

Pawelec ZBIGNIEW*

ZUŻYCIE TRIBOLOGICZNE SKOJARZENIA KOMPOZYT–KOMPOZYT W OBECNOŚCI RÓŻNYCH MATERIAŁÓW ŚCIERNYCH

TRIBOLOGICAL WEAR OF A COMPOSITE–COMPOSITE SYSTEM IN THE PRESENCE OF DIFFERENT ABRASIVE MATERIALS

Słowa kluczowe:

kompozyt metalopolimerowy, charakterystyki tribologiczne, zużycie ściernie, elektrokorund, krzemionka

Key words:

metal-polymer composite, tribological characteristic, abrasive wear, electrocorund, silica

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań odporności na zużycie ściernie regeneracyjnych termo- i chemoutwardzalnych kompozytów metalopolimerowych oraz klasycznego skojarzenia konstrukcyjnego stal–stop łożyskowy. W badaniach zastosowano dwa rodzaje regeneracyjnych kompozytów chemoutwardzalnych, do sieciowania których zastosowano związki aminowe o zróżnicowanej budowie chemicznej i reaktywności (trietylenotetraamina oraz addukt amin

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

alifatycznych i aromatycznych), które umożliwiły uzyskanie kompozytów o zróżnicowanych właściwościach mechanicznych. Jako materiały ściernie zastosowano elektrokorund i krzemionkę o określonym składzie chemicznym i granulometrycznym. Kompozyty chemoutwardzalne nałożone na stalową rolkę i obrabione mechanicznie na żądany wymiar współpracowały z klockiem wykonanym z brązu oraz kompozytu metalopolimerowego na osnowie termoutwardzalnej żywicy fenolowo-formaldehydowej. Badania tarciovo-zużyciowe prowadzono na maszynie tribologicznej T-07 typu rolka-kłosek w styku rozłożonym w obecności materiału ściernego. Testy tribologiczne prowadzono przy prędkości 0,1 m/s i naciskach 1 MPa, nie stosując przy tym środków smarnych. Wykazano, że testowane skojarzenia, w których oba współpracujące elementy wykonane są z kompozytów polimerowych chemo- i termoutwardzalnych, charakteryzują się dużą odpornością na zużycie i mogą być z powodzeniem wykorzystane do regeneracji elementów maszyn pracujących w środowisku, w którym występują substancje ściernie.

WPROWADZENIE

Jednym z najczęściej występujących rodzajów zużycia podczas eksploatacji maszyn i urządzeń, przemysłu wydobywczego i górniczego, a także w eksploatowanych najczęściej w otoczeniu pyłów maszynach i urządzeniach, np. do robót ziemnych, jest zużycie ściernie. W procesie zużywania bierze udział ścierniwo przedostające się między powierzchnie trące, tzw. ciało trzecie, z reguły twardsze od obu partnerów tarcia. Zużywanie ściernie jest szczególnie intensywne w porównaniu z innymi rodzajami zużywania, w tym adhezyjnego i molekularno-mechanicznego. Dominuje wówczas zjawisko mikroskrawania twardymi cząstkami nieorganicznymi (np. krzemionką, korundem) warstwy wierzchniej współpracujących elementów. Intensywność zużywania ściernego współpracujących w parze trącej elementów jest wówczas wielokrotnie większa niż przy występowaniu (wyłącznym) innych rodzajów zużywania. Zużywanie ściernie może występować również i bez obecności ciała trzeciego – ścierniwa; ma to miejsce w sytuacji, w której współpracują ze sobą dwa ciała stałe – najczęściej metale o dużej różnicy twardości. Ten rodzaj zużywania ściernego powoduje jednak mniejszy ubytek materiału niż zużycie ściernie z obecnością ścierniwa nieorganicznego [L. 1–7].

