

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

KOMPOZYTY WIELKOCZĄSTECZKOWE W WĘZŁACH TARCIA MASZYN

POLYMER COMPOSITES IN FRICTION PAIR MACHINE

Słowa kluczowe:

epoksydowy kompozyt metalopolimerowy, termoutwardzalny kompozyt metalopolimerowy, zużycie, tarcie, smar plastyczny

Key words:

metal-polymer composite epoxy, thermosetting metal-polymer composite, wear, friction, grease

Streszczenie

W pracy przedstawiono przegląd wyników prac badawczych zrealizowanych z zakresu opracowywania zoptymalizowanych wersji kompozytów metalożywicznych chemo- i termoutwardzalnych przeznaczonych do budowy i regeneracji węzłów tarcia maszyn i urządzeń.

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

WPROWADZENIE

W wielu 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 bardzo duża i których awaria może doprowadzić do dużych strat ekonomicznych wynikłych z konieczności nieoczekiwanej przerwy w eksploatacji. Pomimo opracowywania kompozytowych materiałów regeneracyjnych i konstrukcyjnych, jak również technologii naprawy, nie daje się jednak uniknąć konieczności wymiany elementów pojedynczych par trących. Poszukuje się zatem takich materiałów wielkokształtkowych, modyfikowanych polimerów i kompozytów polimerowych, które w ostatecznym efekcie – poza łatwą i taną produkcją z nich części zamiennych takich jak panwie, tuleje, koszulki włóczane na czopy wałów, prowadnice płaskie itp., zapewnią uzyskanie odpowiedniej trwałości skojarzenia trącego oraz pozwolą uniknąć obróbki skrawaniem oraz klasycznych obróbek cieplnych, chemicznych lub cieplno-chemicznych [L. 1–6, 12–13].

Od kilkunastu 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 metalopolimerowy–metal (stal), ale nie bez znaczenia są również koszty regeneracji, które są znacznie niższe niż koszty regeneracji elementów metalowych tradycyjnymi metodami. Właściwe jest więc także stosowanie polimerowych materiałów kompozytowych jako materiały konstrukcyjne do wytwarzania elementów trących par tribologicznych.

Ogólne tendencje rozwoju kompozytów polimerowych przeznaczonych do regeneracji elementów maszyn, jak i materiałów konstrukcyjnych to przede wszystkim poprawa właściwości mechanicznych, odporności i przewodności cieplnej. Poprawę tych właściwości można uzyskać najczęściej na drodze modyfikacji osnowy i/lub zastosowania nowych, a także udoskonalonych napełniaczy [L. 1–2, 6, 14]. W pracach dotyczących modyfikacji właściwości tribologicznych kompozytów wykazano między innymi, że kompozyt z wtrąceniami smarów stałych wykazuje lepsze właściwości tribologiczne od konwencjonalnych tworzyw [L. 7–9].

Stosowanie kompozytów w praktyce regeneracji części zamiennych – dla odtwarzania ślizgowych warstw wierzchnich [L. 1, 6], jak i w naprawie przez uzupełnianie ubytków czy łączenie elementów [L. 2, 4] jest utrwalającą się w technice tendencją nakładania warstw kompozytowych na zużyte powierzchnie. Dużym walorem stosowania tej metody jest fakt, że opracowane kompozyty metalopolimerowe do chwili utwardzenia można dowolnie kształtować,

a później poddawać normalnej obróbce mechanicznej. Łatwość formowania i uzyskanie w niezbyt długim czasie, już w temperaturze otoczenia, warstw o parametrach użytkowych jest znaczącym czynnikiem rozwoju technologii kompozytów na osnowie polimerowej [L. 1–9, 16].

W tribologicznych procesach pracy elementów maszyn, szczególnie w łożyskach poprzecznych przenoszących duże naciski, nierządki dynamiczne, oraz pracujących przy umiarkowanych i dużych prędkościach, wydzielają się duże ilości ciepła mogące powodować destrukcję warstw wierzchnich tych elementów. Odprowadzanie nadmiaru ciepła z warstw wierzchnich trących o siebie elementów węzła tarcia przez przewodzenie jest stosunkowo łatwe w przypadkach stosowania obu metalowych elementów np. czopa i panwi, wobec faktu dużej przewodności ciepła przez metale. Przewodność cieplna polimerów jest wielokrotnie niższa i wynosi dla tworzyw termoplastycznych od 0,2 do 0,65 W/m·K, termoutwardzalnych od 0,3 do 0,70 W/m·K. Oznacza to występowanie dużych gradientów temperatury i nadmierne nagrzewanie warstwy wierzchniej. Rzadko wystarczy jedynie odprowadzanie ciepła przez jeden z elementów pary tarcia – np. metalowy czop czy metalową panewkę. W każdym jednak przypadku ogranicza to wachlarz możliwości stosowania polimeru jako materiału tribologicznie czynnego – zbyt bliska jest granica destrukcji cieplnej polimeru. Problem istnieje zatem wówczas, gdy chodzi o wyraźne uodpornienie elementu polimerowego na destrukcyjne działanie kumulującego się w warstwie wierzchniej ciepła. Jest to przede wszystkim powodem do kształtowania węzłów tarcia w oparciu o metale – z wszystkimi konsekwencjami: kosztowny proces wymiany węzłów tarcia – obróbka skrawaniem i obróbki chemiczne oraz cieplne i cieplno-chemiczne.

