

Jacek W. Kaczmar<sup>1</sup>, Adam Kurzawa<sup>2</sup>, Andrzej Janus<sup>3</sup>

Politechnika Wroclawska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji, ul. Łukasiewicza 3/5, 50-371 Wrocław

## MECHANICZNE WYTWARZANIE PROSZKÓW KOMPOZYTOWYCH 2024 Al-SiC I 6060 Al-SiC

Przedstawiono wyniki badań związanych z mechanicznym wytwarzaniem proszków kompozytowych na osnowie 2024 Al+SiC oraz 6060 Al+SiC. Mechaniczne wytwarzanie stopów MWS (*Mechanical Alloying*) polega na mieszanii miękkich proszków osnowy z twardymi cząstkami fazy umacniającej w młynie wysokoenergetycznym - attritorze. W procesie mieszania uzyskuje się proszek kompozytowy, którego poszczególne cząstki składają się z materiału osnowy z cząstkami fazy umacniającej o rozmiarach mikrometrycznych lub mniejszych. Proszki kompozytowe stanowią półprodukt stosowany w procesie wytwarzania gotowych elementów kompozytowych. W tym przypadku wykorzystywane są najczęściej metody metalurgii proszków - prasowanie i spiekanie oraz przeróbki plastycznej - wyciskanie i kucie, prowadzone zarówno na zimno, jak i na gorąco. Do wprowadzania twardych cząstek umacniających SiC o zawartości 5, 10, 15% obj. i średniej średnicy 3  $\mu\text{m}$  w miękkie proszki osnowy 2024 Al i 6060 Al zastosowano attritor z pionową osią obrotu. Badania miały na celu określenie czasu mieszania wystarczającego do uzyskania wymaganej jednorodności rozmieszczenia cząstek umacniających SiC. W tym celu proszki kompozytowe zostały wytworzone przy różnych czasach mieszania ( $t_1 = 0,5$ ,  $t_2 = 1$ ,  $t_3 = 2$  godz.) oraz przy różnych prędkościach obrotowych mieszadła ( $v_1 = 90$ ,  $v_2 = 120$  1/min). Badania mikroskopowe pozwoliły na obserwację kolejnych etapów tworzenia się proszków kompozytowych w wyniku wielokrotnego sekwencyjnego odkształcania plastycznego cząstek proszków przez stalowe kule attritora (rys. rys. 2-4). Dokonano statystycznej oceny jednorodności rozmieszczenia cząstek SiC w proszkach osnowy, wyznaczając: wariancję  $\sigma^2$  dla średnich odległości międzycząsteczkowych, przedziały ufności od średnich rzeczywistych odległości międzycząsteczkowych  $\lambda_{\alpha}$  dla  $1 - \alpha = 0,95$  oraz współczynniki jednorodności  $\xi$  rozmieszczenia cząstek SiC. Przeprowadzona analiza statystyczna wykazała wpływ czasu, prędkości mieszania oraz objętości względnej cząstek umacniających SiC na proces tworzenia się proszku kompozytowego oraz na uzyskanie jednorodności rozmieszczenia cząstek SiC w osnowach proszków 2024 Al i 6060 Al.

Słowa kluczowe: materiały kompozytowe Al-SiC, proszki kompozytowe, mechaniczne wytwarzanie stopów