Eksploatacja urządzeń technicznych w warunkach oddziaływania materiałów ściernych wymusza konieczność stosowania na węzły tarcia odpowiednich materiałów o wysokiej twardości uzyskiwanej za pomocą obróbki cieplnej lub ciepłno-chemicznej. Niemniej jednak w wielu przypadkach niezbędna jest szybka naprawa zużytych elementów. Jednym ze sposobów może być zastosowanie na warstwy wierzchnie chemoutwardzalnych kompozytów metalopolimerowych, które będą zdolne do utworzenia swoistej „warstwy ochronnej” o pod-

wyższej odporności erozyjnej niepowodującej jednocześnie nadmiernego zużycia elementu współpracującego. Zakłada się, że efekt taki jest możliwy do uzyskania przez zastosowanie odpowiednio ukształtowanego kompozytu metalopolimerowego, zdolnego do adhezyjnego umocowania w nim cząstek ścierniwa, gwarantującego jednocześnie odporność na odkształcenie postaciowe. Badania rozpoznawcze wykazały, że kompozyty metalopolimerowe, o mniejszej twardości niż metal, w skojarzeniu tarciovym w obecności materiału ściernego wykazują także dużą odporność na zużycie.

Celem pracy było zbadanie przydatności kompozytów metalopolimerowych chemoutwardzalnych jako materiałów regeneracyjnych na warstwy wierzchnie łożysk ślizgowych narażonych na zużycie ściernie, oraz możliwość zastosowania na materiał panewki, zamiast stopu łożyskowego lub stali, kompozytu termoutwardzalnego.

PRZEDMIOT I METODYKA BADAŃ

Przedmiotem badań były kompozyty chemoutwardzalne na osnowie żywicy epoksydowej Epidian-5 napełnionej proszkiem żelaza, grafitem i organicznymi włóknami poliaramidowymi. Do sieciowania kompozytów zastosowano dwa rodzaje utwardzaczy aminowych:

- trietylenotetraaminę: gęstość w 20°C – 0,985 g/cm³, liczba aminowa – 490 mg KOH/g, ilość utwardzacza – 12 cz. wag. na 100 cz. wag żywicy,
- TFF – produkt reakcji fenolu formaldehydu i drugorzędowej poliaminy: gęstość w 20°C – 1,1 g/cm³, liczba aminowa – 610 mg KOH/g, ilość utwardzacza – 26 cz. wag. na 100 cz. wag. żywicy, lepkość w 25°C ok. 10000 mPas.

Kompozyty utwardzono w temperaturze pokojowej przez siedem dni. W zależności od zastosowanego utwardzacza uzyskano kompozyty o różnicowanych właściwościach mechanicznych, które oznaczono symbolami:

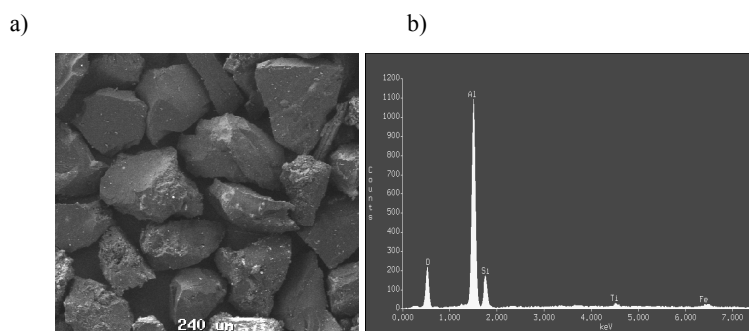
KE-1 – kompozyt usieciowany aminą alifatyczną – trietylenotetraaminą, posiadający twardość wg Brinella 260 MPa i wytrzymałość na ściskanie 97 MPa.

KE-2 – kompozyt usieciowany produktem reakcji fenolu, formaldehydu i drugorzędowej poliaminy (TFF) o twardości Brinella 304 MPa i wytrzymałości na ściskanie 92 MPa.

