

Anita MAŃKOWSKA*, **Witold PIEKOSZOWSKI***,
Marian SZCZEREK*

BADANIE TARCIA I ZUŻYCIA POWŁOK PRZECIWZUŻYCIOWYCH W PRÓŻNI

THE INVESTIGATION OF THE FRICTION AND WEAR OF ANTIWEAR COATINGS IN A VACUUM

Słowa kluczowe:

tarcie, zużycie, powłoka CrN, powłoka MoS₂, próżnia

Key-words:

friction, wear, CrN coating, MoS₂ coating, vacuum

Streszczenie

Zbadano charakterystyki tribologiczne ślizgowego wężła tarcia typu kula-tarcza pracującego w powietrzu w warunkach tarcia technicznie suchego oraz próżni. Elementami testowymi były tarcze wykonane ze stali 100Cr6 bez powłoki i z naniesionymi powłokami: przeciwzużyciową CrN i niskotarciową MoS₂ oraz kulki łożyskowe ze stali 100Cr6 jako przeciwpróbki. Właściwości tribologiczne badanego wężła tarcia oceniano na podstawie przebiegu zmian współczynnika tarcia, intensywności

* Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Pułaskiego 6/10, 260-600 Radom, tel. (048) 364-42-41.

zużywania liniowego, średnicy wytarcia kulki oraz wyglądu wytartych powierzchni. Wykazano istotny wpływ próżni na przebieg tarcia i zużycia badanych skojarzeń ciernych.

WPROWADZENIE

Węzłom tarcia pracującym w próżni stawia się zwykle dużo większe wymagania niż tym pracującym w powietrzu w normalnych warunkach atmosferycznych. W warunkach próżni dochodzi do styku fizycznie czystych powierzchni, które mogą wykazywać silne wiązania adhezyjne, co może powodować duże opory tarcia i duże zużycie, szczególnie w stykach ślizgowych [L. 1].

Styk fizycznie czystych powierzchni elementów może mieć miejsce również przy tarcu w innych środowiskach. Na przykład w warunkach tarcia suchego lub mieszanego, gdy w mikroobszarach styku dochodzi do zerwania warstewek tlenkowych lub do przerwania filmu smarowego, czy też przy obróbce skrawaniem, gdy w wyniku oddzielenia skrawanego materiału odsłania się fizycznie czysta powierzchnia.

Poznanie zjawisk i procesów zachodzących w czasie tarcia elementów o fizycznie czystej powierzchni wymaga badań w warunkach próżni. Na ich podstawie możliwy będzie właściwy dobór materiałów współpracujących elementów i technologii ich warstwy wierzchniej.

Najnowsze kierunki badań zmierzające do nadania odpowiednich właściwości tribologicznych węzłom pracującym w trudnych warunkach środowiskowych i przy dużych obciążeniach dotyczą powłok przeciwzużyciowych i przeciwtarciowych [L. 2–6]. Przeciwtarciowe powłoki mogą pełnić rolę smaru stałego, umożliwiając pracę węzła w warunkach tarcia technicznie suchego, co w środowisku próżni ma istotne znaczenie [L. 1, 6].

Badania tribologiczne w próżni wymagają zastosowania specjalnej, drogiej i trudno dostępnej aparatury, co w Polsce stanowiło poważną przeszkodę w rozwoju inżynierii materiałów. W Zakładzie Tribologii Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu, w oparciu o wcześniejsze prace [L. 7], opracowano metodykę badań oraz zbudowano urządzenie badawcze typu kula-tarcza do badań w próżni (oznaczone symbolem T-26).

Przeprowadzona została seria weryfikacyjnych badań eksperymentalnych, których fragment przedstawiono w niniejszym artykule.

Celem badań było wyznaczenie i porównanie charakterystyk tribologicznych ślizgowego węzła tarcia typu kula–tarcza, pracującego w powietrzu lub próżni w warunkach tarcia technicznie suchego. Elementami testowymi były tarcze wykonane ze stali 100Cr6 bez powłoki, z przeciwzużyciową powłoką CrN i niskotarciową MoS₂ oraz kulki łożyskowe ze stali 100Cr6 jako przeciwpróbki.

