

Zbigniew Pawelec*, Jarosław Molenda, Marek Wolszczak

Instytut Technologii Eksploatacji - PIB, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, Poland

** Corresponding author. E-mail: Zbigniew.Pawelec@itee.radom.pl*

Otrzymano (Received) 09.12.2009

WPŁYW WĘGLA SZKLISTEGO NA WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE I MECHANICZNE EPOKSYDOWYCH KOMPOZYTÓW REGENERACYJNYCH

Przedstawiono wyniki prac badawczych dotyczących wpływu węgla szklanego na właściwości napelnionych nim regeneracyjnych kompozytów metalopolimerowych. Badaniom poddano kompozyty o zróżnicowanym udziale wagowym węgla szklanego, tj. od 5 do 30 cz. wag. Dla opracowanych materiałów kompozytowych oznaczono podstawowe właściwości wytrzymałościowe: twardość wg Brinella, udarność wg Charpy'ego oraz wytrzymałość na ściskanie i odrywanie. Wykorzystując różnicową kalorymetrię skaningową (DSC), zbadano również efekty cieplne towarzyszące procesom zachodzącym podczas ogrzewania kompozytów, a za pomocą dylatometru dokonano pomiarów współczynnika liniowej rozszerzalności cieplnej. Charakterystyki tribologiczne skojarzenia kompozyt metalopolimerowy-brąz wyznaczono na testerze tribologicznym typu rolka-kłoczek. Stwierdzono, że węgiel szklany wpływa korzystnie na niektóre właściwości wytrzymałościowe, stabilność cieplną i charakterystyki tribologiczne skojarzenia tarcowego kompozyt-stop łożyskowy.

Słowa kluczowe: węgiel szklany, kompozyt metalopolimerowy, regeneracja, charakterystyki tribologiczne, właściwości cieplne

INFLUENCE OF GLASSY CARBON ON THERMAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF REGENERATIVE EPOXY COMPOSITES

The main reason for loss exploitation properties of machine construction elements are surface damages of cooperative moving parts. One of the basic methods for protraction of a machine's life cycle is regeneration of slide bearings surface damage. It could be done by application of polymeric composite materials (PCMs) instead of a classical regeneration method. PCMs characterize by a low friction coefficient and a high wearing resistance. On account of a work specification of these materials optimization of theirs thermal and mechanical properties is necessary.

In the article investigation results concerning on influence of the glassy carbon on regenerative metal-polymer composites were presented. Composite materials containing the glassy carbon in the mass fraction from 5 to 30 parts by weight were investigated. For formulated composite materials mechanical properties like the Brinell hardness test, the Charpy impact strength and a resistance to compression and separation were determined. With use of the Differential Scanning Calorimetry (DSC) thermal effects associated with processes proceeding during a sample heating were studied and the coefficient of thermal linear expansion by dilatometer was determined. Tribological characteristics of metal-polymer composite - bronze combination were measured using the block-on ring tester.

On the basis of the obtained results it was confirmed the presence of the glassy carbon in metal-polymer composites stabilize theirs thermal transformation in a elevated temperature and limit theirs coefficient of thermal linear expansion. Presence of the tested filler in the polymer composition to 20% m/m has a good influence on the mechanical properties of the characterized material. Higher hardness, impact strength and lower wearing of the obtained material was observed.

Keywords: glassy carbon, metal-polymer composite, tribological characteristic, thermal properties

WPROWADZENIE

Współczesne wymagania w zakresie ochrony środowiska wskazują, iż jednym ze sposobów minimalizacji ilości odpadów obciążających ekosystemy jest rozwój technologii niskoodpadowych, które pozwalają na wielokrotne przetwórstwo specjalistycznych materiałów konstrukcyjnych przy jednoczesnym ograniczeniu energochłonności procesów. Ponadto rozwija się prace nad możliwościami wydłużenia cyklu życia wytworzonych produktów, a w szczególności maszyn i urządzeń,

poprzez ich regenerację za pomocą odpowiednio zaprojektowanych i wytworzonych materiałów, w szczególności kompozytów metalopolimerowych [1, 2]. Właściwości użytkowe polimerowych materiałów kompozytowych są kształtowane poprzez odpowiedni dobór komponentów, tj. matrycy polimerowej, napelniaczy, dodatków uszlachetniających, a w przypadku tworzyw chemoutwardzalnych także substancji sieciujących [3, 4].

