

Jacek PRZEPIÓRKA\*, Marian SZCZEREK\*\*,\*\*\*

## DOBÓR ELEMENTU STALOWEGO DO POLIMEROWO-METALOWYCH WĘZŁÓW TARCIA

### SELECTION OF STEEL ELEMENT FOR POLYMER- -METAL FRICTION PAIRS

#### Słowa kluczowe:

tarcie, zużycie, stal, żelazo Armco, polietylen UHMW

#### Key words:

friction, wear, steel, iron Armco, polyethylene UHMW

#### Streszczenie

Zbadano charakterystyki tarciowo zużyciowe polimerowo-metalowych węzłów tarcia pracujących w powietrzu oraz w atmosferze gazu obojętnego (argonu) w warunkach tarcia technicznie suchego. Elementami testowymi były: stal 45, żelazo Armco oraz stal nierdzewna współpracująca z polietylenem UHMW. Otrzymane wyniki dowodzą, że powszechne stosowanie na element współpracujący z polimerami stali 45, z uwagi na łatwość utleniania się, charakteryzuje

---

\* Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Wydział Materiałoznawstwa, Technologii i Wzornictwa, ul. Chrobrego 27, 26-600 Radom.

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

\*\*\* Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Wydział Mechaniczny, ul. Krasickiego 54, 26-600 Radom.

duży udział negatywnych oddziaływań w strefie tarcia, czego efektem są niekorzystne charakterystyki tribologiczne.

## WPROWADZENIE

Zużywanie materiału polimerowego może przebiegać według kilku mechanizmów, w efekcie których następuje ciągły ubytek masy stykających się elementów będących w ruchu względnym. Można wyróżnić zużycie mechaniczne i międzyfazowe. Zużycie mechaniczne zachodzi głównie przez ścieranie lub zmęczeniowe pękanie i wykuszanie się cząstek materiału. Zużycie międzyfazowe jest skutkiem adhezji powierzchni współpracujących lub potencjału chemicznego elementów systemu tribologicznego. Zależnie od dominującego procesu wyróżnia się zużycie adhezyjne lub korozyjne (chemiczne) [L. 1].

Ze zużyciem polimerowo-metalowych węzłów tarcia ściśle związany jest proces przenoszenia polimeru na powierzchnię metalu, w wyniku czego po pewnym czasie współpraca metal–tworzywo sztuczne zmienia się we współpracę pary tworzywo–tworzywo [L. 2, 3]. Transfer polimeru powoduje początkowo zmniejszenie zużycia części metalowej oraz w niektórych warunkach tarcia również zmniejszenie zużycia elementu z tworzywa, jednak znacznie pogarsza bilans cieplny węzła z powodu izolacyjnego charakteru tworzyw sztucznych.

Proces przenoszenia cząstek materiału polimerowego jest złożony z uwagi na możliwość powracania ich z powierzchni metalu na powierzchnię, z której zostały wyrwane. Kluczową rolę w tym procesie odgrywiają zjawiska adhezji [L. 2, 4-7]. Cząstki materiału polimerowego mogą agregować się jako produkty zużycia i usuwać poza strefę tarcia. Przeniesienie materiału zachodzi niezależnie od warunków tarcia. Cechy przeniesionego materiału polimerowego, takie jak: grubość utworzonej z nich warstwy, postać i wymiary przenoszonych cząstek, stopień krystalizacji silnie zależą od cech konstrukcyjnych współpracujących elementów oraz warunków pracy [L. 8, 9].

Większość opisywanych w literaturze badań eksperymentalnych koncentrowana była na poprawie charakterystyk tarciovych polimerowo-metalowych węzłów tarcia drogą modyfikacji polimerów napełniaczami niskotarciowymi stosowanymi jako dodatki do olejów i smarów typowych metalowych węzłów tarcia. Zabiegi takie mogą w pewnych warunkach ograniczać opory ruchu lub nawet zużycie polimeru, lecz warunkiem radykalnej poprawy współpracy skjarzeń metal–polimer jest zmniejszenie oddziaływań adhezyjnych współpracujących powierzchni.