Tworzywa niemetalowe stosuje się do produkcji tribologicznie aktywnych węzłów tarcia już od wielu lat, jednak jedynie tam, gdzie nieznaczące są wartości prędkości tarcia, a zatem i minimalne ilości wytwarzanego w węźle tarcia ciepła. Powszechnie stosowane są elementy wytwarzane z tworzyw termoutwardzalnych czy chemoutwardzalnych jako elementy węzła tarcia, np. w obrabiarkach (prowadnice płaskie), w których ilości wydzielanego ciepła są znikome i w których naciski jednostkowe nie grożą odkształcaniem postaciovym elementów. Wzrost obciążenia węzłów sprzyja wzrostowi temperatury, co z kolei wymaga zapewnienia stabilności smarowania w wyższych temperaturach np. poprzez odpowiednie dodatki uszlachetniające lub stosowanie środków smarowych, sprzyjające obniżeniu tarcia i tym samym temperatury w węźle [L. 14, 15].

Modyfikacja składu niektórych z nich, szczególnie polimerów chemo- i termoutwardzalnych, różnymi napełniaczami umożliwia stosowanie takich kompozytów w węzłach tarcia, gdzie z pozytywnym skutkiem konkurują z klasycznym metalem łożyskowym. Ich ograniczoność zastosowania do węzłów tarcia jedynie słabo i średnio obciążonych tribologicznie jest rekompensowana

pozytywnymi zabiegami technologicznymi, gdyż tańsze i prostsze są technologie wytwarzania i regeneracji [L. 1–6, 16].

Nie oznacza to, że tworzywa te są w stanie wszędzie zastąpić klasyczne metale – jednak efekty są na tyle duże, że coraz intensywniej poszukuje się nowych odmian tych materiałów, które wykazują kompatybilność ze stosowanymi w węzłach tarcia smarami plastycznymi. Problematyka kompatybilności środków smarowych z kompozytami metalopolimerowymi jest obecnie intensywnie rozwijana, tym bardziej że w Instytucie Technologii Eksploatacji – Państwowym Instytucie Badawczym w Radomiu opracowano i wdrożono smary plastyczne w oparciu o mineralne, syntetyczne i roślinne bazy olejowe. Realizacja prac badawczych przyczyniła się do poszerzenia możliwości stosowania nietoksycznych smarów plastycznych w skojarzeniach trących układu kompozyt–stal, przy czym skład kompozytu modyfikowano smarem plastycznym. W efekcie uzyskano materiał konstrukcyjny niskotarciowy przeznaczony na elementy pracujące w ekstremalnych warunkach tarcia technicznie suchego [L. 14–16].

MODYFIKOWANE KOMPOZYTY NA BAZIE TWORZYW WIELKOCZĄSTECZKOWYCH

Specjalistyczna literatura przedmiotu traktująca o tworzywach wielkocząsteczkowych jest już dzisiaj bardzo bogata dzięki rozwojowi chemii polimerów. Jednak zaledwie nieliczne „polimery” mają takie właściwości, które pozwalają na stosowanie ich w węzłach tarcia: łożyskach, kołach zębatych – a także w specyficznych węzłach tarcia maszyn – np. prowadnic obrabiarek. O tym, czy tworzywo wielkocząsteczkowe w stanie czystym może skutecznie działać jako element węzła tarcia, decydują przede wszystkim odporność na odkształcenie postaciowe, wartość współczynnika przewodzenia ciepła, wartość współczynnika tarcia oraz odporność na proces zużywania, szczególnie mały ubytek materiału w wyniku działania ciepła tarcia.

