU Dresden), a przede wszystkim warunki wytwarzania

i rozwiązanie konstrukcyjne stanowiska technologicznego stosowanego do mieszania stopów oraz wytwarzania zawiesin kompozytowych w Katedrze Technologii Stopów Metali i Kompozytów w Politechnice Śląskiej. Podczas projektowania kształtu i wymiarów mieszadła zwrócono szczególną uwagę na wymogi wynikające z kształtowania strugi wirującego metalu w trakcie jego pracy [4, 6, 9]. W układzie rzeczywistym mieszanie ciekłego stopu powoduje powstanie tzw. wiru centralnego i wiru potencjalnego, odpowiedzialnych za wprowadzenie i równomierne rozmieszczenie cząstek ceramicznych w ciekłej, metalowej osnowie podczas wytwarzania zawiesiny kompozytowej.

## Analiza stanu naprężeń

Do analizy stanu naprężeń elementu łopatki wraz z fragmentem osi kompozytowej wykorzystano metodę elementów skończonych (MES) oraz programy: COSMOS i Solid Works. Kierując się wskazaniem z książki „Mieszanie układów wielofazowych” prof. J. Kamieńskiego, przeanalizowano dwa warianty wykonania mieszadeł z otworem okrągłym w łopatce oraz bez otworu (rys. rys. 2, 3). Celem badania było znalezienie miejsc występowania największych naprężeń oraz ewentualnych przyszłych uszkodzeń gotowego elementu mieszadła. Obciążenie wyliczono z gęstości ciekłego aluminium w temperaturze ok. 650°C i przeliczono na powierzchnie łopatki. Wyniki analizy przedstawiono na rysunku 3.

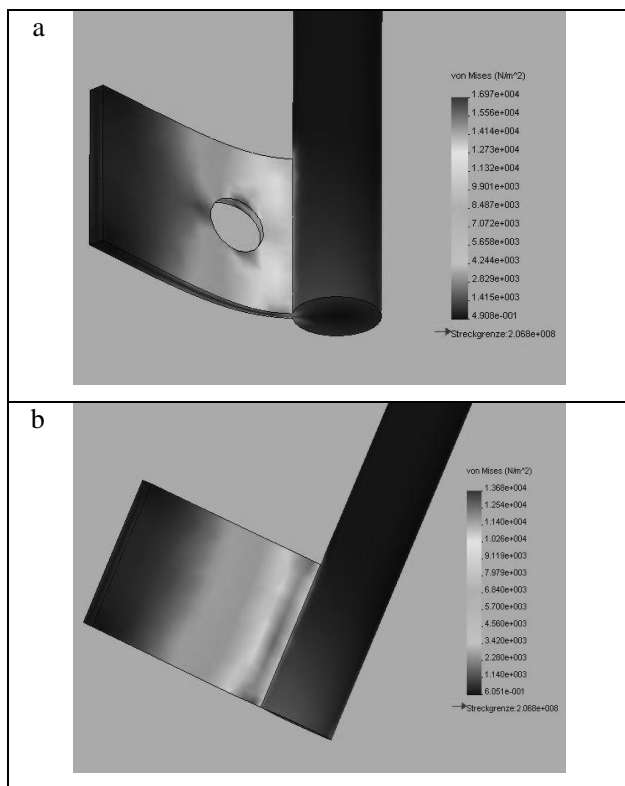


Rys. 2. Model 3D kompozytowego mieszadła SiC/C wykonany w programie Solid Works: a) z otworem, b) bez otworu

Fig. 2. 3D model of SiC/C composite stirrer prepared in the Solid Works programme: a) with hole b) without hole

Z przeprowadzonej analizy występujących naprężeń wynika, że większa wartość naprężeń występuje w łopatce z otworem i wynosi 16 970 N/m<sup>2</sup> (rys. 3a). Jednak ich koncentracja występuje jedynie w okolicach karbu, a w miejscu przyłączenia do osi są one zredukowane do wielkości 9900 N/m<sup>2</sup>. W przypadku łopatki wykonanej bez otworu naprężenia maksymalne osiągają wartość 13 680 N/m<sup>2</sup>, jednak są skoncentrowane w okolicy przyłączenia łopatki do korpusu osi (rys. 3b). Należy zaznaczyć, że wielkość tych naprężeń jest war-

tością bardzo małą w stosunku do wytrzymałości projektowanego materiału, a także połączenia i znacznie odbiega od wartości krytycznych. Ponadto zwiększenie średnicy osi w procesie produkcyjnym pozwoli na dodatkowe obniżenie obliczonych naprężeń.