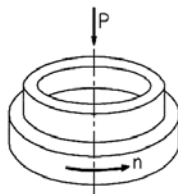
Obecnie do budowy węzłów tarcia wykorzystuje się kilka rodzajów tworzyw sztucznych (najczęściej termoplastycznych); przewiduje się, że przez najbliższe dziesięciolecia nie zostaną zsyntezowane nowe polimery, które mogłyby być użyte do tego celu. W przemyśle tworzyw sztucznych tendencją rozwojową wykazują technologie modyfikacji i ulepszania tworzyw [L. 10]. Okres eksplo-

atacji obecnie wytwarzanych skojarzeń ślizgowych limitowany jest odpornością na zużycie elementu polimerowego. Specyficznym rodzajem zużycia mechanicznego jest zużycie erozyjne przez cząstki materiału zderzającego się z powierzchnią ciała stałego. Zużycie międzyfazowe jest skutkiem adhezji powierzchni współpracujących lub potencjału chemicznego elementów systemu tribologicznego [L. 11, 12]. W polimerowo-metalowym węźle tarcia oba wymienione mechanizmy zachodzą równocześnie, natomiast poprzez obróbkę wykańczającą powierzchni elementu metalowego można wpływać na zmianę proporcji obu składników. Zwiększanie chropowatości powierzchni elementu stalowego umożliwia zmniejszenie oddziaływań adhezyjnych, ale powoduje wzrost udziału składowej mechanicznej powodującej skrawanie polimeru. Przy większej gładkości powierzchni elementu stalowego występuje mniejsze ścieranie polimeru kosztem wzrostu zużycia adhezyjnego. Przy równoczesnym występowaniu obu mechanizmów, jak wykazano w licznych pracach, występuje graniczna intensywność zużycia, której już nie można zmniejszyć [L. 13, 14].

Celem badań przedstawionych w niniejszym artykule było wyznaczenie charakterystyk tribologicznych polimerowo-metalowego węzła tarcia typu pierścień-tarcza, pracującego w obecności tlenu, a następnie porównanie ich z charakterystykami otrzymanymi podczas badań w atmosferze argonu. Elementami badanymi były pierścienie wykonane ze stali 45, stali nierdzewnej oraz żelaza Armco współpracujące w warunkach tarcia technicznie suchego z polietylenem.

## METODYKA BADAŃ

W badaniach stanowiskowych przeprowadzonych z użyciem testera T-15 (schemat węzła tarcia pokazano na **Rys. 1**) rejestrowane były za pomocą komputerowego systemu akwizycji danych wszystkie najważniejsze wielkości pomiarowe: siła tarcia, sumaryczne liniowe zużycie elementów węzła tarcia, temperatura otoczenia oraz prędkość i droga tarcia. Zasadnicze badania tribologiczne zostały poprzedzone badaniami wstępnymi, których analiza wyników dostarczyła niezbędnych informacji do ustalenia warunków współpracy badań zasadniczych.



**Rys. 1.** Schemat węzła tarcia aparatu T-15

Fig. 1. Friction pair of T-15 tesrer

Przyjęte parametry badań zasadniczych prowadzonych z użyciem testera T-15 w oparciu o analizę wyników badań wstępnych były następujące:

- nacisk w styku 0,3 MPa,
- prędkość ślizgania 0,2 m/s,
- droga tarcia 1100 m.

Badania zasadnicze polegały na przeprowadzeniu przynajmniej 3 biegów badawczych wybranych skojarzeń materiałowych pod stałym obciążeniem oraz na określeniu współczynnika tarcia, zużycia oraz temperatury węzła tarcia. Przed każdym biegiem badawczym próbki były myte w acetonie w myjce ultradźwiękowej przez 10 minut, a następnie suszone przez 15 minut w suszarce w temperaturze 40°C.