## PRODUCTION OF COMPOSITE 2024 Al-SiC AND 6060 Al-SiC POWDERS BY THE MECHANICAL ALLOYING

Investigations of production of composite 2024 Al+SiC and 6060 Al+SiC composite powders based on Mechanical Alloying process are presented in the paper. Mechanical Alloying process, it is the high energy milling of soft matrix metal powders with the hard particles of the strengthening phase in the high energy ball mill-attritor. In the milling process the composite powder with particles composed of matrix material and strengthening particles of micron and submicron diameters are produced. Composite powders produced by mechanical alloying process are applied for further production of composite materials and elements. In order to produce the composite elements the processes of powder metallurgy are applied - pressing and sintering and cold and hot plastic processing - extrusion and forging. For production of composite powders containing 5, 10 and 15 vol.% of silicon carbide SiC characterized by powder mean diameters of 3  $\mu\text{m}$  in the soft matrix powders of 2024 Al and 6060 Al, the attritor with the vertical rotor was applied. The goal of the investigations was to determine the milling time for the production of composite Al-SiC powders characterized by the homogeneous distribution of strengthening SiC particles in the matrix. For this purpose the powders were milled applying different milling times ( $t_1 = 0,5$ ,  $t_2 = 1$ ,  $t_3 = 2$  hours) and of rotor different rotation velocities ( $v_1 = 90$ ,  $v_2 = 120$  1/min). Microscopic investigations allowed to determine the stages of composite Al-SiC powders forming as the result of the sequential deformations of matrix powders by steel balls agitated by the rotor (Figs 2-4). The statistical evaluation of the distribution homogeneity of the SiC particles in the aluminium alloyed powders was performed determining the: variances  $\sigma^2$  for mean interparticle spacings, confidence intervals from the real mean interparticle spacings  $\lambda_{\alpha}$  for  $1 - \alpha = 0,95$  and the homogeneity coefficients  $\xi$  of SiC particles distribution. Statistical analysis has shown the effect of the milling time and milling rotation velocity as well as the relative volumetric content of SiC strengthening particles in the matrix on the process of composite Al-SiC particles forming and for achieving of homogeneous distribution of SiC particles in the matrices of 2024 Al and 6060 Al.

Key words: Al-SiC composite materials, composite powders, mechanical alloying

## WPROWADZENIE

Mechaniczne wytwarzanie stopów (MWS) to metoda metalurgii proszków, której głównym celem jest otrzymywanie proszków stopów umacnianych dyspersyjnie

cząstkami bardzo twardych związków, jak tlenki, węgliki czy azotki. Proces ten może być również wykorzystywany do wytwarzania proszków faz międzymetalicz-

<sup>1</sup> dr hab. inż., prof. PWR, <sup>2</sup> mgr inż., <sup>3</sup> dr inż.

nych. Proces MWS w przypadku wytwarzania proszków kompozytowych umacnianych cząstkami ceramicznymi polega na mieszaniu miękkich proszków osnowy z twardymi cząstkami faz umacniających w młynie wysokoenergetycznym - attritorze. Wytwarzanie proszków kompozytowych w tym urządzeniu jest realizowane z udziałem kul stalowych lub ceramicznych za pomocą mieszadła z pionową lub poziomą osią obrotu i polega na sekwencyjnym odkształcaniu plastycznym proszków osnowy [1, 2]. Dzięki wykorzystaniu dużej energii mieszania produktem końcowym jest proszek kompozytowy, którego poszczególne cząstki składają się z materiału osnowy z cząstkami fazy umacniającej. Otrzymane w procesie wysokoenergetycznego mieszania proszki kompozytowe stanowią półprodukt do wytworzenia gotowego elementu kompozytowego metodami metalurgii proszków i przeróbki plastycznej [1, 3].

Wytwarzanie proszków kompozytowych charakteryzujących się równomiernym rozkładem cząstek SiC w osnowie bardzo silnie związane jest z zastosowaniem odpowiednich warunków procesu. Decydują one o wytworzeniu proszku o założonej morfologii; do najbardziej istotnych należą: prędkość mieszania [1/s], czas mieszania [h], średnica kul [mm], materiał kul, proporcja objętości kul do objętości proszków [%] oraz konstrukcja mieszadła.

Głównym celem pracy było wyznaczenie najkorzystniejszego czasu mieszania proszków, przy którym nastąpi tworzenie kompozytowych cząstek proszku 2024 Al+SiC i 6060 Al+SiC o równomiernym rozłożeniu umacniających cząstek SiC.

## STANOWISKO I MATERIAŁY DO BADAŃ

Badania przeprowadzono, stosując młyn wysokoenergetyczny - attritor z pionową osią obrotu, a jako medium mielące zastosowano kule stalowe. Badania zostały przeprowadzone na proszkach wytworzonych z mieszanin:

- 1) proszek typu: 2024 Al+SiC - wytworzony z proszków składników stopu 2024 (proszek Al + proszek Cu + proszki pozostałych składników stopowych) + 5%, 10%, 15% obj. cząstek umacniających SiC dostarczonych przez firmę Orkla Exolon KS, Norwegia.
- 2) proszek typu: 6060 Al+SiC - składający się z proszku stopu 6060 + 5%, 10%, 15% obj. cząstek umacniających SiC. Proszek stopu 6060 został dostarczony przez firmę ECKA-Granulate GmbH&Co. KG, RFN. Zastosowano następujące warunki wysokoenergetycznego mieszania w młynie kulowym - attritorze:
  - czas mieszania -  $t_1 = 0,5$ ,  $t_2 = 1$ ,  $t_3 = 2$  godz.,
  - prędkość obrotowa mieszadła -  $v_1 = 60$ ,  $v_2 = 120$  1/min,

W tabeli 1 przedstawiono skład chemiczny proszków użytych do badań.

