

Jerzy MYALSKI*, **Bartosz HEKNER***, **Andrzej POSMYK****

WPLYW WĘGLOWEJ STRUKTURY SZKIELETOWEJ NA WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE KOMPOZYTÓW Z OSNOWĄ ALUMINIOWĄ

THE INFLUENCE OF A SKELETAL CARBON STRUCTURE ON THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF COMPOSITE WITH AN ALUMINIUM MATRIX

Słowa kluczowe:

kompozyty metalowe, pianki węglowe, węgiel szklisty, współczynnik tarcia, zużycie

Key words:

metal matrix composite, carbon foams, glassy carbon, friction coefficient, wear

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu ciągłej struktury umacniającej węgla szklistego na właściwości tribologiczne kompozytów. W badaniach wykorzystano jako zbrojenie wytworzone we własnym zakresie pianki węglowe o określonej porowatości zapewniające możliwość infiltracji ciekłym materia-

* Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Polska.

** Politechnika Śląska, Wydział Transportu, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Polska.

łem osnowy aluminiowej. Wytworzone kompozyty poddano badaniom tribologicznym w celu określenia wpływu szkieletowej struktury umacniającej na wartość współczynnika tarcia i mechanizm zużywania. Wyniki wykazały, że odpowiednia jakość i porowatość przestrzennych struktur mogą wpływać na wartość współczynnika tarcia i zużycie. Analiza rentgenowska powierzchni biorącej udział w tarciu wykazała, że ulegające zniszczeniu struktury węglowe osadzają się na biorących w tarciu materiałach próbki i przeciwpróbki i mogą tworzyć smar stały wpływający korzystnie na ograniczenie procesów zużywania oraz stabilizację współczynnika tarcia.

WPROWADZENIE

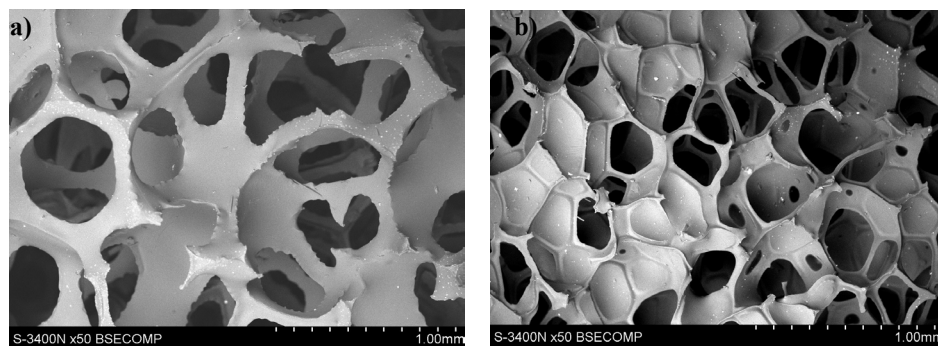
Materiały kompozytowe, przez odpowiedni dobór komponentów mogą osiągnąć unikalne właściwości, których nie jest w stanie spełnić materiał jednorodny. Odpowiedni wybór komponentów, ich właściwości, postać i struktura pozwalają na uzyskanie materiału o dużej wytrzymałości właściwej, wymaganej np. w konstrukcji karoserii samochodowej lub poszyciach samolotów czy środkach transportu wodnego [L. 1–5]. Przy doborze komponentów istotną rolę spełnia ich funkcja w kompozycie. Włókna węglowe lub grafitowe przyczyniają się do wzrostu właściwości wytrzymałościowych. Natomiast cząstki grafitu zastosowane w osnowie polimerowej lub metalowej przyczyniają się do zmiany właściwości tribologicznych i tylko w niewielkim stopniu podwyższają właściwości mechaniczne w stosunku do materiału osnowy [L. 6]. Coraz częściej, w celu uniknięcia niewłaściwego rozmieszczenia zbrojenia w materiale osnowy, włókna wzmacniające są wytwarzane wstępnie w postaci preform i w takiej postaci infiltrowane materiałem osnowy [L. 5]. Pozwala to na eliminację zmiany położenia włókien, jaka może mieć miejsce podczas wytwarzania, skutkującej nierównomiernym składem fazowym osnowy i zbrojenia w kompozycie. Wpływa to negatywnie na właściwości otrzymanego takimi technologiami kompozytu [L. 7–9]. W pracy przedstawiono właściwości tribologiczne kompozytów zawierających szkieletowe struktury wzmacniające na bazie pianek węglowych z węgla o strukturze amorficznej infiltrowane ciekłym materiałem osnowy.