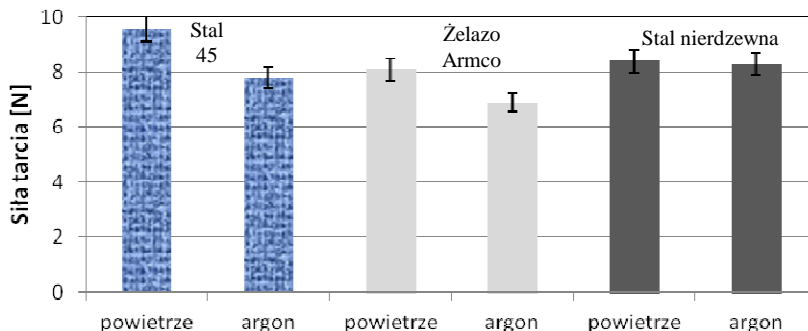
Badania realizowano na dwóch etapach:

- na pierwszym próbki przed zmontowaniem w węźle tarcia poddano procesowi czyszczenia, działania powietrza przez 24 godziny, a następnie testom tribologicznym w obecności powietrza,
- na drugim etapie takie same próbki po procesie czyszczenia były natychmiast montowane w węźle tarcia i poddawane testom tribologicznym w obecności gazu obojętnego – argonu.

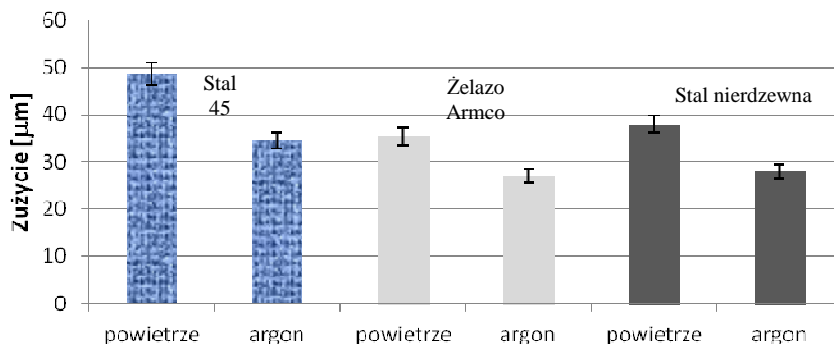
Badane skojarzenia materiałowe po testach tarciovych poddane zostały analizom instrumentalnym z wykorzystaniem mikroskopu sił atomowych (AFM) oraz mikroskopu interferometrycznego.

## WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

Wyniki badań siły tarcia, sumarycznego zużycia liniowego oraz temperatury węzła tarcia dla przebadanych skojarzeń materiałowych pracujących w obecności powietrza oraz argonu przedstawiono na **Rys. 2, 3 i 4**.

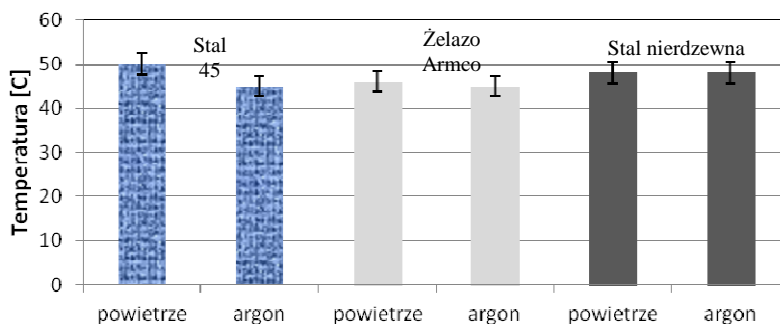


**Rys. 2. Porównanie wielkości siły tarcia badanych skojarzeń w powietrzu i w argonie**  
 Fig. 2. Linear friction force obtained for tested pairs in air and in argon