Generalnie niemodyfikowane tworzywa wielkocząsteczkowe nie spełniają wymagań stawianych tribologicznie pracującym elementom w węzłach tarcia. Wszystkie grupy tworzyw wielkocząsteczkowych nie wytrzymują w zasadzie pracy tarcia przy większych naciskach jednostkowych oraz wysokich prędkościach poślizgu. Podstawową przyczyną takiego stanu rzeczy jest nieduża przewodność cieplna niepozwalająca na skuteczne odprowadzanie ciepła tarcia ze strefy tarcia, czego następstwem jest proces destrukcji materiału warstwy wierzchniej (topnienie, zwęglanie), a więc niszczenie elementów węzła tarcia. Bez zabiegów modyfikacji tworzywa pozwalającego na uzyskanie kompozytu o cechach materiału konstrukcyjnego przeznaczonego do pracy w węzle tarcia nie jest możliwe wykorzystanie tworzyw wielkocząsteczkowych w budowie węzłów tarcia.

Z punktu widzenia zastosowań kompozytów w węzłach tarcia jako materiały regeneracyjne bądź konstrukcyjne, na uwagę zasługują tworzywa formowane pod ciśnieniem lub bez ciśnienia w wyniku temperatury bądź dodatku utwardzacza, przy czym w tworzywie powstaje przestrzenna sieć wiązań chemicznych, a proces jest nieodwracalny. Tworzywa termoutwardzalne sieciowane w procesie prasowania, o stosunkowo dużej stabilności postaci, dość wysokiej temperaturze destrukcji cieplnej do 250°C i niedużej wartości współczynnika tarcia. Tworzywa te modyfikowane napełniaczami metalicznymi i smarami stałymi wykorzystywane są do wytwarzania elementarnych części maszyn – np. panwi i tulejek. Tworzywa chemoutwardzalne, które utwardzają się pod wpływem chemicznego działania utwardzaczy i właściwości ich można kształtować pod wpływem odpowiedniego doboru tych środków sieciujących, przy czym proces utwardzania jest również nieodwracalny. Zaletą tej grupy tworzyw jest możliwość pokrywania nimi elementu regenerowanego, dokładne odtwarzanie warstw wierzchnich utwardzanych w ciągu kilkunastu godzin, w temperaturze otoczenia.

Na podstawie analizy danych dotyczących właściwości tworzyw wielkocząsteczkowych spośród licznych gatunków tworzyw wielkocząsteczkowych termoutwardzalnych i chemoutwardzalnych wybrano żywicę fenolowo-formaldehidową oraz epoksydową jako materiały bazowe do wytwarzania kompozytów konstrukcyjnych i regeneracyjnych. Stwierdzono, że mogą one stanowić materiał łożyskowy w węzle tarcia maszyny, jednak pod następującymi warunkami:

- konieczne jest *obniżenie wartości współczynnika tarcia* odpowiednimi dodatkami smarnymi, np. grafit, dwusiarczek molibdenu, wysokotemperaturowy smar plastyczny, w celu uzyskania wydatnego obniżenia wartości współczynnika tarcia zewnętrznego;
- konieczne jest *wyraźne podwyższenie wartości współczynnika przewodzenia ciepła od materiału warstwy wierzchniej*, co skutecznie można zrealizować jedynie przez przekształcenie tworzywa wielkocząsteczkowego w kompozyt z napełniaczami metalicznymi, w którym polimer pełni przede wszystkim rolę lepiszcza, a od którego w znaczącym stopniu zależy odporność kompozytu na zużywanie.

Dotychczasowe zrealizowane prace badawcze wykazały, że zastosowanie odpowiednich modyfikatorów, w tym napełniaczy metalicznych i dodatków smarnych umożliwiło uzyskanie kompozytów charakteryzujących się wymaganą odpornością oksydacyjną, odpornością na zużycie i o niskim współczynniku tarcia, które to właściwości predestynują do stosowania jako materiały elementów węzła tarcia maszyn [L. 1–6, 16].

KOMPOZYTY CHEMOUTWARDZALNE I TERMOUTWARDZALNE

Badania mające na celu wytworzenie kompozytu dla węzła tarcia polegały przede wszystkim na doborze odpowiednich ilości napełniaczy, a tym samym na doskonaleniu właściwości tworzywa wielkocząsteczkowego stanowiącego lepiszczce. Eksperymenty sprowadzały się do wariantowania rodzaju i ilości dodatków poprawiających ślizgowość kompozytu i jego przewodność cieplną decydującą bezpośrednio o odporności na zużywanie i destrukcji warstwy wierzchniej.