Jako materiał przeciwpróbki (klocka) w badaniach tribologicznych oprócz stopu łożyskowego (brązu) zastosowano kompozyt termoutwardzalny na osnowie żywicy fenolowo-formaldehydowej z proszkiem żelaza i grafitem oznaczony symbolem KF. Dla celów porównawczych przedstawiono również wyniki badań tarciovo-zużyciowych klasycznego skojarzenia konstrukcyjnego stal ŁH15-brąz.

RODZAJE MATERIAŁÓW ŚCIERNYCH ZASTOSOWANYCH W BADANIACH

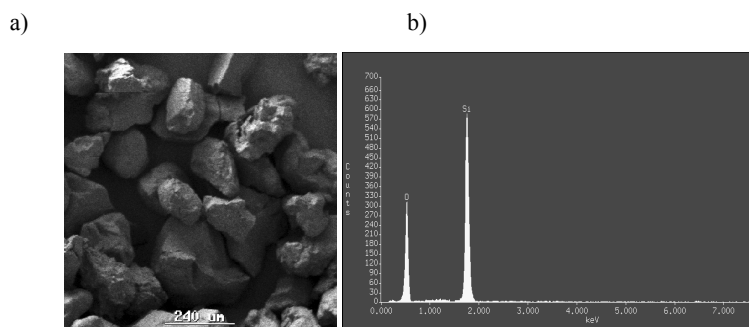
Problem zużycia ściernego dotyczy często maszyn oraz urządzeń przemysłu górniczego i wydobywczego, gdzie dominują ścierniwa o ostrych krawędziach, znacznej twardości i składzie chemicznym zbliżonym do elektrokorundu, który był jednym z testowych materiałów ściernych. Na **Rys. 1** przedstawiono obraz z mikroskopu skaningowego i skład pierwiastkowy elektrokorundu. Na podstawie uzyskanego zdjęcia mikroskopowego można stwierdzić, że cząstki tego materiału ściernego posiadają ostre krawędzie i nieregularny kształt. Widmo promieniowania rentgenowskiego pokazuje, że jest to głównie tlenek aluminium zawierający śladowe ilości krzemu.



Rys. 1. Obraz mikroskopowy elektrokorundu (pow. 100×) (a) i widmo EDS z powierzchni elektrokorundu (b)

Fig. 1. The SEM image of electrocorundum (100×) (a); the EDS spectrum of electrocorundum surface (b)

Intensywne zużycie ściernie występuje również w maszynach i urządzeniach do robót ziemnych i maszynach rolniczych. Głównym składnikiem ścierniwa, które występuje w tym środowisku, jest krzemionka, której obraz mikroskopowy oraz widmo EDS obrazujące skład chemiczny przedstawiono na **Rys. 2**.



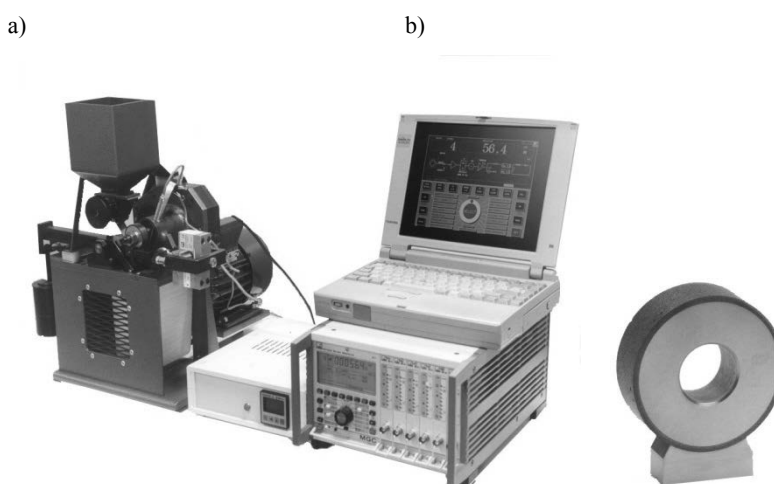
Rys. 2. Obraz mikroskopowy krzemionki (pow. 100×) (a) i widmo EDS z powierzchni krzemionki (b)

Fig. 2. The SEM image of silica (100×) (a); the EDS spectrum of silica surface (b)

Na podstawie otrzymanego obrazu można powiedzieć, że ziarna tego ścierniwa posiadają nieregularny, zbliżony do obłego kształt, a ich krawędzie nie są tak ostre jak w przypadku elektrokorundu. Widmo promieniowania rentgenowskiego wskazuje, że jest to czysty dwutlenek krzemu.