**Rys. 3. Porównanie zużycia badanych skojarzeń w powietrzu i w argonie**

Fig. 3. Linear wear obtained for tested pairs in air and in argon



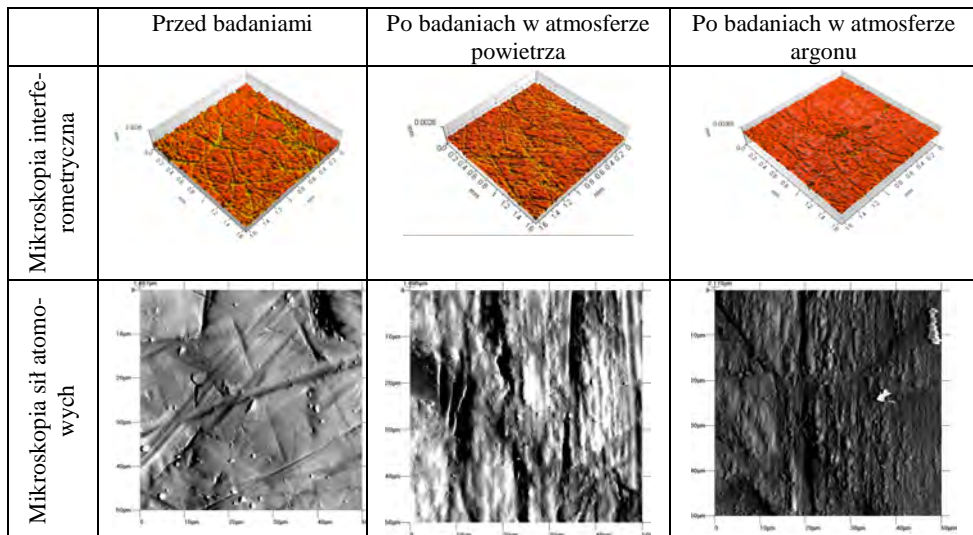
**Rys. 4. Porównanie temperatur węzła tarcia badanych skojarzeń w powietrzu i w argonie**

Fig. 4. Linear temperatures obtained for tested pairs in air and in argon

Porównanie wyników badań tarciovych przedstawionych na **Rysunkach 2–4** pozwala stwierdzić, że usunięcie tlenu ze strefy tarcia przyczynia się do zmniejszenia wszystkich badanych wielkości dla układu materiałowego stal 45–polietylen oraz żelazo Armco–polietylen. W przypadku skojarzenia stal nierdzewna–polietylen odnotowano tylko zmniejszenie zużycia sumarycznego badanych skojarzeń. Może to świadczyć o znaczącej roli tlenu atmosferycznego w oddziaływaniach powierzchni trących się elementów. Utlenianie powierzchni stalowych przyczynia się do zwiększania oddziaływań adhezyjnych pomiędzy tlenkami żelaza a polietylenem, co skutkuje zwiększeniem oporów ruchu i zużycia. Usunięcie z powierzchni próbek stalowych utlenionej warstwy wierzchniej oraz prowadzenie badań bez dostępu tlenu atmosferycznego skutkowało zmniejszeniem oporów ruchu w stosunku do skojarzeń przebadanych w obecności tlenu. Podobnego zjawiska nie obserwowano dla skojarzenia stal nierdzewna–polietylen, ponieważ stal ta nie ulega samoistnemu utlenianiu i prowadzenie badań w osłonie argonu nic nie zmieniło.

W celu potwierdzenia dominującej roli adhezyjnego mechanizmu zużywania w polimerowo-metalowych węzłach tarcia wykonane zostały analizy instrumentalne na każdym etapie badań tribologicznych z wykorzystaniem mikroskopii: interferometrycznej, skaningowej i atomowej, analiz EDS. Wybrane wyniki analiz przedstawione zostały na **Rys. 5, 6 i 7**.

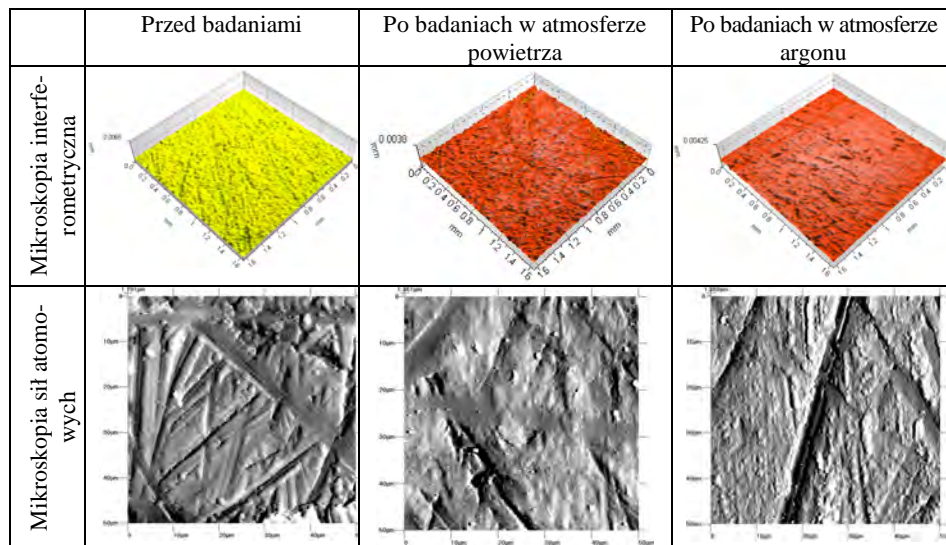
Badania interferometryczne miały na celu wskazanie miejsc o zwiększonej chropowatości świadczącej o transferze polimeru na powierzchnię stalową. Analizy wykonane mikroskopem sił atomowych posłużyły do obserwacji warstwy przeniesionego polimeru poprzez porównanie powierzchni przed i na różnych etapach badań tribologicznych.



