

Zbigniew PAWELEC

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

e-mail: zbigniew.pawelec@itee.radom.pl

Charakterystyki tribologiczne kompozytów polimerowych stosowanych na regeneracyjne warstwy wierzchnie układów pozycjonowania narzędzi obrabiarek skrawających

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań właściwości tribologicznych kompozytów metalopolimerowych przeznaczonych do regeneracji suportów obrabiarek skrawających. Osnową kompozytów była chemoutwardzalna żywica epoksydowa, podstawowym wypełniaczem proszek żelaza Fe, wypełniaczem włóknistym organiczne włókna poliamidowe, a jako dodatki smarne zastosowano smary stałe o spójności anizotropowej: grafit i dwusiarczek molibdenu w układzie pojedynczym i binarnym. Dla skojarzeń tarciovych kompozyty polimerowe – stal przy różnych obciążeniach węzła tarcia zbadano współczynnik tarcia statycznego i kinetycznego oraz podatność węzłów tarcia na występowanie efektu stick - slip. Charakterystyki tribologiczne (odporność na zużycie) wyznaczono z wykorzystaniem testera w ruchu postępowo zwrotnym. Uzyskane wyniki porównano z klasycznym skojarzeniem materiałowym stal – stal. Ocenę mechanizmu zużywania badanych skojarzeń materiałowych przeprowadzono na podstawie obrazów uzyskanych na skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) i pomiarów stereometrii powierzchni. Stwierdzono, że kompozyty polimerowe w skojarzeniu ze stalą charakteryzują się znacznie lepszymi właściwościami tribologicznymi niż skojarzenie stal – stal. Najkorzystniejsze charakterystyki tarcio - zużyciowe uzyskano dla kompozytu polimerowego zawierającego łącznie grafit i dwusiarczek molibdenu.

Słowa kluczowe: kompozyty polimerowe, charakterystyki tribologiczne, wypełniacze, dodatki smarne

TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF POLYMER COMPOSITES USED FOR REGENERATION OF SURFACE LAYERS IN POSITIONING SYSTEMS OF CUTTING TOOLS

Abstract: The paper presents the results of tribological investigation of metal-polymer composites intended for regeneration of machine tool guides. As composite matrix chemical-setting epoxy resin was used, and as the main filler Fe powder as well organic polyamide fibers were applied. The graphite and molybdenum disulfide, single or both, were used as solid lubricant with anisotropic structure. The selected polymer composite-steel friction pairs were tested under various loads for static and kinetic friction coefficient as well as susceptibility for stick-slip. The tribological characteristics (resistance to wear) were measured by means of tribotester operating under reciprocating motion. The obtained results were compared to typical steel-steel friction pair. The description of wear mechanisms of tested friction pairs were conducted using the images acquired by scanning electron microscope (SEM) and the 3D surface measurement. It was stated that the polymer composites-steel tribosystem show better tribological characteristics than steel-steel tribosystem. The best friction-wear characteristics were obtained for the composite containing both solid additives: graphite and molybdenum disulphide.

Keywords: polymer composites, tribological characteristics, fillers, lubricants

1. WSTĘP

Podstawowym środkiem produkcji w przemyśle maszynowym są obrabiarki skrawające do metali. Pogłębia się zjawisko technicznego zużycia maszyn i urządzeń, szacuje się, że środki produkcji w tym przemyśle są zamortyzowane w 80%. Coraz powszechniejszą praktyką producentów obrabiarek stają się dostawy regenerowanego sprzętu (często w pełni zmodernizowanego), w systemie retrofitingu (modyfikacja konstrukcji) wprowadzającym szczegóły w nowej wersji. W ogólnych dostawach obrabiarek do metali udział maszyn po drobnych naprawach i modernizacji stanowi 20 – 25%. Niektóre wielkie firmy obrabiarkowe (np. Haas) tworzą własne oddziały remontowe swoich wyrobów często wykupowanych od byłych użytkowników w celu odsprzedaży [1-4]. Jednym z zasadniczych etapów remontu i modernizacji obrabiarek jest wyposażenie ich w nowe układy sterowania i regeneracja układów prowadnic. Regenerowane prowadnice ślizgowe wyposaża się w nakładki z tworzywa sztucznego lub w bloki toczne. Regenerację układu prowadnic można również przeprowadzić za pomocą kompozytu metalopolimerowego o określonym składzie jakościowym i ilościowym. Skorelowany dobór napełniaczy proszkowych, włóknistych oraz dodatków smarnych pozwala na uzyskanie materiału kompozytowego o korzystnych charakterystykach tarciovych, ograniczenie lub eliminację zjawiska stick – slip, zwiększenie odporności na zużycie i zmniejszenie współczynnika tarcia statycznego [5-9].

Celem pracy było zbadanie wpływu smarów stałych o spójności anizotropowej na charakterystyki tribologiczne kompozytów metalopolimerowych przeznaczonych do regeneracji układów prowadnicowych obrabiarek skrawających oraz porównanie charakterystyk tribologicznych skojarzeń kompozyt - stal ze skojarzeniem stal – stal.

