

Zbigniew PAWELEC*

CHARAKTERYSTYKI TRIBOLOGICZNE KOMPOZYTÓW POLIMEROWYCH W RUCHU POSUWISTO-ZWROTNYM

THE TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF POLYMER COMPOSITES OPERATING IN RECIPROCATING MOTION

Słowa kluczowe:

kompozyt polimerowy, obrabiarki, układy prowadnicowe, ruch posuwisto-zwrotny, tarcie zużycie

Key words:

polymer composite, machine tools, guides, reciprocating motion, friction, wear

Streszczenie

W artykule przedstawiono charakterystyki tribologiczne kompozytów polimerowych w ruchu posuwisto-zwrotnym przeznaczonych do regeneracji suportów obrabiarek skrawających. Osnową kompozytów jest chemoutwardzalna żywica epoksydowa, podstawowym napełniaczem proszek żelaza, a modyfikatorami właściwości tribologicznych smary stałe o spójności anizotropowej: grafit i dwusiarczek molibdenu. Na podstawie wstępnych wyników badań właściwo-

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

ści mechanicznych, współczynnika tarcia spoczynkowego oraz efektu stick-slip wytypowano serię kompozytów o najlepszych właściwościach do badań tarciovo-zużyciowych. Odporność kompozytów na zużycie tribologiczne wyznaczono z użyciem testera T-17. Badania przeprowadzono w następujących warunkach: obciążenie 100 N, częstotliwość 1 Hz, amplituda 25 mm, liczba cykli 20 000, przy smarowaniu olejem maszynowym. W tych samych warunkach wyznaczono również charakterystyki tribologiczne skojarzenia: stal–stal. Dla identyfikacji mechanizmów zużywania kompozytu przeprowadzono obserwację powierzchni tarcia z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) oraz wykonano pomiary struktury geometrycznej powierzchni. Określono wpływ smarów stałych na zużycie skojarzenia kompozyt–stal. Analiza otrzymanych wyników badań wykazała istotny wpływ rodzaju i udziału wagowego zastosowanych dodatków smarnych na odporność na zużycie kompozytów polimerowych. Najlepsze efekty w zakresie zwiększenia ich odporności na zużycie uzyskano, stosując binarny zestaw dodatków smarowych.

WPROWADZENIE

Problemy tribologicznego zużywania się prowadnic są niezwykle ważne dla obrabiarek, mają one bowiem istotny wpływ na roboczą dokładność oraz dłuższy lub krótszy okres ich użytkowania. Problemom tym poświęcono wiele uwagi od samego początku budowania obrabiarek i są one nadal aktualne. Procesy tarcia i jego skutki odnoszą się w tym przypadku do połączeń ruchowych i są rozpatrywane w odpowiednio dużej skali czasu. Podstawowymi skutkami tarcia są ubytki materiału i zmiana geometrii powierzchni ślizgowych oraz zmiana ich właściwości fizycznych. Zużycie ściernie prowadnic narasta w czasie i zmienia trajektorię ruchu narzędzia skrawającego względem przedmiotu obrabianego. W efekcie zmniejsza się dokładność obrabiarki i pogarszają warunki jej pracy. [L. 1–4].

W budowie nowoczesnych obrabiarek skrawających znajdują zastosowanie nowe i niekonwencjonalne materiały konstrukcyjne, które wpływają na lepsze ukształtowanie ich właściwości eksploatacyjnych, dynamicznych i termicznych. Do materiałów tych zaliczyć można tworzywa sztuczne, ceramikę i materiały kompozytowe. Zastosowanie polimerów i kompozytów na ich podstawie ma za zadanie wpłynąć na parametry pracy obrabiarek skrawających, zwiększyć dokładność wymiarową wytwarzanych układów przez wyeliminowanie niekorzystnych cech materiałów. W przypadku układów prowadnicowych coraz częściej w konstrukcji obrabiarek nowych sterowanych numerycznie stosowane są prowadnice toczne, hydro- i aerostatyczne [L. 5–8].

Jednak w przypadku konwencjonalnych obrabiarek przeważają do tej pory prowadnice ślizgowe, w których występują drgania cienne samowzbudne, i które w wyniku zużycia poddawane są procesom regeneracji. Regenerację

suportu obrabiarki można przeprowadzić z wykorzystaniem taśm z tworzywa sztucznego (politetrafluoroetylen) lub metodą odwzorowania, stosując chemoutwardzalne kompozyty polimerowe [L. 9–11].

Celem pracy było zbadanie wpływu smarów stałych o budowie warstwowej na zużycie i współczynnik tarcia kompozytów polimerowych w ruchu posuwisto-zwrotnym, przeznaczonych do regeneracji prowadnic płaskich obrabiarek skrawających.