**Rys. 5. Obraz z mikroskopu interferometrycznego i mikroskopu AFM śladów współpracy pierścienia ze stali 45 z polietylenem w powietrzu i w argonie**

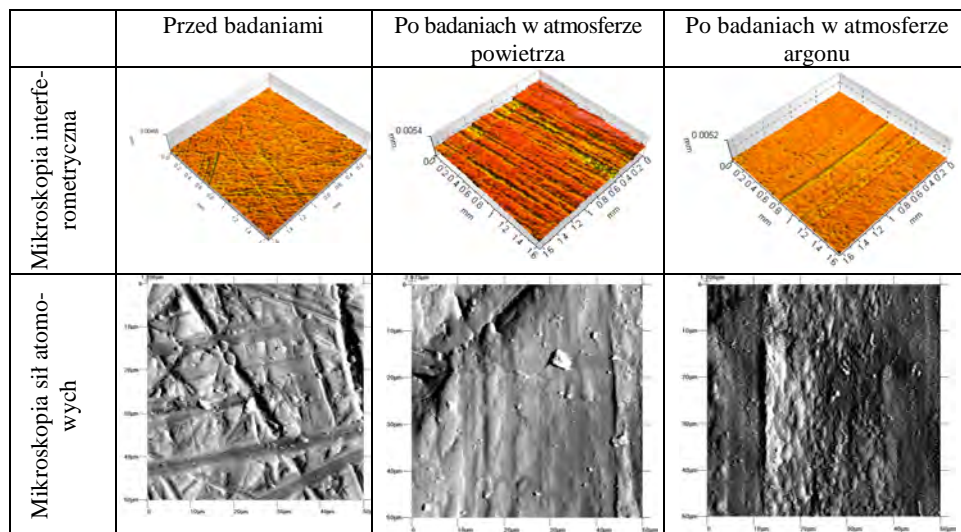
Fig. 5. Scanning Auriga Cross Beam microscope and AFM images of surface on disc in air and in argon for friction pair 56100 steel – polyethylene

Przedstawione na **Rys. 5–7** zestawienie stanu powierzchni próbek stalowych przed badaniami oraz współpracujących z polietylenem wykazuje istnienie typowego dla polimerowo-metalowych węzłów tarcia mechanizmu transferu polimeru na powierzchnię stalową, przy czym jego wielkość jest uzależniona od warunków procesu tarcia. Podczas współpracy polimeru z elementem stalowym pod wpływem sił adhezji następuje wyrywanie łańcuchów tworzywa wielkocząsteczkowego i przenoszenie ich na powierzchnię stalową. Proces ten przebiega samorzutnie i jego intensywność uzależniona jest od rodzaju i stanu energetycznego



**Rys. 6. Obraz z mikroskopu interferometrycznego i mikroskopu AFM śladów współpracy pierścienia z żelaza Armco z polietylenem w powietrzu i w argonie**

Fig. 6. Scanning Auriga Cross Beam microscope and AFM images of surface on disc in air and in argon for friction pair iron Armco – polyethylene



**Rys. 7. Obraz z mikroskopu interferometrycznego i mikroskopu AFM śladów współpracy pierścienia ze stali nierdzewnej z polietylenem w powietrzu i w argonie**

Fig. 7. Scanning Auriga Cross Beam microscope and AFM images of surface on disc in air and in argon for friction pair acid-proof steel – polyethylene

współpracujących powierzchni oraz warunków procesu tarcia. W jego wyniku następuje przeniesienie materiału polimerowego i adhezyjne naniesienie na powierzchnię stalową w postaci powłoki polimerowej, której grubość oraz gładkość jest uzależniona do chropowatości elementu stalowego, jego stanu energetycznego, warunków tarcia, rodzaju polimeru oraz czasu trwania procesu. Proces ten intensyfikuje wzrost temperatury w strefie styku oraz zużycie polimeru, szczególnie gdy dochodzi do transferu grubych warstw polimerowych. Z punktu widzenia analiz powierzchniowych istotna jest grubość utworzonej powłoki polimerowej oraz jej gładkość świadcząca o intensywności procesu oraz szybkości tworzenia przeniesionej warstwy.

