

Jolanta DRABIK*, **Janusz Tytus JANECKI***, **Zbigniew PAWELEC***,
Marek WOLSZCZAK*

SMAR PLASTYCZNY W METALOPOLIMEROWYM KOMPOZYCIE TERMOUTWARDZALNYM

THE GREASE CONTENT IN COMPOSITE THERMOSETTING METAL-POLYMER

Słowa kluczowe:

termoutwardzalny kompozyt metalopolimerowy, smar plastyczny, zużycie masowe, tarcie

Key words:

thermosetting metal-polymer composite, grease, wear, friction

Streszczenie

W pracy opisano eksperyment dotyczący modyfikacji właściwości tribologicznych kompozytu metalopolimerowego uzyskanego na bazie tłoczywa fenolowo-formaldehydowego poprzez wprowadzenie do jego składu wysokotemperatu-

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

rowego smaru plastycznego. Rozwiązanie problemu smarowania skojarzenia ślizgowego układu stal–kompozyt polegało na ustaleniu ilościowego stosunku ekologicznego smaru plastycznego do niskotarciowego kompozytu dla uzyskania jak najlepszych charakterystyk tarciowo-zużyciowych. Badania wykonano w warunkach odwzorowujących pracę rzeczywistego ślizgowego węzła tarcia, bez smarowania zewnętrznego, w warunkach smarowania technicznie suchego. Testy tribologiczne realizowano w zmiennych warunkach prędkości ślizgania i nacisku jednostkowego. W rezultacie przeprowadzonych badań i analiz ustalono zależność odporności na zużycie od składu kompozytu metalopolimerowego. Stwierdzono, że zawartość smaru plastycznego w kompozycie korzystnie wpływa na warunki współpracy skojarzenia kompozyt–stal, następuje obniżenie współczynnika tarcia i temperatury węzła tarcia oraz wzrasta odporność na zużycie modyfikowanego kompozytu.

WPROWADZENIE

Eksperymenty zmierzające do modyfikacji kompozytów przeznaczonych na niskotarciowe elementy składowe łożysk ślizgowych, pracujących w warunkach jednokrotnego smarowania, wykazały między innymi możliwość znacznego przekształcenia termoutwardzalnego tłoczywa na bazie żywicy fenolowo-formaldehidowej (FFA) w kompozyt quasi-niskotarciowy poprzez wprowadzenie polimeru chemoutwardzalnego w fazę rezitolu/rezitu, powstającą wskutek prasowania pod ciśnieniem, na gorąco [L. 1]. Modyfikacja ta spowodowała przekształcenie tłoczywa, które używane jest przede wszystkim do produkcji tworzyw wysoko ciernych, hamulcowych i sprzęgłowych, charakteryzujących się wysoką wartością współczynnika tarcia, w kompozyt o dobrych własnościach ślizgowych. Dowiodły tego eksperymenty opisane w publikacjach dotyczących badań nad wytwarzaniem kompozytów niskotarciowych [L. 2–6]. Kompozyt z wtrąceniami smarów stałych wykazuje lepsze właściwości tribologiczne od bazowych kompozytów, co przedstawiono w pracach dotyczących modyfikacji właściwości tribologicznych kompozytów polimerowych [L. 6–12].

W nowoczesnych maszynach, w wyniku wdrażania coraz doskonalszych technologii, tak kształtuje się trwałość poszczególnych elementów maszyn, by dokonywać remontu metodą wymiany zespołów. Metoda ta stosowana jest szczególnie w maszynach skomplikowanych, wielofunkcyjnych, których niezawodność użytkowa powinna być wysoka, gdyż uszkodzenie może doprowadzić do dużych strat ekonomicznych wynikających z nieplanowanego przestoju. Oprócz wymiany elementów pojedynczych par trących stosowane są również technologie naprawy wykorzystujące regeneracyjne materiały kompozytowe. Szczególnie poszukuje się takich materiałów wielkocząsteczkowych, które pozwalają unikać obróbki skrawaniem oraz klasycznych obróbek cieplnych, chemicznych lub cieplno-chemicznych. Nadal w tego typu zastosowaniach zainte-