PRZEDMIOT I METODY BADAŃ

Przedmiotem badań były kompozyty metalopolimerowe na osnowie chemoutwardzalnej żywicy epoksydowej (100 cz. wag.) napełnionej 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. 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). Na podstawie uzyskanych wyników badań właściwości mechanicznych, współczynnika tarcia statycznego oraz statyczno-dynamicznych charakterystyk tarcia (efekt stick-slip) kompozytów, do badań tarciovo zużyciowych w ruchu posuwisto-zwrotnym wytypowano kompozyty z udziałem 10 i 20 cz. wag. smarów stałych w układzie pojedynczym i binarnym.

Tabela 1. Udział wagowy dodatków niskotarciowych w podstawowym składzie kompozytów
Table 1. The mass share of low-friction additives in the composites

Rodzaj dodatku niskotarciowego					
Grafit		Dwusiarczek molibdenu		Układ binarny dodatków grafit + dwusiarczek molibdenu	
Udział wagowy dodatków na 100 cz. wag. osnowy epoksydowej					
10	20	10	20	10	20
Symbol próbki					
G-10	G-20	M-10	M-20	GM-10	GM-20

Sposób wytwarzania kompozytów polegał na dokładnej homogenizacji sproszkowanych napełniaczy metalicznych 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.

METODY BADAŃ

Oprócz właściwości mechanicznych oraz statyczno-kinetycznych charakterystyk tarcia kompozytów polimerowych, przeznaczonych do regeneracji prowadnic płaskich obrabiarek istotna jest również ich odporność na zużywanie wpływająca w określonym przedziale czasowym na dokładność obróbki. Charakterystyki tarciovo-zużyciowe kompozytów w ruchu posuwisto-zwrotnym wyznaczono z wykorzystaniem testera T-17 (**Rys. 1**).

Podstawowym elementem testera jest badany węzeł tarcia przedstawiony na **Rys. 1b** 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.



Rys. 1. Widok testera tribologicznego T-17 (a) i skojarzenia badawczego (b)
Fig. 1. The view of T-17 tribotester (a) and tribosystem (b)

Metodyka badań tribologicznych: współpraca stalowej płytki (wymiarach 36 x 17 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 100 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.

Ze względu na brak możliwości precyzyjnego określenia współczynnika tarcia w czasie badań tarciovo-zużyciowych dla wyznaczenia tego parametru konieczne było zastosowanie następującej procedury: obciążenie węzła 100 N, czas badania 300 s, liczba cykli 300, amplituda 25 mm. Przy rejestracji stosowano częstotliwość pomiarów 10 Hz, bez filtrów uśredniających. Wartość współczynnika tarcia obliczano jako iloraz wartości chwilowych siły tarcia i obciążenia. Z wykresu odczytywano wartości maksymalne i minimalne. Jako wynik pomiaru przyjmowano wartość średnią z bezwzględnych maksymalnych wartości chwilowych współczynnika tarcia.

Metodyka badań mikroskopowych

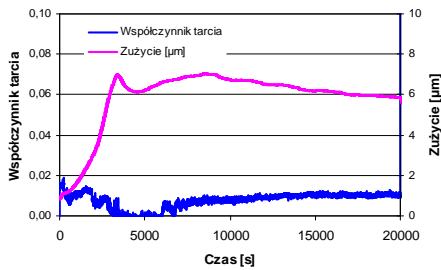
Do badania stanu powierzchni kompozytów wykorzystano skaningowy mikroskop elektronowy (SEM) S 2460N firmy Hitachi z możliwością badań w niskiej próżni, detektor z dyspersją energii (EDS) firmy Noran z okienkiem Norvar i kryształem SiLi o rozdzielczości 133 eV, elektronicznie sprzężony z mikroskopem. Parametry badań: napięcie przyspieszające 15 kV, próżnia wysoka, detektor SE, powiększenie 50x.

Metodyka badań stereometrii powierzchni

Do pomiaru chropowatości powierzchni elementów testowych, rejestrowania profilu śladu tarcia oraz topografii powierzchni zastosowano profilograf Form Talysurf PGI 830 firmy Taylor Hobson z systemem do pomiaru chropowatości, falistości i kształtu metodą stykową. Pomiar realizowany jest za pomocą czujnika z głowicą laserową PGI 830, która przesuwa się wzdłuż badanej powierzchni. Oprogramowania Ultra i TalyMap Platinum umożliwiają zarówno analizę 2D (profile), jak i 3D (topografia).