2. PRZEDMIOT I METODY BADAŃ

Przedmiotem badań były kompozyty metalopolimerowe na osnowie chemoutwardzal-

nej żywicy epoksydowej (100 cz. wag.) napełnione proszkiem żelaza (Fe) o określonym składzie chemicznym i granulometrycznym (250 cz. wag.), włóknami poliaramidowymi (1 cz. wag.) oraz dodatkami smarnymi. Jako modyfikatory właściwości tribologicznych kompozytów zastosowano: grafit i dwusiarczek molibdenu w układzie pojedynczym i łączonym w ilości 20 cz. wag. na 100 cz. wag. osnowy polimerowej. Próbkę oznaczono odpowiednio symbolami G-20 (zawartość grafitu 20 cz. wag.), M-20 - (zawartość dwusiarczku molibdenu 20 cz. wag.), GM-20 - (zawartość grafitu i dwusiarczku molibdenu 20 cz. wag. w równych proporcjach). Wybór dodatków ślizgowych o budowie warstwowej wynikał z ich dobrych właściwości tribologicznych oraz fizykochemicznych (wykazują one obojętność chemiczną, nie wpływają na proces sieciowania kompozytu oraz są dobrze zwilżalne przez ciekłą osnowę polimerową).

Sposób wytwarzania kompozytów polegał na dokładnej homogenizacji sproszkowanego napełniacza metalicznego oraz dodatków smarnych i włókien aramidowych z ciekłą osnową polimerową w niskoobrotowym laboratoryjnym mieszalniku zetowym. Do sieciowania kompozytów zastosowano poliaminę alifatyczną (trietylenotetraaminę) w ilości stechiometrycznej (12 cz. wag) w stosunku do osnowy epoksydowej kompozytu. Proces sieciowania prowadzono w temperaturze pokojowej.

2.1. METODYKA BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

Ze względu na specyfikę połączenia tarcio-owego w układach prowadnic obrabiarek (minimalne prędkości, średnie naciski, ubogie smarowanie) szczególnie istotnymi właściwościami materiałów stosowanych na regeneracyjne warstwy wierzchnie są: współczynnik tarcia statycznego, współczynnik tarcia kinetycznego oraz odporność na zużycie.

Pomiary współczynnika tarcia statycznego opracowanych materiałów kompozytowych

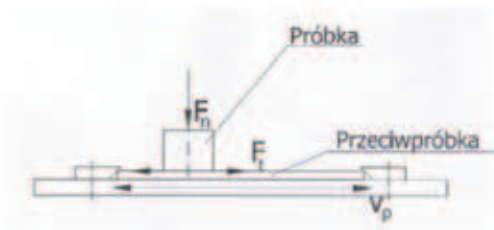
wykonano na specjalistycznym stanowisku z układem przystosowanym do badania tarcia ślizgowego w ruchu posuwisto – zwrotnym. Schemat kinetyczny i widok stanowiska przedstawiono na rysunku 1.

W zastosowanym układzie trącym próbka mocowana jest w nieruchomym uchwycie przez ramie obciążające. Ruch trący wykonuje natomiast przeciwpółka w kształcie płytki, wykonana z materiału kompozytowego. Do wyznaczenia współczynnika tarcia statycznego rejestrowano siłę potrzebną do zerwania kontaktu pomiędzy stalowym trzpieniem a płytką kompozytową. Siła tarcia F_t jest mierzona za pomocą tensometrycznego czujnika siły. Wózek z przeciwpółką wykonuje przesunięcie poprzez czujnik, za pomocą śruby mikrometrycznej.

Badania współczynnika tarcia statycznego opracowanych materiałów kompozytowych

prowadzono w zakresie typowych dla układów prowadnicowych obrabiarek nacisków jednostkowych: 0,1; 0,5; 1,0; 1,5 i 2 MPa, tarcie technicznie suche. Dla każdego materiału kompozytowego wykonano co najmniej dwie serie pomiarowe i minimum 10 pomiarów dla przyjętych wartości nacisków. Dla uzyskania dokładnego przylegania całej powierzchni trzpienia stalowego do materiału kompozytowego badania zasadnicze poprzedzone były procesem docierania - 5000 cykli przy nacisku 0,5 MPa.

Na tym samym stanowisku zbadano podatność badanych skojarzeń tarciovych na występowanie efektu stick – slip (drgań ciernych samowzbudnych). Badania przeprowadzone zostały przy bardzo małej, stałej prędkości ruchu ślizgowego wynoszącej $v_s = 0,005$ m/s. Trzpień stalowy o twardości 65 HRC i średnicy 8 mm wykonywał 5 przemiennych cykli tarcia. Naciski, przy jakich



Rys. 1. Schemat kinetyczny i widok stanowiska badawczego

Fig. 1. Kinematic scheme and view of the research station



Rys. 2. Przykładowy przebieg pomiarów siły tarcia statycznego i kinetycznego

Fig. 2. An example of the measurement of forces static and kinetic friction

wykonywano pomiary ($p = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$ MPa). Odczyt siły tarcia odbywał się z częstotliwością 10 Hz. Badane skojarzenia tarciove smarowano olejem maszynowym AN-46. Przykładowy przebieg zmian wartości siły tarcia statycznego i kinetycznego przedstawiono na rysunku 2.

