

Zbigniew PAWELEC*, Marek WOLSZCZAK*

WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE KOMPOZYTÓW METALOPOLIMEROWYCH W WARUNKACH TARCIA TECHNICZNIE SUCHEGO

THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF METAL-POLYMER COMPOSITES IN DRY CONDITIONS

Słowa kluczowe:

kompozyt metalopolimerowy, tarcie suche, zużycie, współczynnik tarcia, smary stałe, tarflen

Key-words:

metal-polymer composite, dry friction, friction coefficient, solid lubricants, tarflen

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań tribologicznych kompozytów metalopolimerowych w skojarzeniu z brązem bez smarowania zewnętrznego. Testom tarciovo-zużyciowym poddano kompozyty z udziałem smarów stałych o budowie warstwowej oraz polimeru termoplastycznego – tarflenu. Charakterystyki tribologiczne kompozytów wyznaczano na

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

maszynie tribologicznej T-05 typu rolka–klocek w warunkach zmiennych nacisków i różnych prędkości poślizgu. Z przeprowadzonych badań tribologicznych wynika, że istotnie gorsze rezultaty uzyskano dla kompozytu metalopolimerowego zawierającego polimer termoplastyczny – tarflen. Najkorzystniejsze charakterystyki tribologiczne w warunkach tarcia technicznie suchego otrzymano dla kompozytu metalopolimerowego zawierającego pakiet dodatków o spójności anizotropowej. Kompozyt ten w skojarzeniu z brązem charakteryzuje się niewielkim współczynnikiem tarcia i wysoką odpornością na zużywanie, w warunkach tarcia technicznie suchego, przy małych prędkościach poślizgu i wysokich naciskach jednostkowych.

WPROWADZENIE

We współczesnym przemyśle maszynowym obserwuje się tendencję do stosowania tworzyw sztucznych jako materiałów ślizgowych. Wysokie wymagania stawiane tym materiałom powodują konieczność stałej modyfikacji tworzyw podstawowych na drodze fizycznej lub chemicznej [L. 1, 2].

Szczególną rolę zaczęły odgrywać kompozyty na osnowie polimerowej, które zaledwie w małym stopniu mają cechy materiałów podstawowych, ale pozwalają otrzymać materiały o nowych właściwościach mechanicznych, tribologicznych i cieplnych, które umożliwiają zaspokojenie stale rosnących wymagań stawianych przed tworzywami konstrukcyjnymi [L. 3, 4, 5, 6].

Interesującym rodzajem materiału konstrukcyjnego są kompozyty proszkowe (metalopolimerowe) na osnowie żywic chemoutwardzalnych, stosowane do regeneracji ślizgowych elementów maszyn. W wielu przypadkach mogą one z powodzeniem zastępować, nieekonomiczne i nieekologiczne, tradycyjne metody regeneracji lub nakładanie powłok galwanicznych. Regeneracja do niedawna traktowana była jako technologia dla ubogich i technicznie zacofanych, obecnie w gospodarce rynkowej stosowanie taniej metody regeneracji części maszyn jest w wielu przypadkach niezbędne. Wymusza to konieczność prac badawczych nad opracowaniem nowych materiałów i skojarzeń materiałowych na osnowie polimerowej oraz technologii regeneracji pozwalającej na przywrócenie pierwotnych funkcji zużytych elementom, o trwałości zbliżonej do oryginalnych rozwiązań.

Autorzy w wyniku wcześniejszych prac badawczych opracowali, opatentowali i wdrożyli w przemyśle metalopolimerowy kompozyt na osnowie epoksydowej do regeneracji ślizgowych węzłów tarcia. Węzeł tarcia, w którym czop stalowy z nałożoną i utwardzoną warstwą kompozytu współpracuje z metalem, dla określonych nacisków i prędkości poślizgu nie ustępuje niemal klasycznej parze czop stalowy–panew ze stopu łożyskowego.

Dotychczasowe badania tribologiczne regeneracyjnych kompozytów metalopolimerowych prowadzono przy smarowaniu smarem plastycznym. W takich warunkach, dla typowych nacisków i prędkości poślizgu dla łożysk ślizgowych, kompozyty metalopolimerowe charakteryzują się niskim współczynnikiem tarcia i wysoką odpornością na zużywanie.