METODYKA BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

Badania tarciovo-zużyciowe różnych skojarzeń materiałowych prowadzono na maszynie tribologicznej T-07 typu rolka–klocek przedstawionej na **Rys. 3**. Zastosowano grawitacyjny sposób podawania materiału ściernego ze zbiornika wyposażonego w urządzenie dozujące.



Rys. 3. Urządzenie do badań tribologicznych: a) widok stanowiska badawczego, b) widok modelowego węzła tarcia

Fig. 3. The view of device for tribological tests: a) the view of the device, b) the view of exemplary friction couple

Do badań jako próbek użyto stalowych rolek z nałożoną, utwardzoną i obrobioną mechanicznie, na żądany wymiar, warstwą kompozytów chemoutwardzalnych (KE-1, KE-2), przeciwpróbki w postaci klocka wykonano z brązu łożyskowego i kompozytu termoutwardzalnego (KF). Dla celów porównawczych wyznaczono także charakterystyki tribologiczne skojarzenia stal łożyskowa ŁH-15 (twardość 56–60 HRC)–brąz (twardość 85 – 88 HRB). Dla każdego skojarzenia przeprowadzono co najmniej trzy biegi badawcze w obecności wytypowanych materiałów ściernych.

Ponieważ w rzeczywistych warunkach eksploatacji szereg maszyn i urządzeń pracuje przy stosunkowo niewielkich prędkościach poślizgu i małych naciskach jednostkowych, przyjęto następujące warunki prowadzenia testów tar-

ciowo-zużyciowych: rodzaj styku – rozłożony, prędkość poślizgu $v_{sr} = 0,1$ m/s, nacisk jednostkowy $p = 1$ MPa, droga tarcia $S_{sr} = 1000$ m, objętość materiału ściernego ok. 300 ml (na jeden bieg badawczy), tarcie suche. Podczas badań tribologicznych mierzono siłę tarcia, prędkość obrotową oraz temperaturę masową klocka. Uwzględniając różną gęstość, przedstawiono zużycie objętościowe badanych materiałów.

WARUNKI BADAŃ SEM-EDS

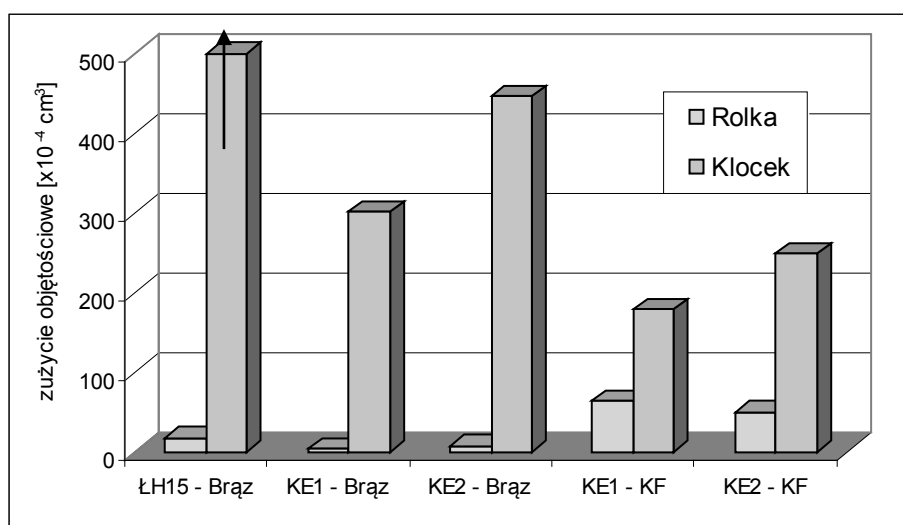
Zmiany w składzie eksploatacyjnej warstwy wierzchniej określono za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego. Mikroanalizator promieniowania rentgenowskiego z dyspersją energii (EDS) posłużył do identyfikacji poszczególnych pierwiastków znajdujących się we wzbudzonej mikroobszarze próbki (analiza jakościowa).