Kompozyty metalopolimerowe, stosowane do regeneracji ślizgowych elementów maszyn, wytwarzane są zazwyczaj na osnowie żywic epoksydowych i zawierają szereg napełniaczy pełniących różnorodne funkcje, w szczególności poprawiające właściwości mechaniczne i przewodność cieplną oraz zmniejszające tarcie i zużycie. Podstawowymi napełniaczami są: proszki metali (np. żelaza, brązu, miedzi), rozdrobnione minerały (np. montmorylonit), włókna mineralne i syntetyczne (np. węglowe, poliaramidowe) oraz napełniacze zmniejszające opory ruchu (np. grafit i disiarczek molibdeny). Dobór napełniaczy do osnowy zależy od wielu czynników, w tym między innymi od wymagań stawianych utwardzonemu kompozytowi oraz warunków eksploatacji regenerowanych elementów maszyn [5, 6].

Zastosowanie określonych napełniaczy pozwala zarówno na kształtowanie właściwości wytrzymałościowych, jak również charakterystyk tarciovo-zużyciowych kompozytów. Przykładowo pod wpływem napełniaczy moduł sprężystości przy rozciąganiu wzrasta, a wytrzymałość na zginanie ulega przeważnie pewnemu pogorszeniu. Dodanie większych ilości napełniaczy proszkowych może powodować wyraźny spadek udarności, natomiast napełniacze o budowie włóknistej decydują o jej znacznym zwiększeniu. Twardość kompozytów z napełniaczami proszkowymi zależy istotnie od rodzaju napełniacza i stopnia napełnienia. Proszki szczególnie twardych materiałów, jak np. korund, wpływają na wzrost tego parametru. Wzrostowi twardości towarzyszy jednak spadek udarności, przy czym rodzaj proszku odgrywa mniejszą rolę niż wielkość ziaren. Proszki metali poprawiają przewodność i zmniejszają rozszerzalność cieplną kompozytów [7-11].

Nowym typem napełniacza organicznego, otrzymywanego podczas karbonizacji żywic fenolowo-formaldehadowych, jest węgiel szklisty, który dotychczas testowano jako napełniacz żywic termoutwardzalnych. Badania tego typu tworzyw wykazały, że dodatek sproszkowanego węgla szklanego przyczynia się do ograniczenia procesów destrukcji termicznej kompozytów i zmniejsza ubytek masy podczas ich wysokotemperaturowego ogrzewania [12-14]. W związku z powyższym zakłada się, że wprowadzenie tego typu napełniacza do kompozytów na osnowie żywic epoksydowych mogłoby również korzystnie wpłynąć na właściwości użytkowe materiałów regeneracyjnych.

Celem pracy było zbadanie wpływu węgla szklanego, zastosowanego jako napełniacz metaloepoksydowych kompozytów regeneracyjnych, na ich stabilność termiczną oraz właściwości mechaniczne, w tym tribologiczne, decydujące o możliwości wykorzystania kompozytu w niskoodpadowych technologiach napraw łożysk ślizgowych.

PRZEDMIOT I METODY BADAŃ

Przedmiotem badań były kompozyty metalopolimerowe na osnowie żywicy epoksydowej Epidian-5 (100

cz. wag.), napełnionej proszkiem żelaza - Fe (300 cz. wag.), grafitem (10 cz. wag.) oraz organicznymi włóknami poliaramidowymi w postaci pulpy o nazwie handlowej Kevlar typ 1F651 (2 cz. wag.). Do kompozycji tej wprowadzano dodatkowo węgiel szklisty. Na podstawie analizy danych literaturowych oraz wstępnych eksperymentów przyjęto następujące udziały wagowe węgla szklanego w modelowych próbkach: 5 cz. wag. (próbkę oznaczono symbolem WSZ-5), 10 cz. wag. (próbka WSZ-10), 20 cz. wag. (próbka WSZ-20) i 30 cz. wag. (próbka oznaczona WSZ-30). Natomiast niemodyfikowaną próbkę kompozytową oznaczono symbolem WSZ-0.

Technologia wytwarzania kompozytów polegała na dokładnej homogenizacji sproszkowanych napełniaczy z ciekłą osnową w niskoobrotowym laboratoryjnym mieszalniku zetowym. Do sieciowania kompozytów zastosowano poliaminę alifatyczną (trietylenotetraaminę) w ilości stechiometrycznej w stosunku do osnowy epoksydowej kompozytu. Utwardzanie prowadzono w temperaturze pokojowej przez 7 dni.

CHARAKTERYSTYKA WĘGLA SZKLISTEGO

Zastosowany w pracach eksperymentalnych węgiel szklisty jest produktem procesu karbonizacji żywic fenolowo-formaldehadowych. Podczas pirolizy wygrzewany jest prekursor przez okres od 24 do 78 godzin. Proces ten jest prowadzony do osiągnięcia temperatury 1000°C. Tak długi czas pozwala na uzyskanie węgla szklanego niezawierającego innych dodatków. Cykl zwęglania żywic fenolowych prowadzi się w ten sposób, aby w krytycznym zakresie temperatur, w którym procesy destrukcji są najbardziej intensywne, szybkość ogrzewania była możliwie jak najmniejsza i wynosiła ok. 50°/h. Po karbonizacji uzyskany materiał węglowy jest rozdrabniany w młynie do granulacji poniżej 200 µm [15].

Rozkład granulometryczny węgla szklanego jest zróżnicowany z przewagą frakcji o rozmiarach powyżej 150 µm. Charakteryzuje się on dużą obojętnością chemiczną, wysokim stopniem rozwinięcia powierzchni i spełnia podstawowe wymagania (nie wpływa na proces sieciowania, posiada dobrą zwilżalność i wysoką adhezję do osnowy) odnośnie do napełniaczy stosowanych do kompozytów z ciekłą osnową polimerową.

METODY BADAŃ KOMPOZYTÓW

Program badań związany z oceną wpływu węgla szklanego na właściwości wytrzymałościowe kompozytów metalopolimerowych obejmował znormalizowane badania: twardości wg Brinella PN-EN ISO 2039-1:2004), udarności wg Charpy'ego (PN-EN ISO 179-1:2004) i wytrzymałości na odrywanie i ściskanie, określanych na maszynie wytrzymałościowej Intron (PN-EN ISO 604:2004). Pomiar współczynnika linio-

wej rozszerzalności cieplnej przeprowadzono na próbkach o wymiarach $7 \times 7 \times 50$ wg PN-C-89021: 1982. Jako wynik podawano średnią arytmetyczną z co najmniej pięciu pomiarów mierzonych parametrów.

Charakterystyki tribologiczne opracowanych materiałów kompozytowych przeznaczonych do regeneracji elementów łożysk ślizgowych wyznaczano na maszynie tribologicznej T-05 typu rolka-klocek. Testy przeprowadzono zgodnie z wymogami określonymi w normie ASTM D 2714 w następujących warunkach:

- materiały węzła kompozyt - brąz,
- prędkość poślizgu v $0,4 \div 0,8$ m/s,
- nacisk jednostkowy p 3 MPa,
- droga tarcia s 2400 m,
- ilość pomiarów w czasie trwania testu 1000,
- rodzaj smarowania - jednokrotne smarem plastycznym ŁT4S3.

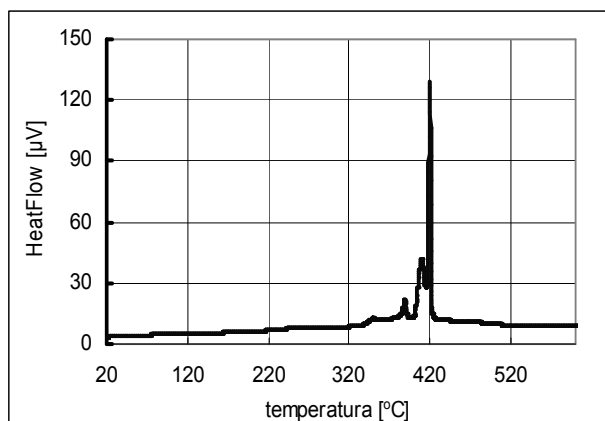
W czasie trwania testu prowadzono pomiary siły tarcia, temperatury i zużycia liniowego węzła tarcia.