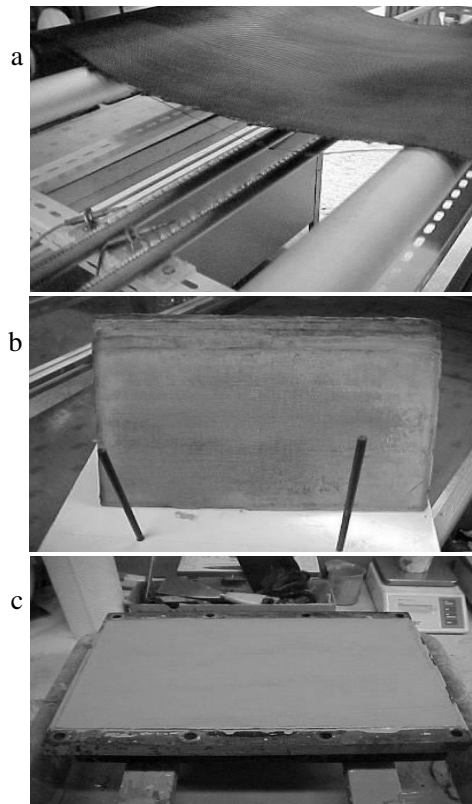
Rys. 3. Rozkład naprężeń w łopatkach mieszadła z otworem i bez otworu  
Fig. 3. Stress pattern in the blade with round hole and without any hole

## OPRACOWANIE TECHNOLOGII WYTWARZANIA MIESZADŁA SiC/C

Do wykonania osi mieszadła z ceramiki zbrojonej włóknem węglowym zastosowano zmodyfikowaną metodę nawijania, wykorzystywaną w ILK TU Dresden [10]. Metoda ta pozwala na: wykonanie elementów z ceramiki zbrojonej włóknem ciągłym o kącie  $<45^\circ$ , jednorodne połączenie włókien i osnowy z zachowaniem struktury nawijania, dokładne ułożenie włókien z programowalnym nacięciem, a przede wszystkim uzyskanie wysokiego, wymaganego udziału włókien w wykonywanych elementach z przeznaczeniem do przenoszenia większych obciążeń (w przypadku zaprojektowanego mieszadła przede wszystkim ciśnienia i oporów przepływu podczas wirowania ciekłego metalu).

Do wykonania elementów łopatek wykorzystano zmodyfikowaną metodę laminowania ręcznego i maty z włókna węglowego o odpowiednim kącie ułożenia zbrojenia  $[0,90]$  (rys. 4). W celu uzyskania zakładanej grubości płyty (2 mm) ułożono 8 warstw przygotowanych wcześniej mat na przeznaczony do tego celu formie stalowej. Impregnację mat przeprowadzono przy zastosowaniu wałków. Odpowiedni docisk zapewnił

odprowadzenie nadmiaru syciwa, zapewniając wymaganą zawartość włókien w płycie. Dla tak przygotowanych elementów mieszadła zastosowano technologię infiltracji i pirolizy polimerem (PIP), opisaną w pracy [11]. Następnie, korzystając z metody wycinania strumieniem wody, wykonano elementy łopatek.