Do zbadania różnic tarcia spoczynkowego i ruchowego zastosowano następującą procedurę.

1. Wyselekcjonowania „piku” siły tarcia statycznego,
2. Wyliczenie wartości średniej z pozostałego odcinka dla jednego cyklu (tarcie kinetyczne). W ten sposób dla 5 cykli uzyskujemy 10 wartości siły tarcia statycznego (5 pików w jedną stronę i 5 pików podczas tarcia w drugą stronę) oraz 10 wartości siły tarcia kinetycznego,
3. Wyznaczenie współczynników tarcia statycznego (μ_0) i kinetycznego (μ),
4. Wyliczenie stosunku μ/μ_0 – im wyliczona wartość jest bliższa jedności (mniejsza różnica pomiędzy współczynnikami tarcia statycznego i kinetycznego, tym mniejsza podatność danego skojarzenia materiałowego na występowanie efektu stick – slip).

W takich samych warunkach zbadano również współczynnik tarcia statycznego i kinetycznego typowego skojarzenia materiałowego w układach przewodnicowych stal – stal.

Charakterystyki tarciovo – zużyciowe kompozytów w ruchu posuwisto – zwrotnym wyznaczono z wykorzystaniem testera tribologicznego (Rys. 3).

Podstawowym elementem testera jest badany węzeł tarcia przedstawiony na rys.

3b składający się z nieruchomego trzpienia (stalowego), dociskanego siłą P do płytki wykonującej ruch posuwisto-zwrotny z określoną częstotliwością i amplitudą.

Na płytkę metalową nakładano i utwardzano warstwę kompozytu metalopolimerowego, a następnie obrabiano za pomocą szlifowania na określony wymiar wymagany dla testera. Urządzenie wyposażone jest w system komputerowej rejestracji i archiwizacji wyników pomiarów. Ocenę trwałości modelowego węzła tarcia prowadzono na podstawie pomiarów zużycia liniowego modelowego węzła tarcia.

Metodyka badań tribologicznych: współpraca stalowej płytki (o wymiarach 36x17 mm) z nałożoną, utwardzoną i obrobioną warstwą kompozytu metalopolimerowego (grubość 2 mm) z trzpieniem stalowym (ϕ 9 mm) o twardości 30 – 40 HRC w następujących warunkach: ruch ślizgowy posuwisto – zwrotny, styk rozłożony, nacisk stały w czasie trwania testu 200 N, amplituda 25 mm, częstotliwość 1 Hz, liczba cykli 20 000, smarowanie olejem maszynowym.

W czasie testów rejestrowano: siłę tarcia, temperaturę otoczenia węzła tarcia, liczbę cykli (drogę tarcia) oraz zużycie liniowe węzła tarcia. Dla celów porównawczych w tych samych warunkach wyznaczono również charakterystyki tarciovo – zużyciowe skojarzenia stal – stal.

3. WYNIKI BADAŃ

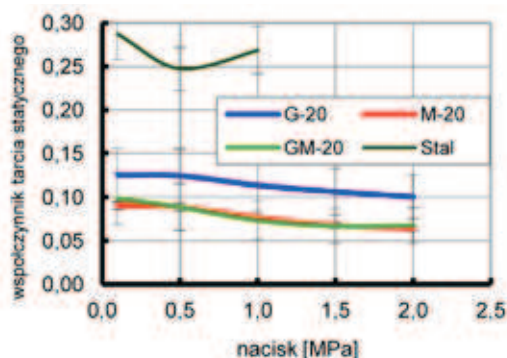
Na rysunku 4 przedstawiono przebieg zmian współczynnika tarcia dla badanych



Rys. 3. Widok testera tribologicznego (a) i skojarzenia badawczego (b)

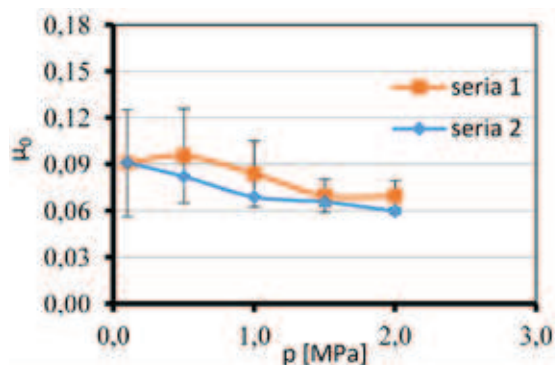
Fig. 3. View of tribological tester (a) and tested friction pairs (b)

skojarzeń materiałowych w zależności od nacisków, a na rysunkach 5÷7 przedstawiono przebieg zmian współczynnika tarcia dla wybranych kompozytów i stali w poszczególnych seriach pomiarowych.