Charakterystyki tarciovo-zużyciowe opracowanych kompozytów wyznaczano na testerze T-05 typu rolka-kłócek odwzorowującym układ rzeczywisty *czop-panew* w łożysku ślizgowym oraz pozwalającym na zapis przebiegu temperatury warstwy wierzchniej i wartości współczynnika tarcia (**Rys. 1**). Parametry charakteryzujące węzeł tarcia to styk rozłożony utworzony przez obracającą się rolę i dociskany do niej kłócek (**Rys. 2**). Eksperymenty realizowano w warunkach zmiennej prędkości ślizgania i naciskach jednostkowych ($p = 1,5-12 \text{ MPa}$, $v = 0,2-0,6 \text{ m/s}$) w zależności od rodzaju badanego kompozytu [**L. 2, 6, 9**].



Rys. 1. Widok testera tribologicznego T-05 typu rolka-kłócek

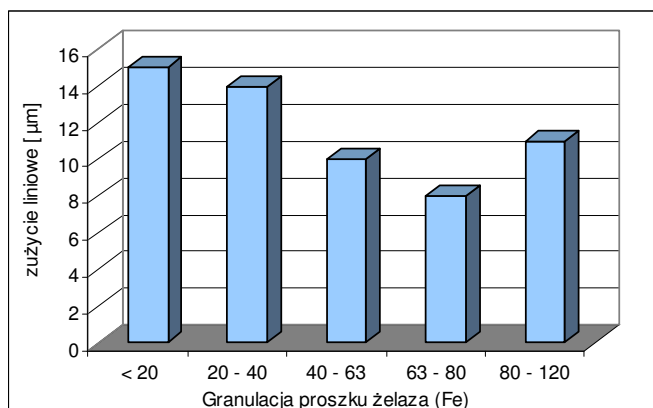
Fig. 1. Tester T-05 type roll-block



Rys. 2. Modelowy węzeł tarcia: a) rolka z naniesioną warstwą kompozytu na bazie żywicy epoksydowej, kłócek wykonany z brązu, b) kłócek wykonany z materiału kompozytowego na bazie żywicy fenolowo-formaldehydowej, rolka ze stali łożyskowej

Fig. 2. Model of friction a) roller bearing layer of epoxy resin-based composite, block made of bronze, b) block made from phenol resin-based composite, a roll of bearing steel

Przeprowadzone eksperymenty dowiodły, że odporność cieplna kompozytów w węźle tarcia, zależy de facto od napelniaczy poprawiających zdecydowanie wartość współczynnika przewodzenia ciepła kompozytu, tym samym od wartości współczynnika odprowadzania ciepła z powierzchni tarcia [L. 6, 16]. Tę cechę można było uzyskać jedynie przez odpowiednie wypełnienie osnowy kompozytu metalem w postaci proszku, z reguły proszkiem żelaza (Fe) wykazującym dużą podatność na adhezję, sorpcję i chemisorpcję z tworzywem wielkocząsteczkowym. Opracowany kompozyt metalożywiczy, dwuskładnikowy na bazie żywicy epoksydowej z dodatkiem proszku żelaza o określonej granulacji (Rys. 3), ma już cechy materiału o dostatecznie dużej przewodności cieplnej, pozwalającej na trwałą pracę tarciovą warstwy wierzchniej w skojarzeniu kompozyt–metal, na poziomie obciążenia występującego w rozmaitych węzłach tarcia takich maszyn, jak: maszyny rolnicze, włókiennicze lub transportery urobku w kopalniach [L. 1, 4, 5]. Jednak niezadowalająca duża wartość współczynnika tarcia stwarzająca warunki do zbyt wysokiego nagrzewania warstwy wierzchniej i do dużych strat na pokonanie oporów tarcia wymagała kontynuowania prac w celu wytworzenia kompozytu trójskładnikowego zawierającego środek smarny. Okazuje się, czego dowiodły przeprowadzone badania nad optymalizacją właściwości kompozytów, że kompozyt trójskładnikowy oparty o żywicę epoksydową z dodatkiem proszku żelaza i smaru stałego (dwusiarcezek molibdenu, grafit czy sadza) wykazuje we współpracy z elementem stalowym już wyraźne cechy kompozytu niskotarciowego [L. 4–6, 12–13]. Natomiast kompozyt opracowany na bazie żywicy fenolowo-formaldehidowej z dodatkiem proszku żelaza i smaru plastycznego w skojarzeniu trącym kompozyt–metal wykazuje zarówno cechy kompozytu niskotarciowego, jak i samosmarującego [L. 15–16]. Modyfikacja składu kompozytów na bazie tych żywic wpływa na obniżenie ilości ciepła generowanego w węźle tarcia, stymuluje nagrzewanie kompozytowej warstwy wierzchniej oraz obniża jej zużycie.