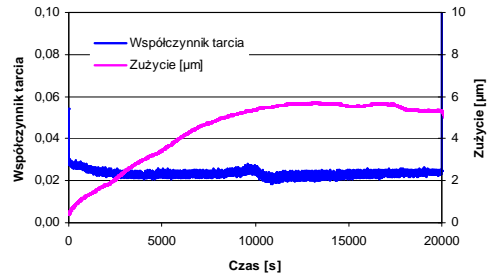
WYNIKI BADAŃ

Na **Rys. 2–8** przedstawiono przykładowe charakterystyki tribologiczne badanych kompozytów polimerowych w skojarzeniu z trzpieniem stalowym.



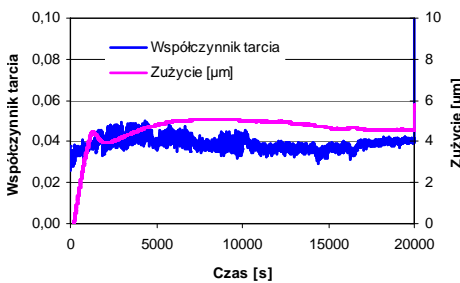
Rys. 2. Przykładowy przebieg zmian współczynnika tarcia i zużycia skojarzenia kompozyt G-10 – stal

Fig. 2. The example of friction force and wear curves for G-10-steel tribosystem



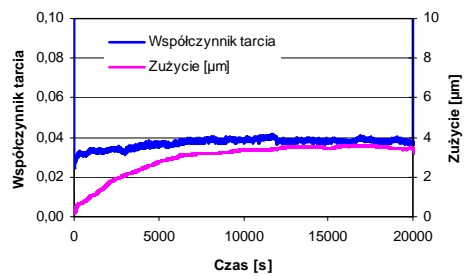
Rys. 3. Przykładowy przebieg zmian współczynnika tarcia i zużycia skojarzenia kompozyt G-20 – stal

Fig. 3. The example of friction force and wear curves for G-20-steel tribosystem



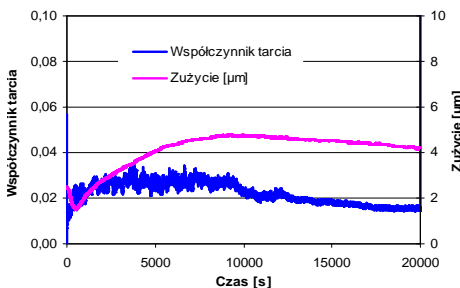
Rys. 4. Przykładowy przebieg zmian współczynnika tarcia i zużycia skojarzenia kompozyt M-10 – stal

Fig. 4. The example of friction force and wear curves for M-10-steel tribosystem



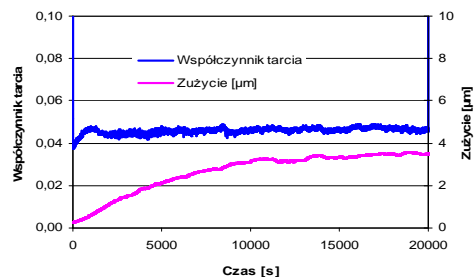
Rys. 5. Przykładowy przebieg zmian współczynnika tarcia i zużycia skojarzenia kompozyt M-20 – stal

Fig. 5. The example of friction force and wear curves for M-20-steel tribosystem



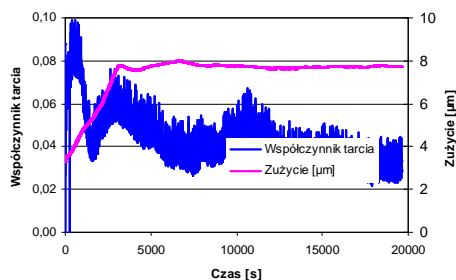
Rys. 6. Przykładowy przebieg zmian współczynnika tarcia i zużycia skojarzenia kompozyt GM-10 – stal

Fig. 6. The example of friction force and wear curves for GM-10-steel tribosystem



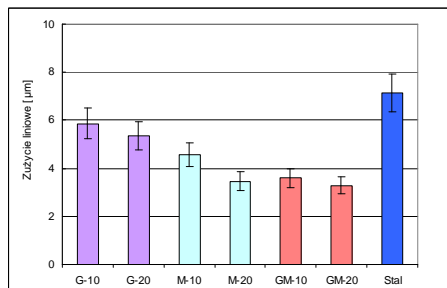
Rys. 7. Przykładowy przebieg zmian współczynnika tarcia i zużycia skojarzenia kompozyt GM-20 – stal

Fig. 7. The example of friction force and wear curves for GM-20-steel tribosystem



Rys. 8. Przykładowy przebieg zmian współczynnika tarcia i zużycia skojarzenia stal–stal

Fig. 8. The example of friction force and wear curves for steel-steel tribosystem