MATERIAŁ DO BADAŃ

Wytworzenie kompozytów ze szkieletową strukturą umacniającą

Komponent umacniający stanowiły porowate preformy o strukturze węgla szklistego. Do wytworzenia węglowego materiału o strukturze szkieletowej wykorzystano komercyjne pianki poliuretanowe o różnej otwartej porowatości komórkowej. W ramach pracy podjęto próbę wytworzenia przestrzennych

struktur węglowych na bazie pianek poliuretanowych. Były to pianki poliuretanowe o porowatości otwartokomórkowej wynoszącej 40, 60 i 80 ppi. Mikrostruktura uzyskanych pianek została przedstawiona na **Rys. 1**. Uzyskana struktura charakteryzowała się dużą regularnością budowy, równomiernością rozmieszczenia porów, bardzo cienkimi ażurowymi ściankami przypominającymi struktury wielościanów (podobnie jak to ma miejsce w budowie fulerenów). W niektórych obszarach pianki można zauważyć wypełnienie ścianek pojedynczych sfer i ich zamykanie cienką warstewką węgla szklistego. Uzyskana struktura zachowała budowę otwartokomórkową zapewniającą infiltrację materiałem osnowy, jednak zamknięte ścianki mogą utrudniać wypełnianie osnową, a w przypadku kompozytu stanowić obszar o zwiększonej koncentracji zbrojenia. Tworzenie się zamkniętych obszarów w poszczególnych komórkach było prawdopodobnie związane z dużą lepkością żywicy fenolowej. Jak wspomniano, były to pierwsze próby wytworzenia węglowych struktur szkieletowych i w dalszych badaniach należałoby określić wpływ lepkości żywicy impregnującej piankę polimerową na budowę uzyskiwanej pianki.

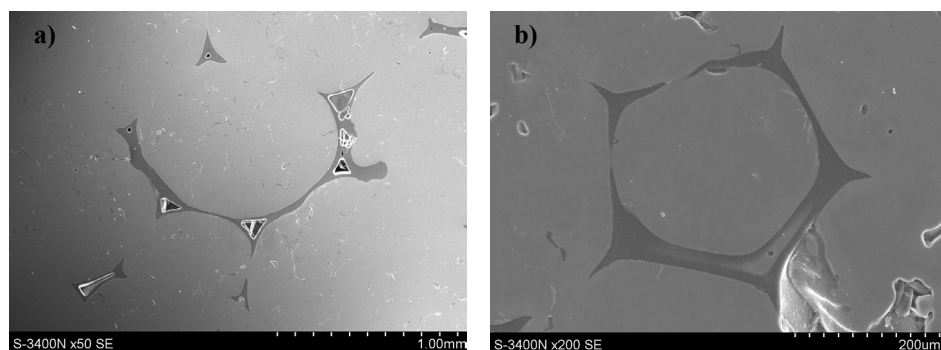


Rys. 1. Wygląd i mikrostruktura pianki węglowej o porowatości wyjściowej: a) 40 ppi, b) 60 ppi – mikrostruktura pianki z wypełnionymi obszarami sfer, SEM

Fig. 1 The view and microstructure of carbon foam with: a) 40 ppi of porosity, b) microstructure of 60 ppi foam with filled cells, SEM