resowanie wzbudzają kompozyty polimerowe, stąd ciągle poszukuje się materiałów konstrukcyjnych i regeneracyjnych wytworzonych na bazie modyfikowanych polimerów, które w ostatecznym efekcie – poza łatwą i taną produkcją z nich trących części zamiennych (panwie, tuleje, koszulki włączane na czopy wałów, prowadnice płaskie i inne) zapewniają uzyskanie odpowiedniej trwałości [L. 1–6, 11–12]. Stosowanie takich materiałów jest szczególnie wskazane w maszynach rolniczych, przetwórstwa żywności, ale także w urządzeniach i maszynach przemysłu wydobywczego.

Od kilku lat następuje intensywny rozwój kompozytów na osnowie polimerowej znajdujących zastosowanie w regeneracji części maszyn, nawet w mocno wysiłonych elementach trących, szczególnie łożyskach poprzecznych. Istotne są tu nie tylko korzystne wartości parametrów tribologicznych skojarzeń kompozyt–metal (stal), ale nie bez znaczenia są również koszty regeneracji, które są znacznie niższe niż koszty regeneracji elementów metalowych tradycyjnymi metodami. Pożądane jest więc także zastosowanie polimerowych materiałów kompozytowych do wytwarzania elementów trących par tribologicznych.

W Instytucie Technologii Eksploatacji – PIB opracowano szereg kompozytów na bazie tworzyw wielkocząsteczkowych, w tym chemoutwardzalne kompozyty regeneracyjne, które z powodzeniem wdrożono w wielu zakładach przemysłowych, co przyczyniło się do uzyskania wymiernych efektów użytkowych w regeneracji części maszyn [L. 1, 3–6]. Ponadto na bazie termoutwardzalnej żywicy fenolowo-formaldehdowej opracowano kompozyt metalopolimerowy przeznaczony na wysokoobciążone elementy skojarzeń ślizgowych pracujące w obecności środka smarowego. W celu wyeliminowania smarowania zewnętrznego układu kompozyt–stal do modyfikacji kompozytu wykorzystano wysokotemperaturowy smar plastyczny, opracowany i wytworzony w ramach realizowanego projektu badawczego [L. 13, 16]. Dotychczas prace badawcze dotyczyły opracowania specjalistycznych smarów plastycznych do stosowania przede wszystkim w przemyśle spożywczym, ze względu na ich właściwości użytkowe i ekologiczne potwierdzone odpowiednimi badaniami i certyfikatami [L. 14, 15]. Realizacja programu badawczego [L. 16] przyczyniła się do poszerzenia możliwości stosowania opracowanych smarów plastycznych również do modyfikacji materiału kompozytowego przeznaczonego na elementy ślizgowe maszyn. Problematyka kompatybilności ekologicznych środków smarowych z kompozytami metalopolimerowymi jest obecnie intensywnie rozwijana, do którego również przyczynił się zrealizowany projekt badawczy [L. 16].

Celem pracy było zbadanie odporności na zużycie zmodyfikowanego smarem plastycznym kompozytu metalopolimerowego oraz możliwość jego zastosowania jako materiał konstrukcyjny czopa, w skojarzeniu ślizgowym czop–panew pracującego w warunkach tarcia technicznie suchego.