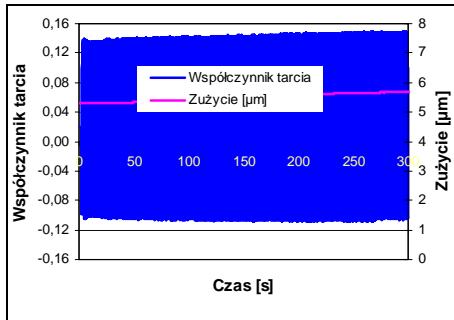
Rys. 9. Zużycie liniowe węzła tarcia

Fig. 9. The linear wear of the tribosystem

Z otrzymanych charakterystyk badanych skojarzeń materiałowych wynika, że największy przyrost zużycia modelowego węzła tarcia obserwujemy na początku trwania testu, po przebiegu ok. 40–50% drogi tarcia zmniejsza się intensywność zużywania i stabilizuje się ona na określonym stałym poziomie.

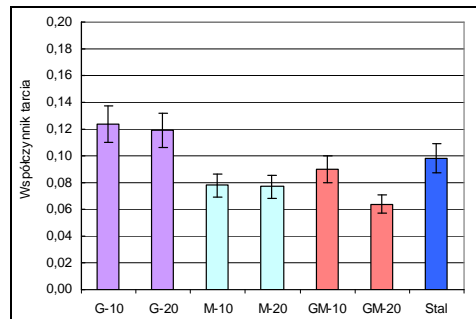
Otrzymane wyniki badań tribologicznych opracowanych materiałów kompozytowych wskazują, że większą odporność na zużywanie wykazują kompozyty z udziałem dwusiarczku molibdenu w układzie pojedynczym (M-20) oraz układzie łączonym z grafitem (GM-10 i GM-20). Zdecydowanie większe zużycie zarejestrowano dla skojarzenia, w którym stalowy trzpień współpracował z płytką z warstwą regeneracyjną z kompozytu polimerowego zawierającego jako modyfikator tarcia grafit. Mniejszy ciężar właściwy tego modyfikatora w porównaniu z dwusiarczkiem molibdenu powoduje, że jego objętość w usieciowanym kompozycie była zdecydowanie większa, co mogło wpłynąć niekorzystnie na zwilżalność cząstek napełniaczy przez ciekłą osnowę epoksydową, a tym samym spowodować pewne wady strukturalne objawiające się pogorszeniem kohezji między komponentami i spadkiem odporności na zużycie. Z analizy otrzymanych charakterystyk tarciovo-zużyciowych wytypowanych kompozytów polimerowych wynika, że w przyjętych warunkach badań tribologicznych charakteryzują się one większą odpornością na zużywanie niż skojarzenie stal–stal (**Rys. 9**).

Na **Rys. 10** przedstawiono przykładowy zapis zmian współczynnika w czasie pomiaru, a na **Rys. 11** wartości współczynnika tarcia skojarzeń kompozyt–stal oraz stal–stal.



Rys. 10. Przykładowy zapis zmian współczynnika tarcia dla kompozytu z grafitem

Fig. 10. The example of friction force curve for the composite containing graphite



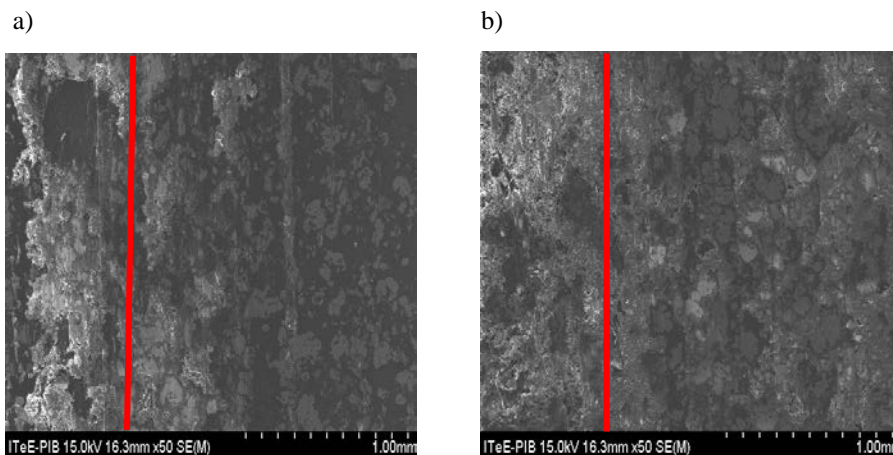
Rys. 11. Współczynnik tarcia badanych skojarzeń materiałowych