Następnie zwęglone prekursorzy, w postaci preform wkładanych do kokili, były infiltrowane ciśnieniowo ciekłym stopem osnowy. Wytworzono kompozyty z trzech rodzajów preform o wyjściowej porowatości 40, 60 i 80 ppi. Gęstość i porowatość poszczególnych preform były podobne. Gęstość zmieniała się od 90 do 120 kg/m³, porowatość dla poszczególnych pianek wynosiła odpowiednio 85, 87 i 88%. Jednakże ilość porów przypadająca na jednostkową długość spowodowała zróżnicowanie średnicy poszczególnych obszarów zbrojenia, grubości ścianek zbrojenia i odległości pomiędzy nimi. Jako materiału osnowy użyto stopu odlewniczego aluminium AC-AlCuMg5 zawierającego dodatek Mn i niewielką

ilość Cu. Uzyskane kompozyty charakteryzowały się dobrym połączeniem na granicy rozdziału. Ze względu na małą wartość ciśnienia infiltracji metalem osnowy można zauważyć niewypelnienia poszczególnych sfer (**Rys. 2**).



Rys. 2. Mikrostruktura kompozytu umacnianego pianką węglową 60 ppi, a) wady struktury obszarów węglowych, b) niewypelnione przestrzenie pomiędzy ściankami pianki węglowej, SEM

Fig. 2. The microstructure of composite reinforced by carbon foam with 60 ppi: a) voids in structure of glassy carbon, b) unfilled spaces between glassy carbon walls, SEM

WARUNKI I WYNIKI BADAŃ

Warunki badań

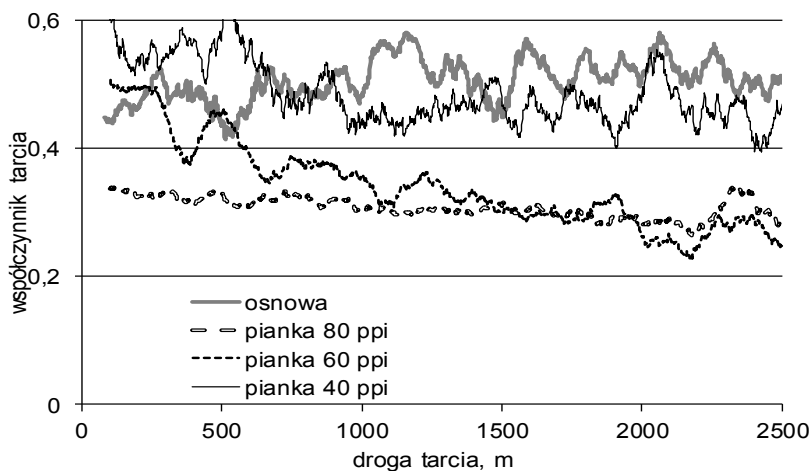
Badania tribologiczne wykonano w układzie trzpień–tarcza z wykorzystaniem tribometru T 01 w warunkach tarcia technicznie suchego. Pomiaru i rejestracji współczynnika tarcia dokonano z użyciem tensometrycznego przetwornika siły i rejestratora Spider 8. Niedokładność toru pomiarowego nie przekraczała 2% wartości mierzonej. Badania przeprowadzono na drodze tarcia 2500 m, przy obciążeniu 35 N i prędkości poślizgu 1 m/min. Materiałem przeciwpróbki był trzpień o średnicy 3 mm wykonany z żeliwa GLJ 300. Przedstawione wyniki badań były wstępnymi badaniami mającymi na celu określenie możliwości stosowania ciągłego zbrojenia kompozytów w postaci struktur szkieletowych i ocenę wpływu różnej porowatości na właściwości tribologiczne. Wyniki badań współczynnika tarcia (**Rys. 3**) są wartościami uśrednionymi dla co najmniej 2 pomiarów.

Po badaniach współczynnika tarcia dokonano oceny stanu powierzchni tarcia kompozytów i współpracujących z nimi trzpieniami żeliwnymi z użyciem mikroskopu skaningowego S-3400N Hitachi. Obserwacje mikroskopowe miały na celu określenie mechanizmów związanych z procesami zużycia. Wybrane

wyniki stanu powierzchni tarcia po współpracy przedstawiono na **Rysunku 5**. Przeprowadzono również analizę składu fazowego powierzchni tarcia kompozytów, trzpieni i produktów zużycia. Obserwowane obszary tworzące się podczas tarcia kompozytów przedstawiono na **Rysunkach 6–8**.