TABELA 1. Skład chemiczny proszków  
TABLE 1. Chemical composition of powders

Proszki osnowy	Pierwiastek, % obj.								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Składniki stopu 2024 w postaci proszków	0,2	0,3	4,2	0,6	1,4	0,1	0,2	0,1	reszta
Proszek stopu 6060	0,5	-	-	-	0,5	-	-	-	reszta

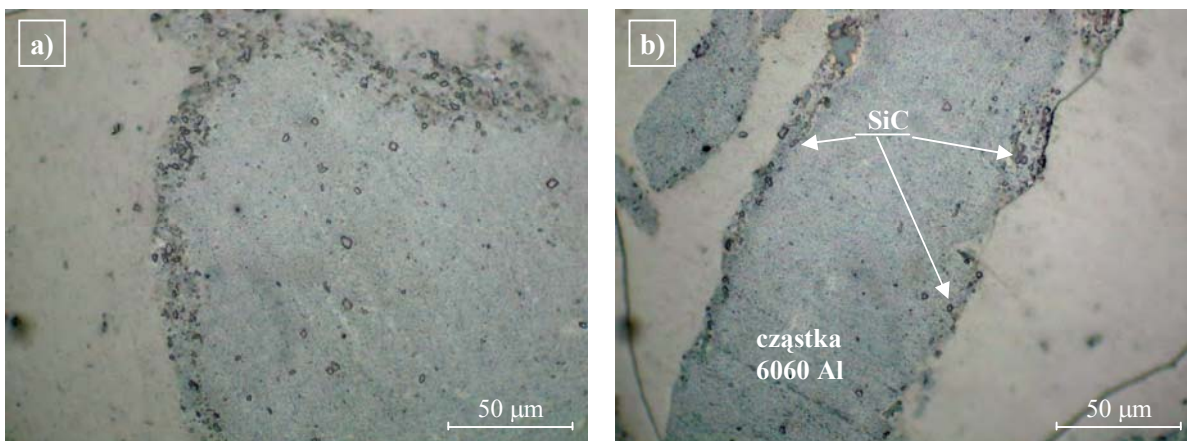
## BADANIA MIKROSKOPOWE

Wytworzone proszki kompozytowe zostały poddane obserwacjom na mikroskopie optycznym firmy Olympus C 3030 ADL i pozwoliły na analizę etapów tworzenia się proszków kompozytowych otrzymywanych w różnych warunkach mieszania. Proces wytwarzania proszków kompozytowych przebiegał podobnie jak opisali to J. Fogagnolo i inni [4], którzy prowadzili badania na proszkach stopu 6061 z dodatkiem 5 i 15% AlN oraz 5% Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

Proszki otrzymane po czasie mieszania  $t_1 = 0,5$  godz. z prędkością  $v_1 = 90$  1/min charakteryzowały się obecnością cząstek SiC głównie w warstwach powierzchniowych miękkiego proszku stopu 6060 Al. W proszkach typu 2024 Al oprócz cząstek SiC występujących na powierzchni cząstek proszku Al na ich powierzchni

