

Kształtowanie siluminów z dodatkiem fazy węglkowej – analiza temperatury narzędzi podczas skrawania

Forming of silumins with the addition of carbide phase – the analysis of inserts temperatures during the cutting process

PIOTR PUTYRA
LUCYNA JAWORSKA
MACIEJ DYZIA
MARCIN PODSIADŁO*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.2.31>

Określono trwałość narzędzi z PCD w procesie obróbki skrawaniem odlewanych materiałów kompozytowych z zawartością fazy ceramicznej. Próby skrawania przeprowadzono narzędziami z polikrystalicznego diamentu z wykorzystaniem centrum tokarsko-frezarskiego Mori Seiki NL2000SY. Sprawdzano charakter zużycia VBB zgodnie z normą PN-ISO 3685:1996. Ustalono wpływ parametrów skrawania (prędkości obrotowej, posuwu, głębokości skrawania) na temperaturę ostrzy z PCD. Przeanalizowano mechanizm kształtowania wióra w trakcie obróbki z różnymi parametrami skrawania. Badania zrealizowano z zastosowaniem kamery termowizyjnej FLIR A655 oraz szybkiej kamery Phantom MIRO M310.
SŁOWA KLUCZOWE: materiały kompozytowe, obróbka skrawaniem

The stability of PCD inserts in the machining of cast composite materials containing 10 vol.% of ceramic phase is presented. Tests were carried out using a polycrystalline diamond cutting tool and the turning and milling center Mori Seiki NL2000SY. The VBB wear parameters of inserts according to the standard PN-ISO 3685:1996 were determined. The influence of the cutting parameters (speed, feed rate, depth of the cut) on the temperature of PCD inserts was investigated. The analysis of chip formation mechanism during the processing at different cutting parameters was performed. The study was carried out using the FLIR A655 thermal camera and the high speed camera Phantom MIRO M310.

KEYWORDS: composite materials, cutting process

Materiały metaliczne wzmocnione fazami ceramicznymi są coraz częściej wykorzystywane w nowoczesnych konstrukcjach inżynierskich. Powstają poprzez wpro-

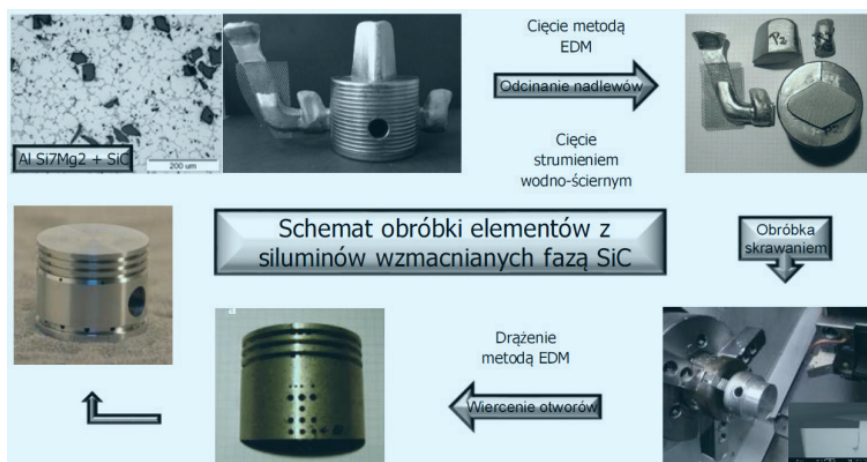
wienie do osnowy stopu fazy wzmacniającej ceramicznej lub międzymetalicznej [1, 2]. Takie umocnienie pozwala zwiększyć wytrzymałość, twardość, sztywność i odporność na zużycie cierne materiałów kompozytowych. Jako cząstki umacniające stosuje się np.: węgliki, tlenki, azotki i borki [3–5].

Kompozyty o osnowie z aluminium zbrojone cząstkami ceramicznymi (np. Al_2O_3 , SiC) są stopniowo wdrażane do produkcji w przemyśle motoryzacyjnym, elektronicznym czy lotniczym – przede wszystkim ze względu na dużą odporność na zużycie w warunkach tarcia. Na skalę przemysłową wytwarzane są kompozytowe elementy pracujące pod dużym obciążeniem ciernym, takie jak łożyska, bębny czy tarcze hamulcowe [6]. Technologie wytwarzania tych materiałów bazują głównie na metodach metalurgii proszków, infiltracji porowatych preform ceramicznych, odlewania ciśnieniowego czy też prasowania w stanie ciekłym [7, 8]. Uzyskanie materiałów o podwyższonych właściwościach mechanicznych wymaga zastosowania zbrojenia *in situ*, które jest stabilne termodynamicznie, ma mniejszą skłonność do pęknięcia, a ze względu na brak warstw pośrednich jest dobrze połączone z osnową [9, 10].