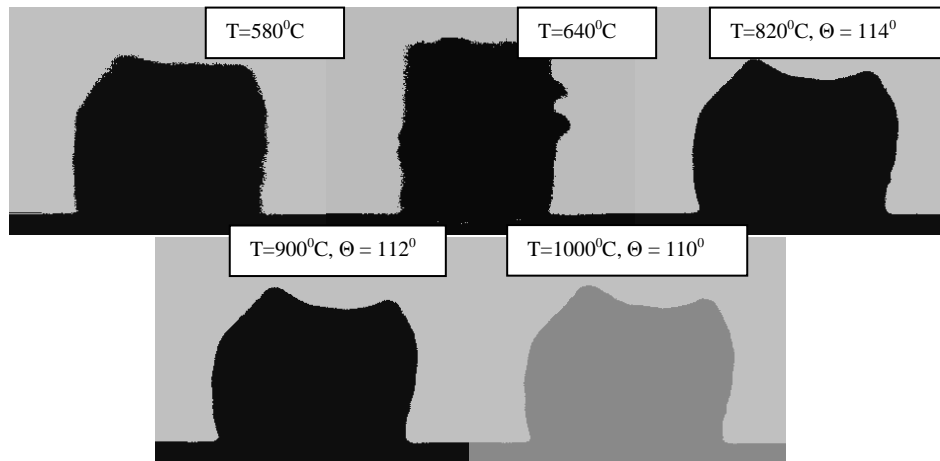
Rys. 4. Etapy wytwarzania łopatek mieszadła SiC/C  
Fig. 4. Manufacture stages of SiC/C stirrer blades

## OCENA MATERIAŁU MIESZADŁA W KONTAKCIE ZE STOPAMI ALUMINIUM

### Badania zwilżalności powierzchni materiału mieszadła przez ciekły metal

Badania zwilżalności, a zatem przydatność kompozytu SiC/C do pracy w warunkach ciekłego metalu przeprowadzono metodą leżącej kropli (rys. 5 i 6).

Badania wykonano w Politechnice Śląskiej (rys. 5), a także w Instytucie Odlewnictwa w Krakowie (rys. 6), stosując różne procedury wytwarzania kropli. Metodę CH (contact heating), w której próbka stopu Al i podłoża znajdują się w kontakcie podczas nagrzewania do temperatury badań, [12] oraz metodę CP (capillary purification technique), w której prowadzone jest osobne nagrzewanie próbek, połączono z wyciskaniem kropli metalu z kapilary w momencie osiągnięcia temperatury badań [13]. Po badaniach nie stwierdzono żadnego połączenia kropli metalu z podłożem, nawet w podwyższonej temperaturze (rys. 5). Uzyskane wyniki świadczą o przydatności użytego kompozytu do pracy w warunkach ciekłego metalu z zastosowaniem na mieszadło mechaniczne.



Rys. 5. Obrazy kropli stopu Al na podkładce z kompozytu SiC/C, metoda leżącej kropli CH

Fig. 5. Photographs of AlSi9Cu droop on C/SiC composite plate, sessile drop wettability method CH

Nr pomiaru	Stop AlSi9Cu-SiC/C			Czyste Al-SiC/C		
	θ lewy [°]	θ prawy [°]	θ średnia [°]	θ lewy [°]	θ prawy [°]	θ średnia [°]
0	137,602	149,443	144	107,322	136,601	122
1	138,127	149,151	144	106,291	137,28	122
2	137,694	149,367	144	103,103	137,544	120
3	137,951	149,718	144	102,685	138,008	120
4	138,376	149,133	144	98,993	138,477	119
5	138,344	148,871	144	97,758	138,362	118
6	137,654	148,616	143	95,394	138,522	117
7	84,04	148,64	116	94,902	138,162	117
8	89,451	147,943	119	93,576	138,027	116
9	88,266	148,103	118	93,89	138,213	116
10	90,906	148,246	120	93,367	136,211	115