PRZEDMIOT I METODYKA BADAŃ

Przedmiotem badań były kompozyty opracowane na bazie tłoczywa o symbolu FSZG-2 stanowiącego mieszaninę żywicy fenolowo-formaldehydowej typu nowolakowego i mączki mineralne. Do sproszkowanego tłoczywa dodawano napelniacz metaliczny–proszek żelaza Fe typu NC 100.24 firmy Höganäs (próbka FN) oraz smar plastyczny opracowany na bazie oleju silikonowego [L. 13, 16]. Do komponowania smaru zastosowano olej FS 1265 firmy DOW CORNING® oraz zagęszczacz nieorganiczny, krzemionkę płomieniową firmy Degussa o budowie warstwowej wykazującą wysoką odporność termiczną. Uzyskany smar plastyczny charakteryzuje się stabilnością oksydacyjną oraz korzystnymi właściwościami smarnymi oznaczonymi w warunkach tarcia granicznego i w warunkach zacierania [L. 16].

W celu uzyskania materiału kompozytowego, po dokładnym wymieszanu składników, przeprowadzono proces prasowania z użyciem prasy hydraulicznej PHM-100 zgodnie z opracowaną procedurą, w temperaturze 160°C, pod ciśnieniem 10 MPa [L. 16]. Z otrzymanych wyprasek wycinano próbki do badań tribologicznych. Próbkę stanowił klocek z materiału kompozytowego przygotowany na bazie tłoczywa z dodatkiem żelaza (FN) oraz zawierający 1% m/m (FN 1S), 3% m/m (FN 3S) i 5% m/m (FN 5S) smaru plastycznego. Przeciwpróbkę w testowym węźle tarcia stanowiła rolka wykonana ze stali łożyskowej 100Cr6.

Badania tribologiczne prowadzono na testerze T-05 [L. 17] w skojarzeniu trącym rolka–klocek odwzorowującym układ rzeczywisty czop–panew, w następujących warunkach:

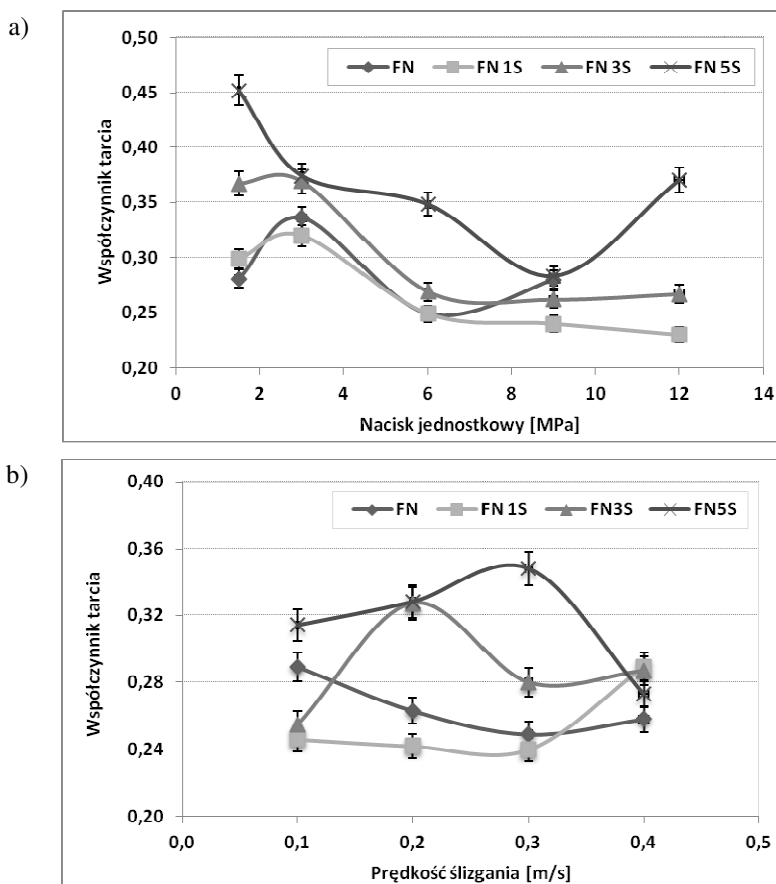
- tarcie technicznie suche węzła tarcia,
- prędkość ślizgania: w zakresie od 0,1 m/s do 0,4 m/s,
- nacisk jednostkowy: w zakresie od 1,5 MPa do 12 MPa.