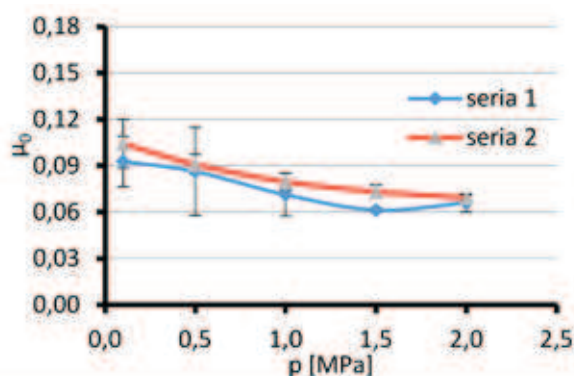
Rys. 4. Współczynnik tarcia statycznego badanych skojarzeń

Fig. 4. The coefficient of static friction of the tested friction pairs



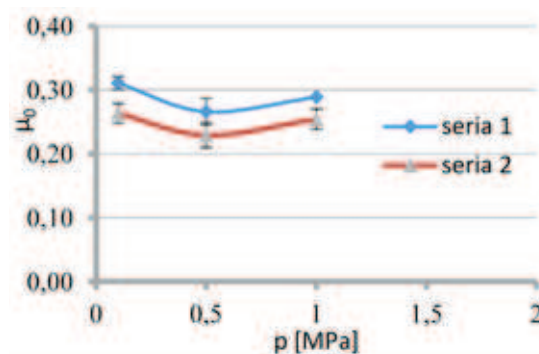
Rys. 5. Współczynnik tarcia statycznego dla kompozytu M-20

Fig. 5. The coefficient of static friction of the composite M-20



Rys. 6. Współczynnik tarcia statycznego dla kompozytu GM-20

Fig. 6. The coefficient of static friction of the composite GM-20



Rys. 7. Współczynnik tarcia statycznego dla stali

Fig. 7. The coefficient of static friction of the steel

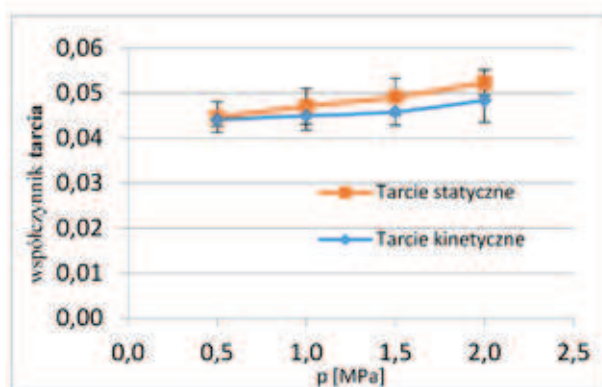
Z danych przedstawionych na wykresach (Rys. 4-7) wynika, że współczynnik tarcia statycznego w warunkach bezsmarowych skojarzeń kompozyty metalopolimerowe – stal, jest zróżnicowany. Wartość tego parametru jest uzależniona od rodzaju zastosowanego wewnętrznego smaru stałego. Kompozyt zawierający jako modyfikator tarcia grafit charakteryzuje się zdecydowanie większym współczynnikiem tarcia statycznego niż kompozyt zawierający dwusiarczki molibdenu w układzie pojedynczym

kompozytów jest ok. 3 – krotnie mniejszy niż skojarzenia stal – stal. Pomiary dla skojarzenia stal – stal przeprowadzono tylko dla nacisków 0,1 – 1,0 MPa dla większych wartości nacisków opory ruchu przekraczały zakres czujnika pomiarowego siły tarcia.

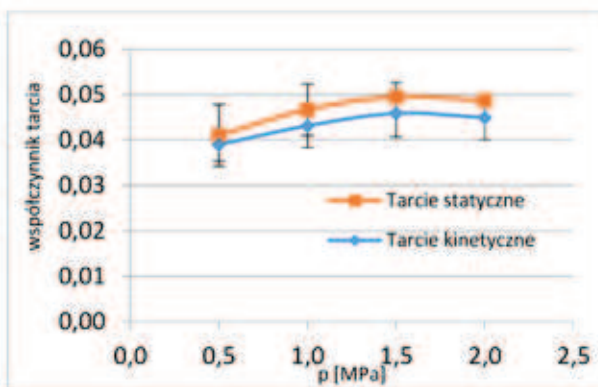
Oprócz współczynnika tarcia statycznego istotnym parametrem charakteryzującym połączenia przewodnicowe obrabiarek jest różnica pomiędzy współczynnikiem tarcia statycznego i kinetycznego w ruchu posuwisto zwrotnym

wpływająca na generowanie efektu stick – slip (drgań ciernych samowzbudnych) oddziałującego negatywnie na jakość obróbki skrawaniem. Na rysunku 8÷11 przedstawiono wyniki pomiarów współczynnika tarcia statycznego i ruchowego skojarzeń kompozyt – stal i skojarzenia stal – stal wg opisanej wyżej procedury.