Celem pracy było określenie możliwości wykorzystania metalopolimerowych materiałów kompozytowych do regeneracji węzłów tarcia pracujących w ekstremalnych warunkach, bez zewnętrznych środków smarowych:

- w maszynach i urządzeniach, w których smarowanie konwencjonalne może zabrudzić wyrób, np. w maszynach przemysłu papierniczego, spożywczego, włókienniczego itp.,
- w węzłach maszynowych, w których nie może być stosowane smarowanie konwencjonalne ze względu na jego nieefektywność, np. w otoczeniu niskich lub wysokich temperatur, próżni, w środowisku aktywnym chemicznie,
- w przypadku, gdy obsługa jest niemożliwa, trudna lub nieopłacalna.

PRZEDMIOT I METODY BADAŃ

Przedmiotem badań były regeneracyjne kompozyty metalopolimerowe, w których zastosowano zwiększone udziały wagowe smarów stałych o spójności anizotropowej oraz polimer termoplastyczny – tarflen, charakteryzujący się najmniejszą wartością współczynnika tarcia spośród tworzyw termoplastycznych. Wybór modyfikatorów właściwości tribologicznych kompozytów podyktowany był tym, że mogą one tworzyć na powierzchni tarcia warstwy wierzchnie charakteryzujące się małymi oporami ruchu i dużą odpornością na zużywanie. W pracach badawczych bazę materiałową stanowił kompozyt handlowy opracowany w ITeE – PIB i charakteryzujący się dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi, a także tribologicznymi, we współpracy ze stopem łożyskowym i przy smarowaniu smarem plastycznym.

Ze względu na konieczność utrzymywania na odpowiednim poziomie właściwości mechanicznych i cieplnych kompozytów przyjęto, że zawartość napełniacza metalicznego (proszku żelaza NC 100.24 firmy Hoegenes) w stosunku do osnowy kompozytu (żywicy epoksydowej Epidian 5) powinna wynosić 200 do 300 części wagowych, napełniacza włóknistego (organicznych włókien poliamidowych w postaci pulpy o nazwie handlowej kevlar 1F651 produkcji Du Pont) 2 części wagowe. Jako dodatki ślizgowe zastosowano grafit płytkowy M15-99 o rozmiarze ziarna $< 10 \mu\text{m}$, dwusiarczek molibdenu o średnim rozmiarze ziarna 3–5 μm oraz polimer termoplastyczny Tarflen SMG-1 produkcji Z.A. w Tarnowie). Do celów porównawczych badania tribologiczne w warunkach tarcia technicznie suchego przeprowadzono również dla kompozytu handlowego. Materiały kompozytowe przygotowano wg składów podanych w **Tabeli 1**.

Tabela 1. Składy opracowanych kompozytów metalopolimerowych

Table 1. The composition of metal-polymer composites

Symbol próbki	Zawartość komponentów [cz. wag.]					
	Epidian 5	Proszek Fe	Grafit	MoS ₂	Tarflen	Twaron
GM-20	100	200	20	20	0	2
PTFE-10	100	300	0	0	10	2
Kompozyt handlowy	100	300	10	0	0	2

Do sieciowania kompozytów zastosowano poliaminę alifatyczną – trietylenotetraaminę. Proces sieciowania prowadzono w temperaturze pokojowej. Charakterystyki tribologiczne kompozytów wyznaczono na testerze tribologicznym T-05 typu rolka–klocek, 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:

Materiały:

- próbka – różne rodzaje kompozytów,
- przeciwpróbka – brąz łożyskowy.

Środek smarowy:

- tarcie technicznie suche.

Parametry pracy:

- ruch ciągły ślizgowy,

- prędkość stała w czasie trwania testu 0,1 m/s, 0,2 m/s, 0,3 m/s,
- nacisk stały w czasie trwania testu od 1,5 do 9 MPa,
- droga tarcia 2400 m,
- styk rozłożony.

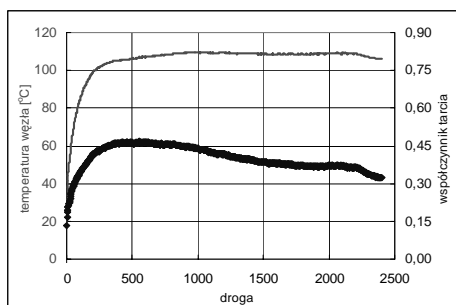
Pomiary:

- siły tarcia w czasie trwania testu,
- temperatury klocka w czasie trwania testu,
- zużycia wagowego jako różnicy w pomiarach masy próbki przed i po badaniu.

OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

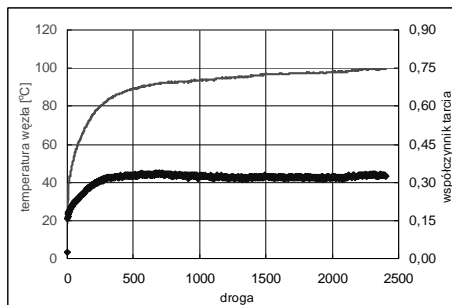
Wstępne testy tribologiczne badanych materiałów kompozytowych w skojarzeniu z brązem bez smarowania zewnętrznego przeprowadzono przy prędkości 0,3 m/s i różnych naciskach jednostkowych 1,5 MPa, 1,8 MPa, 2,1 MPa i 2,4 MPa.

Przykładowe charakterystyki tribologiczne zaprezentowano na poniższych wykresach (**Rys. 1–3**). Przedstawiają one przebieg zmian współczynnika tarcia oraz temperatury węzła w funkcji drogi tarcia. Pokazano również w sposób graficzny zależność współczynnika tarcia i temperatury węzła od nacisków jednostkowych (**Rys. 4, 5**).



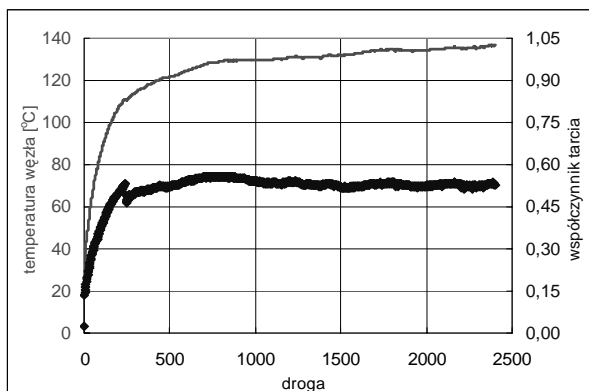
Rys. 1. Przebieg zmian temperatury węzła tarcia i współczynnika tarcia dla skojarzenia kompozyt handlowy – brąz ($p = 1,8$ MPa, $v = 0,3$ m/s)

Fig. 1. The temperature and friction coefficient for commercial composite-bronze friction pair ($p = 1.8$ MPa, $v = 0.3$ m/s)



Rys. 2. Przebieg zmian temperatury węzła tarcia i współczynnika tarcia dla skojarzenia kompozyt GM-20 – brąz ($p = 1,8$ MPa, $v = 0,3$ m/s)

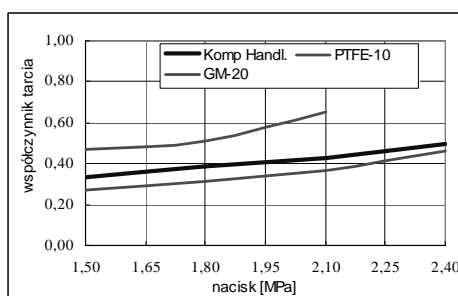
Fig. 2. The temperature and friction coefficient for GM-20 composite-bronze friction pair ($p = 1.8$ MPa, $v = 0.3$ m/s)



Rys. 3. Przebieg zmian temperatury węzła tarcia i współczynnika tarcia dla skojarzenia kompozyt PTFE-10 – brąz ($p = 1,8 \text{ MPa}$, $v = 0,3 \text{ m/s}$)

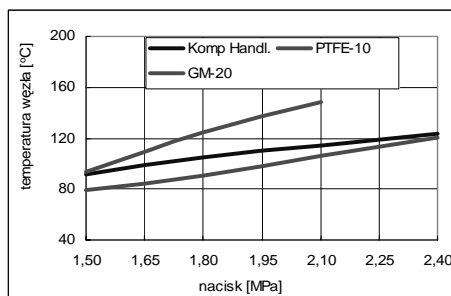
Fig. 3. The temperature and friction coefficient for PTFE-10 composite-bronze friction pair ($p = 1.8 \text{ MPa}$, $v = 0.3 \text{ m/s}$)

Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że współczynnik tarcia, temperatura węzła i zużycie zależą w istotny sposób od rodzaju materiału kompozytowego. Porównując otrzymane przebiegi zmian współczynnika tarcia i temperatury węzła można zauważyć pozytywny wpływ smarów stałych (kompozyt GM-20) na stabilność rejestrowanych parametrów (**Rys. 2**).