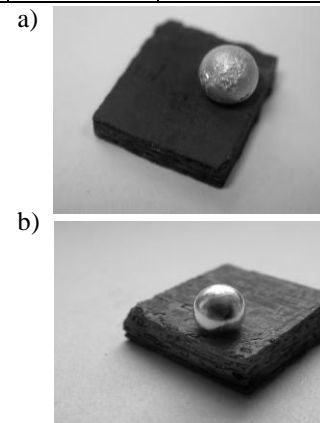
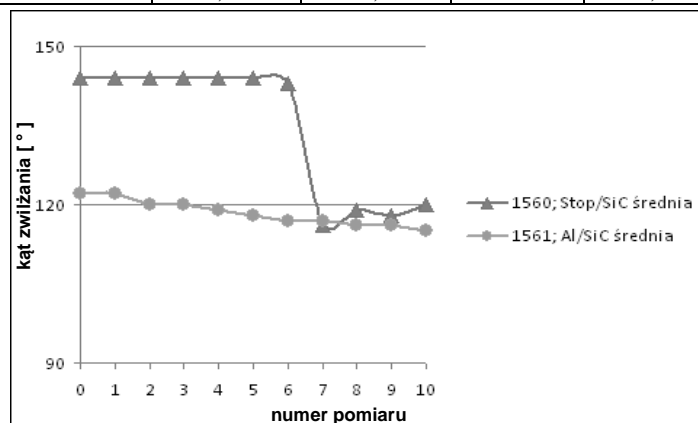
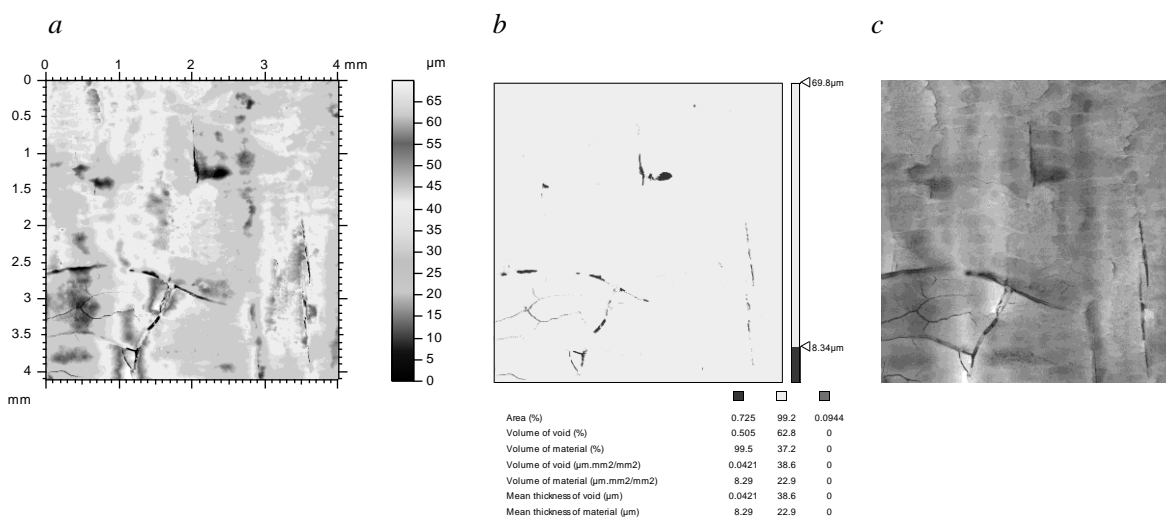
Rys. 6. Wyniki pomiaru skrajnego kąta zwilżania  $\theta$  i obrazy próbki stopu AlSi9Cu na podkładce z kompozytu C/SiC, metoda leżącej kropli, CP

Fig. 6. Measurement results of the contact angle and photographs of AlSi9Cu droop on C/SiC composite plate, sessile drop wettability method, CP

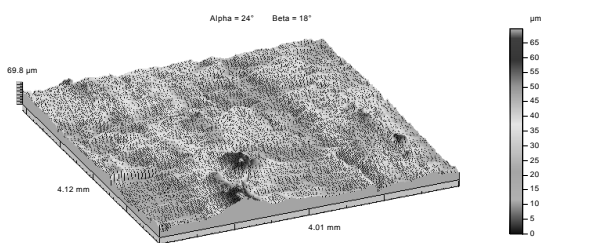
### Badania profilografometryczne

Obok wielu czynników wpływ na trwałość mieszadła pracującego w środowisku ciekłego metalu ma stan jego powierzchni. Charakterystyczne cechy geometrii powierzchni zostały wyznaczone w badaniach profilografometrycznych, przeprowadzonych przy użyciu bezkontaktowego profilometru optycznego FRT Micro'Prof. Badaniami objęto wybrane fragmenty powierzchni łopatki mieszadła. Powierzchnie łopatki oznaczone