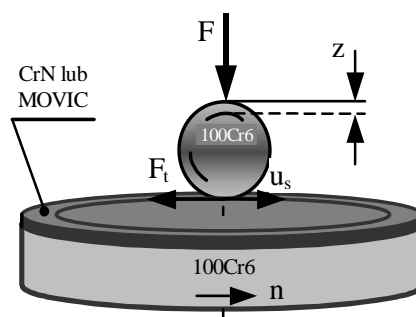
METODYKA BADAŃ

Badania polegały na wykonaniu biegów testowych pary trącej, składającej się z nieruchomej kuli dociskanej do wykonującej ruch obrotowy tarczy (**Rys. 1**), pracującej w powietrzu (w normalnych warunkach atmosferycznych utrzymywanych w komorze badawczej) oraz próżni w warunkach tarcia fizycznie suchego.

a)



b)



Parametry pracy węzła tarcia

- obciążenie $F = 50 \text{ N}$,
- prędkość poślizgu $u_s = 0,1 \text{ m/s}$,
- droga tarcia $s = 5000 \text{ m}$,

Warunki pracy węzła (na sucho)

- w powietrzu: $T_o = 23 \pm 2^\circ\text{C}$,
 $p_a = 8,5 \times 10^2 \text{ mbar}$, wilgotność $H = 50 \pm 5\%$
- w próżni: $p = 5 \times 10^{-3} \text{ mbar}$

Rys. 1. Urządzenie badawcze i warunki badań: a) widok urządzenia; b) schemat węzła tarcia

Fig. 1. The test apparatus (a), and test conditions with the scheme ball-on-disc tribosystem (b)

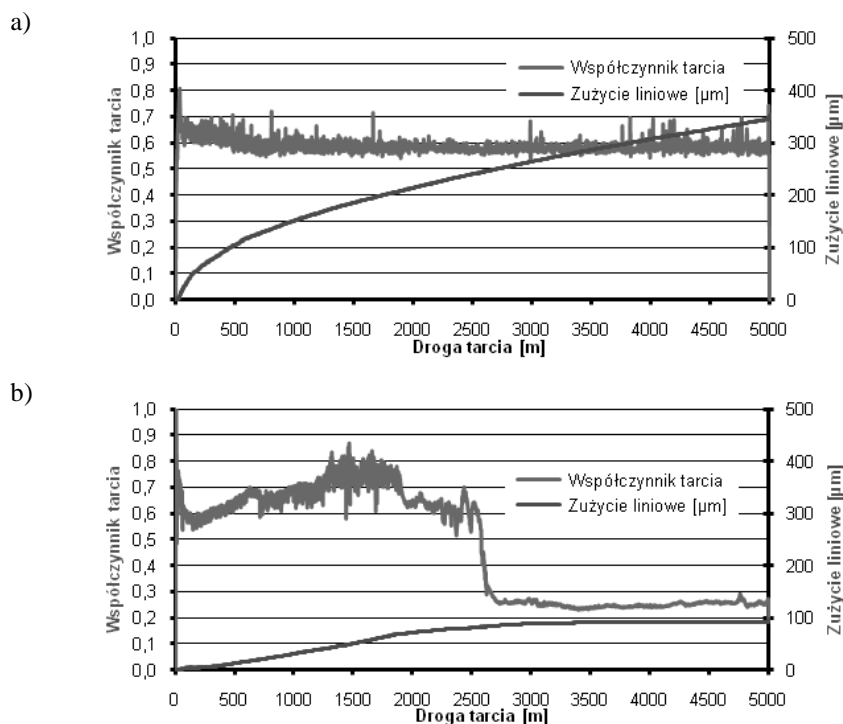
W każdym biegu badawczym, przy zadanej wartości obciążenia F i prędkości poślizgu u_s , dokonywano ciągłego pomiaru siły tarcia F_t oraz sumarycznego zużycia liniowego z elementów trących. Mierzono również temperaturę masową kulki. Na podstawie zmierzonych wielkości, w oparciu o uzyskane dane, wyznaczano wartość współczynnika tarcia μ i intensywności zużywania. W czasie biegu testowego kontrolowano ciśnienie p w komorze próżniowej oraz prędkość obrotową tarczy n , na podstawie której obliczano prędkość poślizgu u_s i drogę tarcia s .

Przeprowadzono badania przy współpracy kulki o średnicy 10 mm ze stali 100Cr6 z tarczą wykonaną z tej samej stali bez powłoki oraz z naniesionymi na nią dwoma powłokami. Jedną z nich była typowa powłoka przeciwzużyciowa azotku chromu (CrN) o grubości 1,7 μm , twardości 1800 HV i chropowatości powierzchni charakteryzowanej parametrem $R_a = 0,35 \mu\text{m}$. Drugą była niskotarciowa powłoka dwusiarczku molibdenu (MoS_2) o handlowej nazwie MOVIC, o grubości 1,7 μm , twardości 400 HV i chropowatości powierzchni $R_a = 0,33 \mu\text{m}$. Obie powłoki zostały naniesione w procesie PVD (Physical Vapour Deposition). