

Zbigniew PAWELEC*

CHARAKTERYSTYKI TRIBOLOGICZNE SKOJARZEŃ KOMPOZYT METALOPOLIMEROWY – KOMPOZYT

TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF METAL-POLYMER COMPOSITE – COMPOSITE JUNCTION

Słowa kluczowe:

kompozyt termoutwardzalny, wypełniacze, właściwości wytrzymałościowe, tarcie, zużycie, współczynnik tarcia

Key words:

thermosetting composite, fillers, strength properties, friction, abrasion, coefficient of friction

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości wytrzymałościowych, cieplnych i tribologicznych kompozytów chemo- i termoutwardzalnych o różnych składach jakościowych i ilościowych. Jako wypełniacze kompozytów termoutwardzalnych zastosowano proszki miedzi i brą-

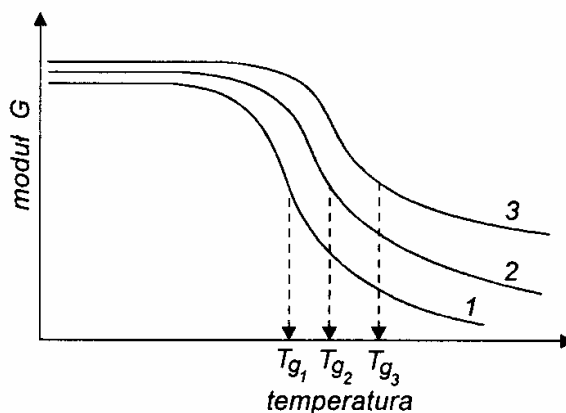
* Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, ul. K. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel.: (48) 364-42-41.

zu o określonym składzie chemicznym i granulometrycznym, napelnia-
czem kompozytu chemoutwardzalnego był proszek żelaza. Materiały
kompozytowe na osnowie termoutwardzalnej żywicy fenolowo-formalde-
hydowej wytwarzano metodą prasowania w ogrzewanej formie z wyko-
rzystaniem prasy hydraulicznej. Właściwości wytrzymałościowe i cieplne
kompozytów zbadano zgodnie z wymogami PN EN ISO na maszynie
wytrzymałościowej Instron z komputerową rejestracją i archiwizacją wy-
ników badań, twardościomierzu Brinella, młocie Charpe'go i dylatome-
trze Cosfelda. Charakterystyki tribologiczne różnych skojarzeń materia-
łowych wyznaczono na testerze T-05 typu rolka–klocek w styku rozłożo-
nym. Rolka stalowa lub z warstwą chemoutwardzalnego kompozytu me-
talopolimerowego, usieciowanego i obrobionego mechanicznie współ-
pracowała z przeciwpróbką wykonaną z brązu i kompozytów termo-
utwardzalnych. W przyjętych warunkach badań skojarzenie kompozyt-
–kompozyt wykazuje mniejsze zużycie i współczynnik tarcia niż typowe
skojarzenie stal–brąz.

WPROWADZENIE

Polimery jako materiał konstrukcyjny mają ograniczone zastosowanie
z uwagi na małą wytrzymałość mechaniczną i niekorzystne właściwości
cieplne. Istnieje wiele sposobów modyfikacji polimerów. Najczęściej stoso-
waną metodą z uwagi na niski koszt procesu, jak i z powodu uzyskania do-
brych właściwości użytkowych jest opracowywanie kompozytów na osnowie
polimerowej. Jest to sposób projektowania nowych materiałów o określonej
strukturze i właściwościach. Głównym celem wytwarzania nowych materia-
łów kompozytowych jest poprawa właściwości mechanicznych, odporności
cieplnej, chemicznej i innych parametrów, np. tribologicznych.

Kompozyty na osnowie polimerów termo- i chemoutwardzalnych
różnią się istotnie od kompozytów na osnowie termoplastów zarówno ze
względu na budowę chemiczną, właściwości fizyczne i mechaniczne,
sposoby przetwarzania, jak i kierunki i sposoby zastosowań. Kompozyty
te stanowią zróżnicowaną chemicznie grupę materiałów polimerowych,
których wspólną cechą odróżniającą je od termoplastów jest nieodwra-
calne przechodzenie w czasie formowania wyrobów w stan nietopliwego
i nierozpuszczalnego ciała stałego. Właściwości usieciowanych tworzyw
i kompozytów zależą od gęstości usieciowania. Na **Rys. 1** przedstawiono
wpływ gęstości usieciowania na zależność modułu sprężystości posta-
ciowej od temperatury.



Rys. 1. Zależność modułu G polimerów usieciowanych od gęstości usieciowania i temperatury, krzywa 3 – polimer o największej gęstości usieciowania

Fig. 1. The dependence of cross-linked polymers G module on the cross-linking density and temperature, curve number 3 – polymer with highest cross-linking density

W miarę przebiegu sieciowania w temperaturze utwardzania T_{utw} rośnie temperatura zeszklenia T_g wskutek zmniejszenia się ruchliwości kinetycznych fragmentów struktury. Gdy wartość T_g zbliża się do wartości T_{utw} , to kontrolowany dyfuzją proces sieciowania ulega zahamowaniu wskutek zeszklenia. Pełne usieciowanie może być zatem osiągnięte w temperaturze utwardzania wyższej niż maksymalna temperatura zeszklenia kompozytu [L. 1–4].

O ile właściwości wytrzymałościowe i cieplne kompozytów na osnowie polimerowej można z dużym prawdopodobieństwem prognozować, to charakterystyki tribologiczne i zjawiska tribologiczne zachodzące w systemach metal–polimer i polimer–polimer, ze względu na bardziej złożoną budowę polimerów oraz kompozytów na ich osnowie niż metali, są bardziej skomplikowane i mniej poznane niż w parach metal–metal i wymagają znacznie większej liczby eksperymentów. Dużo większą rolę w procesach tarcia i zużycia zachodzących w systemach zawierających element polimerowy odgrywają zjawiska fizykochemiczne. Z drugiej strony złożona struktura kompozytów polimerowych oraz możliwość ich modyfikacji umożliwia bardziej elastyczne sterowanie ich właściwościami [L. 5–9].

W dotychczasowych aplikacjach opracowane kompozyty metalopolimerowe współpracowały w regenerowanych węzłach tarcia z metalem.

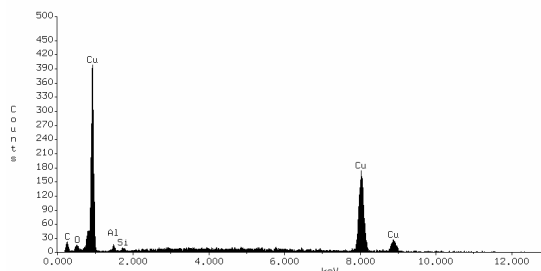
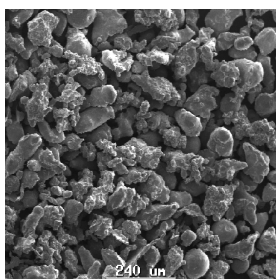
Badaniom tribologicznym materiałów stosowanych do regeneracji zużytych elementów maszyn poddawano przede wszystkim skojarzenia kompozyt metalopolimerowy-brąz lub kompozyt-stal. Otrzymane rezultaty wskazywały na zasadność stosowania na węzły tarcia, dla zapewnienia dużej odporności na zużycie, kompozytów metalopolimerowych. Nie próbowano natomiast zastąpić klasycznego tribologicznego skojarzenia materiałowego narażonego na zużycie, jakim jest stal-stop łożyskowy lub stal-stal, skojarzeniem kompozyt metalopolimerowy z odpowiednio dobranym innym niż metal materiałem partnera tribologicznego, np. kompozytem termoutwardzalnym.

Celem pracy było zbadanie i porównanie charakterystyk tribologicznych skojarzeń kompozyt chemoutwardzalny – kompozyty na osnowie polimeru termoutwardzalnego, ze skojarzeniem stal-stop łożyskowy i kompozyt-stop łożyskowy.

PRZEDMIOT I PROGRAM BADAŃ

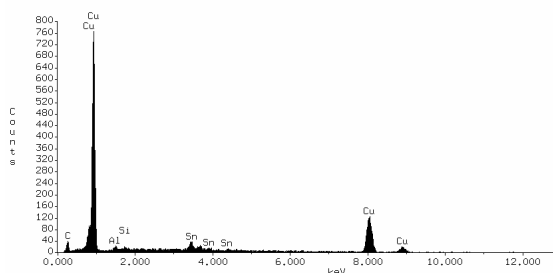
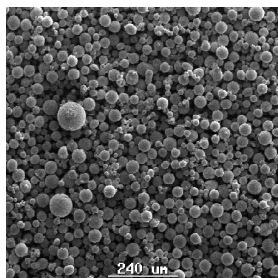
Obiektem badań były kompozyty metalopolimerowe na bazie termoutwardzalnej żywicy fenolowo-formaldehydowej, przygotowane z wykorzystaniem proszkowych napełniaczy metalicznych o zróżnicowanych parametrach geometrycznych. Jako napełniacze kompozytów zastosowano komercyjnie dostępne proszki miedzi i brązu.

Wygląd ziaren poszczególnych typów napełniaczy przedstawiono na zdjęciach mikroskopowych zaprezentowanych na **Rys. 2 i 3**, a na **Rys. 2a i 3a** przedstawiono widmo określające ich skład pierwiastkowy wykonane za pomocą analizy EDS.



Rys. 2. Obraz mikroskopowy proszku miedzi **Rys. 2a. Widmo promieniowania rentgenowskiego – skład chemiczny miedzi**

Fig. 2. The SEM image of copper powder **Fig. 2a. X-ray spectrum – copper chemical composition**



Rys. 3. Obraz mikroskopowy proszku brązu **Rys. 3a. Widmo promieniowania rentgenowskiego – skład chemiczny brązu**

Fig. 3. The SEM image of bronze powder Fig. 3a. X-ray spectrum – bronze chemical composition

Porównując obrazy mikroskopowe zastosowanych proszkowych napełniaczy metalicznych, można zaobserwować istotne różnice w kształcie ziaren. Proszek miedzi ma cząstki o nieregularnym kształcie i rozwiniętej powierzchni, natomiast ziarna brązu mają regularny, kulisty kształt. Kompozyty termoutwardzalne z różnym udziałem wagowym napełniaczy metalicznych wytwarzano metodą prasowania na gorąco z wykorzystaniem ogrzewanej formy i prasy hydraulicznej. Osnową kompozytów była handlowa żywica fenolowo-formaldehdowa. Na drodze eksperymentalnej przyjęto określone udziały wagowe napełniaczy, jak również parametry prasowania: ciśnienie prasowania 20 MPa, temperatura prasowania 160°C i czas prasowania 60 s/mm grubości wypraski. Składy opracowanych kompozytów podano w **Tabeli 1**.

Tabela 1. Kompozyty termoutwardzalne poddane badaniom wytrzymałościowym, cieplnym i tribologicznym

Table 1. The thermosetting composites subjected to strength, heat and tribological tests

Rodzaj napełniacza	Brąz			Miedź		
Udział wagowy [cz. wag.]	10	20	30	10	20	30
Symbol próbki	KBr-1	KBr-2	KBr-3	KCu-1	KCu-2	KCu-3

Z uzyskanych w wyniku prasowania prostopadłościennych próbek kompozytowych wykonywano za pomocą obróbki skrawaniem kształtki do badań właściwości wytrzymałościowych i cieplnych oraz przeciw-

próbki (klocki) do badań tribologicznych. Próbkami do badań tarciovo-zużyciowych były rolki stalowe z nałożoną, usieciowaną i obrobioną warstwą metalopolimerowego kompozytu chemoutwardzalnego.

Metody badań właściwości wytrzymałościowych i ciepłych kompozytów

Zbadano właściwości wytrzymałościowe próbek kompozytowych, w tym: twardość Brinella (wg PN-EN ISO 2039-1:2004), udarność (wg PN-EN ISO 179-1:2004), wytrzymałość na ściskanie (wg PN-EN ISO 604:2004). Oznaczenia twardości wykonano za pomocą twardościomierza Brinella (prod. Zwick, Niemcy), udarność mierzono młotem Charp'ego (prod. Zwick, Niemcy), natomiast wytrzymałość na ściskanie wyznaczano, stosując maszynę wytrzymałościową Instron. Właściwości cieplne opracowanych kompozytów określono na podstawie współczynnika liniowej rozszerzalności cieplnej (α) wyznaczonego za pomocą dylatometru Cosfelda zgodnie w wymaganiach normy PN-82/C-89021.

Metodyka badań tribologicznych

Charakterystyki tribologiczne kompozytów wyznaczono na testerze tribologicznym T-05 typu rolka-kłosek, w którym modelowy węzeł tarcia w dużym przybliżeniu jest odwzorowaniem pary czop–panew w łożysku ślizgowym. Tester ten umożliwia przeprowadzenie badań zgodnie z metodami określonymi w normie amerykańskiej ASTM D 2714. Badania tarciovo-zużyciowe prowadzono w następujących warunkach: próbka–rolka stalowe i z warstwą kompozytu chemoutwardzalnego, przeciwpróbka–brąz łożyskowy, kompozyty termoutwardzalne, środek smarowy-smar ŁT4S3, parametry pracy: ruch ciągły ślizgowy, prędkość stała w czasie trwania testu 0,3 m/s, nacisk stały w czasie trwania testu 6 MPa, droga tarcia 3000 m, styk rozłożony, pomiary: siły tarcia w czasie trwania testu, temperatury klocka w czasie trwania testu, zużycia wagowego jako różnica w pomiarach ciężaru próbki i przeciwpróbki przed i po badaniu.

Wyniki badań właściwości wytrzymałościowych i ciepłych

W **Tabeli 2** przedstawiono wyniki badań właściwości wytrzymałościowych i ciepłych termoutwardzalnych kompozytów metalopolimerowych. Do celów porównawczych podano także właściwości regenera-

cyjnego kompozytu chemoutwardzalnego nakładanego na stalową rolkę. Uzyskane wyniki badań są średnią arytmetyczną z co najmniej pięciu pomiarów mierzonych parametrów. Zastosowane w eksperymencie proszkowe napełniacze metaliczne zmieniają właściwości wytrzymałościowe kompozytów termoutwardzalnych. Twardość badanych kompozytów zależy w istotnym stopniu zarówno od rodzaju zastosowanego proszkowego napełniacza metalicznego, jak również jego udziału wagowego. Twardość kompozytów zawierających proszek brązu jest zdecydowanie mniejsza niż dla kompozytów z proszkiem miedzi.

Tabela 2. Wyniki badań właściwości wytrzymałościowych i cieplnych kompozytów
Table 2. The results of strength and heat properties of composites

	Twardość [MPa]	Udarność [kJ/m ²]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Wsp α [$\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$]
KBr-1	373	1,8	148	18
KBr-2	421	1,7	151	15
KBr-3	392	1,5	137	14
KCu-1	491	2,0	143	17
KCu-2	527	2,0	160	16
KCu-3	504	1,8	147	15
Komp. chemoutw.	240	3,1	95	72

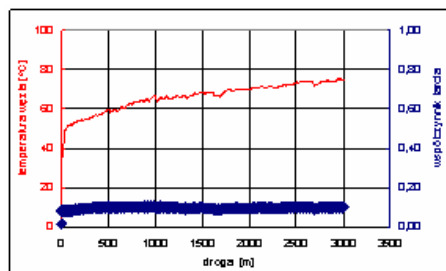
Niezależnie od zastosowanego napełniacza metalicznego odporność kompozytów na oddziaływania dynamiczne pogarsza się wraz ze wzrostem jego zawartości. Wytrzymałość kompozytów na odkształcenia postaciowe mierzone za pomocą wytrzymałości na ściskanie dla obu rodzajów napełniacza jest największa dla udziału wagowego 20 cz. wag. Największą wartość tego parametru uzyskano dla kompozytu oznaczonego symbolem KCu-2 z udziałem 20 cz. wagowych proszku miedzi. Niewielka udarność i mniejsza wytrzymałość na ściskanie kompozytów z udziałem proszku brązu mogą wynikać z tego, że cząstki brązu przedstawione na **Rys. 4** mają regularny, kulisty kształt, co w znacznym stopniu obniża adhezję mechaniczną polimerowej osnowy do napełniacza i wpływa niekorzystnie na właściwości wytrzymałościowe kompozytu. Twardość i wytrzymałość na ściskanie kompozytów termoutwardzalnych, parametry ważne dla zastosowań tribologicznych są znacznie większe niż dla kompozytów na osnowie polimeru chemoutwardzalnego.

Ważnym parametrem materiałów stosowanych na elementy węzłów tarcia jest również rozszerzalność cieplna. Współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej termoutwardzalnych kompozytów metalopolimero- wych jest kilkakrotnie mniejszy niż kompozytu chemoutwardzalnego i maleje ze wzrostem udziału wagowego proszkowego napełniacza metalicznego.

Charakterystyki tribologiczne badanych skojarzeń materiałowych

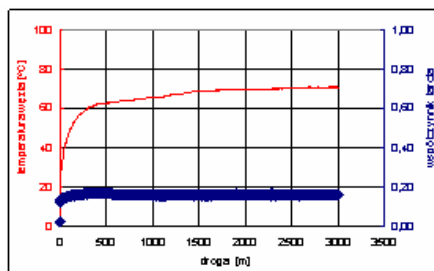
Opracowane materiały kompozytowe są przeznaczone do budowy i regeneracji elementów węzłów tarcia, w związku z tym ostatecznym eksperymentem kwalifikującym je do zastosowań tribologicznych są właściwości tarciovo-zużyciowe. W przypadku materiałów kompozytowych zależą one od składu, struktury kompozytu oraz dodatków wpływających na opory ruchu, temperaturę węzła i zużycie w czasie tarcia.

Na podstawie wyników badań właściwości cieplnych i wytrzymałościowych trudno jest jednoznacznie wytypować materiały kompozytowe do badań tarciovo-zużyciowych. W związku z tym dla wszystkich opracowanych kompozytów przeprowadzono serię badań tribologicznych przy prędkości 0,3 m/s i naciskach 6 MPa. Na **Rys. 4–7** przedstawiono przykładowe przebiegi zmian temperatury węzła tarcia i współczynnika tarcia skojarzenia kompozyt-brąz, stal-brąz i kompozyt-kompozyt.



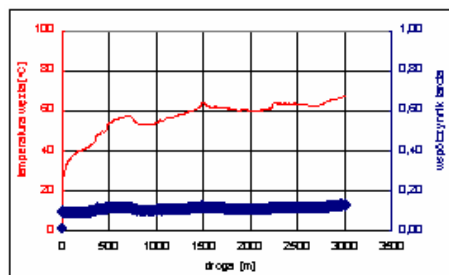
Rys. 4. Przebieg zmian temperatury węzła i współczynnika tarcia dla skojarzenia kompozyt chemoutwardzalny-brąz

Fig. 4. Temperature of friction couple and coefficient of friction for chemically setting composite-bronze junction



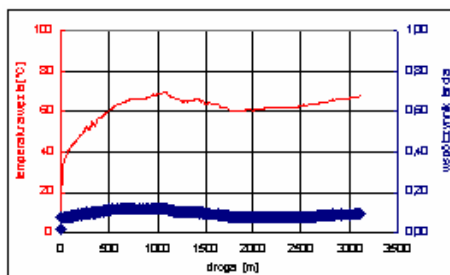
Rys. 5. Przebieg zmian temperatury węzła i współczynnika tarcia dla skojarzenia stal-brąz

Fig. 5. Temperature of friction couple and coefficient of friction for steel-bronze junction



Rys. 6. Przebieg zmian temperatury węzła i współczynnika tarcia dla skojarzenia kompozyt chemoutwardzalny–kompozyt KBr-2

Fig. 6. Temperature of friction couple and coefficient of friction for chemically setting composite – KBr-2 composite junction



Rys. 7. Przebieg zmian temperatury węzła i współczynnika tarcia dla skojarzenia kompozyt chemoutwardzalny–kompozyt KCu 2

Fig. 7. Temperature of friction couple and coefficient of friction for chemically setting composite – KCu 2 composite junction

Otrzymane przebiegi zmian temperatury węzła tarcia i współczynnika tarcia pozwalają stwierdzić, że stabilność rejestrowanych w czasie tarcia parametrów dla skojarzeń rolki z regeneracyjną warstwą wierzchnią kompozytu chemoutwardzalnego współpracującego z przeciwpróbkami z kompozytów termoutwardzalnych z udziałem proszku brązu i miedzi jest nieco gorsza niż skojarzenia kompozyt–brąz i kompozyt–stal. Minimalne wahania temperatury w przypadku skojarzeń kompozytowych mogą wynikać z mniejszej przewodności cieplnej tych materiałów. Cecha ta może również powodować, że średnia temperatura węzła tarcia w skojarzeniu dwóch materiałów kompozytowych jest niższa niż dla skojarzenia kompozyt–brąz czy kompozyt–stal. W **Tabeli 3** przedstawiono średnie wartości temperatury węzła i współczynnika tarcia badanych skojarzeń materiałowych.

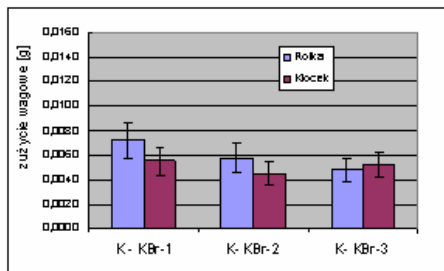
Tabela 3. Średnie wartości temperatury węzła tarcia i współczynnika tarcia badanych skojarzeń materiałowych

Table 3. Average values of temperature of friction couple and friction force of tested material junctions

Rodzaj skojarzenia	K- -KBr-1	K- -KBr-2	K- -KBr-3	K- -KCu-1	K- -KCu-2	K- -KCu-3	Komp. – brąz	Stal – brąz
Współczynnik tarcia	0,10	0,11	0,12	0,125	0,090	0,10	0,096	0,16
Temperatura węzła [°C]	50	57	54	57	61	54	67	66

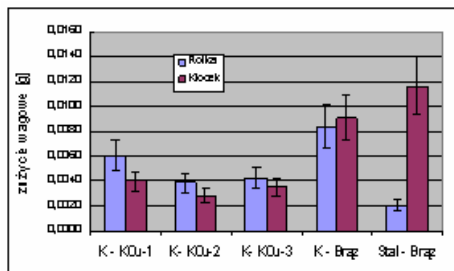
Porównując wartości współczynnika tarcia badanych skojarzeń materiałowych (**Tabela 3**), można zauważyć, że najmniejszym współczynnikiem tarcia charakteryzuje się skojarzenie, w którym przeciwpróbką dla rolki z warstwą kompozytu chemoutwardzalnego jest klocek z materiału kompozytowego zawierającego 20 cz. wag miedzi. Jest on mniejszy niż dla skojarzenia kompozyt-brąz i znacznie niższy niż dla typowego skojarzenia stal-stop łożyskowy. Dla skojarzeń kompozyt-kompozyt zarejestrowano również niższą temperaturę węzła tarcia.

Na podstawie pomiarów zużycia wagowego elementów modelowego węzła tarcia można stwierdzić, że zużycie skojarzenia kompozytu chemoutwardzalny-brąz jest znacznie większe niż skojarzeń, w których oba współpracujące elementy modelowego węzła tarcia były wykonane z materiałów kompozytowych (**Rys. 8 i 9**). Dla klasycznego skojarzenia konstrukcyjnego stal-brąz zużycie stalowej rolki jest mniejsze niż rolek z kompozytową warstwą wierzchnią, jednak zużycie współpracującego partnera ze stopu łożyskowego jest zdecydowanie większe niż przeciwpróbek z termoutwardzalnych kompozytów metalopolimerowych.



Rys. 8. Zużycie wagowe badanych skojarzeń materiałowych (przeciwpróbki wykonane z kompozytu termoutwardzalnego zawierającego brąz)

Fig. 8. Mass wear of tested friction junctions (thermosetting composite with bronze based counter specimens)



Rys. 9. Zużycie wagowe badanych skojarzeń materiałowych (przeciwpróbki wykonane z kompozytu termoutwardzalnego zawierającego miedź) oraz skojarzeń kompozyt-brąz i stal-brąz

Fig. 9. Mass wear of tested friction junctions (thermosetting composite with copper based counter specimens) and composite-bronze and steel-bronze

Spośród zbadanych skojarzeń w przyjętych warunkach badań tarciowo-zużyciowych najmniejsze zużycie uzyskano dla skojarzenia, w któ-

rym rolka z regeneracyjną warstwą chemoutwardzalnego kompozytu współpracowała z przeciwpróbką wykonaną z kompozytu termoutwardzalnego zawierającego 20 cz. wag. proszku miedzi. Zwiększona odporność na zużycie kompozytów na osnowie polimeru termoutwardzalnego z udziałem proszku miedzi może wynikać z ich dużej twardości i odporności na odkształcenia postaciowe, będącej skutkiem zwiększonej adhezji mechanicznej napełniacza i polimerowej osnowy wynikającej z jego kształtu i rozwiniętej powierzchni. Kulisty kształt proszku brązu nie sprzyja jego trwałemu umocowaniu w polimerowej osnowie i może powodować oprócz pogorszenia właściwości wytrzymałościowych również wzrost zużycia w procesie tarcia.

PODSUMOWANIE

Opracowane kompozyty polimerowe na osnowie termoutwardzalnej żywicy fenolowo-formaldehadowej mają wysokie parametry wytrzymałościowe znacznie większe niż kompozyt chemoutwardzalny. Obecność proszkowych napełniaczy metalicznych wpływa korzystnie na współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej oraz niektóre właściwości wytrzymałościowe. Uzyskane wyniki badań tribologicznych wskazują, że kompozyty metalopolimerowe charakteryzują się dobrymi właściwościami tarciovo-zużyciowymi. Skojarzenie kompozyt–kompozyt w modelowym węźle tarcia wykazuje mniejsze opory ruchu i niższą temperaturę węzła tarcia, jak również zużycie współpracujących elementów niż skojarzenie kompozyt–brąz i typowe skojarzenie konstrukcyjne stal–stop łożyskowy.

LITERATURA

1. Królikowski W.: Składniki kompozytów polimerowych. Ogólnopolska Szkoła Kompozytów. Podstawy mechaniki kompozytów polimerowych. Materiały Konferencyjne, Szklarska Poręba 1997. Oficyna Wydawnicza PW 1998.
2. Koszul J.: Materiały polimerowe. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej Częstochowa 1999.
3. Ashby Michael F., Jones David R.H.: Materiały inżynierskie właściwości i zastosowanie. WNT, Warszawa 1995.
4. Żuchowska D.: Polimery konstrukcyjne WNT, Warszawa 1995, 2000.
5. Szczerek M., Przepiórka J.: Optymalizacja technologiczna sytemu tribologicznego metal–polimer. Tribologia 2/99.

6. Przepiórka J., Szczerek M.: „The modification of metal-polymer friction pair” 2nd World Tribology Congress, 2001, Vienna.
7. Wieleba W., Capanidis D., Ziemiański K.: Polimerowe łożyska ślizgowe z tworzyw termoplastycznych. Cz. I – Materiały ślizgowe. Poradnik Tribologii i Tribotechniki. Wkładka do dwumiesięcznika Tribologia. 1995, nr 6.
8. Unal H., Mimaroglu A., Arda T.: Friction and wear performance of some thermoplastic polymers and polimer composites againts unsaturated polyester. Applied Surface Science 252 (2006) 8139–8146.
9. Zhang Ming Qiu, Rong Min ZHI, Yu Shu Li, Wetzal Bernd, Friedrich Klaus: Effect of particle treatment on the tribological performance of epoxy based nanocomposites. Wear 253 (2002) 1086–1093.

Praca realizowana w ramach projektu badawczego własnego nr NN 508367435.

Recenzent:
Janusz JANECKI

Summary

The paper presents the results of strength, heat and tribological properties of chemically setting and thermosetting composites with different configurations of qualitative and quantitative compositions. Copper and bronze powders of defined chemical and granulometric composition were used as composite fillers. Iron powder was used as a chemically-setting composite filler. Thermosetting phenol-formaldehyde resin based composites were produced by a heated press using a hydraulic press. The strength and heat properties of the composites were tested according to PN EN ISO standards. The tests were performed on hydraulic strength machine Intsron, Brinell hardness tester, Charpy's impact test stand, and Coesfeld dilatometer. The tribological characteristics of different material junctions were measured in conformed contact by a T-05 black-on-ring tester. A steel roller or roller coated by cross-linking and machined to the desired size of chemically setting metal-polymer composite were cooperating with bronze and thermosetting composite based counter specimen. In predetermined test conditions, the composite – composite conjunction shows less abrasion and a lower friction coefficient than a typical steel – bronze junction.