Badania właściwości cieplnych kompozytów przeprowadzono za pomocą różnicowej kalorymetrii skaningowej DSC, która umożliwiła badanie efektów cieplnych, towarzyszących procesom zachodzącym podczas ogrzewania badanej substancji. Pomiary DSC wykonano za pomocą aparatu LABSystem SETARAM TG DSC i prowadzono je metodą dynamiczną, przy liniowym wzroście temperatury w następujących warunkach: zakres temperatury - $20 \div 600^\circ\text{C}$, szybkość wzrostu temperatury - $5^\circ/\text{min}$, przepływ tlenu - 60 ml/min, masa próbki 3,0 mg, tygle platynowe.

WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

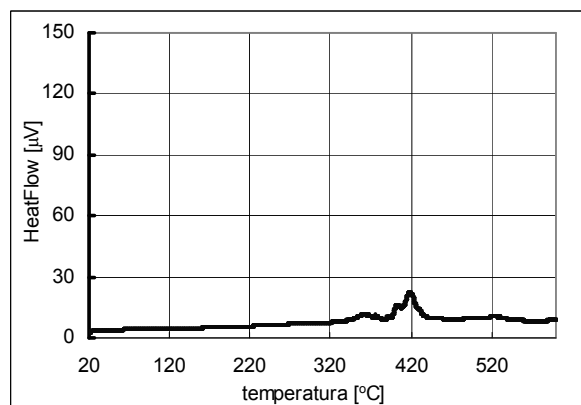
Właściwości cieplne

Węgiel szklisty zastosowany jako dodatkowy napełniacz proszkowy kompozytów metalopolimerowych wpływa na przemiany cieplne w kompozytach. Typowy przebieg tych zmian przedstawiono na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1. Krzywa sygnału DSC kompozytu WSZ-0

Fig. 1. The DSC curve signal of the composite WSZ-0



Rys. 2. Krzywa sygnału DSC kompozytu WSZ-20

Fig. 2. The DSC curve signal of the composite WSZ-20

Na podstawie otrzymanych wyników badań efektów cieplnych związanych z procesem ogrzewania kompozytów można zaobserwować, że obecność węgla szklistego w kompozytach metalopolimerowych stabilizuje je pod względem przemian energetycznych zachodzących w podwyższonej temperaturze. W przypadku próbek modyfikowanych węglem szklistym nie obserwuje się intensywnego piku egzotermicznego w przedziale temperatur $380 \div 420^\circ\text{C}$, związanego prawdopodobnie z temperaturą maksymalnej szybkości utlenienia.

Dla materiałów stosowanych w węzłach tarcia istotnym parametrem związanym z oddziaływaniem podwyższonej temperatury jest rozszerzalność cieplna. W węzłach tarcia, w których oba elementy wykonane są z różnych materiałów, np. czop regenerowany kompozytem polimerowym i panewka ze stopu łożyskowego, różniących się znacznie wartością współczynnika liniowej rozszerzalności cieplnej i wartością współczynnika przewodzenia ciepła, wzrost temperatury w warstwie wierzchniej kompozytu będzie znacząco większy niż dla elementu metalowego. Zbyt duża rozszerzalność cieplna kojarzonych w węzle tarcia materiałów może zakłócić prawidłową pracę łożyska ślizgowego lub całkowicie ją uniemożliwić. Zbadano więc wpływ niekonwencjonalnego napełniacza na współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej. Na podstawie otrzymanych wyników badań rozszerzalności cieplnej kompozytów stwierdzono, że węgiel szklisty wpływa korzystnie na zmiany wymiarów próbek kompozytu związane ze wzrostem temperatury - wydłużenie próbki kompozytu WSZ-20 jest mniejsze niż kompozytu bez dodatkowego napełniacza, a współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej α wynosi odpowiednio dla kompozytu WSZ-0 - $75 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, a dla kompozytu WSZ-20, zawierającego węgiel szklisty ma wartość $68 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Właściwości mechaniczne

Obecność węgla szklistego jako napełniacza proszkowego znajdującego się w utwardzonej osnowie polimerowej może zmieniać w istotny sposób nie tylko

właściwości cieplne, ale również wytrzymałościowe. Z punktu widzenia praktyki konstrukcyjnej najbardziej interesujące są właściwości mechaniczne. Znajomość tych właściwości, określanych podczas działania sił o odpowiednim rozkładzie i wielkości, pozwala na przybliżone przewidywanie zachowania się materiału kompozytowego w rzeczywistych warunkach pracy i pozwala wnioskować o możliwości ich zastosowania jako materiały regeneracyjne. Wyniki badań właściwości wytrzymałościowych materiałów kompozytowych z udziałem węgla szklanego przedstawiono w tabeli 1 i porównywano je z parametrami kompozytu wyjściowego bez udziału tego napelniaacza.