Fig. 11. The friction force for the investigated tribosystems

Z danych przedstawionych na **Rys. 11** wynika, że opory ruchu w większym stopniu zależą od rodzaju zastosowanego dodatku smarnego niż jego udziału wagowego w kompozycie. W przypadku grafitu i dwusiarczku molibdenu w układzie pojedynczym obserwujemy niewielką różnicę pomiędzy wartościami współczynników tarcia kompozytów z udziałem 10 cz. wag. oraz ilością dwukrotnie większą. Znacząco skuteczniejszym dodatkiem smarnym z odniesienia do zmniejszenia współczynnika tarcia jest dwusiarczek molibdenu niż grafit. Kompozyty zawierające ten rodzaj dodatku niskotarciowego zarówno w układzie pojedynczym, jak i w układzie binarnym w skojarzeniu w próbką stalową mają mniejszy współczynnik tarcia niż skojarzenie stal–stal. Najniższym współczynnikiem tarcia charakteryzuje się skojarzenie kompozyt GM-20 – stal, co koreluje z jego wysoką odpornością na zużycie.

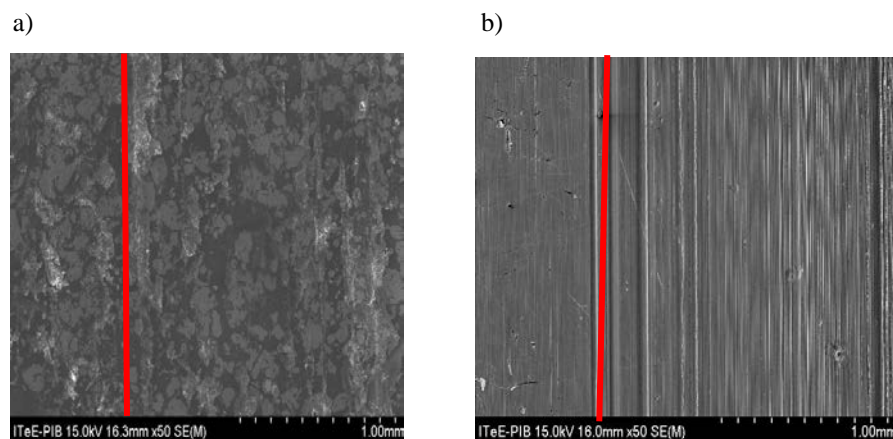
MIKROSTRUKTURA POWIERZCHNI KOMPOZYTÓW

Wykorzystując skaningowy mikroskop elektronowy, dokonano oceny stanu warstwy wierzchniej kompozytów i stali po eksperymencie tribologicznym. Na **Rys. 12 i 13** 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 tarciami, natomiast po lewej stronie jest to obraz powierzchni próbek poza obszarem tarcia.



Rys. 12. Obraz powierzchni płytki z warstwą kompozytu G-20 (a) i M-20 (b) po badaniach tribologicznych

Fig. 12. The images of the wear track on the test plate for: a) G-20 composite, b) M-20 composite



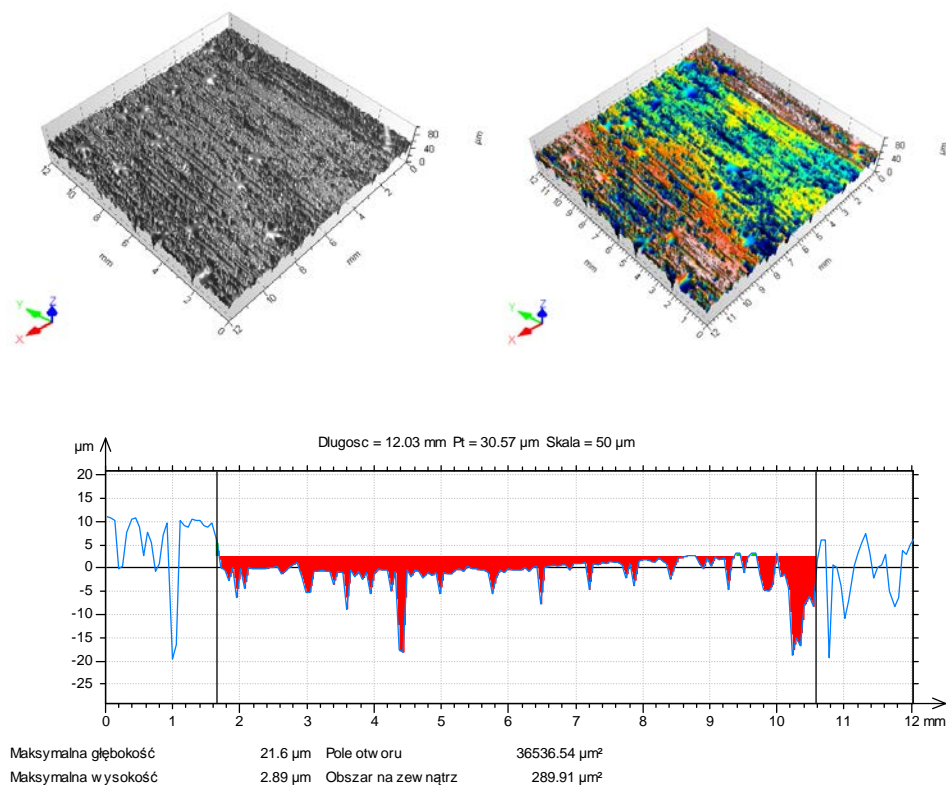
Rys. 13. Obraz powierzchni płytki z warstwą kompozytu GM-20 (a) i stali (b) po badaniach tribologicznych