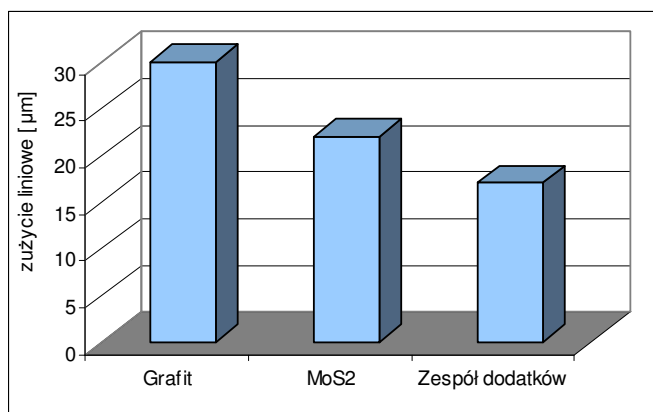


Rys. 3. Wpływ granulacji proszku żelaza na zużycie tribologiczne kompozytu chemoutwardzalnego

Fig. 3. Effect of granulation of iron powder on the wear of epoxy resin-based composite

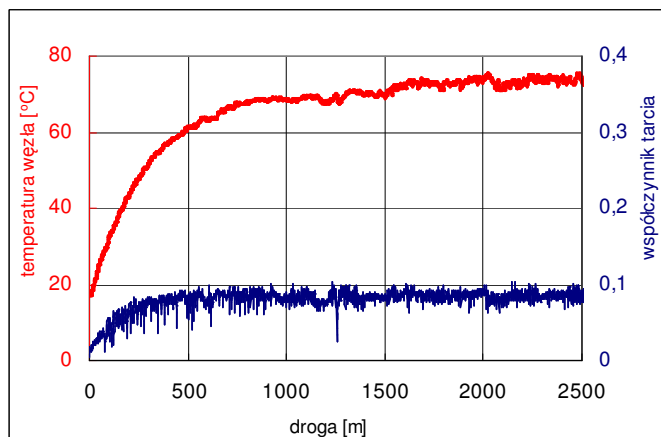
Dotychczasowe badania wykazały [L. 1–6], że właściwości tribologiczne kompozytów są zależne od granulacji składnika metalowego – zastosowanego proszku żelaza (Rys. 3). Dla konkretnego gatunku kompozytu istnieje taka granulacja, przy której kompozyt uzyskuje największą odporność na zużywanie.

Jeśli chodzi o właściwości tribologiczne, w kompozycie jest również bardzo istotny udział dodatków smarnych zarówno pojedynczych smarów stałych, jak również stosowanych łącznie (Rys. 4).



Rys. 4. Wpływ ilości i rodzaju dodatku smarnego w kompozycie chemoutwardzalnym na jego zużycie tribologiczne

Fig. 4. The impact of the quantity and type of lubricant additive in the wear of the friction

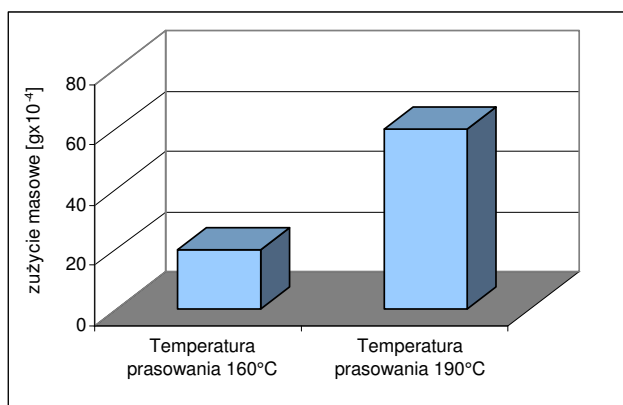


Rys. 5. Przykładowy przebieg zmian temperatury węzła i współczynnika tarcia skojarzenia kompozyt–stal; smarowanie jednokrotne

Fig. 5. The friction pair bulk temperature and friction coefficient for the composite–steel; lubrication of the single

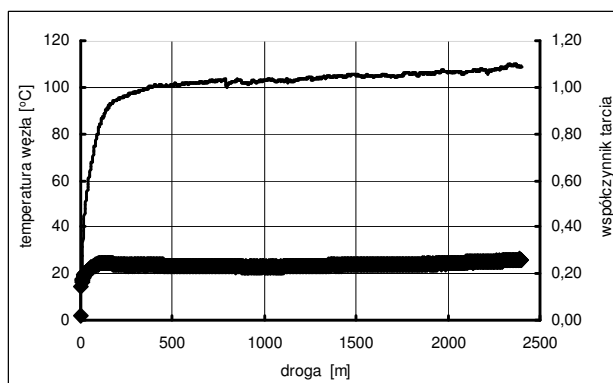
W przypadku kompozytu termoutwardzalnego istotny wpływ na charakterystyki tarciove i odporność na zużywanie ma temperatura prasowania, co zilustrowano na **Rys. 6**.