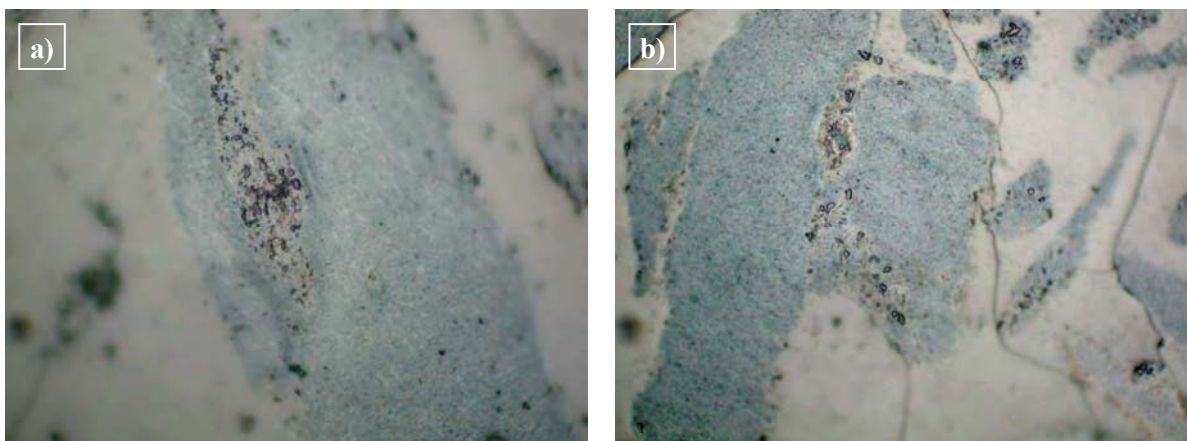
obserwowano proszki składników stopowych (rys. 1).

W tej fazie procesu MWS proszki osnowy charakteryzowały się głównie spłaszczonym kształtem powstałym na skutek odkształcania ich przez stalowe kule attritora. W proszkach typu 6060 Al+SiC znajdowały się również bardzo nieliczne cząstki stopu 6060, w których nie stwierdzono obecności cząstek umacniających. Zarówno w proszkach typu 2024 Al+SiC, jak i 6060 Al+SiC obserwowano nieliczne agregaty zawierające cząstki umacniające SiC pomiędzy cząstkami proszków osnowy i dodatkowo składniki stopowe dla stopu 2024 Al (rys. 2). W przypadku proszków, do których wprowadzano dużą objętość cząstek umacniających SiC (np. 15% obj.) w analizowanych cząstkach osnowy stopu obserwowano obszary ze skupiskami cząstek umacniających, które jeszcze nie wykazywały równomiernego rozmieszczenia w objętości cząstek proszku osnowy stopu. W tej fazie procesu we wszystkich badanych proszkach niezależnie od ilości wprowadzanej fazy umacniającej obserwowano stan wymieszania, w którym występowała bardzo duża niejednorodność rozmieszczenia cząstek SiC.



Rys. 1. Proszek kompozytowy otrzymany po czasie mieszania  $t_1 = 0,5$  godz. przy prędkości obrotowej mieszadła  $v_1 = 90$  1/min: a) 2024 Al+5% obj. SiC, b) 6060 Al+5% obj. SiC

Fig. 1. Composite powder produced during milling time of  $t_1 = 0.5$  h and rotation velocity of  $v_1 = 90$  1/min: a) 2024 Al+5 vol.% SiC, b) 6060 Al+5 vol.% SiC



Rys. 2. Tworzenie się agregatów SiC w cząstkach kompozytowych po czasie mieszania  $t_1 = 0,5$  godz. z prędkością mieszania  $v_1 = 90$  1/min: a) 2024 Al+5% obj. SiC, b) 6060 Al+5% obj. SiC

Fig. 2. Formation of SiC aggregates in composite particles after milling time  $t_1 = 0.5$  h and milling velocity  $v_1 = 90$  1/min: a) 2024 Al+5 vol.% SiC, b) 6060 Al+5 vol.% SiC

Proszki wytworzone w procesie MWS w czasie  $t_2 = 1$  godz. w większości stanowiły skupiska składające się z dwóch lub trzech cząstek proszku stopu 6060 Al z wyraźnym pasmowym ułożeniem cząstek umacniających SiC. Niektóre proszki wykazywały obecność cząstek kompozytowych o nawet cztery razy większej średnicy w porównaniu do proszku wyjściowego z bardzo licznymi strefami, w których cząstki umacniające grupowały się w skupiska. Obserwowano również cząstki proszku osnowy charakteryzujące się równomiernym rozmieszczeniem twardej fazy umacniającej SiC. Plastikne dodatki stopowe, np. miedź w proszkach typu 2024 Al+SiC, występowały w postaci wąskich podłużnych pasm układających się najczęściej równolegle względem siebie. Inne dodatki, np. Cr, Fe, Ti, na tym etapie prowadzenia procesu zostały już mocno rozdrobnione, a jednocześnie powstało również więcej drobniejszych cząstek SiC. Świadczy to o częściowej fragmenta-