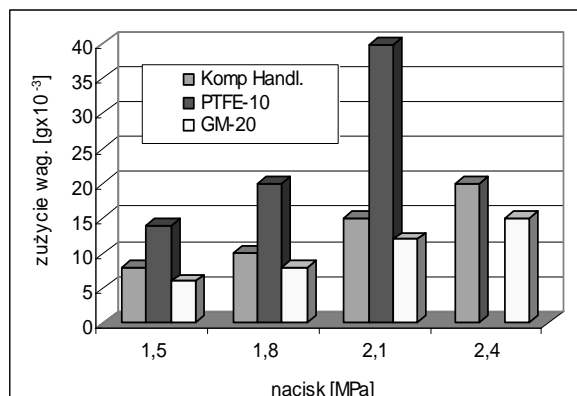
**Rys. 4. Zależność współczynnika tarcia od nacisków jednostkowych dla badanych skojarzeń tarcio-
wych ($v = 0,3 \text{ m/s}$)**

Fig. 4. The dependence of friction coefficient on unit pressure for investigated materials ($v = 0.3 \text{ m/s}$)



**Rys. 5. Zależność temperatury węzła od nacisków jednostkowych dla badanych skojarzeń tarcio-
wych ($v = 0,3 \text{ m/s}$)**

Fig. 5. The dependence of temperature on unit pressure for investigated materials ($v = 0.3 \text{ m/s}$)



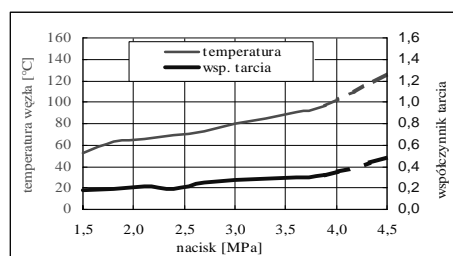
Rys. 6. Zużycie badanych skojarzeń tarcowych dla zmiennych nacisków jednostkowych

Fig. 6. The wear of the investigated friction pairs for various unit pressures

Spośród badanych materiałów kompozytowych skojarzenie kompozyt GM-20 – brąz posiada najmniejsze opory ruchu, a także najniższą temperaturę węzła tarcia (**Rys. 4, 5**). Dla nacisków 1,5 MPa współczynnik tarcia tego skojarzenia wynosi 0,27 w przypadku kompozytu handlowego 0,33, a dla kompozytu z udziałem policzterofluoroetyleny 0,47. Podobne proporcje współczynnika tarcia uzyskiwano dla wyższych nacisków jednostkowych. Wbrew oczekiwaniom najmniej korzystne charakterystyki uzyskano dla kompozytu z udziałem polimeru termoplastycznego tarflenu. Współczynnik tarcia tego kompozytu jest bardzo wysoki i zmienia się w granicach od 0,47 do 0,65. Dla tego skojarzenia rejestrujemy również najwyższą temperaturę węzła tarcia, która dla nacisków 2,1 MPa przekracza 150°C i jest o kilkadziesiąt stopni wyższa niż dla kompozytu handlowego i kompozytu z udziałem 20 części wagowych smarów stałych (**Rys. 5**). Przy naciskach 2,4 MPa notowano nadmierny wzrost oporów ruchu, temperatury węzła i lawinowe zużycie uniemożliwiające przeprowadzenie testu w całym zakresie drogi tarcia. Wzrost temperatury węzła tarcia, duży współczynnik tarcia spowodowały, że kompozyt ten miał największe zużycie (**Rys. 6**). Wysoka wartość współczynnika tarcia, temperatury i zużycia dla skojarzenia kompozyt PTFE 10 – brąz wynika prawdopodobnie z małej przewodności cieplnej tego dodatku ślizgowego, niejednorodności struktury kompozytu, tendencji dodatku do aglomeracji i braku możliwości wytworzenia na powierzchni kompozytu niskotarciowej warstewki tarflenu.