Jedną z ważniejszych zalet kompozytów jest możliwość uzyskania odpowiednich właściwości materiału poprzez ukształtowanie jego struktury w procesie technologicznym. Dobór zarówno materiału osnowy, rodzaju, wielkości oraz udziału objętościowego faz zbrojących, jak i parametrów technologicznych pozwala na zaprojektowanie materiałów o cechach przewyższających właściwości niezbrojonego materiału osnowy [11]. Nadal jednak jako istotne ograniczenia w szerszym wdrożeniu kompozytów wskazywane są koszty produkcji, a przede wszystkim koszty obróbki mechanicznej [12].

Materiały te ze względu na zawartość twardej fazy ceramicznej są trudno obrabialne i wymagają zastosowania specjalnych technologii oraz narzędzi w procesach kształtowania [13–16]. W przypadku narzędzi z węglików

* Dr inż. Piotr Putyra (piotr.putyra@ios.krakow.pl), prof. dr hab. inż. Lucyna Jaworska (lucyna.jaworska@ios.krakow.pl), inż. Marcin Podsiadło (marcin.podsiadlo@ios.krakow.pl) – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania; dr inż. Maciej Dyzia (maciej.dyzia@polsl.pl) – Instytut Nauki o Materiałach, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Politechnika Śląska



Rys. 1. Schemat obróbki siluminu wzmocnianego fazą węglkową SiC

spiekanych obserwuje się intensywne zużycie ostrzy skrawających oraz problem z zapewnieniem stabilności wymiarowej w tolerancji przewidzianej dla danej operacji obróbkowej. Obróbka skrawaniem odlewanych materiałów kompozytowych wzmocnionych fazami ceramicznymi ma charakter przerywany i charakteryzuje się dynamicznymi uderzeniami na ostrze skrawające.

Materiał i metody badań

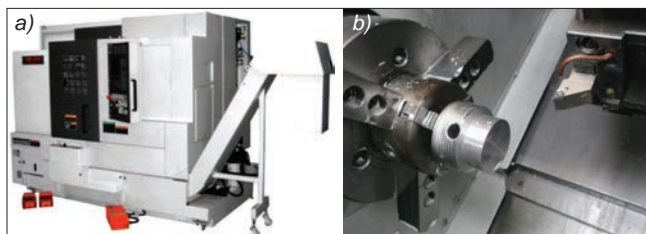
Przedmiotem badań był kompozyt metalowy typu stop odlewniczy AK7 (AlSi7Mg2) zbrojony cząstkami SiC, opracowany w Instytucie Nauki o Materiałach Politechniki Śląskiej. Udział objętościowy fazy wzmocniającej wynosił 10%. Kompozyt wytworzono w ramach badań przemysłowych w firmie Złotecki Sp. z o.o.

Skład chemiczny stopu przedstawiono w tabl. I. Jako fazę zbrojącą wykorzystano cząstki SiC SIKA ABR P (Saint-Gobain) o ziarnistości 40,5 µm. Bazowy stop osnowy AK7 stopiono w temperaturze 720°C, a następnie poddano godzinnej rafinacji argonem. Cząstki ceramiczne po wstępnym wygrzewaniu podawane były na lustro wirującego metalu. Proces homogenizacji i odgazowania zawiesiny realizowano w warunkach obniżonego ciśnienia argonu. Półfabrykaty tłoka (o średnicy $\varnothing 68$ mm i długości $l = 54$ mm) odlano do formy metalowej.

TABLICA I. Skład chemiczny stopu AK7 (wyrażony w % wagowych)

Al	Si	Fe	Mg	Sr	Ti
92,56	6,50	0,52	0,23	0,002	0,03

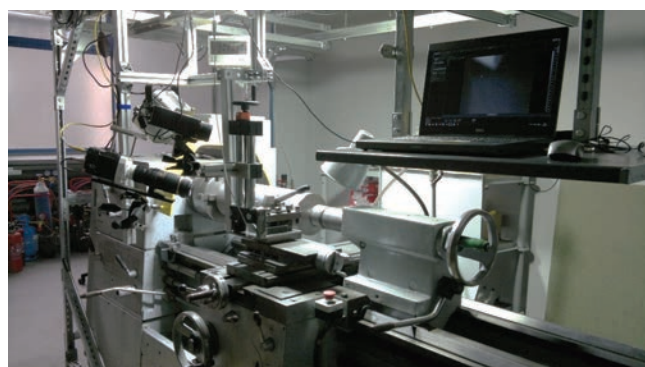
Do obróbki materiałów kompozytowych z dodatkiem fazy wzmocniającej SiC wytypowano następujące metody kształtowania: obróbkę skrawaniem, przecinanie strumieniem wodno-ściernym oraz drażnienie elektroerozyjne. Schemat procesów kształtowania elementów z materiału odlewniczego o osnowie ze stopu AK7 zbrojonego fazą węglkową SiC przedstawiono na rys. 1.