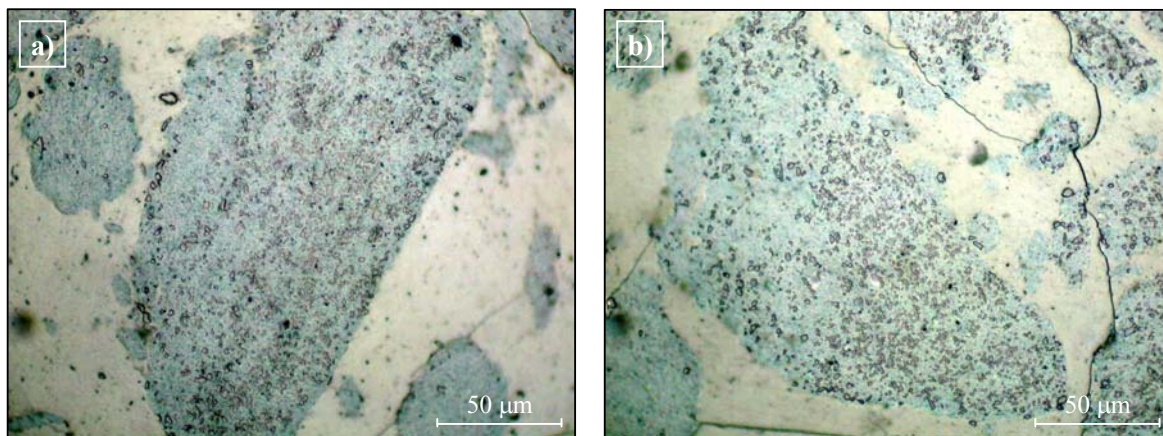
cji cząstek SiC podczas wstępnego etapu wysokoenergetycznego mieszania.

Średnie wymiary rozdrobnionych cząstek SiC były silnie związane z ilością wprowadzanej fazy umacniającej. Przy zawartości 5% obj. cząstek umacniających SiC rozdrobnienie cząstek pojawiało się bardzo rzadko. W miarę wzrostu objętości względnej wprowadzanych cząstek SiC powstawała większa ilość drobniejszej frakcji proszków SiC. Największą objętość rozdrobnionych cząstek SiC obserwowano w przypadku wprowadzania 15% obj. cząstek SiC.

Po czasach mieszania  $t_2$  stwierdzono brak równomiernego rozmieszczenia SiC w całej objętości proszków kompozytowych (rys. 3). W cząstkach tych występowały obszary z gęstym upakowaniem cząstek SiC na przemian z obszarami, gdzie ich obecności nie stwierdzono.

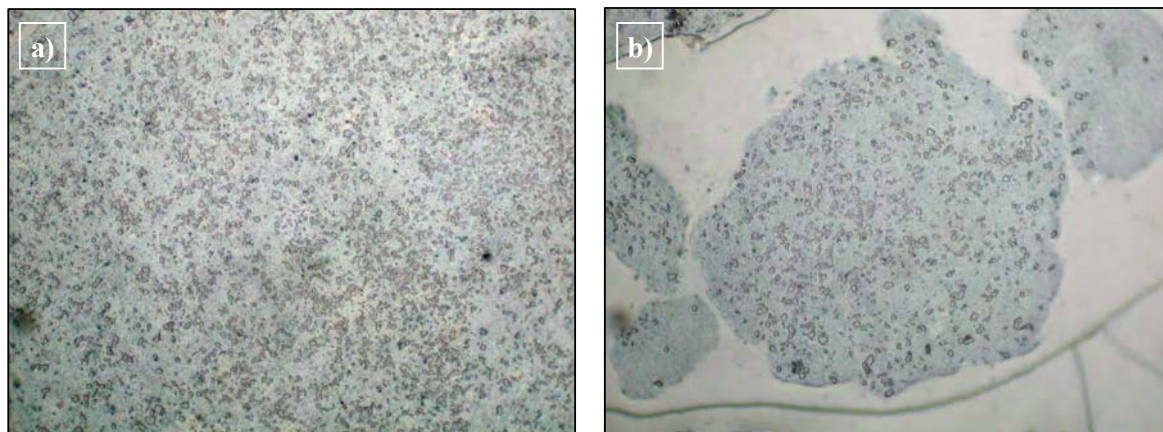
Proszki otrzymane po czasie mieszania  $t_3 = 2$  godz. spełniały oczekiwania pod względem jednorodności (rys.