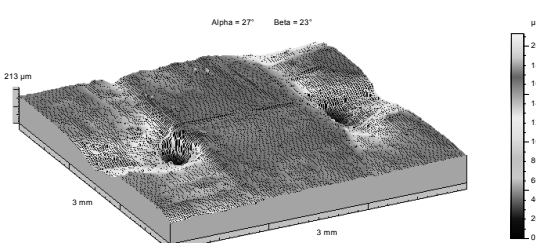
w badaniach A i B różnią się wyraźnie makroskopowo. Jedną z nich, oznaczoną jako A, jest gładka z nielicznymi pęknięciami na krawędziach (rys. 7). Na powierzchni A po procesie wytwarzania (PIP) powstały nieliczne pęknięcia widoczne na rysunku 7. Pęknięcia te rozłożone są w różnych kierunkach, ich długość nie przekracza jednak 0,5 mm, a zmierzona głębokość 45  $\mu\text{m}$  (rys. rys. 7-9). Z kolei powierzchnia B charakteryzuje się wyraźnie widocznymi pasmami włókien zbrojących i jest pozbawiona pęknięć (rys. rys. 10-12).



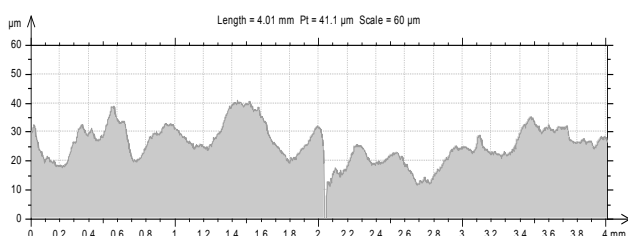
Rys. 7. Powierzchnia A: a) widok izometryczny 2D, b) powierzchniowy udział nieciągłości, %, c) numeryczna fotografia powierzchni  
 Fig. 7. Surface A: a) 2D isometric view, b) superficial volume of void, %, c) numerical pictures



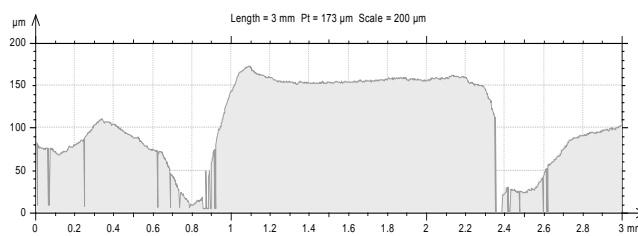
Rys. 8. Obraz 3D powierzchni A  
 Fig. 8. Image 3D of surface A



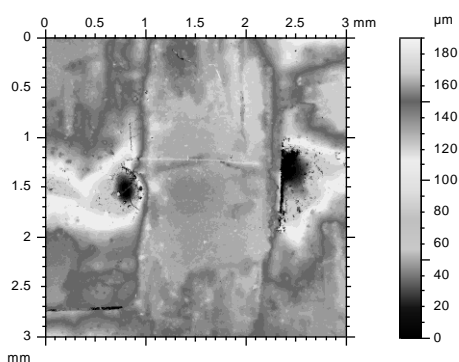
Rys. 11. Obraz 3D powierzchni B  
 Fig. 11. Image 3D of surface B



Rys. 9. Profil chropowatości w wybranym przekroju (poprzez pęknięcia)  
 Fig. 9. Roughness of profile in chooses section, (through the cracks)



Rys. 12. Przykład profilu chropowatości, powierzchnia B  
 Fig. 12. Example of roughness profile, surface B



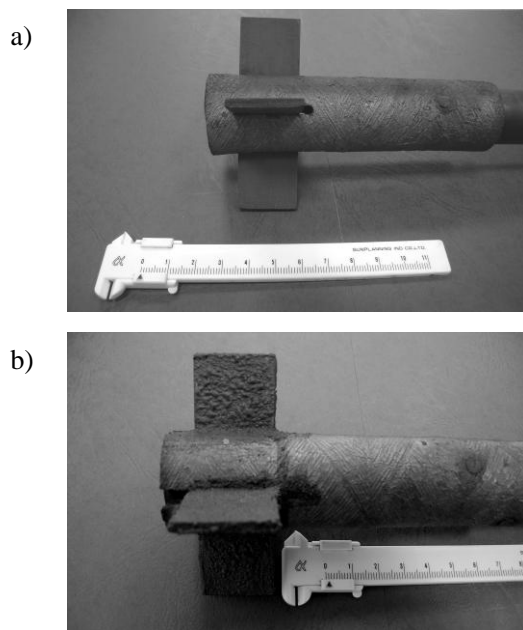
Rys. 10. Widok izometryczny 2D powierzchni B; widoczna wiązka włókien o średnicy 1,2 mm  
 Fig. 10. 2D isometric view of surface B; visible fiber bundle of 1,2 mm diameter