W trakcie testu rejestrowano temperaturę próbki oraz siłę tarcia, a po zakończeniu testu mierzono zużycie masowe oraz obliczano współczynnik tarcia. Jako wynik oznaczeń przyjmowano średnią arytmetyczną z co najmniej trzech pomiarów. Rozrzut wyników badań wokół średniej arytmetycznej szacowano za pomocą odchylenia standardowego.

Warunki prowadzenia testów tribologicznych dobrano w taki sposób, żeby sprawdzić zachowanie kompozytu w różnych warunkach pracy styku łożyska ślizgowego, co miało na celu wyznaczenie granicznego obszaru stosowalności kompozytu metalopolimerowego oraz zmodyfikowanego dodatkiem smaru plastycznego.

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

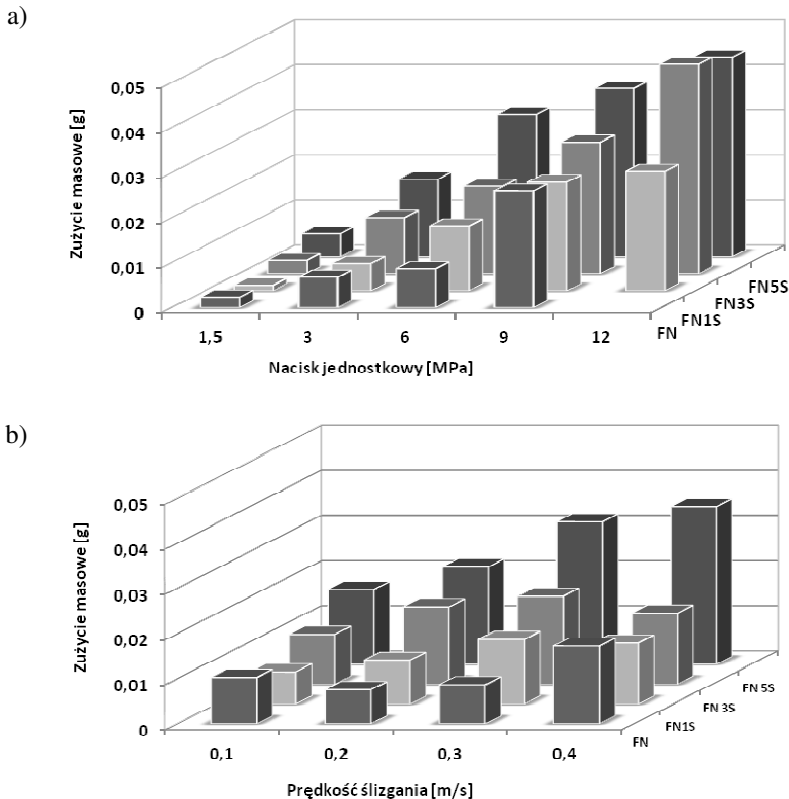
Na podstawie uzyskanych charakterystyk tarciovo-zużyciowych w funkcji drogi tarcia zbadano wpływ nacisku jednostkowego i prędkości ślizgania na odporność na zużycie skojarzenia materiałowego pary trącej kompozyt–stal. Uzyskane wyniki testów umożliwiły ocenę wpływu zastosowanej ilości smaru na charakterystyki tribologiczne skojarzenia pary trącej realizowane w zmiennych warunkach, bez smarowania zewnętrznego. Po zakończeniu eksperymentów dla badanych kompozytów metalopolimerowych bez i z dodatkiem smaru plastycznego wyznaczono współczynnik tarcia (**Rys. 1**), zużycie masowe (**Rys. 2**) oraz temperaturę w węźle tarcia (**Rys. 3**).