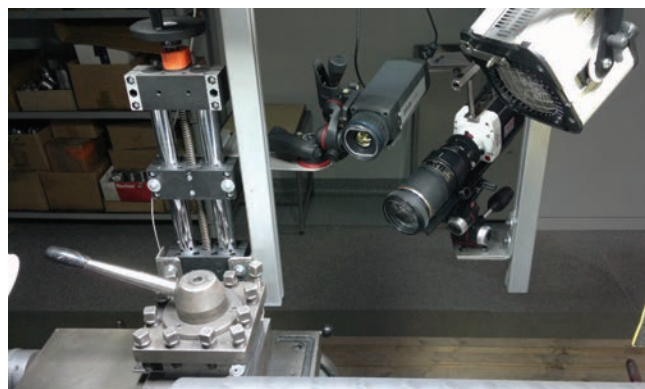
Rys. 2. Stanowisko NL2000SY do przeprowadzenia prób skrawania (a), widok układu obróbkowego: uchwyt – przedmiot obrabiany (tłok) – narzędzie (b)

Materiały – po odcięciu układu wlewowego oraz nadlewów – poddano próbom toczenia wzdłużnego, w których zastosowano narzędzia z polikrystalicznego diamentu. Określono trwałość narzędzi PCD z wykorzystaniem centrum tokarsko-frezarskiego typu NL2000SY (firmy Mori Seiki) o mocy silnika napędu głównego 18,5 kW. Sprawdzano charakter zużycia oraz jego wielkość na powierzchni przyłożenia (parametr VBB max i VBC według normy PN-ISO 3685:1996). Jako graniczną wartość trwałości ostrza przyjęto czas jego pracy, po którym parametr starcia VBB lub VBC osiągnie wartość 0,3 mm. Stanowisko do określenia trwałości ostrzy podczas obróbki skrawaniem kompozytu odlewniczego o osnowie z Al z dodatkiem fazy węglkowej SiC przedstawiono na rys. 2.

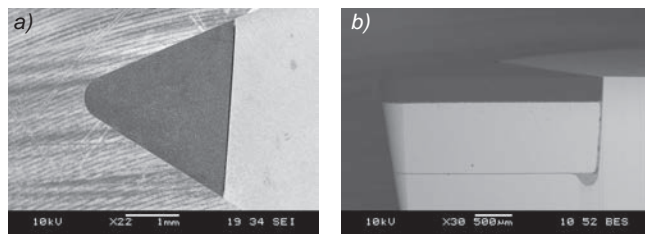
VBB max i VBC według normy PN-ISO 3685:1996). Jako graniczną wartość trwałości ostrza przyjęto czas jego pracy, po którym parametr starcia VBB lub VBC osiągnie wartość 0,3 mm. Stanowisko do określenia trwałości ostrzy podczas obróbki skrawaniem kompozytu odlewniczego o osnowie z Al z dodatkiem fazy węglkowej SiC przedstawiono na rys. 2.



Rys. 3. Stanowisko do analizy temperatury oraz mechanizmu formowania wióra podczas toczenia



Rys. 4. Kamera termowizyjna FLIR A655, kamera szybka Phantom MIRO 310, oświetlenie halogenowe



Rys. 5. Płytkę z polikrystalicznego diamentu o oznaczeniu NP-DCMW11T304 MD220: a) powierzchnia natarcia, b) powierzchnia przyłożenia i krawędź skrawająca

Określono także wpływ parametrów skrawania (prędkości, posuwu i głębokości skrawania) na temperaturę ostrzy skrawających. Przeanalizowano mechanizm kształtowania wióra w trakcie obróbki z różnymi wartościami parametrów skrawania. Zarówno pomiar temperatury, jak i analizę mechanizmów tworzenia wiórów zrealizowano na stanowisku przedstawionym na rys. 3. W skład stanowiska wchodzi: obrabiarka TUR50, kamera termowizyjna A655 firmy FLIR i kamera z szybką rejestracją obrazu MIRO 310 firmy Phantom. W trakcie prób skrawania dobrano: parametry kamery termowizyjnej (m.in. emisyjność poszczególnych materiałów, wartość transmisji oraz parametry zewnętrznego układu optycznego), parametry szybkiej kamery (rozdzielczość, szybkość próbkowania, czas ekspozycji) oraz rodzaj światła i sposób oświetlenia. Przeprowadzono również analizy ostrzy z polikrystalicznego diamentu z zastosowaniem elektronowego mikroskopu skaningowego JEOL JSM 6460LV.