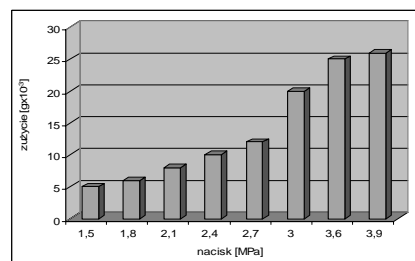
Na podstawie wstępnych wyników badań tarciovo-zużyciowych można stwierdzić, że najlepszymi charakterystykami tribologicznymi, największą odpornością na proces zużywania charakteryzuje się kompozyt z udziałem 20 części wagowych smarów stałych o spójności anizotropowej, które wykazują synergiczne oddziaływanie w warunkach tarcia. Fakt najmniejszej podatności na zużycie kompozytu oznaczonego symbolem GM-20 w porównaniu z innymi materiałami kompozytowymi, niezależnie od parametrów procesu tarcia wskazuje, że w tym przypadku musi istnieć najdogodniejszy proces tarcia i zużywania. Kompozyt ten poddano dalszym badaniom tribologicznym w warunkach niższych prędkości poślizgu i zwiększonych nacisków jednostkowych, próby wyznaczenia charakterystyk tribologicznych kompozytu dla prędkości poślizgu powyżej 0,3 m/s i założonych naciskach nie dały pozytywnych rezultatów, obserwowano nadmierny wzrost temperatury badanego skojarzenia i lawinowe zużycie materiału kompozytowego.

Na **Rysunku 7** przedstawiono zależność zmian współczynnika tarcia i temperatury węzła tarcia od nacisków jednostkowych przy prędkości 0,2 m/s. Na podstawie tej zależności można stwierdzić, że ich wpływ na wielkość współczynnika tarcia do wartości nacisków jednostkowych 3 MPa jest minimalny. Pomimo braku smarowania zewnętrznego współczynnik tarcia tego skojarzenia jest jednak niewielki i oscyluje wokół wartości 0,2. Zdecydowanie większe przyrosty współczynnika tarcia i temperatury węzła, jak również zużycia rolki z warstwą kompozytową (**Rys. 8**) obserwujemy dla nacisków jednostkowych 3 MPa i powyżej tej



Rys. 7. Zależność współczynnika tarcia i temperatury od nacisków jednostkowych skojarzenia kompozyt GM-20 – brąz ($v = 0,2$ m/s)

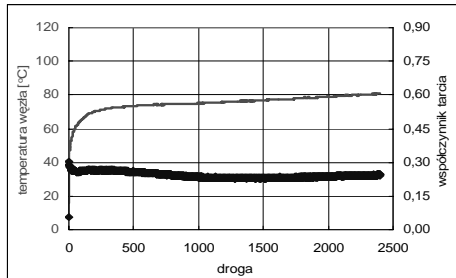
Fig. 7. The dependence of friction coefficient and temperature versus unit pressure for GM-20 composite-bronze friction pair ($v = 0.2$ m/s)



Rys. 8. Zależność zużycia rolki z warstwą kompozytu GM-20 od nacisków jednostkowych ($v = 0,2$ m/s)

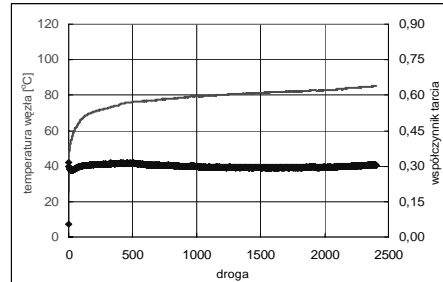
Fig. 8. The dependence wear versus unit pressure for GM-20 composite-bronze friction pair ($v = 0.2$ m/s)

wartości. Przedstawione na **Rysunkach 9 i 10** przykładowe przebiegi zmian temperatury węzła tarcia i współczynnika tarcia w skojarzeniu kompozytu GM – 20 z brązem wykazują monotoniczny przebieg rejestrowanych parametrów w całym zakresie drogi tarcia. Jest to cecha szczególnie istotna, bo o jakości współpracy kojarzonych elementów węzła tarcia decydują nie tylko wartości liczbowe badanych parametrów tribologicznych, ale również ich niezmiennosc w czasie.