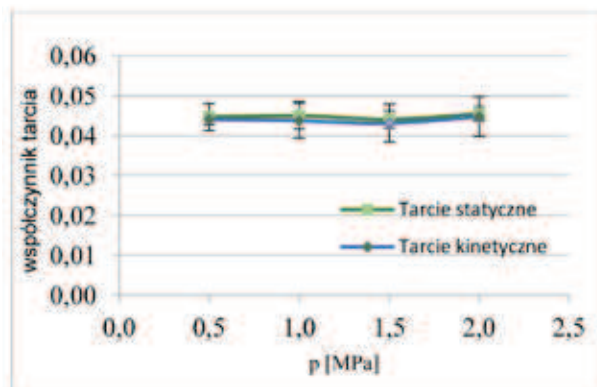
nie mniejsze są również różnice we współczynnikach tarcia statycznego i kinetycznego. Najmniejszą różnicę pomiędzy współczynnikiem tarcia kinetycznego i statycznego wykazuje kompozyt GM-20 (Rys. 10) iloraz (μ/μ_0) wynosi 0,986 jest więc bliski jedności, co znacznie ogranicza możliwość powstawania efektu stick – slip



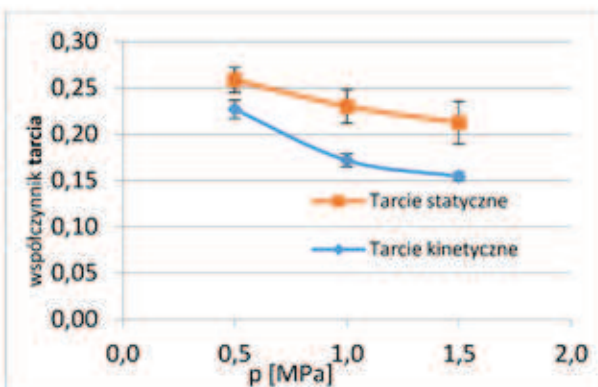
Rys. 8. Współczynnik tarcia statycznego i kinetycznego skojarzenia kompozyt G-20 – stal
Fig. 8. The coefficient of friction static and kinetic of composite G-20 - steel friction pair.



Rys. 9. Współczynnik tarcia statycznego i kinetycznego skojarzenia kompozyt M-20 – stal
Fig. 9. The coefficient of friction static and kinetic of composite M-20 - steel friction pair.



Rys. 10. Współczynnik tarcia statycznego i kinetycznego skojarzenia kompozyt GM-20 – stal
Fig. 10. The coefficient of friction static and kinetic of composite GM-20 - steel friction pair.



Rys. 11. Współczynnik tarcia statycznego i kinetycznego skojarzenia stal – stal
Fig. 11. The coefficient of friction static and kinetic of steel - steel friction pair.

Z wykresów przedstawionych na rysunku 8÷11 wynika, że współczynnik tarcia skojarzeń kompozyty polimerowe – stal jest kilkakrotnie mniejszy niż skojarzenia stal – stal, zdecydowa-

powodującego drgania układu. Iloraz (μ/μ_0) dla stali wynosi 0,789, ze względu na nadmierne drgania układu (wyraźny efekt stick – slip) niemożliwe było przeprowadzenie testów dla naci-

sków powyżej 1,5 MPa (Rys. 11). Korzystne charakterystyki kompozytu zawierającego binarny zestaw smarów stałych w skojarzeniu ze stalą mogą świadczyć o możliwej interakcji pomiędzy zastosowanymi dodatkami niskotarciowymi.

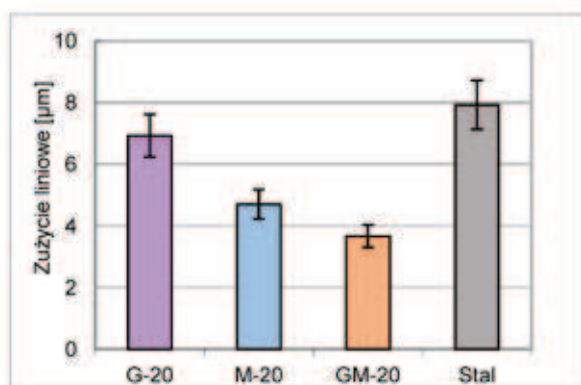
Na rysunku 12 przedstawiono zużycie liniowe badanych skojarzeń materiałowych w ruchu postępowo – zwrotnym na testerze tribologicznym, a na rysunku 13 przykładowy zapis zmian współczynnika tarcia i zużycia skojarzenia kompozyt GM-20 – stal.