Obróbkę skrawaniem wykonywano za pomocą płytek skrawających z ostrzami z PCD typu: NP-DCMW11T304 MD220 (rys. 2b i rys. 5), mocowanych w oprawce nożowej typu SDJCL2525M11. Kąty: natarcia $\gamma_o = 0^\circ$, przyłożenia $\alpha_o = 7^\circ$, pochylenia krawędzi skrawającej $\lambda_s = 0^\circ$, przystawienia $\kappa_r = 93^\circ$. Symbol literowo-cyfrowy tej płytki oznacza, że jest to płytka o przekroju romboidalnym z kątem $\varepsilon_r = 55^\circ$ (D), kątem przyłożenia płytki 7° (C), tolerancją wymiarów w klasie M (M), z otworem mocującym częściowo walcowym z pogłębieniem stożkowym na jednej powierzchni ($40+60^\circ$) i bez łamacza wiórów (W), o średnicy okręgu wpisanego 9,525 mm (11), grubości 3,97 mm (T3) i promieniu naroża $r_c = 0,4$ mm (04). Symbol MD220 oznacza gatunek materiału ostrza z PCD wlutowanego na podłożu z węgla spiekane w jednym narożu płyt-

ki. Materiał MD220 zawiera cząstki diamentu o średniej wielkości ziarna $10 \mu\text{m}$. Ostrze przeznaczone jest m.in. do obróbki wykończeniowej stopów aluminium z dużą prędkością skrawania.

W badaniach trwałości ostrzy z PCD przyjęto następujące parametry toczenia wzdłużnego:

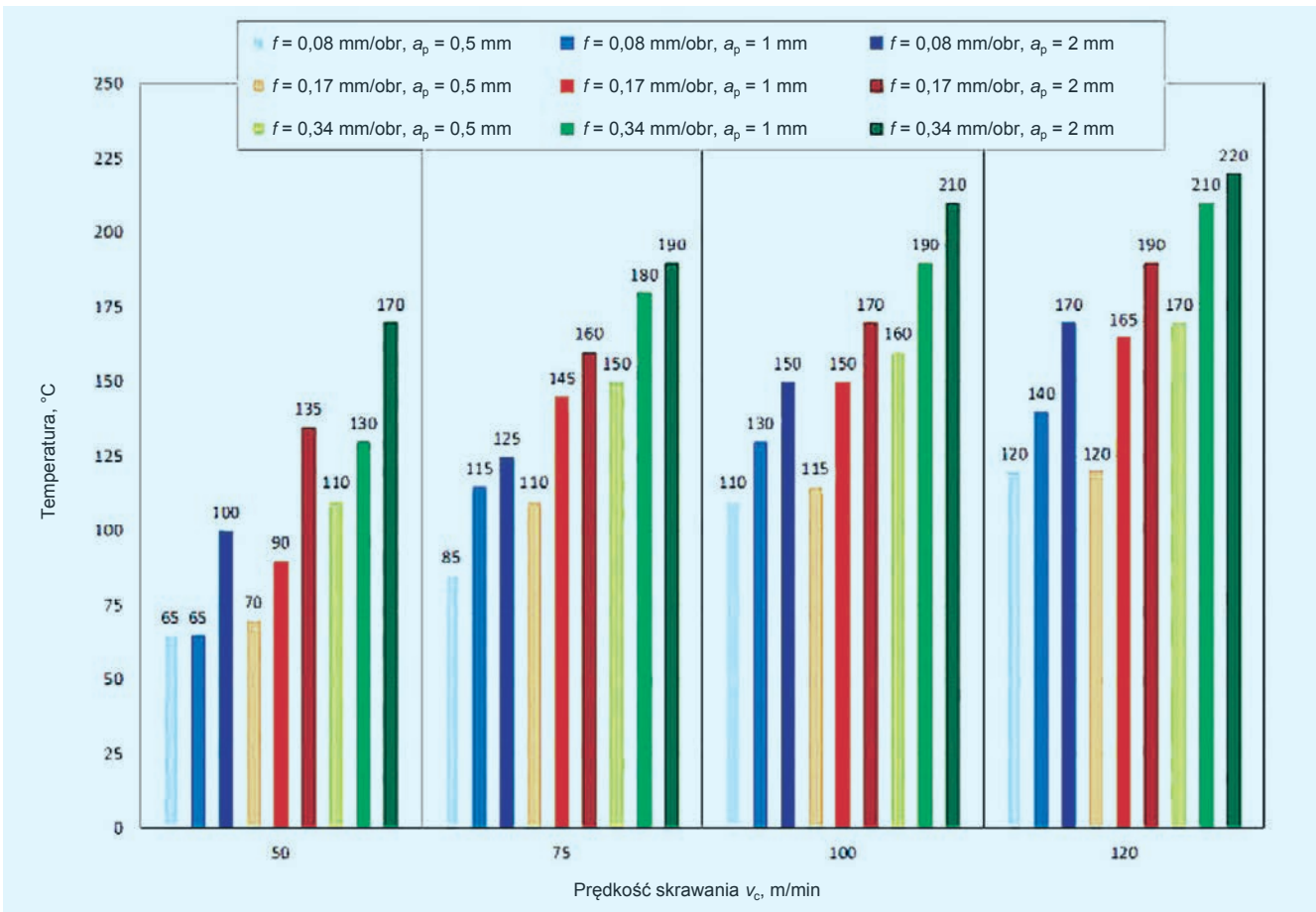
- prędkość skrawania $v_c = 200; 300; 500$ m/min,
- posuw $f = 0,10; 0,20; 0,30$ mm/obr,
- głębokość skrawania $a_p = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$ mm.