Wyniki badań

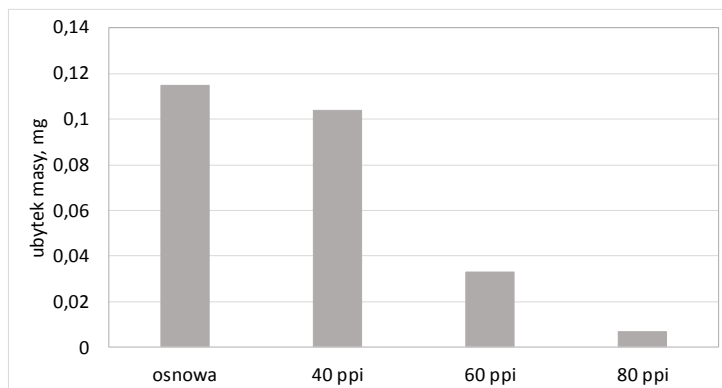
Wyniki pomiaru współczynnika tarcia przedstawiono na **Rysunku 3**. Wyniki badań wykazały, że współczynnik tarcia zależy od porowatości pianki węglowej i jej struktury. Małą i stabilną wartość μ (o połowę mniejszą niż dla osnowy) uzyskano dla pianek o porowatości liniowej 60 i 80 ppi. Natomiast dla kompozytu z pianką o porowatości 40 ppi współczynnik tarcia jest porównywalny do współczynnika tarcia osnowy i podobnie jak osnowa charakteryzuje się dużą niestabilnością. Jest to związane z rozmieszczeniem fazy zbrojącej w kompozycie. Jak widać na **Rys. 5**, faza węglowa tworzy sfery o dużej średnicy i grubych ściankach. Powoduje to, że na powierzchni kompozytu tworzą się obszary o dużej zawartości węgla (**Rys. 5b**). Dochodzi zatem do naprzedniego kontaktu podczas tarcia z materiałem osnowy i materiałem zbrojenia, co skutkuje szczepianiem żeliwa z osnową. Przebieg zmian współczynnika tarcia jest prawie taki sam jak dla osnowy.



Rys. 3. Współczynnik tarcia kompozytów zawierających pianki z węgla szklistego

Fig. 3. The coefficient of friction for composites reinforced by glassy carbon foams

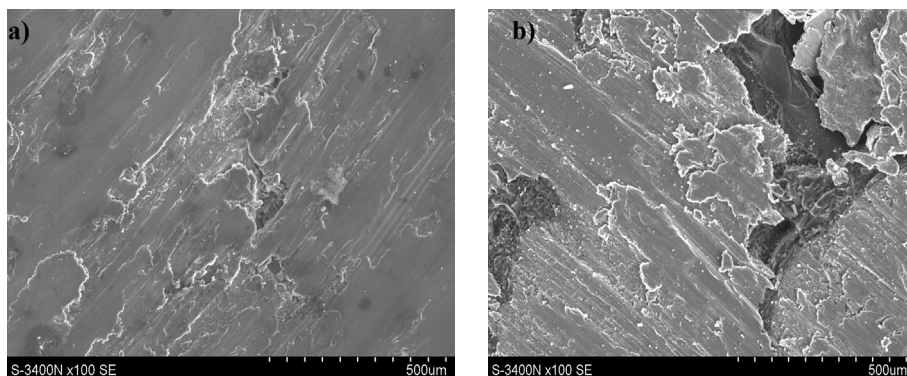
Przy większej porowatości pianki węglowej, np. 60 ppi, rozmieszczenie fazy zbrojącej na powierzchni kompozytu jest bardziej równomierne (**Rys. 5a**) i podczas tarcia ma miejsce większa ilość znacznie krótszych styków z materiałem osnowy niż materiałem zbrojenia, co skutkuje zmniejszeniem sił tarcia.