Uzyskane wyniki badań geometrii powierzchni (A oraz B) elementów mieszadła są zgodne z wstępnymi założeniami. Analizowane powierzchnie robocze mieszadła charakteryzują się niską chropowatością i nie wymagają żadnych dodatkowych zabiegów obróbki wykańczającej (szlifowanie, polerowanie).

### KONCEPCJA METOD POŁĄCZENIA ŁOPATEK I UCHWYTU

Na podstawie wyników analizy MES zaproponowano dwie metody połączenia łopatek z osią mieszadła. Pierwszym rozwiązaniem było połączenie zakładkowe. Jest to połączenie mechaniczne, które powstało w wy-

niku odpowiednio przygotowanego systemu wycięć w osi mieszadła (rys. 13).



Rys. 13. Prototypowe mieszadła kompozytowe: a) z połączeniem mechanicznym; b) z połączeniem klejonym

Fig. 13. Prototype of composite stirrers: a) with mechanical joint, b) with glue joint

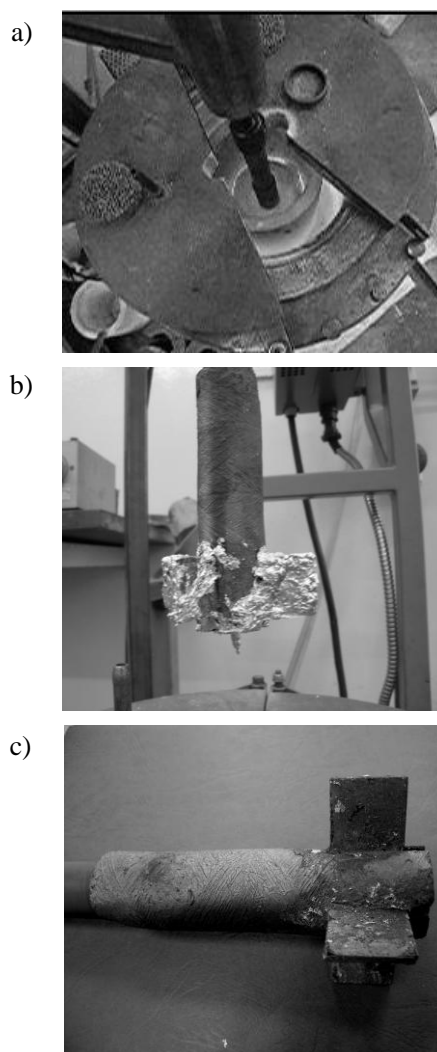
Zaletą połączenia mechanicznego jest możliwość wymiany łopatek. Drugą metodą połączenia łopatek z osią mieszadła oparto na koncepcji wykorzystania zawiesiny proszku SiC w wodnym roztworze krzemianów sodu. Zaletą połączenia klejonego jest prostota wykonania oraz szczelność układu, co ogranicza wnikanie ciekłego metalu w wolne przestrzenie mieszadła.

## PRÓBY MIESZANIA STOPÓW Al Z ZASTOSOWANIEM PROTOTYPOWYCH MIESZADEŁ SiC/C

Odpowiednio dobrany kształt i materiał wytworzonego mieszadła zweryfikowano doświadczalnie podczas prób mieszania stopów Al i zawiesin kompozytowych, które przeprowadzono na stanowisku technologicznym, jakim dysponuje Katedra Technologii Stopów Metali i Kompozytów (rys. 14a) [2, 3]. Wykonane próby technologiczne potwierdziły znaczne zmniejszenie turbulencji przepływu, co przy niezmiennym systemie sterowania mieszadłem zapewniło stabilność wiru ciekłego metalu oraz powtarzalność procesu wytwarzania.