Podczas obserwacji stosowano następujące parametry pracy:

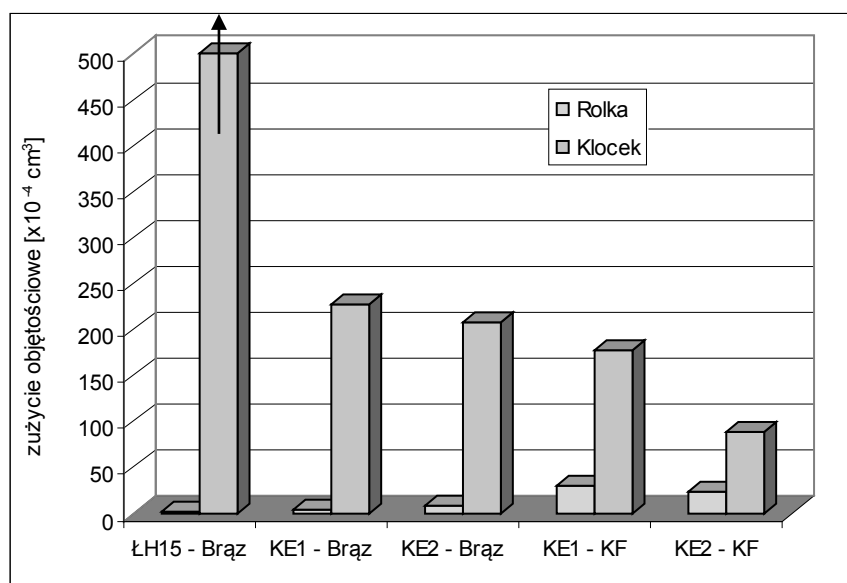
powiększenie	100×
napięcie przyspieszające	10 kV
odległość pracy	15 mm
rodzaj próżni	wysoka

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wyniki przeprowadzonych badań tarciovo-zużyciowych skojarzeń stal-brąz, kompozyt-brąz i kompozyt-kompozyt przedstawiono na **Rys. 4 i 5**.



Rys. 4. Zużycie objętościowe badanych skojarzeń pracujących w obecności elektrokorundu
 Fig. 4. Volume wear of tested friction junctions



Rys. 5. Zużycie objętościowe badanych skojarzeń pracujących w obecności krzemionki

Fig. 5. Volume wear of tested friction junctions

Na podstawie uzyskanych charakterystyk dla badanych skojarzeń materiałowych można stwierdzić, że ich zużycie objętościowe (**Rys. 4, 5**) zależy w istotny sposób od rodzaju materiału ściernego, kompozytu metalopolimerowego chemoutwardzalnego zastosowanego na warstwy wierzchnie, ale przede wszystkim od materiału, z którego wykonana jest przeciwpróbka (klocek) badanego węzła tarcia. Ze względu na właściwości (większa twardość, ostre krawędzie) większe zużycie badanych skojarzeń uzyskano w obecności elektrokorundu jako materiału ściernego. Należy zwrócić uwagę, że największe zużycie przeciwpróbek ze stopu łożyskowego w obecności zastosowanych materiałów ściernych obserwuje się podczas ich współpracy z rolką wykonaną ze stali łożyskowej ŁH-15. Erozyjne działanie zastosowanych w eksperymencie materiałów ściernych powoduje, że we wszystkich przypadkach zużycie ściernie przeciwpróbki (klocka) jest znacznie większe niż rolki z regeneracyjną warstwą kompozytową, jak również rolki stalowej.