Analiza wielkości zużycia liniowego badanych skojarzeń tarciovych wskazuje, że w przyjętych warunkach badań, charakterystycznych dla połączeń przewodnicowych obrabiarek skrawających, zużycie liniowe skojarzeń kompozyt

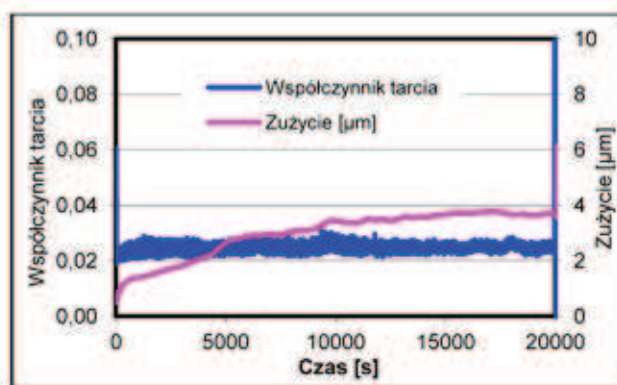
– stal jest znacznie mniejsze niż skojarzenia stal – stal. W przypadku badanych kompozytów metalopolimerowych na wielkość tego parametru wpływa rodzaj zastosowanego smaru stałego o spójności anizotropowej. Najmniejszym zużyciem charakteryzuje się skojarzenie, w którym kompozyt zawierający binarny zestaw dodatków smarnych (grafit i dwusiarczek molibdenu GM-20) współpracuje z trzpieniem stalowym.

MIKROSTRUKTURA POWIERZCHNI KOMPOZYTÓW

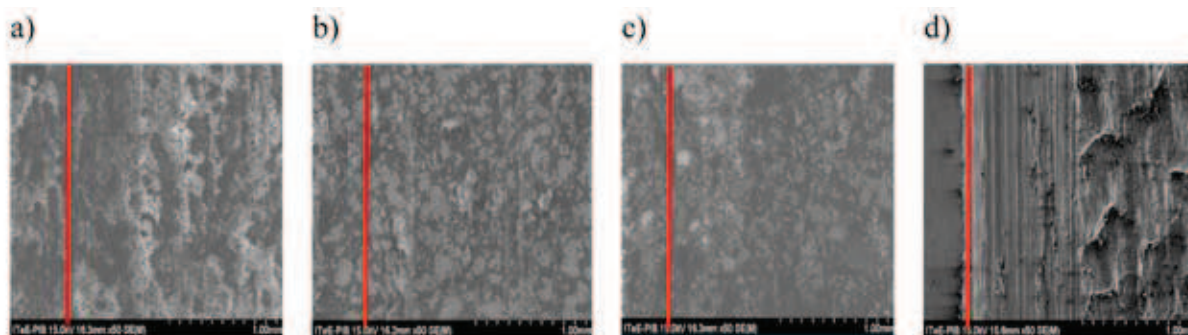
Z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) dokonano oceny stanu warstwy wierzchniej kompozytów i stali



Rys. 12. Zużycie liniowe węzła tarcia
Fig. 12. Linear wear of the friction node



Rys. 13. Przykładowy przebieg zmian współczynnika tarcia i zużycia dla skojarzenia kompozyt GM-20 – stal
Fig. 13. Example of changes in coefficient of friction and wear for composite GM-20 composite – steel friction pair



Rys. 14. Obrazy skaningowe powierzchni próbek po badaniach tribologicznych: a) kompozyt G-20, b) kompozyt M-20, c) kompozyt GM-20, d) stal

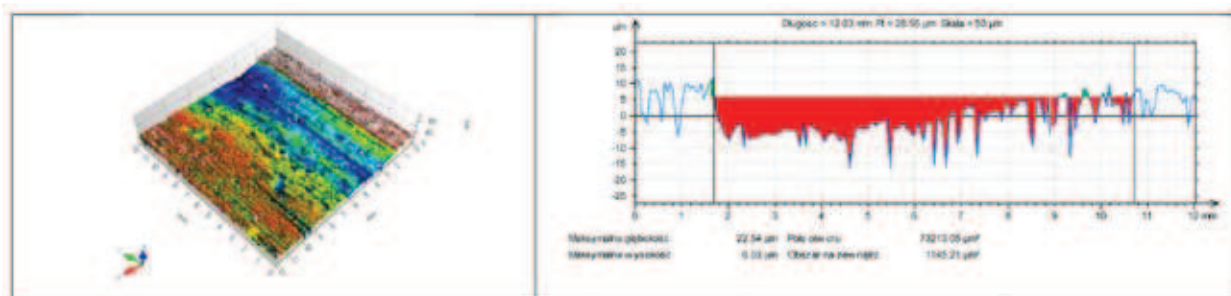
Fig. 14. Images from the scanning microscope of the sample surface after tribological studies: a) G-20 composite, b) M-20 composite, c) GM-20 composite, d) steel

po eksperymencie tribologicznym. Na rysunku 14 przedstawiono obraz powierzchni płytki z nałożoną warstwą kompozytów zawierających różne dodatki smarne oraz płytki stalowej po testach tarciovo-zużyciowych. Obszar po prawej stronie linii przedstawia powierzchnię objętą tarcieniem natomiast po lewej stronie jest to obraz powierzchni próbek poza obszarem tarcia.