Rys. 1. Wpływ a) nacisku jednostkowego przy stałej prędkości 0,3 m/s oraz b) prędkości ślizgania przy stałym nacisku jednostkowym 6 MPa na wartość współczynnik tarcia skojarzenia trącego kompozyt–stal

Fig. 1. The effect of a) pressure at constant velocity 0,3 m/s and b) velocity at constant pressure 6 MPa on the coefficient of sample in the friction tests

Analizując wpływ nacisków jednostkowych na współczynnik tarcia możemy zaobserwować, że wraz ze wzrostem obciążenia węzła tarcia (powyżej 3 MPa) maleje współczynnik tarcia, co jest zjawiskiem często obserwowanym w polimerowych węzłach tarcia. Czterokrotny wzrost nacisków jednostkowych z 3 do 12 MPa powoduje redukcję oporów ruchu o ok. 30%. Najniższym współczynnikiem tarcia w zakresie wartości nacisków jednostkowych charakteryzuje się skojarzenie, w którym klocek wykonany był z kompozytu FN 1S zawierającego 1% wagowych smaru plastycznego. Zawartość 5% m/m smaru plastycznego w kompozycie spowodowała istotne zwiększenie współczynnika tarcia z jednoczesnym zwiększeniem temperatury w węźle (**Rys. 3a**), co jednak nie miało wpływu na intensywny wzrost zużycia masowego materiału kompozytowego FN 5S (**Rys. 2a**).



Rys. 2. Wpływ a) zmiennego nacisku jednostkowego przy stałej prędkości 0,3 m/s oraz b) zmiennej prędkości ślizgania przy stałym nacisku jednostkowym 6 MPa na zużycie próbki w testach tribologicznych

Fig. 2. The effect a) of the pressure on the wear of sample in the friction tests at constant velocity 0,3 m/s and b) of the velocity on the wear of sample in the friction tests at constant pressure 6MPa

Analizując wpływ prędkości ślizgania na współczynnik tarcia stwierdzono mniejsze zróżnicowanie we współczynniku tarcia badanych kompozytów przy najwyższej prędkości i stałym nacisku jednostkowym (6 MPa). Zaobserwowano, że w warunkach testu kompozyt FN 1S wykazuje stabilizację współczynnika tarcia (**Rys. 1b**) przy niskich prędkościach ślizgania, w zakresie 0,1–0,3 m/s, średni współczynnik tarcia kształtuje się na jednakowym poziomie, wykazując niewielki wzrost dopiero przy prędkości 0,4 m/s.

Kompozyty zawierające zarówno 3, jak i 5% m/m dodatku smaru plastycznego w zakresie badanych prędkości wykazują przy niższych prędkościach ślizgania większe zróżnicowanie w wartościach współczynnika tarcia, co może świadczyć o wolniejszym docieraniu współpracujących elementów skojarzenia kompozyt–stal. Dopiero przy najwyższej zadanej prędkości ślizgania 0,4 m/s dla kompozytu FN 5S zawierającego 5% m/m smaru plastycznego zaobserwowano zdecydowany spadek współczynnika tarcia (**Rys. 1b**), co skutkuje również obniżeniem temperatury węzła tarcia (**Rys. 3b**).