Rys. 4. Ubytek masy kompozytów zawierających pianki z węgla szklanego

Fig. 4. The mass loss for composites reinforced by glassy carbon foams

Porowatość pianek wpływa również na zużycie masowe kompozytów. Podobnie jak w przypadku współczynnika tarcia, ze zwiększeniem się porowatości ubytek masy kompozytu również jest mniejszy (**Rys. 4**).



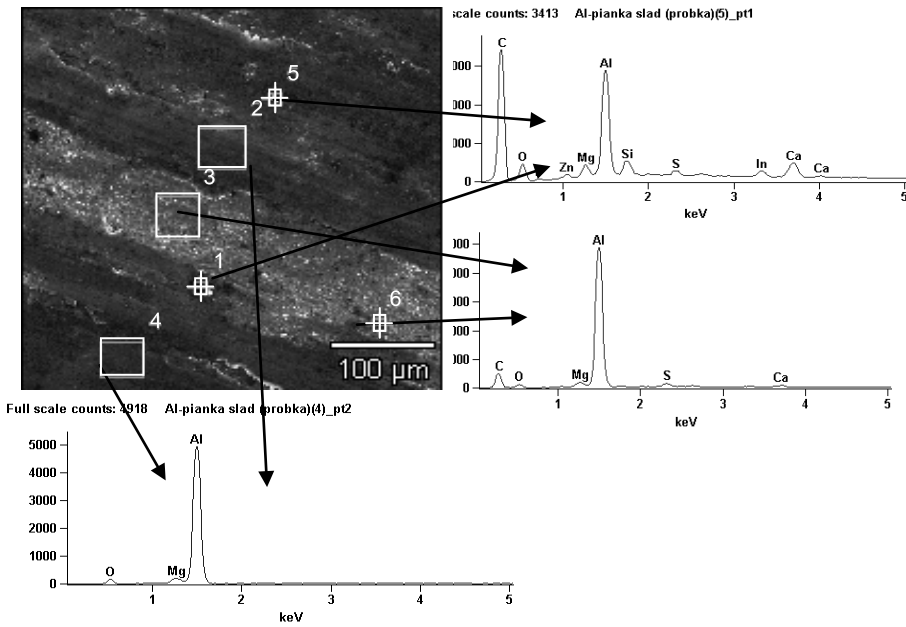
Rys. 5. Powierzchnia tarcia w kompozycie zawierająca zbrojenie węglowe o różnej porowatości: a) porowatość 80 ppi, b) porowatość 40 ppi, SEM

Fig. 5. The surface after friction of composite reinforced by carbon foam with another porosity: a) 80 ppi, b) 40 ppi, SEM

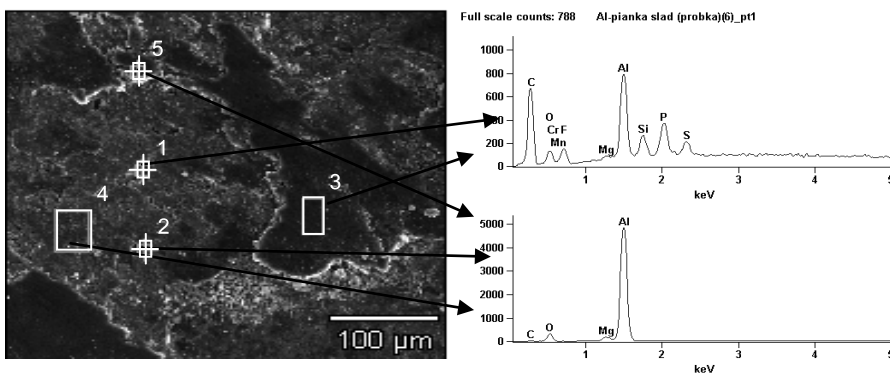
Ocena mechanizmów zużycia kompozytów o zbrojeniu szkieletowym