Rys. 3. Proszki kompozytowe otrzymane po czasie mieszania  $t_2 = 1$  godz. z prędkością mieszania  $v_1 = 90$  1/min: a) 2024 Al+15% obj. SiC, b) 6060 Al +15% obj. SiC

Fig. 3. Composite powders produced applying  $t_2 = 1$  h milling time and  $v_1 = 90$  1/min milling velocity: a) 2024 Al+15 vol.% SiC, b) 6060 Al +15 vol.% SiC



Rys. 4. Proszki kompozytowe otrzymane po czasie mieszania  $t_3 = 2$  godz. z prędkością mieszania  $v_1 = 90$  1/min: a) 2024 Al+15% obj. SiC, b) 6060 Al +10% obj. SiC

Fig. 4. Composite powders produced applying  $t_3 = 2$  h milling time and milling velocity  $v_1 = 90$  1/min: a) 2024 Al+15 vol. % SiC, b) 6060 Al +15 vol.% SiC

4). W proszkach typu 2024 Al składniki stopu zostały już wprowadzone w proszek Al i tylko w nielicznych przypadkach stwierdzono ich obecność. Proszki kompozytowe, do których wprowadzono 5 i 10% obj. fazy umacniającej, charakteryzują się zwartą budową o owalnym kształcie cząstek oraz średniej średnicy 240  $\mu\text{m}$ . Natomiast przy zawartości 15% obj. SiC proszki kompozytowe mają mniejsze rozmiary - ok. 120  $\mu\text{m}$  i charakteryzują się nieregularnym kształtem o dużej gładkości powierzchni zewnętrznej.

#### OCENA JEDNORODNOŚCI ROZMIESZCZENIA CZĄSTEK SiC W PROSZKACH KOMPOZYTOWYCH

Proszki kompozytowe mieszane z prędkościami  $v_1 = 90$  1/min i  $v_2 = 120$  1/min po czasie  $t_3 = 2$  godz. poddano badaniom, mającym na celu określenie jedno-

rodności rozmieszczenia cząstek SiC w osnowie proszku 6060 Al i 2024 Al. Ocena jednorodności rozmieszczenia twardych cząstek SiC w miękkich cząstkach proszku osnowy przeprowadzono, stosując się do obowiązującej zasady sformułowanej przez [5]. Zasada ta mówi, że strukturę uważa się za jednorodną ze względu na rozmieszczenia cząstek w osnowie wtedy, gdy cząstki te będą rozmieszczone w ten sposób, że każda będzie miała, statystycznie biorąc, takie samo otoczenie (koordynację) niezależnie od kierunku w osnowie. W związku z tym analizę zglądów metalograficznych pod względem jednorodności rozmieszczenia fazy umacniającej przeprowadzono na podstawie zliczeń ilości cząstek umacniających na wybranej powierzchni oraz w oparciu o obliczone wartości średniej odległości międzycząsteczkowej  $\lambda_{sr}$  między cząstkami SiC.

Do badań przyjęto następujące ustalenia:

– wszystkie cząstki SiC mają tę samą średnicę 3  $\mu\text{m}$  (przyjęto wartość średnią podaną przez producenta, firmę Orkla Exolon, Norwegia)

– obserwacje prowadzono przy powiększeniu 800x,  
– obserwacjom poddano pole powierzchni 0,01  $\text{mm}^2$ .

Obserwacjom poddano 50 losowo wybranych cząstek kompozytowych.

Obliczenie średniej odległości międzycząsteczkowej przeprowadzono zgodnie z tokiem przedstawionym w [6], natomiast do wyznaczenia liczby cząstek posłużono się metodą Jeffriesa-Sałytkowa [6].

Średnią odległość  $\bar{\lambda}_{sr}$  między cząstkami SiC obliczono zgodnie ze wzorem [6]

$$\bar{\lambda}_{sr} = \frac{1}{dN_A} - \bar{d}$$

gdzie  $\bar{d}$  - wartość średnia średnicy cząstek.