Analizę temperatury oraz mechanizmu formowania wióra przeprowadzono podczas toczenia wzdłużnego z parametrami:

- prędkością skrawania $v_c = 50; 75; 100$ i 120 m/min,
- posuwem $f = 0,08; 0,17; 0,34$ mm/obr,
- głębokością skrawania: $a_p = 0,5; 1,0; 2,0$ mm.

Wyniki

Wyniki testowych prób skrawania w zależności od parametrów obróbki przedstawiono w tabl. II. Trwałość T narzędzi określono jako czas do powstania narostu lub wytarcia VBB o wartości $0,3$ mm. Podczas skrawania w wyniku tarcia pomiędzy powierzchnią ostrza skrawającego i wióra generowana jest duża ilość ciepła. Pomiar temperatury wywołanej tarcem realizowany był na podstawie pomiaru temperatury wiórów nad ostrzem skrawającym. Aby rejestracja zmian temperatury była prawidłowa, dobrano odpowiednie parametry obiektu mierzonego (emisyjności obiektu) oraz transmisyjności (w przypadku gdy zastosowany jest zewnętrzny układ optyczny w postaci dodatkowego okna). Wykorzystanie dodatkowego okna miało na celu zabezpieczenie powierzchni obiektywu kamery termowizyjnej przed zarysowaniem wiórami.



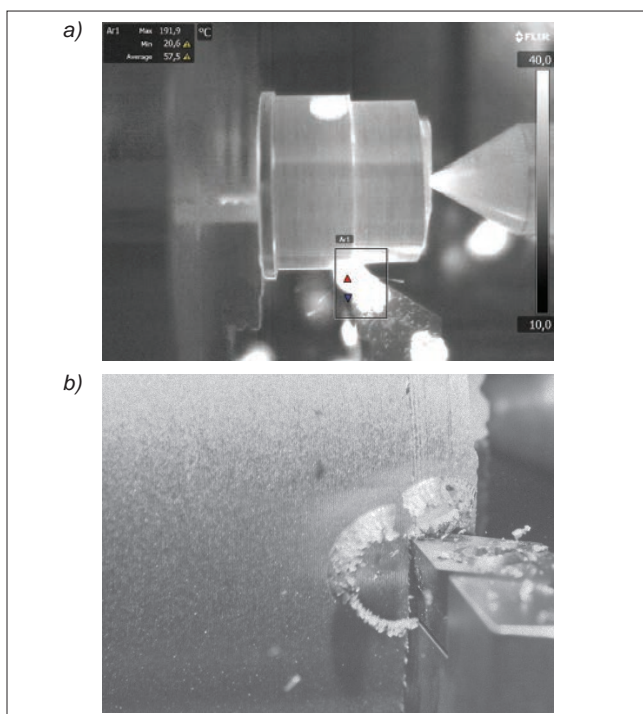
Rys. 6. Wpływ parametrów skrawania (prędkości v_c , posuwu f , głębokości a_p) na wartość temperatury ostrzy z polikrystalicznego diamentu

TABLICA II. Trwałość płytek z polikrystalicznego diamentu podczas toczenia wzdłużnego kompozytu AK7-SiC