Analiza rentgenowska powierzchni po tarcia wykazała, że skład fazowy produktów zużycia nie zależy od porowatości szkieletu węglowego. W głównej mierze są to tlenki na bazie związków glinu (**Rys. 6**, p. 1, 3, 4) oraz niewielka ilość produktów węglowych występujących punktowo i sporadycznie w warstwie powierzchniowej, usuwanych z powierzchni kompozytu podczas tarcia i związanych adhezyjnie z kompozytem (**Rys. 6**, p. 2, 5). W niektórych obsza-

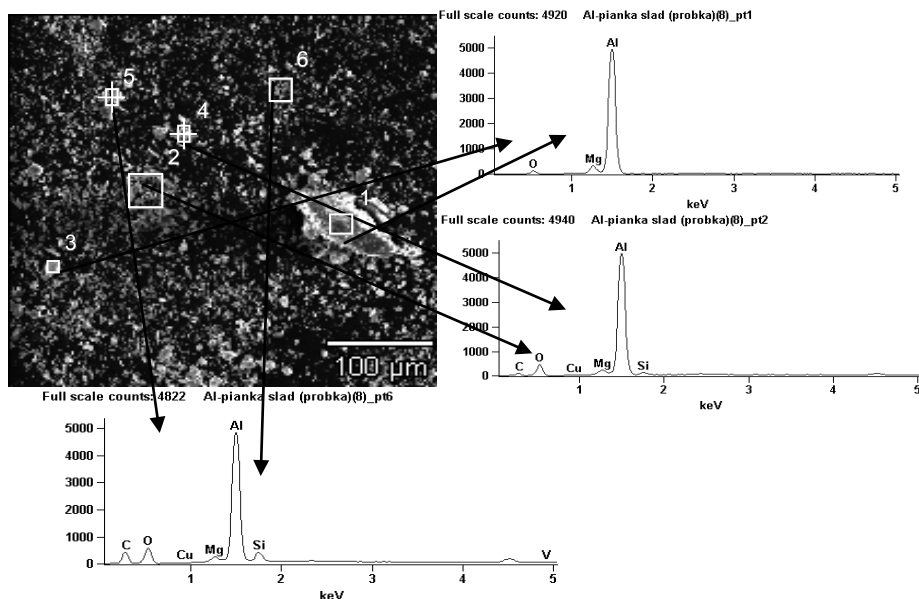
rach (Rys. 6, p. 1) ilość węgla w składzie fazowym naniesionych produktów zużycia jest dość duża. Dzięki temu w warstwie pojawiły się dodatkowe obszary wzbogacone w węgiel, zmniejszające współczynnik tarcia i zużycie, szczególnie przy zwiększonym nacisku jednostkowym.



Rys. 6. Analiza produktów zużycia na powierzchni kompozytu z pianką węglową
 Fig. 6. The analysis of wear debris on the surface of composite with glassy carbon foam



Rys. 7. Analiza fazowa produktów zużycia na trzpieniu żeliwnym po współpracy z kompozytem zawierającym piankę węglową
 Fig. 7. The phase analysis of debris on the cast iron pin after friction with composite reinforced by glassy carbon foam



Rys. 8. Analiza produktów zużycia powstałych podczas tarcia skojarzenia GJL-300 – kompozyt z pianką węglową

Fig. 8. The analysis of wear debris obtained during sliding of GJL-300 – composite with carbon foam contact

Produkty zużycia utworzone podczas tarcia na powierzchni roboczej żeliwnego trzpienia (**Rys. 7**) składają się w głównej mierze z Al, Mg, O, co sugeruje, że są to składniki osnowy (Al, Mg, Cu), tlenki lub spinele zawierające głównie aluminium, pochodzące ze zużycia osnowy. W naniesionych na powierzchni trzpienia produktach zużycia zaobserwowano również bardzo małą zawartość węgla (**Rys. 7**, p. 6) oraz zidentyfikowano drobne wydzielenia węglowe (**Rys. 5**, p. 1, 5). Świadczy to o adhezyjnym szepianiu wykruszonych cząstek węgla z materiałem trzpienia.