Na podstawie uzyskanych wyników dokonano statystycznej oceny jednorodności rozmieszczenia cząstek SiC w proszkach osnowy, biorąc pod uwagę:

- odchylenie standardowe  $\sigma$  od średniej rzeczywistej odległości międzycząsteczkowej  $\lambda_{sr}$ ,
- przedział ufności o rozmiarze  $m$  dla średniej odległości międzycząsteczkowej,
- przedział ufności o rozmiarze  $m$  dla średniej odległości międzycząsteczkowej  $\lambda_{sr}$  przy współczynniku ufności równym  $1 - \alpha = 0,95$  wg wzoru

$$\lambda_{sr} - t_\alpha \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < m < \lambda_{sr} + t_\alpha \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

dla którego wartość zmiennej  $t_\alpha$  wynosi 1,96

- współczynnik jednorodności  $\xi$  rozmieszczenia cząstek SiC obliczony wg zależności [5]

$$\xi = \left| \frac{\sigma_j^2 - \sigma^2}{\sigma_j^2} \right|$$

gdzie:

- $\sigma_j^2$  - wariancja średniej odległości międzycząsteczkowej dla mikrostruktury jednorodnej (przyjęto  $\sigma_j^2 = 0,10$ ),

$\sigma^2$  - wariancja średniej odległości międzycząsteczkowej dla mikrostruktury rzeczywistej.

W przypadku rozkładu jednorodnego proszku SiC w osnowie  $\sigma_j^2 = \sigma^2$  wskaźnik niejednorodności  $\xi$  przyjmuje wartość zero, natomiast dla rozkładu niehomogenicznego  $\sigma_j^2 \neq \sigma^2$  i zatem wskaźnik  $\xi \neq 0$ .

Wyniki analizy statystycznej przedstawiono w tabeli 2. Zarówno w przypadku badania proszków kompozytowych typu 2024 Al+SiC, jak i 6060 Al+SiC zaobserwowano, że zwiększenie udziału objętościowego cząstek umacniających SiC w osnowie powoduje polepszenie jednorodności ich rozmieszczenia. W tym przypadku najniższe wartości odchylenia standardowego  $\sigma$  i współczynnika jednorodności  $\xi$  wykazały próbki zawierające największą objętość cząstek SiC, tj. 15% obj. Zwiększenie prędkości obrotowej mieszadła z  $v_1 = 90$  1/min do  $v_2 = 120$  1/min spowodowało polepszenie jednorodności rozmieszczenia cząstek SiC głównie dla proszków o mniejszych objętościach względnych. Na przykład dla proszku kompozytowego 2024 Al-5% obj. SiC przy prędkości  $v_1$  wartość współczynnika  $\xi$  wynosiła  $\xi = 33,03$ , a przy prędkości  $v_2$  wynosiła  $\xi = 21,24$ . Dla proszków 2024 Al-15% obj. SiC wartość współczynnika jednorodności  $\xi$  zmieniała się tylko nieznacznie i wynosiła 0,43 dla prędkości obrotowej mieszadła  $v_1$  i 0,40 dla prędkości  $v_2$ .

Zdecydowaną największą nierównomierność w rozmieszczeniu cząstek wykazały proszki z 5% obj. zawartością cząstek SiC. W tym przypadku wysokie wartości współczynnika  $\xi$  oraz duży obszar przedziału ufności obliczonego dla prawdopodobieństwa 95% wskazują na dużą przypadkowość rozmieszczenia cząstek SiC w osnowach proszków.

## PODSUMOWANIE

Badania pozwoliły na wyznaczenie najkorzystniejszego czasu mieszania (czas  $t_3 = 2$  godz.) przy zastosowanych prędkościach mieszania ( $v_1 = 60$ ,  $v_2 = 120$  1/min), przy którym uzyskano dobrą jednorodność rozmieszczenia proszku umacniającego SiC w proszkach kompozytowych na osnowie 2024 Al i 6060 Al. Zaobserwowano wpływ objętości względnej cząstek umacnia-

TABELA 2. Wyniki analizy statystycznej rozmieszczenia cząstek SiC w proszkach osnowy  
TABLE 2. Results of statistical analysis of SiC particles distribution in the matrix powders