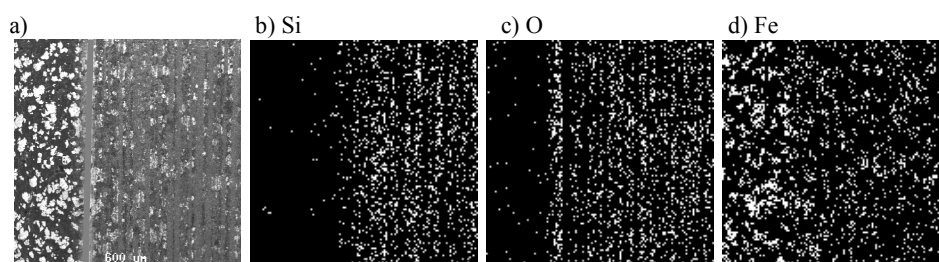
Analiza wyników badań zużycia przedstawionych na **Rys. 4, 5** wskazuje, że najmniejszą wartość zużycia przeciwpróbki w obecności zastosowanych materiałów ściernych uzyskano dla skojarzenia, w którym oba elementy modelowego węzła tarcia są wykonane z materiałów kompozytowych.

Porównując łączne zużycie ściernie badanych skojarzeń materiałowych, można zaobserwować, że większą odpornością na zużywanie w obecności elektrokorundu charakteryzuje się skojarzenie kompozyt KE-1–KF (skojarzenie,

w którym kompozyt chemoutwardzalny charakteryzuje się znacznie mniejszą twardością), natomiast w obecności krzemionki większą odporność na zużywanie wykazuje skojarzenie kompozyt KE-2 (o większej twardości) we współpracy z kompozytem termoutwardzalnym. Zaobserwowane różnice w odporności kompozytów na działanie materiałów ściernych wynikają bezpośrednio ze zjawisk fizykochemicznych i mechanicznych występujących w skojarzeniu tribologicznym, które przekładają się na zużycie i zmiany w warstwie wierzchniej.

Wykorzystując skaningowy mikroskop elektronowy dokonano oceny stanu warstwy wierzchniej próbek kompozytu KE-1 po eksperymencie tribologicznym. Na **Rys. 6** przedstawiono obraz powierzchni rolki z nałożoną warstwą kompozytu po testach tarciovo-zużyciowych oraz wyniki mikroanalizy rentgenowskiej na obecność w warstwie wierzchniej krzemu i tlenu pierwiastków będących głównym składnikiem zastosowanej w badaniach krzemionki. Obszar po prawej stronie linii (**Rys. 7a**) przedstawia powierzchnię kompozytu objętą tarciami, natomiast po lewej stronie jest to obraz kompozytu poza obszarem tarcia.

Na obrazie mikroskopowym powierzchni kompozytu **Rys. 6a** nie obserwuje się symptomów nadmiernego zużycia metalopolimerowego kompozytu chemoutwardzalnego. Z przedstawionych wyników mikroanalizy rentgenowskiej pierwiastków wchodzących w skład krzemionki na powierzchni kompozytu objętej tarciami daje się zaobserwować zwiększoną intensywność ich występowania (**Rys. 6b** i **6c**). Zwiększona zawartość krzemu i tlenu na powierzchni tarcia kompozytu oraz nieco mniejsza intensywność dla żelaza (głównego składnika kompozytów chemoutwardzalnych) świadczy, że ziarna krzemionki tworzą warstwę ochronną i przeciwdziałają nadmiernemu zużyciu metalopolimerowego kompozytu regeneracyjnego. Jednocześnie wielkość zużycia współpracującej z kompozytem przeciwpróbki wykonanej z kompozytu termoutwardzalnego nie wzrasta. W efekcie zużycie pary tarciowej kompozyt-kompozyt jest najmniejsze. Obserwacje pozwalają więc na stwierdzenie, że materiał ścierniwa zakotwicza się w warstwie kompozytu, co powoduje dodatkowe jego wzmocnienie przeciwdziałające zużyciu współpracujących elementów.