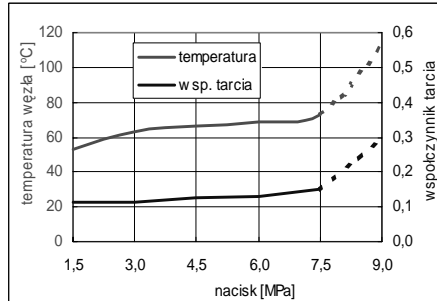
Rys. 9. Przebieg zmian temperatury węzła tarcia i współczynnika tarcia dla skojarzenia kompozyt metalopolimerowy GM-20 – brąz ($v = 0,2$ m/s, $p = 2,7$ MPa)

Fig. 9. The temperature and friction coefficient for GM-20 composite-bronze pair ($v = 0,2$ m/s, $p = 2,7$ MPa)



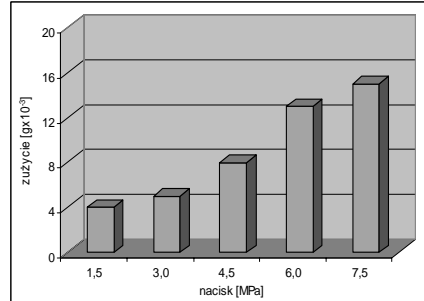
Rys. 10. Przebieg zmian temperatury węzła tarcia i współczynnika tarcia dla skojarzenia kompozyt metalopolimerowy GM-20 – brąz ($v = 0,2$ m/s, $p = 3$ MPa)

Fig. 10. The temperature and friction coefficient for GM-20 composite-bronze pair ($v = 0,2$ m/s, $p = 3$ MPa)



Rys. 11. Zależność współczynnika tarcia i temperatury od nacisków jednostkowych skojarzenia kompozyt GM-20 – brąz ($v = 0,1$ m/s)

Fig. 11. The dependence of friction coefficient and temperature versus unit pressure for GM-20 composite-bronze pair ($v = 0.1$ m/s)

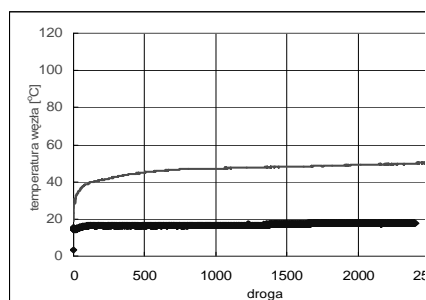


Rys. 12. Zależność zużycia rolki z warstwą kompozytu GM-20 od nacisków jednostkowych ($v = 0,1$ m/s)

Fig. 12. The dependence wear versus unit pressure for GM-20 composite-bronze pair ($v = 0.1$ m/s)

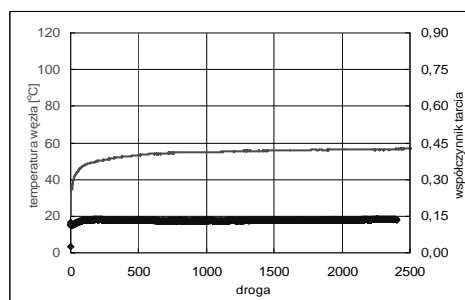
W następnym etapie badań tribologicznych wyznaczono charakterystyki tarciovo-zużyciowe opracowanego materiału kompozytowego dla prędkości 0,1 m/s i zmiennych nacisków jednostkowych 1,5 MPa, 3 MPa, 4,5 MPa, 6 MPa, 7,5 MPa i 9 MPa.

Rysunek 11 przedstawia zmiany współczynnika tarcia i temperatury węzła skojarzenia kompozyt GM-20 – brąz w zależności od nacisków jednostkowych. Wskazują one, że dla małych prędkości poślizgu wpływ nacisków jednostkowych zarówno na współczynnik tarcia, jak i na temperaturę węzła tarcia jest nieznaczny. Pięciokrotne zwiększenie nacisków jednostkowych z 1,5 do 7,5 MPa powoduje minimalne zmiany współczynnika tarcia od 0,11 do 0,15, a temperatura węzła wzrasta tylko o około 20°C od wartości 50°C do około 70°C. Porównując wielkość zużycia wagowego kompozytu (**Rys. 12**), można zauważyć, że pomimo trzykrotnego wzrostu nacisków do wartości 4,5 MPa jego przyrosty są niewielkie.