Zestawienie analiz powierzchniowych przedstawione na **Rys. 5** obrazuje stan powierzchni stali 45 przed badaniami tribologicznymi oraz po ich zakończeniu przy różnych warunkach procesu tarcia. Porównanie stanu powierzchni elementu stalowego przed i po tarcu w atmosferze tlenu wskazuje wyraźnie, że proces ten odbywał się z intensywnym transferem polimeru na powierzchnię stali. Widoczne ślady po szlifowaniu na powierzchni stali (analiza AFM) są całkowicie przykryte warstwą polimeru po badaniach tarciovych, co dodatkowo potwierdza badanie mikroskopem interferometrycznym. Wyniki obserwacji są zgodne z wynikami badań tribologicznych, w których stal 45 była materiałem najgorzej współpracującym z polietylenem, przy czym wielkość odnotowanego dla niej zużycia była największa.

W przypadku analiz instrumentalnych wykonanych na powierzchni stali nierdzewnej i żelaza Armco współpracujących z tarczami polietylenowymi (**Rys. 6, 7**) można zauważyć, że mechanizm przenoszenia materiału polimerowego przebiega z mniejszą intensywnością oraz w innych warunkach. Z uwagi na mniejszą skłonność obu materiałów stalowych do utleniania się podczas badań tarciovych w obecności tlenu zauważono mniejsze warstwy przeniesionego polietylenu, czemu towarzyszyły niewielkie zmiany chropowatości powierzchni. Spowodowane jest to większą adhezją startego polietylenu do powierzchni pierścienia polimerowego niż do próbki stalowej. Osiągnięcie takiego efektu świadczy o znacznym zredukowaniu oddziaływań adhezyjnych odpowiedzialnych za transfer polimeru na element stalowy.

Badania prowadzone w obecności argonu wykazują jeszcze bardziej ograniczony udział oddziaływań polarnych w procesie zużywania polimeru. W związku z powyższym analizy instrumentalne prowadzone dla próbek poddanych tarcu w obecności argonu przedstawiają wpływ drugiej składowej – dyspersyjnej, odpowiedzialnej w tym przypadku za mechanizm zużycia adhezyjnego. Znaczące ograniczenie lub nawet wyeliminowanie oddziaływań polarnych przyczyniło się do stworzenia prostego mechanizmu zużycia adhezyjnego, w którym za przeniesienie polimeru na element stalowy odpowiedzialne są zjawiska magnetycznego i elektrostatycznego oddziaływania powierzchni tarcia.



## PODSUMOWANIE

Zrealizowane badania wykazały możliwość znaczącej poprawy charakterystyk tribologicznych polimerowo–metalowych węzłów tarcia, głównie przez selektywną redukcję poszczególnych oddziaływań fizykochemicznych odpowiedzialnych za opory tarcia w strefie styku.

Badaniom poddano różne gatunki stali oraz charakteryzujący się prostą i ściśle zdefiniowaną budową chemiczną polietylen o ultrawysokiej masie cząsteczkowej, który ma bardzo dobre właściwości tribologiczne i mechaniczne. Próbki polimerowe oraz stalowe przed badaniami tarciovymi oraz po ich zakończeniu poddane zostały kompleksowym badaniom instrumentalnym z wykorzystaniem szerokiego spektrum nowoczesnej aparatury do analiz materiałowych i powierzchniowych (SEM, EDS, EDS- X-ray AFM). Badania te potwierdziły tezę, że głównym, trudnym do ograniczania i stosunkowo słabo poznanym mechanizmem zużywania takich skojarzeń jest adhezyjne przenoszenie polimeru na element stalowy.