Kontynuowane badania nad doskonaleniem właściwości kompozytów niskotarciowych dowiodły, że w przypadku kompozytu utworzonego na bazie żywicy termoutwardzalnej pozytywny wpływ na charakterystyki tribologiczne ma zastosowanie jako komponentu wysokotemperaturowego smaru plastycznego (**Rys. 8**). Przykładowe charakterystyki tarciove takiego kompozytu, bez i z dodatkiem smaru plastycznego, w warunkach tarcia technicznie suchego przedstawiono na **Rys. 7**.



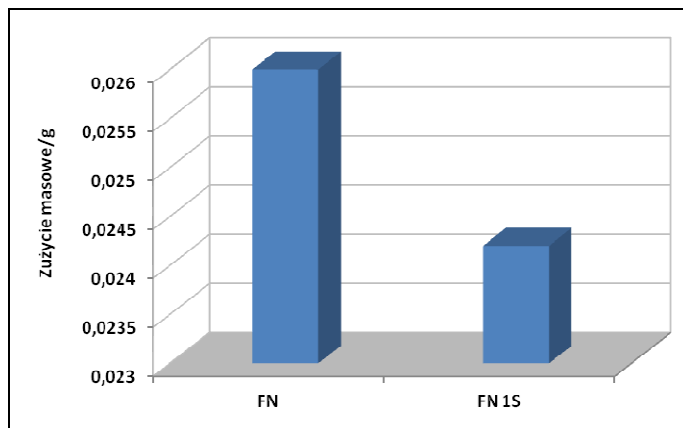
Rys. 6. Zużycie masowe kompozytu termoutwardzalnego w zależności od temperatury prasowania

Fig. 6. The wear of the friction pair composite-steel pressed at different temperature



Rys. 7. Przykładowy przebieg zmian temperatury węzła i współczynnika tarcia skojarzenia kompozyt FN–stal, tarcie technicznie suche ($p = 9$ MPa, $v = 0,3$ m/s)

Fig. 7. The friction pair bulk temperature and friction coefficient for the composite FN-steel; the friction of technically dry ($p = 9$ MPa, $v = 0.3$ m/s)

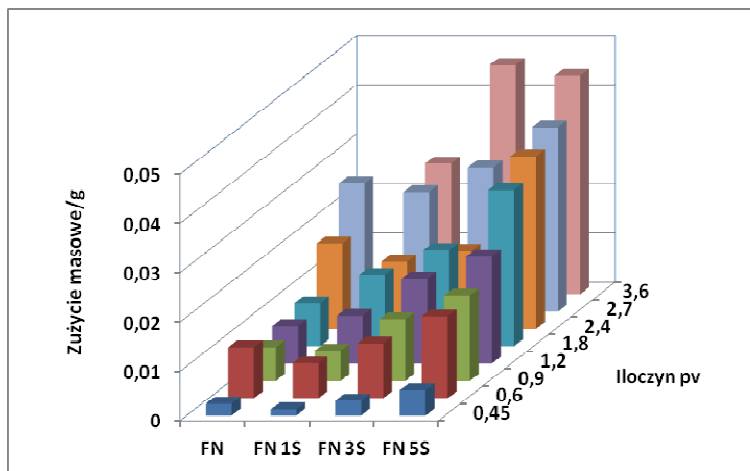


Rys. 8. Zużycie masowe termoutwardzalnego kompozytu bez udziału smaru FN i ze smarem plastycznym FN 1S; skojarzenia kompozyt–stal, tarcie technicznie suche; ($p = 9 \text{ MPa}$, $v = 0,3 \text{ m/s}$)

Fig. 8. The wear of the friction pair thermosetting composite FN – steel and composite FN1S-steel; the friction of technically dry; ($p = 9 \text{ MPa}$, $v = 0.3 \text{ m/s}$)