Fig. 13. The images of the wear track on the test plate for: a) GM-20 composite, b) steel

Na przedstawionych obrazach powierzchni kompozytów zawierających pojedyncze dodatki smarne (**Rys. 12**) istnieje różnica pomiędzy morfologią powierzchni objętej współpracą tribologiczną a powierzchnią nieobjętą tarcieniem. Natomiast w przypadku kompozytu zawierającego binarny zestaw dodatków (**Rys. 13a**) stwierdzono niewielki wpływ testu tribologicznego na stan powierzchni kompozytu, jest ona stosunkowo gładka, bez widocznych objawów zużycia, pęknięć i rys powierzchniowych. Ponadto można zaobserwować dobrą

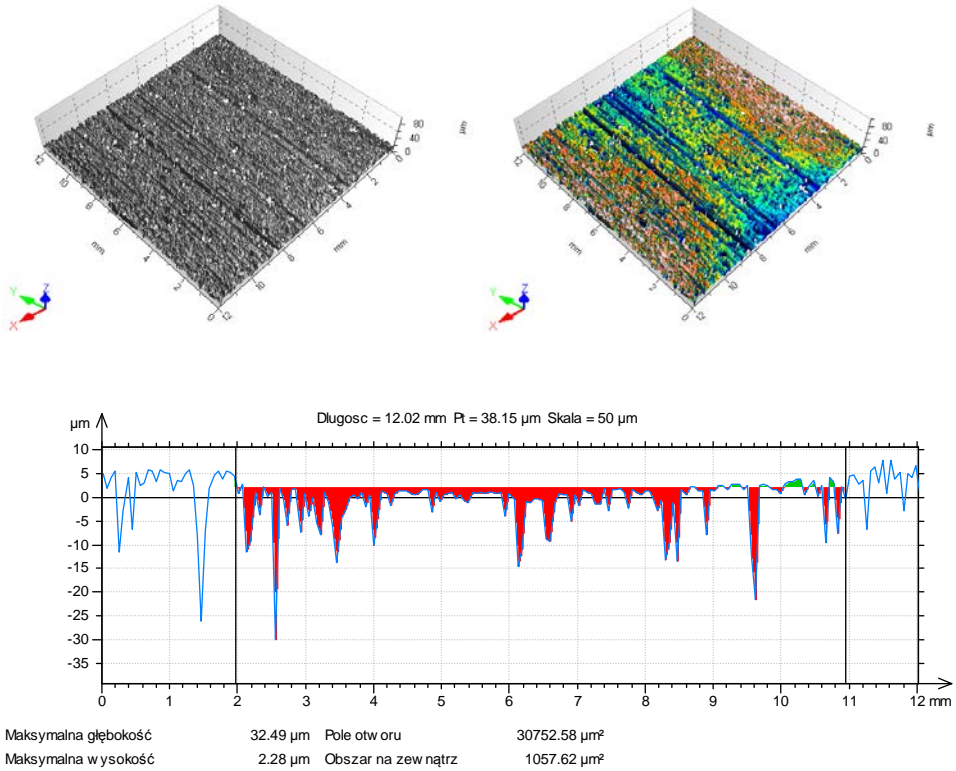
dystrybucję napełniaczy i dodatków smarnych w chemoutwardzalnej matrycy polimerowej. Skaningowy obraz powierzchni płytki stalowej po współpracy z trzpieniem wykonany również ze stali przedstawiono na **Rys. 13b**. Na powierzchni stalowej próbki widoczne są wyraźne rysy mogące świadczyć, że dominującym rodzajem zużycia jest zużycie ściernie.

Oprócz obserwacji powierzchni próbek testowych z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego dokonano pomiarów ich topografii i chropowatości powierzchni za pomocą profilografu. Wyniki badań przedstawiono na **Rys. 14–16**.