Rys. 6. Wyniki badań SEM-EDS powierzchni kompozytu KE-2 po testach tarciowych w obecności krzemionki: a) obraz mikroskopowy kompozytu, sygnał EDS na obecność: b)krzemu (Si), c) tlenu (O), d) żelaza (Fe)

Fig. 6. SEM iage of KE-2 composites surface after friction tests (a) and EDS Spectra for silicon (b), oxygen (c) and iron (d)

PODSUMOWANIE

Kompozyty metalopolimerowe chemo- i termoutwardzalne wykazują dużą odporność na zużycie w obecności materiałów ściernych. Jest to uzależnione od utworzenia w kompozycie metalopolimerowym ochronnej warstwy wzmacniającej, która zwiększa odporność na zużycie kompozytu przy jednoczesnym umiarkowanym oddziaływaniu zużyciowym na kompozytowy element współpracujący. Można przypuszczać, że możliwości takie wynikają ze zdolności do quasi-trwałego umocowania w warstwie wierzchniej kompozytu chemoutwardzalnego cząstek ścierniwa i zastosowywania jako materiału przeciwpróbki kompozytu termoutwardzalnego o znacznie lepszych właściwościach mechanicznych niż kompozyt chemoutwardzalny. Uzyskane wyniki badań tarciowo-zużyciowych wykazały nowe możliwości technologicznego zastosowania chemoutwardzalnych kompozytów metalopolimerowych, tj. do regeneracji węzłów tarcia narażonych na zużycie tribologiczne w obecności materiałów ściernych.

LITERATURA

1. Zwierzycki W.: i zespół: Wybrane zagadnienia zużywania się materiałów ślizgowych w węzłach maszyn, PWN, Warszawa – Poznań 1990.
2. Hebda M., Wachal A.: Trybologia. WNT Warszawa 1980.
3. Axen N., Jacobson S., Hogmark S.: Influence of hardness of the counterbody in threebody abrasive wear – an overlooked hardness effect. *Tribology International* vol. 27, nr 4/1994.
4. Kallas P.: Indentation energy and abrasive wear of metals. *Wear*, 198 (1996).
5. Jacobson P., Wallen S., Hogmark.: Fundamental aspects of abrasive wear studied by a new simulation model. *Wear* 123 (1998), s. 25–32.
6. Safonow B.P.: Influence of hardness of steels on tribo-technological parameters in abrasive wear. *Friction Wear* 12 (1991).
7. Budinski K. G.: Resistance to particle abrasion of selected plastics. *Wear*, 2003–2004 (1997), s. 42–49.

Summary

The article presents the results of abrasive wear resistance of metal–polymer thermo- and chemosetting composites in composite–composite tribological system. To make the comparison, some friction experiments were performed using a steel–bearing alloy system. During the research, two kinds of regenerative chemically setting composites were used. The cross-linking agents used were amine compounds with different chemical structure and reactivity (such as triethylenetetramine and adduct of aliphatic and aromatic amines). These cross-linking agents made it possible to obtain composites with very different mechanical properties. Electrocorundum and silica of defined chemical and granulometric composition were adopted as abrasive material. Chemosetting metal–polymer composites were applied

to a steel roller and machined to the desired size to cooperate with a bronze block and metal-polymer composite based on thermosetting phenol-formaldehyde resin. The friction tests were performed using a T-07 block-on-ring tester in the presence of the selected abrasive material. Tribological tests were conducted at a speed of 0.1 m/s and 1 MPa pressure, without any lubricant. A high resistance to abrasive wear of the tested systems was proved, which means they can be used for machine element regeneration that are running in an abrasive environment.