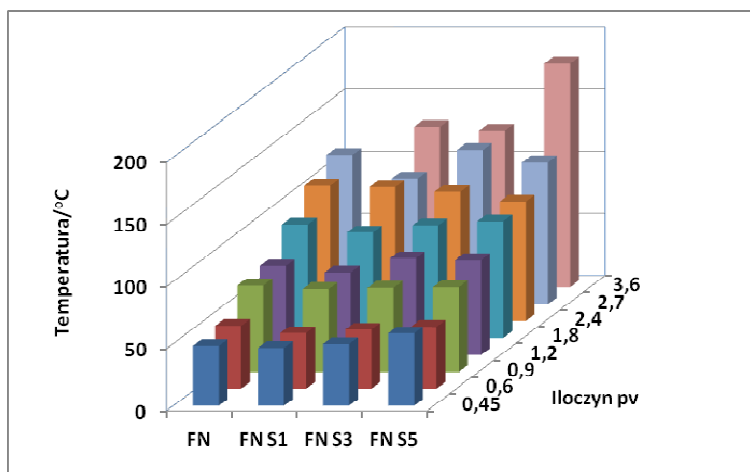
Istotnym parametrem charakteryzującym właściwości kompozytowych łożysk ślizgowych jest ich nośność. Obciążenia zewnętrzne pary trącej w postaci nacisku i prędkości poślizgu ma znaczny wpływ zarówno na wartość współczynnika tarcia, temperaturę jak również na zużycie skojarzenia materiałowego. Znajomość dopuszczalnych wartości nacisku i prędkości jest ważną cechą użytkową decydującą o możliwości zastosowań danego kompozytu polimerowego w skojarzeniach ślizgowych.

W celu wyznaczenia granicznych wartości parametrów skojarzenia materiałowego kompozyt termoutwardzalny–stal przeprowadzono eksperymenty, modelując zmiany nacisku jednostkowego i prędkości ślizgania, przy czym droga tarcia była jednakowa dla wszystkich badanych kompozytów i wynosiła 2400 m. W celu zachowania jednakowej drogi tarcia regulowano czas trwania testów tribologicznych, co umożliwiło przyjęcie jako miary zużycia badanych kompozytów zużycia masowego i porównywania wyników przeprowadzonych eksperymentów. Testy tribologiczne wykonane przy różnych wartościach parametrów ($p = 1,5\text{--}12 \text{ MPa}$, $v = 0,1\text{--}0,4 \text{ m/s}$) przyczyniły się do określenia obszaru efektywnej pracy kompozytu w skojarzeniu trącym ze stalą. Oceniono termoutwardzalny kompozyt metalopolimerowy FN modyfikowany wysokotemperaturowym smarem plastycznym w ilości 1, 3 i 5% m/m, oznaczono odpowiednio jako kompozyt FN 1S, FN 3S, FN 5S [L. 14, 16]. Na podstawie wyznaczonych charakterystyk tarciovych skojarzenia materiałowego stwierdzono zależność między procesem tarcia a zużyciem w powiązaniu z warunkami prowadzenia testów tribologicznych (Rys. 9, 10).



Rys. 9. Zużycie termoutwardzalnych kompozytów FN bez i z dodatkiem smaru plastycznego FN1S, FN3S i FN5S wyznaczone w zmiennych warunkach prędkości ślizgania i nacisku jednostkowego ($p = 1,5-12$ MPa, $v = 0,1-0,4$ m/s)

Fig. 9. The wear of the friction pair thermosetting composite FN without and with the addition grease FN1S, FN3S and FN5S set out in the conditions of sliding speed variables and unit pressure ($p = 1.5-12$ MPa, $v = 0.1-0.4$ m/s)



Rys. 10. Temperatura w węzle tarcia kompozytów metalopolimerowych wyznaczone w zmiennych warunkach prędkości ślizgania i nacisku jednostkowego ($p = 1,5-12$ MPa, $v = 0,1-0,4$ m/s)

Fig. 10. The temperature in friction pair thermosetting composite FN without and with the addition grease FN1S, FN3S and FN5S set out in the conditions of sliding speed variables and unit pressure ($p = 1.5-12$ MPa, $v = 0.1-0.4$ m/s)

Stwierdzono, że zużycie materiału kompozytowego wzrasta wraz ze wzrostem obciążalności węzła tarcia i zależy od rodzaju kompozytu pracującego w skojarzeniu ze stalą. W przypadku kompozytu metalopolimerowego FN nie zawierającego smaru plastycznego obserwowany jest wzrost zużycia masowego próbki wraz ze wzrostem wartości iloczynu $p \cdot v$, przy czym maksymalna trwałość tej próbki jest do momentu osiągnięcia wartości 2,7. Przy obciążalności węzła 3,6 (prędkości 0,3 m/s i nacisku 12 MPa) znacznie wzrosła temperatura masowa klocka powyżej 150°C i próbka FN uległa zniszczeniu. Najmniejsze zużycie w całym zakresie obciążalności wykazuje kompozyt zawierający 1% smaru plastycznego FN 1S.