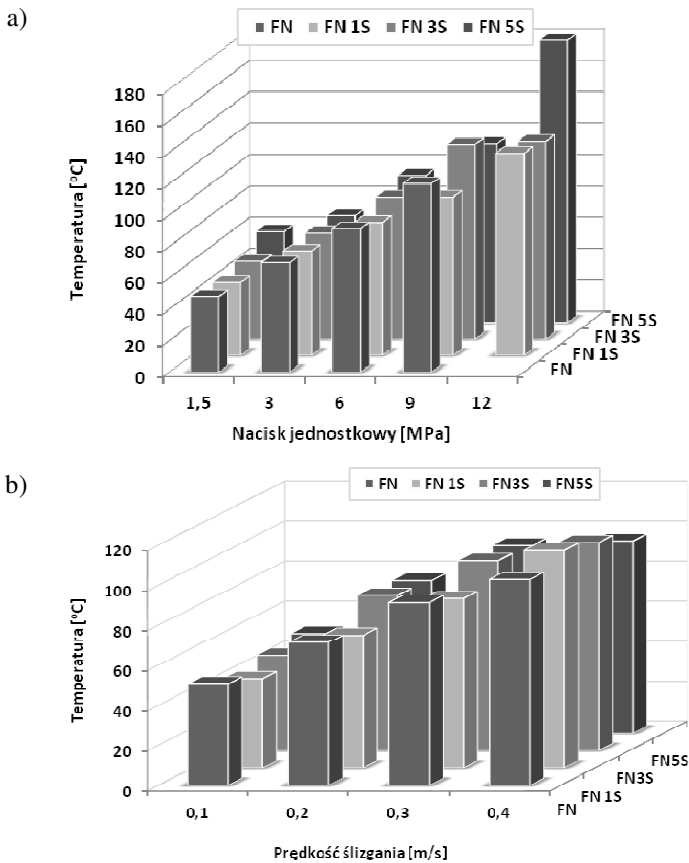
Na podstawie uzyskanych rezultatów stwierdzono, że zarówno prędkość ślizgania jak i obciążenie węzła tarcia w przypadku badanych skojarzeń kompozyt–stal wpływa na zmiany współczynnika tarcia, przy czym większy wpływ na te zmiany ma obciążenie węzła tarcia niż prędkość ślizgania. Nie stwierdzono zależności liniowej między ocenianymi wielkościami.

Następnie przeanalizowano wpływ dodatku smaru plastycznego w kompozycie na jego zużycie masowe wyznaczone po zakończeniu testów. Poniżej, na wykresach, przedstawiono wyniki zużycia masowego kompozytów poddanych testom tribologicznym, które realizowano przy zmiennym nacisku jednostkowym w zakresie 1,5–12 MPa i stałej prędkości 0,3 m/s (**Rys. 2a**) oraz przy zmiennej prędkości w zakresie 0,1–0,4 m/s i stałym nacisku 6 MPa (**Rys. 2b**).

Zaobserwowano, że zużycie wagowe badanych kompozytów zawierających dodatek smaru plastycznego wzrasta wraz ze wzrostem nacisku jednostkowego w sposób proporcjonalny (**Rys. 2a**). W przypadku kompozytu bez dodatku smaru FN zauważalny jest znaczny wzrost zużycia już przy nacisku 9 MPa w porównaniu z poprzednimi naciskami realizowanymi w testach. Dla tego kompozytu przy nacisku 12 MPa temperatura wzrosła powyżej 180°C, nastąpił gwałtowny wzrost temperatury oraz siły tarcia i bieg został przerwany. Stwierdzono, że praca w warunkach tarcia technicznie suchego kompozytu FN nie jest możliwa po przekroczeniu poziomu nacisku 9 MPa i prędkości 0,3 m/s. Natomiast smar plastyczny zawarty w kompozycie korzystnie wpłynął na współpracę skojarzenia pary trącej (kompozyt–stal) testowanej w ekstremalnych warunkach, bez smarowania zewnętrznego w całym zakresie prowadzonych eksperymentów.

Analizując wpływ prędkości poślizgu na odporność na zużycie ocenianych kompozytów metalopolimerowych zaobserwowano nieznaczne zużycie masowe badanych próbek, co ze względów aplikacyjnych jest korzystne (**Rys. 2b**). Ponadto rejestrowana temperatura w węzle tarcia nie przekracza 100°C, co również przyczynia się do niewielkiego zużycia masowego badanych próbek (**Rys. 3b**). Stwierdzono, że warunki współpracy elementów skojarzenia kompo-