TABELA 1. Wpływ węgla szklanego na wybrane właściwości wytrzymałościowe kompozytów

TABLE 1. Influence of the glassy carbon on selected mechanical properties

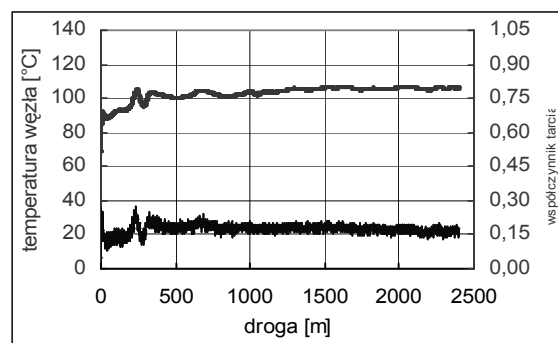
Symbol próbki	Twardość MPa	Udarność kJ/m ²	Ściskanie MPa	Odrywanie MPa
WSZ-0	230	2,5	95	21,0
WSZ-5	228	2,7	107	18,6
WSZ-10	236	2,8	99	21,1
WSZ-20	242	3,0	91	19,0
WSZ-30	260	2,7	74	6,2

Na podstawie otrzymanych wyników badań można stwierdzić, że węgiel szklisty wpływa na wartości niektórych parametrów mechanicznych. Obecność tego napelniaacza w składzie kompozytu zwiększa twardość badanych materiałów. Efekt ten jest wyraźnie widoczny dla udziału węgla szklanego w ilości 30 części wagowych. Poprawia on również udarność kompozytów i dla kompozytu zawierającego 20 cz. wag. tego napelniaacza jest ona największa, powyżej tej zawartości obserwuje się spadek tego parametru. W przypadku wytrzymałości na ściskanie zawartość węgla szklanego w ilości 5 cz. wag. powoduje jej zwiększenie, a następnie zdecydowany spadek. Jest on szczególnie zauważalny po przekroczeniu zawartości 20 cz. wag. i dla kompozytu WSZ-30 wytrzymałość na ściskanie obniża się o około 30% w porównaniu do próbki WSZ-5. Przy udziale 30 cz. wag. węgla szklanego notuje się około trzykrotne zmniejszenie wytrzymałości na odrywanie, określającej przyczepność kompozytu do materiału podłoża. Pogorszenie niektórych parametrów wytrzymałościowych usieciowanych kompozytów z udziałem amorficznej postaci węgla może wynikać ze zmniejszenia zwilżalności przez osnowę ziaren wszystkich napelniaaczy spowodowanej zbyt dużym ich udziałem objętościowym w kompozycie.

Materiały regeneracyjne przeznaczone do niskoodpadkowej technologii napraw skojarzeń ślizgowych obok parametrów wytrzymałościowych i cieplnych charakteryzowane są także przez właściwości tribologiczne. W przypadku materiałów kompozytowych zależą one od składu, struktury kompozytu oraz dodatków wpływających na opory ruchu, temperaturę węzła i zużycie

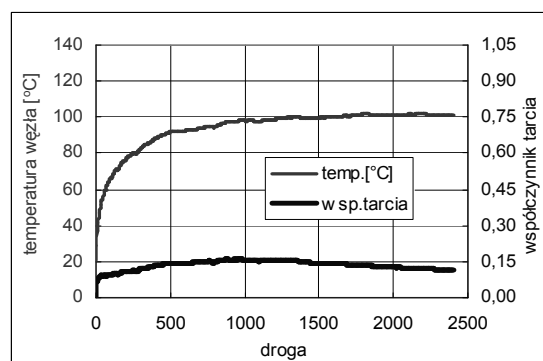
w czasie tarcia. Parametry tribologiczne, takie jak: współczynnik tarcia, temperatura węzła tarcia i zużycie stanowią kryterium przydatności kompozytów regeneracyjnych na ślizgowe elementy maszyn.