Temperatura generowana w węźle tarcia również zmienia się w zależności od warunków tarcia i zależy od rodzaju kompozytu (**Rys. 10**). Najmniejsze wartości temperatury uzyskano w całym zakresie iloczynu wartości nacisku i prędkości 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 i odprowadza ciepło generowane w styku kompozyt–stal.

PODSUMOWANIE

Wyniki dotychczasowych prac, prowadzonych w zakresie technologii regeneracji maszyn i wytwarzania elementów konstrukcyjnych z kompozytów metalopolimerowych, pozwoliły na opracowanie zasad kształtowania właściwości użytkowych kompozytów poprzez dobór ilościowy i jakościowy poszczególnych składników kompozytu. W efekcie opracowano szereg materiałów kompozytowych, które zostały zweryfikowane w rzeczywistych warunkach eksploatacji maszyn. Selektywny dobór osnów polimerowych, napełniaczy i dodatków funkcyjnych stwarza możliwość opracowania kompozytów mogących zastąpić klasyczne materiały konstrukcyjne (metale) w określonych węzłach tarcia.

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. Zużycie materiału jest ściśle zależne od temperatury panującej w węźle tarcia i wpływającej w istotny sposób na trwałość warstwy kompozytu polimerowego. Wzrost temperatury zależy od możliwości odprowadzania ciepła z węzła jak również od iloczynu $p \cdot v$. Na podstawie uzyskanych rezultatów stwierdzono, że zwiększenie iloczynu prędkości poślizgu i nacisku jednostkowego wpływa na wzrost temperatury w węźle, a tym samym na zużycie materiału kompozytowego, przy czym dodatek smaru plastycznego powoduje zwiększenie odporności na zużycie.

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

LITERATURA

1. Janecki J. i inni: Nowe materiały epoksydowo-metaliczne do regeneracji i naprawy elementów maszyn i urządzeń. Sprawozdanie z Projektu Celowego KBN 7 13 77 91C, Radom 1994.
2. Drabik J. i zespół: *Wpływ napelniaczy aktywnych oraz procesu starzenia na właściwości kompozytu metalożywicznego* – sprawozdanie z grata KBN 7 T08E 024 08, 1997.
3. 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.
4. Dasiewicz J., Pawelec Z.: Możliwość stosowania kompozytu metalożywicznego do regeneracji węzłów tarcia maszyn włókienniczych. *Problemy Eksploatacji* 4/2000, s. 103–112.
5. Janecki J., Dasiewicz J., Pawelec Z.: Kompozyt metalożywiczny do regeneracji elementów maszyn. *Problemy Eksploatacji* 2/2001, s. 57–66.
6. Janecki J. i zespół: Niskotarciowy odporny na odkształcenia postaciowe tribologiczny kompozyt metalożywiczny na podstawie polimeru termoutwardzalnego. Projekt Badawczy KBN, Nr 1 T09B 002 30, ITeE – PIB, Radom 2009.
7. 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.
8. 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.
9. Tomascu L., Mindora R.: Some PTFE composites slipping In water against steel. *Euromat 2000*, Edit Elsevier 2000.
10. 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.
11. 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.
12. Janecki J., Pawelec Z., Wolszczak M.: Żywica chemoutwardzalna jako dodatek łagodzący tarcie kompozytu termoutwardzalnego o metal. *Tribologia*, nr 5, 2008, s. 45–54.
13. Janecki J., Pawelec Z., Wolszczak M., Drabik J.: O specyfice zużywania metalopolimerowego kompozytu termoutwardzalnego. *Tribologia* nr 6, 2009, s. 29–43.
14. 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.

15. 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.
16. Janecki J. i zespół: Łożyskowy niskotarciowy termoutwardzalny kompozyt metalo-polimerowy modyfikowany ekologicznym smarem plastycznym. Sprawozdanie z projektu Nr N N508 481138, Radom 2012.

Summary

In the article, the investigation results of the formation chemo- and thermo-setting composite on sliding bearings were presented. Composites of different chemical compositions were investigated. The influence of grease on the tribological characteristic phenol-formaldehyde composites are discussed. The results of the tribological processes that were conducted under different conditions of load and velocity are presented. After the experiments, an analysis of the influence of friction parameters and grease content in the composite on wear characteristics and temperature changes are determined.