zyt–stal wywierają duży wpływ na zużycie masowe próbki wykonanej z materiału kompozytowego. Ze względu na silną zależność właściwości fizycznych polimerów od temperatury i czasu działania wymuszeń mechanicznych w przypadku prowadzonych eksperymentów obserwowany jest jednoczesny wzrost temperatury w węzle tarcia (**Rys. 3**) przy wzroście zużycia masowego (**Rys. 2**) badanych kompozytów metalopolimerowych. Temperatura w węzle tarcia zmienia się w zależności od warunków tarcia i zależy od rodzaju badanego kompozytu (**Rys. 3**). Najmniejsze wartości temperatury uzyskano w całym zakresie wartości nacisku dla kompozytu metalopolimerowego zawierającego zarówno 1%, jak i 3% smaru plastycznego. Świadczy to o tym, że podczas tarcia skojarzenia kompozyt–stal wydzielany smar plastyczny zmienia warunki tarcia, łagodząc wzrost temperatury generowanej podczas współpracy.



Rys. 3. Wpływ a) nacisku jednostkowego przy stałej prędkości 0,3 m/s oraz b) prędkości ślizgania przy stałym nacisku jednostkowym 6 MPa na wartość temperatury skojarzenia trącego kompozyt–stal

Fig. 3. The effect of a) pressure at constant velocity 0,3 m/s and b) velocity at constant pressure 6 MPa on the temperature of sample in the friction tests

Badania tribologiczne przeprowadzone w zmiennych warunkach wykazały, że dodatek smaru plastycznego do kompozytu metalopolimerowego wpłynął na ustabilizowanie pracy pary tarczej w całym zakresie prowadzonych badań zarówno temperatura, jak i siła tarcia kształtowała się na niższym poziomie niż dla kompozytu FN bez dodatku smaru.

Ważnymi czynnikami wpływającymi na przebieg charakterystyk tarcio- wych polimerowych materiałów kompozytowych jest prędkość poślizgu oraz nacisk jednostkowy. Znajomość dopuszczalnych wartości tych dwóch parametrów decyduje o zakresie zastosowań danego polimeru jako materiału konstrukcyjnego przeznaczonego na elementy pary tarczej. Zużycie materiału jest ściśle zależne od temperatury panującej w węźle tarcia, która w istotny sposób wpływa na trwałość warstwy kompozytu polimerowego. Wzrost temperatury węzła tarcia zależy od zawartości smaru plastycznego w badanym kompozycie, na co mają decydujący wpływ również warunki współpracy układu kompozyt–stal. Na podstawie uzyskanych rezultatów stwierdzono, że zwiększenie nacisku jednostkowego wpływa na wzrost temperatury w węźle, a tym samym na zużycie materiału w wyższym stopniu niż zwiększenie prędkości poślizgu.

PODSUMOWANIE

Charakterystyki tarcio- zużyciowe otrzymanych materiałów wyznaczono na podstawie testów tribologicznych, które prowadzono w zmiennych warunkach prędkości ślizgania i nacisku jednostkowego. Badania wykonano w warunkach odwzorowujących pracę rzeczywistego ślizgowego węzła tarcia.

Wprowadzenie smaru plastycznego do kompozytu metalopolimerowego umożliwiło poprawę jego właściwości tribologicznych; zużycie współpracujących elementów wyraźnie zmniejszyło się, obniżyła się temperatura węzła tarcia i nastąpiła stabilizacja siły tarcia.

Uzyskane rezultaty umożliwiły wyznaczenie właściwości użytkowych i ustalenie najkorzystniejszej ilości smaru plastycznego w kompozycie ze względu na odporność na zużycie i temperaturę węzła tarcia. Uzyskane wyniki świadczą o korzystnych właściwościach eksploatacyjnych opracowanych samo- smarnych kompozytów, co potwierdza możliwość rozwoju materiałów kompo- zytowych, znacznie rozszerzając potencjalne obszary i zakres ich aplikacji w technice przy spełnieniu wymogów ekologicznych.

Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2010–2012 – Projekt Nr N N508 481138.