Z przedstawionych obrazów powierzchni płytek z warstwą kompozytu polimerowego wynika, że jest ona gładka, bez wyraźnych śladów zużycia, pęknięć i rys powierzchniowych. Powierzchnia objęta tarcieniem nie wykazuje istotnych różnic w porównaniu z powierzchnią nie objętą współpracą tribologiczną. W przypadku kompozytu zawierającego grafit (Rys. 14a) możemy zaobserwować strukturę

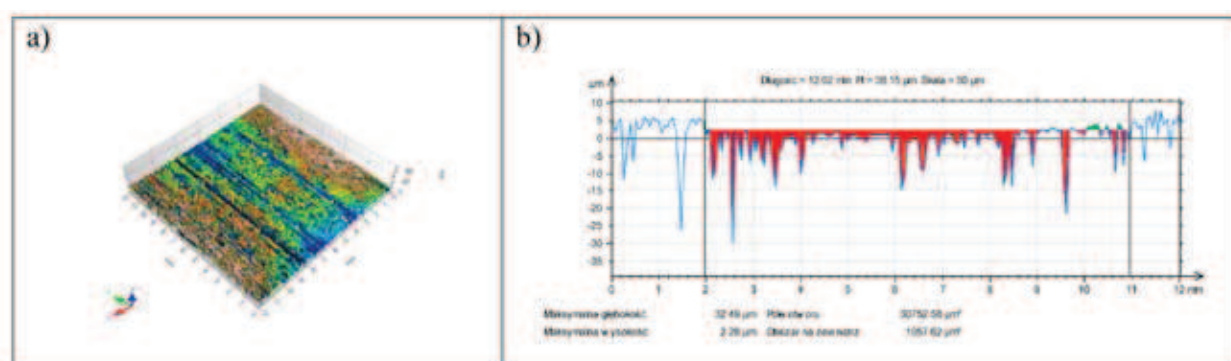
płatkową tego dodatku. Obrazy powierzchni kompozytów zawierających dwusiarczek molibdenu w układzie pojedynczym i łączonym (Rys. 14b,c) wskazują na dobre zdyspergowanie napełniaczy w osnowie polimerowej. Na obrazie mikroskopowym płytki stalowej (Rys. 14d) widać wyraźne ślady zużycia tribologicznego. Wygląd powierzchni stalowej płytki wskazuje, że dominującym rodzajem zużycia jest zużycie adhezyjne charakterystyczne dla współpracy elementów wykonanych z takich samych materiałów.

Niezależnie od obserwacji powierzchni próbek testowych z wykorzystaniem SEM dokonano pomiarów ich topografii i chropowatości powierzchni za pomocą profilografu. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 15÷18.



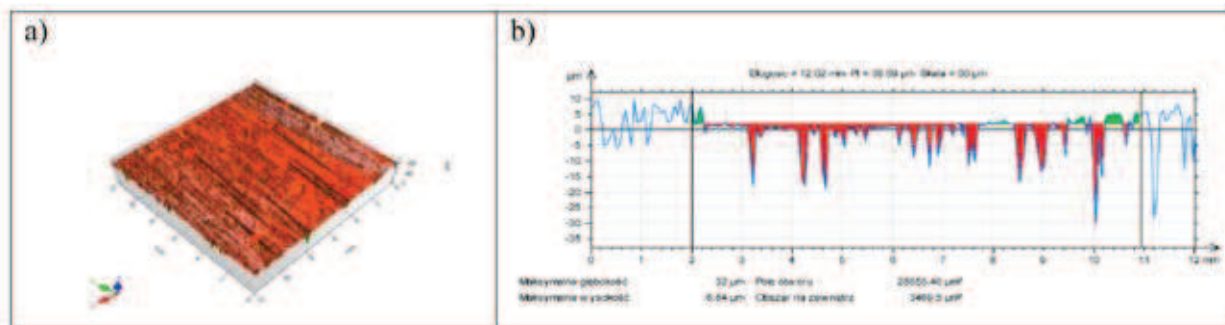
Rys. 15. Obraz powierzchni (a) i profil chropowatości (b) kompozytu z grafitem

Fig. 15. An image of the surface (a) and the roughness profile (b) a composite of graphite