W powstałych podczas tarcia produktach zużycia (**Rys. 8**) można zidentyfikować głównie pierwiastki występujące także w kompozycie. Są to głównie pierwiastki pochodzące z osnowy kompozytu – Al, Mg oraz śladowe ilości węgla (**Rys. 8**, p. 2, 3, 5). Brak żelaza w produktach zużycia może świadczyć o tym, że pomimo dużej twardości węgla tworzącego szkieletowe zbrojenie kompozytu nie następuje zużycie ściernie na powierzchni trzpienia żeliwnego.

PODSUMOWANIE

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły możliwość wytworzenia materiałów kompozytowych zawierających zbrojenie w postaci ciągłej struktury szkieletowej pozwalającej na infiltrację ciekłym metalem osnowy. Taki układ

komponentów eliminuje podstawowe wady technologii odlewniczych stosowanych do wytworzenia kompozytów metodami mieszania skutkujące segregacją i nierównomiernym rozmieszczeniem cząstek zbrojących w materiale osnowy.

Przez zastosowanie pianek węglowych o różnej porowatości można wpływać na zmiany wartości współczynnika tarcia i zużycie. Odpowiednie cechy stereologiczne porów, duża równomierność rozmieszczenia porów i zmniejszenie ich średnicy przyczyniają się do zwiększenia stabilności i obniżenia wartości współczynnika tarcia. Taka zmiana właściwości jest związana z mechanizmem zużywania podczas współpracy kompozytu z żeliwem. Obecność węgla szklistego w strukturze kompozytu, zmniejsza intensywność tarcia i zużywania. Jest to związane z odwarstwianiem niewielkich fragmentów węgla szklistego (oderwanych w wyniku ścinania) i adhezyjnym ich osadzaniem na powierzchni kompozytu i materiału z nim współpracującego. Pomiędzy współpracującymi materiałami tworzy się, funkcjonujący jak smar stały, film węglowy sprzyjający tarcu granicznemu.

Praca została realizowana w ramach programu Innowacyjna Gospodarka, finansowanego przez Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego POIG.01.01.02-00-015/08-00 pt.: Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym.

LITERATURA

1. Chawla N., Chawla K.K.: Metal Matrix Composites, Springer, New York, USA, 2006.
2. Suraj Rawal: Metal-Matrix Composites for Space Applications. Journal of Metals, 53, (4), 2001, 14–17.
3. Lin Ye, Ye Lu, Zhongqing Su, Guang Meng: Functionalized composite structures for new generation airframes; A review. Composites Science and Technology, vol. 65, 2005, 1436–1446.
4. Chung D.L.: Composite materials: functional materials for modern technologies. Springer, London 2003.
5. Kainer K.U. (ed.): Metal Matrix Composites. Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Germany, 2006.
6. Allison J.E., Cole G.S.: Metal-Matrix Composites in the Automotive Industry: Opportunities and Challenges. Journal of Metals, (1), 1993, 19–24.
7. Method for production of aluminium-ceramic composite including solid lubricants. Patent application P. 398311 [WIPO ST 10/C PL398311] 2012.
8. Posmyk A., Myalski J.: Producing of composite materials with aluminium alloy matrix containing solid lubricants. Solid State Phenomena, Vol. 191, 2012, 67–74.
9. Potoczek M.: Gelcasting of alumina foams using agarose solutions. Ceramics International 34, 2008, 661–667.

Summary

This paper presents the influence of the skeletal structure of glassy carbon foam on the tribological properties of composite materials. During the research, carbon foams produced in the laboratory were used as a reinforcement. The proper level of the porosity of the skeletal structure gave an opportunity for the infiltration of liquid aluminium. For manufactured composites, the coefficient of friction and wear level were measured as a result of tribological investigations. The measurements revealed the influence of the porosity and quality of foams on the coefficient of friction and level wear ratio. During X-ray studies of external parts of the friction surface, the specific behaviour of carbon foam was discovered. The worn carbon phases are smeared on the friction surface, creating thin lubricating layer. This carbon layer plays a protective role against progressive wear and lead to the stabilisation of friction coefficient values.