LITERATURA

1. Janecki J. i zespół: Niskotarciowy odporny na odkształcenia postaciowe tribologiczny kompozyt metalożywiczny na osnowie polimeru termoutwardzalnego. Projekt Badawczy KBN, Nr 1 T09B 002 30, ITeE – PIB, Radom 2009.
2. Alonso M.V. et al.: Thermal degradation of lignin-phenol-formaldehyde and phenol-formaldehyde resol resins. *J. Therm Anal Calorim* (2011) 105.
3. Janecki J., Pawelec Z., Wolszczak M.: Żywica chemoutwardzalna jako dodatek łagodzący tarcie kompozytu termoutwardzalnego o metal. *Tribologia*, nr 5, 2008, s. 45–54.
4. Janecki J., Pawelec Z., Wolszczak M., Drabik J.: O specyfice zużywania metalopolimerowego kompozytu termoutwardzalnego. *Tribologia* nr 6, 2009, s. 29–43.
5. Drabik J., Janecki J.: Application of thermal analysis and tribotesting to estimating the range of working conditions of EPAN I composite. *Problemy Eksploatacji* nr 3'98, s. 81–89.
6. Drabik J. i zespół: Wpływ napelnaczy aktywnych oraz procesu starzenia na właściwości kompozytu metalożywicznego – sprawozdanie z grata KBN 7 T08E 024 08, 1997.
7. M.M. Gatzert et al. *Tribology International* 2010, 43, s. 981–989.
8. S.S. Kim et al. *Composite Structures* 2009, 88, s. 26–32.
9. Wu J., Cheng X. H.: The tribological properties of Kevlar pulp reinforced epoxy composites under dry sliding and water lubricated condition. *Wear*, 261, 2006, s. 1293–1297.
10. Bassani R., Levita G., Meozzi M., Palla G.: Friction and wear of epoxy resin on inox steel: remarks on the influence of velocity, load and induced thermal state. *Wear* 247, 2001, s. 125–132.
11. Marczak R., Starczewski L., Szumniak J.: Termoutwardzalny kompozyt dla skojarzeń ślizgowych o niskich oporach tarcia i wysokiej odporności na zużycie. *Tribologia* 3/2001, s. 341–348.
12. Starczewski L., Szumniak J.: Wpływ grafitu, BN i MoS₂ na kształtowanie się właściwości tribologicznych skojarzenia stal – termoutwardzalny kompozyt zawierający PTFE i Cu. *Tribologia* 3/2001, s. 429–436.
13. Drabik J., Trzos M., Janecki J.T.: Modelowanie wpływu zawartości smaru plastycznego w kompozycie metalopolimerowym na odporność na zużycie. *Przem. Chem.*, 2013, 92, 3, s. 369–373.
14. Drabik J., Trzos M.: Modeling relation between oxidation resistance and tribological properties of non-toxic lubricants with the use of artificial neural networks. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2012, 109:521–527.
15. Drabik J.: Wymuszenia cieplne w testach tribologicznych a skuteczność działania nietoksycznych smarów plastycznych. *Tribologia* nr 4, 2012, s. 49–58.
16. Janecki J.T. i inni: Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego Nr N N508 481138. ITeE – PIB, Radom 2012.
17. Szczerek M.: Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. Biblioteka Problemów Eksploatacji, ITeE – PIB, Radom 1997.

Summary

This paper presents the impact of the grease additive content in the metal–polymer composite that improves the wear characteristics of the investigated composites. The investigated composite material was based on phenol-formaldehyde resin with the addition of iron and high temperature grease varying by percentage share in composite. The results of the tribological processes, which were conducted under different conditions of load and velocity, are presented. The tests were performed without external lubrication, which are technically dry conditions. After the experiments, analysis was conducted on the influence of the friction parameters and grease content in composite on wear characteristics and temperature changes. It was found that the content of grease in the composite has a positive effect on the working of the composite steel.