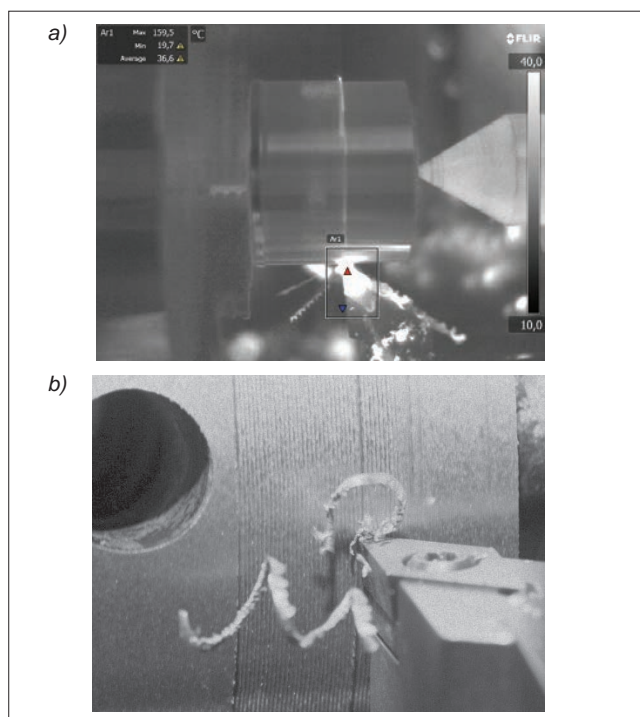
Parametry skrawania			Trwałość ostrza T min
Prędkość skrawania v_c m/min	Posuw f mm/obr	Głębokość skrawania a_p mm	
200	0,15	1,5	12,3
300	0,10	0,5	14,7
	0,10	1,0	9,5
	0,20	1,0	12,5
	0,30	1,0	8,2
500	0,10	0,5	2,5
	0,10	1,0	1,7
	0,20	1,0	0,7
	0,30	1,0	0,5

Emisyjność kompozytu AK7-SiC wyznaczono w trakcie nagrzewania materiału kompozytowego w kąpeli wodnej. Temperaturę materiału kompozytowego mierzono termometrem kontaktowym i miernikiem AR540 firmy APAR. W procesie kalibracji zmieniano wartość współczynnika emisyjności, a następnie transmisyjności do momentu, aż wartość temperatury zarejestrowanej przez kamerę była zbliżona do wartości wskazanej przez termometr kontaktowy. Wartość współczynnika emisyjności materiału AK7-SiC w temperaturze 65°C wynosi 0,85.

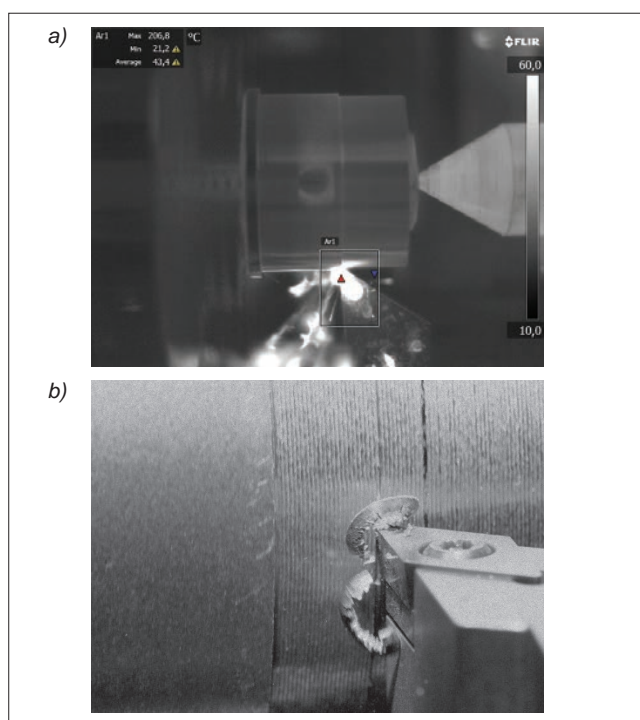
Wyniki pomiaru temperatury powszechni ostrza skrawającego z diamentu polikrystalicznego podczas toczenia wzdłużnego materiału kompozytowego AK7-SiC przedstawiono na rys. 6. Przykładowe obrazy zarejestrowane przez kamerę termowizyjną FLIR A655 oraz obraz zarejestrowany przez kamerę szybką Phantom MIRO 310 dla trzech wybranych parametrów toczenia przedstawiono na rys. 7–9. Ostrza z polikrystalicznego diamentu z widocznym narostem po toczeniu materiału AK7-SiC przedstawiono na rys. 10 i 11.



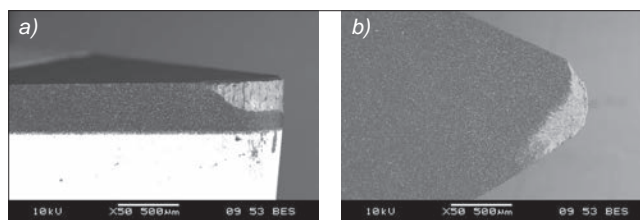
Rys. 7. Obraz z kamery termowizyjnej (a), mechanizm formowania wióra (b) (prędkość skrawania: 45 m/min, posuw: 0,34 mm/obr, głębokość skrawania: 2 mm)