Oznaczenie proszku kompozytowego	Odchylenie standardowe $\sigma$ $\mu\text{m}$		Średnia odl. międzycząstecz. $\lambda_{sr}$ $\mu\text{m}$		Przedział ufności dla $1 - \alpha = 0,95$ $\mu\text{m}$		Współczynnik jednorodności $\xi$	
	$v_1$	$v_2$	$v_1$	$v_2$	$v_1$	$v_2$	$v_1$	$v_2$
2024 Al - 5%	1,84	1,49	29,4	29,4	28,85 > m > 29,87	29,36 > m > 29,44	33,03	21,24
2024 Al - 10%	0,58	0,50	8,39	8,42	8,23 > m > 8,55	8,28 > m > 8,56	2,42	1,46
2024 Al - 15%	0,24	0,22	5,58	5,43	5,51 > m > 5,65	5,37 > m > 5,49	0,43	0,40
6060 Al - 5%	1,66	1,32	33,40	33,22	32,94 > m > 33,86	32,85 > m > 33,59	26,68	16,57
6060 Al - 10%	0,61	0,50	9,01	8,94	8,84 > m > 9,18	8,80 > m > 9,08	2,74	1,53
6060 Al - 15%	0,36	0,34	6,23	6,24	6,10 > m > 6,32	6,14 > m > 6,34	0,27	0,19

jących SiC w osnowie na proces tworzenia się proszku kompozytowego po czasie mieszania  $t_3$  i w miarę wzrostu objętości względnej SiC otrzymywano poprawę jednorodności ich rozmieszczenia. W przypadku proszków zawierających 15% obj. SiC mieszanych z zastosowaniem prędkości  $v_1$  obliczone współczynniki jednorodności  $\xi = 0,43$  dla proszku kompozytowego 2024 Al+5% obj. SiC i  $\xi = 0,27$  dla proszku kompozytowego 6060 Al+15% obj. SiC są bliskie zeru, co wskazuje na najlepszą jednorodność rozmieszczenia cząstek SiC w osnowie. Najwyższe z kolei wartości  $\xi = 33,03$  dla proszku kompozytowego 2024 Al+5% obj. SiC i  $\xi = 26,68$  dla proszku kompozytowego 6060 Al+5% obj. SiC przy prędkości mieszania  $v_1$  wskazują na relatywnie dużą niejednorodność rozmieszczenia cząstek umacniających SiC. Zwiększenie prędkości mieszania do  $v_2 = 120$  l/min na przykład dla proszków kompozytowych na osnowie 2024 Al powoduje tylko nieznaczną poprawę stopnia wymieszania w przypadku proszków kompozytowych z zawartościami 15% obj. SiC (zmniejszenie  $\xi$  do 0,40), natomiast powoduje istotną poprawę jednorodności (zmniejszenie  $\xi$  do 21,24) w przypadku proszków z małymi zawartościami SiC w osnowie (5% obj.).

Badania mikroskopowe pozwoliły na obserwację kolejnych etapów tworzenia się proszków kompozytowych, w których zachodzi początkowo odkształcanie plastycznych cząstek proszków osnowy i występowanie cząstek SiC na powierzchni cząstek kompozytowych. Kolejny etap (czas  $t_2$ ) to formowanie agregatów z cząstek umac-

niających SiC wewnątrz cząstek osnowy. W ostatnim etapie występującym po czasie  $t_3$  w wyniku sekwencyjnego i wielokrotnego odkształcania cząstek dochodziło do formowania cząstek proszków kompozytowych o homogenicznym rozkładzie umacniających proszków SiC w osnowie.

## LITERATURA

- [1] Kaczmar J.W., Pietrzak K., Włosiński W., The production and of metal matrix composite materials, *Journal of Materials Processing Technology* 2000, 106, 58-67.
- [2] Heming Zoz, Attritor Technologie - Stand der Technik, *Metall* 1995, 49, 2/95.
- [3] Schwarz R.B., Introduction to the viewpoint set on: mechanical alloying, *Scripta Materialia* 1996, 34, 1, 1-4.
- [4] Fogagnolo J.B., Velasco F., Robert M.H., Torralba J.M., Effect of mechanical alloying on the morphology, microstructure and properties of aluminium matrix composite powders, *Materials Science and Engineering* 2003, A 342, 131-143.
- [5] Ryś J., *Stereologia materiałów*, Wyd. Fotobit Design, Kraków 1995.
- [6] Cybo J., Jura S., *Funkcyjny opis struktur izometrycznych w metalografii ilościowej*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1995.
- [7] Pietrzak K., Kaczmar J.W., Włosiński W., *Wytwarzanie, własności i zastosowanie materiałów kompozytowych ceramiczno-metalowych*, *Kompozyty - Seminarium*, Częstochowa 1996.

Recenzent  
Jan Sieniawski