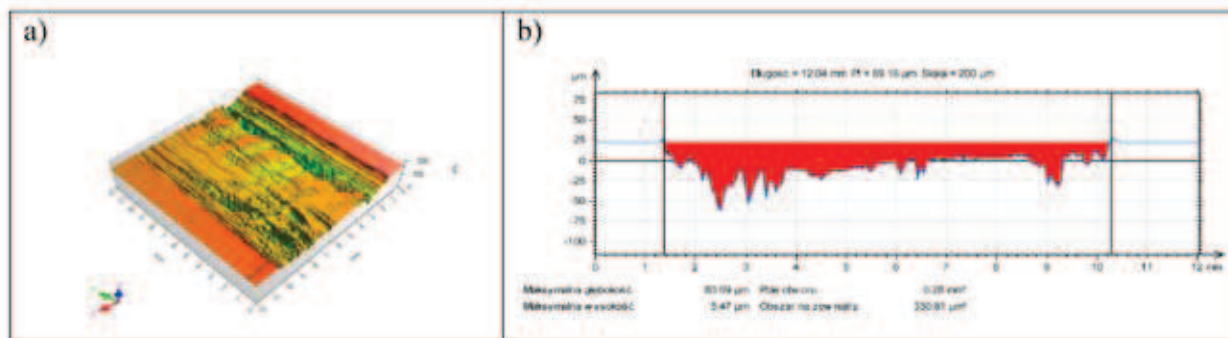


Rys. 16. Obraz powierzchni (a) i profil chropowatości (b) kompozytu z dwusiarczkiem molibdenu

Fig. 16. An image of the surface (a) and the roughness profile (b) a composite of molybdenum disulfide



Rys. 17. Obraz powierzchni (a) i profil chropowatości (b) kompozytu z dwusiarczkiem molibdenu i grafitem
 Fig. 17. Image of surface (a) and roughness profile (b) of molybdenum disulphide and graphite



Rys. 18. Obraz powierzchni (a) i profil chropowatości (b) próbki stalowej
 Fig. 18. An image of the surface (a) and the roughness profile (b) the steel of the sample

Na podstawie uzyskanych obrazów topografii powierzchni (Rys. 15÷18) można zaobserwować, że zależy ona w istotny sposób od rodzaju skojarzenia tj. składu jakościowego kompozytu metalopolimerowego. Z obrazów przedstawiających topografię powierzchni próbek kompozytowych wynika, że głównym mechanizmem ich zużywania jest rysowanie, bruzdowanie połączone z ewentualnym wykruszaniem stałych napełniaczy metalicznych i dodatków smarnych z usieciowanego kompozytu.

PODSUMOWANIE

Na podstawie uzyskanych wyników badań tribologicznych kompozytów polimerowych przeznaczonych do regeneracji układów pro-

wadnicowych obrabiarek skrawających można stwierdzić, że zastosowanie binarnego zestawu smarów stałych o spójności anizotropowej (kompozyt GM-20) wpływa korzystnie na statyczno – kinetyczne charakterystyki tarcia. Współczynnik tarcia statycznego oraz podatność na występowanie efektu stick – slip skojarzenia kompozyt GM-20 - stal jest zdecydowanie mniejszy niż dla pozostałych kompozytów i skojarzenia stal – stal. Kompozyt ten charakteryzuje się również dużą odpornością na zużycie w ruchu postępowo – zwrotnym. Wynika z tego, że zastosowanie jako komponentów binarnego układu dodatków smarnych powoduje, że ewentualne produkty zużycia są inkludowane w warstwie wierzchniej kompozytu tworząc warstwę o bardzo małej chropowatości i dużej odporności na zużycie

LITERATURA

5. Krzyżanowski J., Wojciechowski J., Wasiak Z., Wojciechowski T.: *Znaczenie modernizacji obrabiarek*. Mechanik 12/2001 s. 797.
6. Oczóś K.E.: *Obrabiarki skrawające – stan obecny na tle prognozy rozwoju*. Mechanik 12/2005 79 s. 973.
7. Honczarenko J.: *Elastyczna automatyzacja wytwarzania obrabiarki i systemy obróbkowe*. WNT Warszawa 2000.
8. Olszak W.: *Obróbka skrawaniem*. WNT Warszawa 2008.
9. Żach P.: *Materiały kompozytowe w zastosowaniach specjalnych maszyn. Tworzywa sztuczne i chemia* 2/2005 s. 16.
10. Koszkuł J.: *Prowadnice ślizgowe z tworzyw wielkocząsteczkowych*. Trybologia 1/1989 s. 13.
11. Pawelec Z., Molenda J.: *Tribological wear of metal-polymer composites in the presence of abrasives* Composites 1/2011, s. 23-29.
12. Pawelec Z., Molenda J.: *The application of metal-polymer composites In Technologies regenerating machines and structural components*. [In]: Mazurkiewicz A. (ed.): *Innovative technological solutions for sustainable development*. ITeE-PIB, Radom, 2010, s. 221-233.
13. Pawelec Z.: *Charakterystyki tribologiczne skojarzeń kompozyt metalopolimerowy – kompozyt*. Tribologia 5/2010 s. 105-116.

Data wpłynięcia artykułu do redakcji: 15-05-2017

Data akceptacji publikacji do druku: 09-06-2017