Rys. 14. Obraz powierzchni i profil chropowatości kompozytu z grafitem

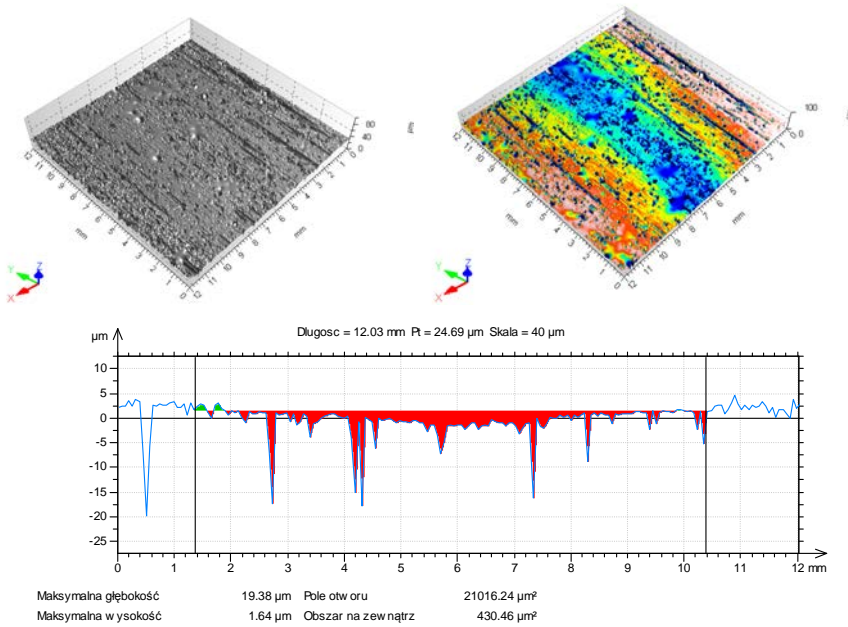
Fig. 14. The image and roughness profile for the composite containing graphite



Rys. 15. Obraz powierzchni i profil chropowatości kompozytu z dwusiarczkiem molibdenu

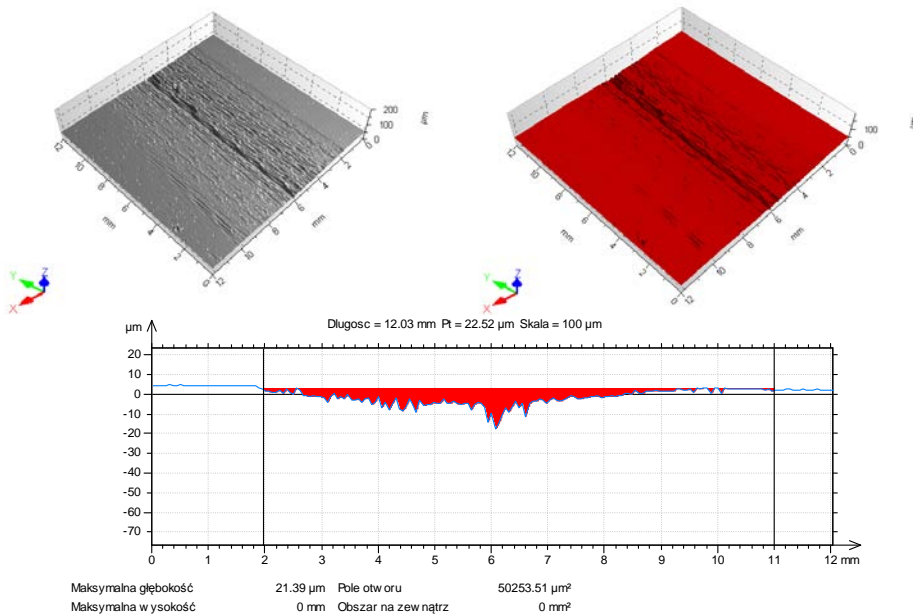
Fig. 15. The image and roughness profile for the composite containing molybdenum disulphide

Chropowatość powierzchni po testach tarciovo-zużyciowych zależy od rodzaju zastosowanych w kompozycie modyfikatorów właściwości tribologicznych. Najmniejszą chropowatością i najmniej zdestruowaną powierzchnią po badaniach tribologicznych charakteryzuje się kompozyt z udziałem łączonych dodatków smarnych (grafitu i dwusiarczku molibdenu). Większą chropowatość powierzchni w porównaniu z kompozytami wykazuje próbka stalowa. Z obrazów przedstawiających topografię powierzchni próbek kompozytowych wynika, że głównym mechanizmem ich zużywania jest rysowanie, brzdowanie połączone z ewentualnym wykruszaniem stałych napełniaczy metalicznych i dodatków smarnych z usieciowanego kompozytu.