Otrzymane wyniki dowodzą, że dobór do polimerowego partnera elementu ze stali 45 może intensyfikować niekorzystne oddziaływania w strefie tarcia, czego efektem jest pogorszenie współpracy takiego skojarzenia. Problematicznym zagadnieniem jest obróbka cieplna elementów stalowych współpracujących z polimerami. Wzrost twardości warstwy wierzchniej wiąże się ze zmianą (najczęściej wzrostem) swobodnej energii powierzchniowej, przy czym negatywnej zmianie ulega stosunek składowej polarnej do dyspersyjnej. W zależności od budowy węzła tarcia, zastosowanego polimeru oraz iloczynu nacisków i prędkości (pv) może to doprowadzić do pogorszenia warunków współpracy takiego układu [L. 12].

Analiza wyników przeprowadzonych badań potwierdziła, że znacząca poprawa charakterystyk tribologicznych skojarzenia metal–polimer, w którym element stalowy pozbawiony jest warstwy utlenionej, jest skutkiem zmniejszenia oddziaływań polarnych, a tym samym zmniejszenia ilości powstających wiązań wodorowych pomiędzy aktywnymi centrami łańcuchów polimeru a utlenioną powierzchnią stali. Podobny efekt można zaobserwować poprzez nałożenie na powierzchnię elementu stalowego odpowiednio dobranej powłoki PVD/CVD, o innych właściwościach powierzchniowych niż własności metalu, co przyczynia się do dalszej poprawy właściwości tribologicznych węzła tarcia poprzez ograniczenie powstawania wiązań wodorowych – głównego mechanizmu szczyptę adhezyjnych.

## LITERATURA

1. Rymuza Z.: Trybologia polimerów ślizgowych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa 1986.

2. Polak A.: Przenoszenie materiału w łożysku ślizgowym stal–tworzywo sztuczne. Monografia, Politechnika Krakowska 1998.
3. Ziemiański K.: Zastosowanie tworzyw sztucznych w budowie maszyn. Politechnika Wrocławska, Wrocław 1995.
4. Grundmeier G., Stratmann M.: Adhesion and De-adhesion mechanisms at Polymer/Metal interfaces. Annual Review of Material Research. Max-Planck Institute for Iron Research. Vol. 35, 2005, s. 571–615.
5. Boizian C.: Molecular engineering of the polymer-metal Bond. Puer App/Chem. Vol. 64, Nr 11, 1992, s. 1647–1651.
6. Cameron F., Abrams C.F.: Inhomogeneous Coarse-Graining of Polymer and Polymer/Metal Interfaces. NIC series, vol. 23, 2004, s. 275–288.
7. Tambe N.S.: Nanotribological investigation of materials for nanotechnology application. The Ohio State University, 2005.
8. Capanidis D., Wieleba W., Ziemiański K.: Wpływ warunków eksploatacji na dobór polimerów i kompozytów polimerowych jako materiałów ślizgowych. Tribologia. 1997, nr 5–6.
9. Boizian C.: Molecular engineering of the polymer-metal Bond. Puer App/Chem. Vol. 64, Nr 11, 1992, s. 1647–1651.
10. Szlezyngier W.: Tworzywa sztuczne. Tom 3. FOSZE, Rzeszów 1999.
11. Przepiórka J., Szczerek M.: A new approach to optimization of the metal-polymer tribology characteristics. WTC 2005-63343; World Tribology Congress III, September 12–16, 2005, Washington DC, USA.
12. Projekt badawczy Nr 4 T08C 017 24. Zakończony 2005, kierownik projektu Marian Szczerek.
13. Mori K., Hirahara H., Oishi Y.: Development of Resin-molding-releasing Metal Mold Surface Resin Perfluoroalkyl Group Containing Polymer Plating. Journal of the Chemical Society of Japan, Nr 4, 2000.
14. Della Site L., Abrams C.F., Alawi A., Kremer K.: Polymers near metal surfaces. Phys. Rev. Lett, 89 (15), 2002.

## Summary

**Tribological characteristics were investigated using the polymer–metal friction pairs working without a lubrication in the presence of air and in atmosphere of indifferent gas. Following materials have been tested: 56100 steel, Armco iron and acid-proof steel disc and bearing with polyethylene UHMW.**

**Researches were undertaken in presence of oxygen and argon. Acquired results of the test indicate that 56100 steel does not cooperate with polymer.**