Kolejne testy laboratoryjne zaprojektowanego i wykonanego kompozytowego mieszadła w układzie SiC/C potwierdziły założenia projektowe dotyczące jego odporności cieplnej, mechanicznej i chemicznej. Na rysunku 14b pokazano mieszadło po szesnastu 30-minutowych cyklach mieszania. Metal widoczny na łopatkach mieszadła nie wykazuje oddziaływań adhe-

zyjnych (efekt skurczu podczas krzepnięcia metalu), co pozwala na proste oczyszczenie ich powierzchni. Należy zatem sądzić, że jego zastosowanie pozwoli rozszerzyć możliwości prac badawczych na poziomie laboratorium i przyczynić się do zwiększenia trwałości mieszadła w stosunku do dotychczas stosowanych rozwiązań.



Rys. 14. a) Stanowisko do wytwarzania zawiesin kompozytowych z prototypowym mieszadłem kompozytowym SiC/C, b) widok mieszadła po szesnastu 30-minutowych cyklach mieszania; c) widok mieszadła po oczyszczeniu

Fig. 14. a) Tests of composite suspensions manufacture with prototype of SiC/C composite stirrer, b) view of the stirrer after sixteen 30-minute mixing cycles, c) view of the stirrer after clean

## Podziękowania

Pracę badawczą zrealizowano w ramach współpracy pomiędzy Instytutem Konstrukcji Lekkich i Technologii Polimerowych w TU Dresden a Katedrą Technologii Stopów Metali i Kompozytów w Politechnice Śląskiej. Badania są częścią projektu pt: *Konzeption und Fertigung eines Rührers aus textilverstärkter Keramik zur Herstellung partikelverstärkter Metallegierungen*, finansowanego ze środków niemieckiej fundacji: *Herbert Quandt* w roku 2008.

## LITERATURA

- [1] Dolata-Grosz A., Hufenbach W., Śleziona J., Czulak A., Gude M., Dyzia M., Wieczorek J., Ocena możliwości wykonania mieszadła kompozytowego (CMC), do zastosowań w technologii zawieszinowej - projekt finansowany przez fundację: Herbert Quandt - Stiftung, Kompozyty (Composites) 2008.
- [2] Śleziona J., Wieczorek J., Dolata-Grosz A., Wpływ procesu odgazowania na strukturę kompozytów aluminiowych zawierających cząstki węgla szklстого i węgla krzemu, Inżynieria Materiałowa 2006, 3(151), 665-667.
- [3] Dolata-Grosz A., Wieczorek J., Śleziona J., Dyzia M., Możliwości wykorzystania technik próżniowych do podnoszenia jakości zawieszin kompozytowych, Archiwum Odlewnictwa 2006, 6, 18(1/2), 285-290.
- [4] Naher S., Brabazon D., Looney L., Simulation of the stir casting process, Journal of Materials Processing Technology 2003, 143-144, 567-571.
- [5] Hashim J., Looney L., Hashmi M.S.J., Metal matrix composites: production by the stir casting method, Journal of Materials Processing Technology 1999, 92-93, 1-7.
- [6] Śleziona J., Dolata-Grosz A., Dyzia M., Wieczorek J., Badania własne, niepublikowane.
- [7] Kok M., Production and mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle-reinforced 2024 aluminium alloy composites, Journal of Materials Processing Technology 2005, 161, 381-387.
- [8] Hufenbach W., Weimann C., Richter H., Langkamp A., Behnisch T., Development of textile reinforced CMC lightweight modules for high performance automotive damping systems, Revue, Interceram 2007, 56, 2, 92-97.
- [9] Stręk F., Mieszanie i mieszalniki, WNT, Warszawa 1981.
- [10] Błażejowski W., Hufenbach W., Czulak A., Böhm R., Wytwarzanie i badanie kompozytowych próbek rurowych wzmocnionych włóknem szklanym, Kompozyty (Composites) 2005, 5, 4, 67-71.
- [11] Ziegler G., Richter I., Suttor D., Fiber-reinforced composites with polymer-derived matrix: processing, matrix formation and properties, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 1999, 30, 4, 411-417.
- [12] Siwiec G., Botor J., The surface tension determination through the estimation of the parameters of the sessile drop equation, Archives of Metallurgy 2003, 48, (2).
- [13] Sobczak N., Zwilżalność, struktura i właściwości granic rozdziału w układzie Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Kompozyty (Composites) 2003, 3, 7, 301-312.