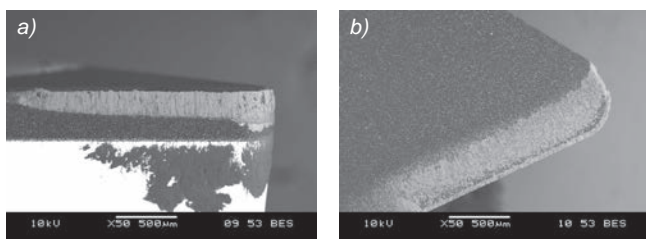
Rys. 8. Obraz z kamery termowizyjnej (a), mechanizm formowania wióra (b) (prędkość skrawania: 100 m/min, posuw: 0,34 mm/obr, głębokość skrawania: 0,5 mm)



Rys. 9. Obraz z kamery termowizyjnej (a), mechanizm formowania wióra (b) (prędkość skrawania: 120 m/min, posuw: 0,34 mm/obr, głębokość skrawania: 1 mm)



Rys. 10. Narzędzia z PCD po toczeniu materiału AK7-SiC: a) powierzchnia przyłożenia, b) powierzchnia natarcia (prędkość skrawania: 500 m/min, posuw: 0,10 mm/obr, głębokość skrawania: 0,5 mm)



Rys. 11. Narzędzia z PCD po toczeniu materiału AK7-SiC: a) powierzchnia przyłożenia, b) powierzchnia natarcia (prędkość skrawania: 500 m/min, posuw: 0,20 mm/obr, głębokość skrawania: 2,0 mm)

Podsumowanie

Wyniki uzyskane w próbach toczenia tłoków ze stopów aluminium z cząstkami SiC (10% obj.), z zastosowaniem ostrzy z PCD, potwierdziły trudną obrabialność tego stopu oraz wpływ prędkości skrawania na trwałość narzędzi. Trwałość ostrzy diamentowych podczas obróbki skrawaniem materiału o osnowie z aluminium z dodatkiem 10% SiC z prędkością 500 m/min – niezależnie od przyjętych posuwów i głębokości skrawania – nie przekraczała 4 min. Wraz ze zmniejszeniem prędkości skrawania do 300 m/min przy posuwie 0,10 mm/obr i głębokości skrawania 0,5 mm stwierdzono wzrost trwałości narzędzia skrawającego do 15 min. Trudną obrabialność materiału o osnowie z aluminium z dodatkiem fazy węglkowej potwierdzają wyniki uzyskane podczas toczenia z prędkością 200 m/min, posuwem 0,15 mm/obr i głębokością skrawania 1,5 mm. Trwałość ostrza z PCD w procesie toczenia wynosiła 12,3 min, co w przeliczeniu na drogę skrawania daje 2,46 km. Zgodnie z danymi producenta zużycie diamentu polikrystalicznego podczas obróbki stopu aluminium o dużej zawartości Si (stop nie zawiera fazy węglkowej SiC) z prędkością 200 m/min, posuwem 0,15 mm/obr i głębokością skrawania 1,5 mm przekracza 24 km.

Ostrza po procesie toczenia poddano analizie mikroskopowej z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego JEOL JSM 6460LV. Celem tych analiz było określenie mechanizmu zużycia ostrzy w zależności od parametrów skrawania. Zużycie tych ostrzy wynikało głównie z tworzących się narostów materiału obrabianego. Podczas toczenia za pomocą wszystkich badanych płytek, niezależnie od przyjętych parametrów skrawania, otrzymywano wióry w korzystnej postaci elementowej (według klasyfikacji kształtów wiórów w PN-ISO 3685:1996).

Analiza rozkładu temperatury z zastosowaniem kamery termowizyjnej FLIR A655 wykazała, że największy wpływ na ilość ciepła generowanego w trakcie skrawania i wartość temperatury ma prędkość obrotowa (prędkość skrawania) materiału obrabianego. W dalszej kolejności na wartość temperatury materiału obrabianego wpływają głębokość skrawania i posuw. W zależności od wartości posuwów i głębokości skrawania temperatura ostrza z PCD przy prędkości skrawania 50 m/min mieściła się w zakresie od 65°C do 170°C. Przy prędkości skrawania 75 m/min, 100 m/min i 120 m/min temperatura ostrzy z PCD mieściła się w zakresach odpowiednio: 85÷190°C, 110÷210°C i 120÷220°C. Należy dodać, że ze względu na ograniczony dostęp do powierzchni ostrza skrawającego podczas toczenia mierzono temperaturę wióra. W analizie z użyciem kamery termowizyjnej założono, że w wyniku tarcia materiału obrabianego o powierzchnię ostrza skrawającego elementy te nagrzewają się do tej samej temperatury. Badania rozkładu temperatury poprzedził etap kalibracji układu oraz określenia współczynnika emisyjności materiału o osnowie z aluminium z dodatkiem fazy węglkowej SiC.