Rys. 16. Obraz powierzchni i profil chropowatości kompozytu z grafitem i dwusiarczkiem molibdenu

Fig. 16. The image and roughness profile for the composite containing graphite and molybdenum disulfide



Rys. 17. Obraz powierzchni i profil chropowatości próbki stalowej

Fig. 17. The image and roughness profile for the steel

PODSUMOWANIE

Uzyskane wyniki badań tarciovo-zużyciowych kompozytów polimerowych przeznaczonych do regeneracji układów przewodnicowych obrabiarek wskazują, że zastosowanie jako modyfikatorów właściwości tribologicznych binarnego zestawu dodatków smarnych wpływa korzystnie na ich charakterystyki tribologiczne. Kompozyt zawierający łącznie grafit i dwusiarczek molibdenu charakteryzuje się największą odpornością na zużycie i najmniejszym współczynnikiem tarcia. Można przypuszczać, że dla tego skojarzenia podczas współpracy tarciowej kompozytu i stalowego trzpienia konstytuuje się eksploatacyjna warstwa wierzchnia, skutecznie rozdzielająca powierzchnie współpracy, przeciwdziałająca zużyciu i redukująca opory ruchu. Kompozyt ten charakteryzuje się również niewielkim współczynnikiem tarcia statycznego oraz najmniejszą podatnością na występowanie efektu stick-slip i może być stosowany na warstwy regeneracyjne suportów konwencjonalnych obrabiarek skrawających.

LITERATURA

1. Marchelek K.: Dynamika obrabiarek WNT, Warszawa 2000.
2. Honczarenko J.: Elastyczna automatyzacja wytwarzania obrabiarki i systemy obróbkowe. WNT, Warszawa 2000.
3. Olszak W.: Obróbka skrawaniem WNT, Warszawa 2008.
4. Liang Mi, Guo-fu Yin, Ming-nan Sunang, Ciao-hu Wang: Effects of preloads on joint on on Dinami stiffness of a whole machine tool structure. Journal of Mechanical Science and Technology 26 (2) 2012.
5. Oczó K.E.: Obrabiarki skrawające – stan obecny na tle prognozy rozwoju. Mechanik 2005 79 nr 12.
6. Honczarenko J.: Rozwój obrabiarek skrawających w aspekcie realizacji innowacyjnych technologii wytwarzania. Wrocław, Inżynieria Maszyn. Zeszyt 1/2006.
7. Oczó K.E.: Trendy rozwojowe obrabiarek produkcyjnych. Mechanik 2003, 76, nr 3.
8. Chung D.D.L.: Materials for vibration damping. Journal of Materiale Science 36, 2001.
9. Janecki J., Dasiewicz J., Pawelec Z.: Funkcje komponentów i aspekty praktycznego stosowania regeneracyjnych kompozytów polimerowych. Problemy Eksploatacji 3/2003.
10. Okulik T., Powoła B., Marchelek K.: Dynamika układu przewodnicowego montowanego z wykorzystaniem tworzywa EPY. Modelowanie Inżynierskie, 40, Gliwice 2010.
11. Żach P.: Materiały kompozytowe w zastosowaniach specjalnych maszyn. Tworzywa Sztuczne i Chemia, nr 2/2005.

Praca wykonana w ramach Programu Badawczego Rozwojowego nr N R15 0023 10 Metalopolimerowy kompozyt regeneracyjny przeznaczony do niskoodpadowej technologii regeneracji przewodnic płaskich obrabiarek skrawających.

Summary

The paper presents the results of the tribological results of the polymer composite performed under reciprocating motion that is intended for the regeneration of the cutting tool guides. The matrix of the composite is chemical-setting epoxy resin. The main filler is an iron oxide. The composite also included improving additives, mainly anisotropic solid lubricants – graphite and molybdenum disulphide. Based on the preliminary measurements of mechanical properties, the friction coefficient and the stick-slip effect, the set of the composites exhibiting the best properties were selected for further friction and wear tests. The wear resistance of the composites was tested using a T-17 tribotester. The research was conducted under the following conditions: 100N load, 1 Hz frequency, 25 mm amplitude, 20 000 cycles and lubrication with machine oil. Using the same parameters the tribological characteristics of steel-steel tribosystem were measured. Based on analytical investigations like scanning electron microscopy (SEM) and 3D topography measurements the wear mechanism was described. The effect of the solid lubricants on the wear of composite-steel tribosystem was elaborated. Based on obtained test results, it was concluded that mechanical and tribological properties depends on type and mass ratio of the used tribological modifiers. The most beneficial results were obtained for the composites containing mixed solid lubricants.