Na podstawie wyników badań właściwości cieplnych i wytrzymałościowych do badań tarcio-zużyciowych wybrano kompozyt (WSZ-20), tj. z udziałem 20 cz. wag. węgla szklanego. Kompozyt ten posiada wysoką twardość, najwyższą udarność i zadowalającą wytrzymałość na ściskanie, charakteryzuje się również stosunkowo dużą wytrzymałością na odrywanie zapewniającą dobrą przyczepność warstwy kompozytu regeneracyjnego do metalowego podłoża. Przeprowadzono dla niego serię badań tarcio-zużyciowych dla zmiennych prędkości poślizgu. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono przykładowe przebiegi zmian temperatury węzła tarcia i współczynnika tarcia skojarzenia kompozyt WSZ-0 - brąz i WSZ-20 - brąz.



Rys. 3. Przebieg zmian temperatury węzła tarcia i współczynnika tarcia dla skojarzenia kompozyt WSZ-0 - brąz ($p = 3 \text{ MPa}$, $v = 0,6 \text{ m/s}$)

Fig. 3. The temperature and friction coefficient for composite WSZ-0 - bronze friction pair ($p = 3.0 \text{ MPa}$, $v = 0.6 \text{ m/s}$)



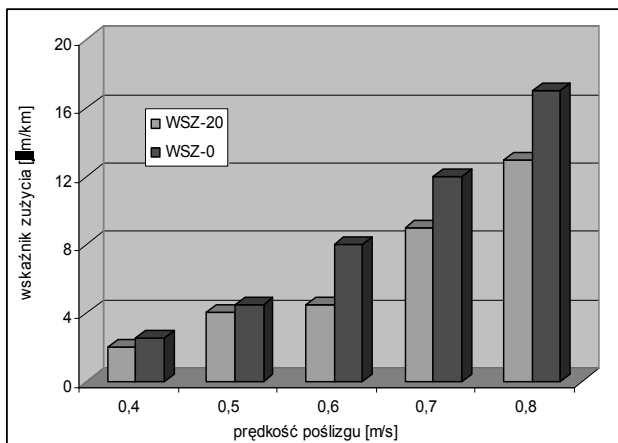
Rys. 4. Przebieg zmian temperatury węzła tarcia i współczynnika tarcia dla skojarzenia kompozyt WSZ-20 - brąz ($p = 3 \text{ MPa}$, $v = 0,6 \text{ m/s}$)

Fig. 4. The temperature and friction coefficient for composite WSZ-20 - bronze friction pair ($p = 3.0 \text{ MPa}$, $v = 0.6 \text{ m/s}$)

Porównując przedstawione na powyższych rysunkach charakterystyki tribologiczne badanych skojarzeń, można zaobserwować, że kompozyt niezawierający węgla szklanego charakteryzuje się nieco większym współczynnikiem tarcia w skojarzeniu ze stopem łożyskowym, wyższa jest również temperatura modelowego

węzła tarcia w porównaniu z kompozytem, w którym zastosowano jako dodatkowy napełniacz węgiel szklisty. Napełniacz ten wpływa również pozytywnie na stabilność zarówno temperatury, jak i współczynnika tarcia. Efekt ten może być związany z jego korzystnym oddziaływaniem na przemiany cieplne zarejestrowane za pomocą różnicowej kalorymetrii skaningowej (DSC).

Analizując wyniki zużycia badanych skojarzeń ślizgowych zamieszczone na rysunku 5, można wnioskować, że dodatkowy napełniacz kompozytów zwiększa ich odporność na zużycie tribologiczne. Uzyskane wyniki wskazują, że jego skuteczność w poprawie odporności na zużycie jest większa dla wyższych prędkości poślizgu, tj. powyżej 0,5 m/s, a więc w warunkach generowania wyższych temperatur w węzle tarcia związanych z prędkościami poślizgu.