Rys. 13. Przebieg zmian temperatury węzła tarcia i współczynnika tarcia dla skojarzenia kompozyt metalopolimerowy GM-20 – brąz ($v = 0,1$ m/s, $p = 4,5$ MPa)

Fig. 13. The temperature and friction coefficient for GM-20 composite-bronze friction pair ($v = 0,1$ m/s, $p = 2,7$ MPa)



Rys. 14. Przebieg zmian temperatury węzła tarcia i współczynnika tarcia dla skojarzenia kompozyt metalopolimerowy GM-20 – brąz ($v = 0,1$ m/s, $p = 6$ MPa)

Fig. 14. The temperature and friction coefficient for GM-20 composite-bronze friction pair ($v = 0,1$ m/s, $p = 2,7$ MPa)

Prezentowane na **Rysunkach 13 i 14** przebiegi rejestrowanych parametrów wykazują monotoniczny przebieg w całym zakresie drogi tarcia, świadczy to o ustabilizowanej współpracy tarciowej skojarzonych w modelowym węzle tarcia materiałów i ograniczonym oddziaływaniu wymu-

szeń związanych ze wzrostem nacisków jednostkowych oraz brakiem smarowania zewnętrznego, na charakterystyki tribologiczne skojarzenia kompozyt metalopolimerowy GM-20 – brąz.

PODSUMOWANIE

Eksperyment tribologiczny w warunkach tarcia suchego kompozytów z udziałem smarów stałych o budowie warstwowej i kompozytu zawierającego polimer termoplastyczny tarflen (PTFE) wykazał, że kompozyt oznaczony symbolem GM-20 zawierający 20 części wagowych smarów stałych o budowie warstwowej (grafitu i dwusiarczku molibdenu) charakteryzuje się największą odpornością na zużywanie i najmniejszą wartością współczynnika tarcia. Zwiększona zawartość smarów stałych w tym kompozycie kosztem udziału wagowego proszkowego napelnacza metalicznego dała pozytywne efekty w postaci zadowalających wyników badań tarciovych prowadzonych w ekstremalnych warunkach przy wysokich naciskach jednostkowych i bez smarowania zewnętrznego. W warunkach małych prędkości poślizgu, poniżej 0,3 m/s, współczynnik tarcia skojarzenia kompozyt metalopolimerowy – brąz w niewielkim stopniu zależy od nacisków jednostkowych.

Kompozyt ten może spełniać funkcję warstw regeneracyjnych zużytych elementów węzłów tribologicznych pracujących bez smarowania dla prędkości nie większych niż 0,3 m/s i stosunkowo wysokich naciskach jednostkowych 7,5 MPa.

LITERATURA

1. 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.
2. Capanidis D., Wieleba W., Ziemiański K.: Polimerowe łożyska ślizgowe z tworzyw termoplastycznych. *Poradnik Tribologii i Tribotechniki*. Tribologia, 1995, 6.
3. Zieliński J.: Blendy i kompozyty polimerowe. *Polimery* 2002, 5, 305–309.
4. Hak Gu Lee, Seong Su Kim, Dai Gi Lee.: Effect of compacted wear debirs on the tribological behavior of carbon/epoxy composites. *Composites Structures* 2006, 74, 136–144.
5. Ashby M.F., Jones H.D.R.: *Materiały inżynierskie właściwości i zastosowanie*. WNT, Warszawa 1995.

6. Lawrowski Z.: Bezobsługowe łożyska ślizgowe. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.

Recenzent:
Jan SENATORSKI

Summary

In the paper, the results of tribological tests of metal-polymer composites and bronze pair without external lubrication were presented. The friction and wear tests were performed using the composites with solid lubricant additives (with lamellar structure) and with thermoplastic polymer – tarflen. The tribological characteristics of the composites were measured using T-05 black-on-ring tester under various loads and sliding velocities. The performed results show that the significantly worse characteristics were obtained for metal-polymer composite containing thermoplastic polymer – tarflen. The best characteristics were obtained for metal-polymer composite containing the package of additives with anisotropic coherence. The friction pair consisting of this composite and bronze shows a low friction coefficient and high resistance to wear in dry friction conditions, under low sliding velocities, and high pressures.