Etap formowania wióra w wyniku toczenia ostrzami diamentowymi z PCD został zarejestrowany także przez kamerę szybką Phantom MIRO 310. Podczas toczenia wszystkimi badanymi płytkami, niezależnie od przyjętych parametrów skrawania, otrzymywano wióry w korzystnej postaci elementowej lub spiralnej, przy czym ich długość nie przekraczała kilkunastu milimetrów. W zależności od parametrów obróbki (prędkości obrotowej, posuwu, głębokości skrawania) łamanie wióra następowało w wyniku kontaktu z powierzchnią czołową materiału obrabianego (przy małych wartościach posuwu), powierzchnią boczną materiału obrabianego, powierzchnią natarcia (przy najniższych wartościach prędkości skrawania, posuwu i głębokości skrawania) lub przyłożenia ostrza skrawającego (przy dużej prędkości skrawania, niezależnie od wartości posuwu i głębokości skrawania).

Prace finansowane z projektu: „Opracowanie składu fazowego kompozytu na bazie stopu AlSi pod kątem możliwości kształtowania powierzchni roboczych tłoków”, KOMPCAST, Nr PBS1/B6/13/2013.

LITERATURA

- Rajeshkumar Gangaram Bhandare, Sonawane Parshuram M. "Preparation of aluminium matrix composite by using stir casting method". *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*. 3, 2 (2013).
- Bharath V., Madev Nagara, Auradi V., Kori S.A. "Preparation of 6061Al-Al₂O₃ MMC's by stir casting and evaluation of mechanical and wear properties". *3rd International Conference on Materials Processing and Characterization (ICMPC 2014), Procedia Materials Science*. 6 (2014).
- Dyzia M., Śleziona J. „Kompozyty o osnowie aluminium zbrojone dyspersyjnymi fazami azotkowymi”. *Kompozyty*. 3 (2008).
- Wieczorek J., Śleziona J., Dyzia M., Dolata-Grosz A., Myalski J. „Struktura i właściwości kompozytów po odlewaniu ciśnieniowym”. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji*. 30, 1 (2010).
- Srinivasa R., Sambasiva Rao A., Madhusudhan Reddy G., Srinivasa Rao K. "Friction stir surfacing of cast A356 aluminium-silicon alloy with boron carbide and molybdenum disulphide powders". *Defence Technology*. 11 (2015): s. 140–146.
- Prasad S.V., Asthana R. „Aluminium metal-matrix composites for automotive applications: tribological considerations”. *Tribology Letters*. 17, 3 (2004).
- Potoczek M., Śliwa R.E., Myalski J., Śleziona J. „Kompozyty metalowo-ceramiczne wytwarzane przez infiltrację ciśnieniową metalu do ceramicznej preformy o budowie piany”. *Rudy i Metale Nieżelazne*. 54, 11 (2009): s. 688–692.
- O'Donnell G., Looney L. "Production of aluminium matrix composites components using conventional PM technology". *Materials Science and Engineering*. A303 (2001): s. 292–301.
- Fraś E., Kolbus A., Janas A. „Porównanie niektórych właściwości mechanicznych kompozytów *ex situ* typu Duralcan z kompozytami *in situ* typu Al-TiC”. *Kompozyty (Composites)*. 2 (2002).
- Meena K.L., Manna A., Banwait S.S. "An analysis of mechanical properties of the developed Al/SiC-MMC's". *American Journal of Mechanical Engineering*. 1, 1 (2013).
- Dyzia M., Dolata A.J., Putyra P., Jaworska L. „Dobór składu fazowego kompozytu na bazie stopu AlSi pod kątem możliwości kształtowania powierzchni roboczych tłoków”. *Inżynieria Materiałowa*. 1 (2009).
- Mikkola P., Willson B. "Investment casting metal matrix composites". *Metal Casting Design & Purchasing*. Listopad–grudzień (2014).
- Thambu Sornakumar, Marimuthu Kathiresan. "Machining studies of die cast aluminum alloy-silicon carbide composites". *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 17, 5 (2010).
- Kathiresan M., Sornakumar T. "EDM studies on aluminum alloy-silicon carbide composites developed by Vortex Technique and Pressure Die Casting". *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*. 9, 1 (2010).
- Putyra P., Czechowski K., Wojteczko K., Jaworska L., Dyzia M., Dolata A.J. „Metody kształtowania odlewniczych materiałów kompozytowych”. *Mechanik*. 8–9 (2014).
- Putyra P., Jaworska L., Dyzia M., Czechowski K., Krzywdą T. „Kształtowanie siluminów z dodatkiem fazy węglkowej”. *Materiały konferencyjne: Jakość i Innowacyjność w Procesach Wytwarzania*. Wiśła: 24–26.09.2015.