Rys. 5. Porównanie wskaźnika zużycia kompozytu modyfikowanego węglem szklistym oraz niemodyfikowanego dla różnych prędkości poślizgu

Fig. 5. The wear factor comparison of the composite modified and unmodified with the glassy carbon for variety sliding values

Na podstawie przeprowadzonych badań tribologicznych można przypuszczać, że dla skojarzenia kompozyt WSZ-20 - brąz istniały takie warunki procesu tarcia i zużywania, że destrukcji cieplnej i zużyciu ulegała tylko mikrowarstwa wierzchnia; co jest możliwe przez wprowadzenie napełniacza, wydawnie poprawiającego stabilność termiczną kompozytów, i odprowadzanie ciepła od strefy styku trących powierzchni.

PODSUMOWANIE

Kompozyty epoksydowo-metaliczne zawierające dodatek węgla szklistego charakteryzują się wyższą odpornością termiczną i mniejszą rozszerzalnością cieplną w porównaniu do kompozytów bez dodatku. Ponadto wprowadzenie węgla szklistego do kompozytu

powoduje poprawę niektórych właściwości wytrzymałościowych oraz tribologicznych. W szczególności kompozyt epoksydowy z węglem szklistym posiada większą twardość oraz wykazuje mniejsze opory ruchu ślizgowego, co w efekcie prowadzi do redukcji zużycia zregenerowanego węzła tarcia.

LITERATURA

- [1] Królikowski W., Nowoczesne konstrukcyjne polimerowe materiały kompozytowe, *Kompozyty (Composites)* 2002, 2, 3, 16-24.
- [2] Zieliński J., Blendy i kompozyty polimerowe, *Polimery* 2002, 5, 305-309.
- [3] Wolszczak M., Pawelec Z., Molenda J., Wrona M., Wpływ parametrów geometrycznych napełniaczy na właściwości wytrzymałościowe kompozytów na bazie żywicy chemoutwardzalnej, *Problemy Eksploatacji* 2008, 4, 239-249.
- [4] Xing X.S., Li R.K.Y., wear behavior of epoxy matrix composites filled with uniform sized sub-micron spherical silica particles, *Wear* 2004, 256, 21-26.
- [5] Pawelec Z., Dasiewicz J., Funkcje komponentów i aspekty praktycznego stosowania regeneracyjnych kompozytów polimerowych, *Problemy Eksploatacji* 2003, 3, 147-156.
- [6] Janecki J., Dasiewicz J., Pawelec Z., Wpływ składu chemicznego i granulometrycznego wybranych proszków Fe na właściwości użytkowe kompozytu, *Tribologia* 2000, 3, 351-363.
- [7] Capanidis D., Wieleba W., Ziemiański K., Polimerowe łożyska ślizgowe z tworzyw termoplastycznych, *Poradnik Tribologii i Tribotechniki*, *Tribologia* 1995, 6.
- [8] Hak Gu Lee, Seong Su Kim, Dai Gi Lee, Effect of compacted wear debris on the tribological behavior of carbon/epoxy composites, *Composites Structures* 2006, 74, 136-144.
- [9] Yen B.K., Dharan C., K., H., A model for the abrasive wear of fiber - reinforced polymer composites, *Wear* 1996, 195, 123-127.
- [10] Gunor A., Mechanical properties of iron powder filled high density polyethylene composites, *Materials and Design* 2007, 28, 1027-1030.
- [11] Boczkowska A., Kapuściński J., Puciłowski K., Wojciechowski S., *Kompozyty*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
- [12] Myalski J., Ślężiona J., Posmyk A., Tribological properties of frictional composite material, 13th International Colloquium Tribology, Esslingen 2002, 2, 997-1002.
- [13] Myalski J., Wieczorek J., Stolarczyk P., Charakterystyka kompozytu ciernego zawierającego węgiel o strukturze amorficznej, X Seminarium Tworzywa sztuczne w budowie maszyn, Kraków 2003, 275-278.
- [14] Myalski J., Ślężiona J., Kompozyty metalowe zbrojone cząstkami węgla szklistego, *Przegląd Odlewnictwa* 2005, 1, 24-30.
- [15] Piasecka-Herud A., Kossobudzka H., Gonsior J., Junka Z., Oliwa S., Pilarz J., Piotrowska Z., Sarna K., Sposób wytwarzania węgla szklistego - opis patentowy 137061, Urząd Patentowy, Warszawa 1987.10.31.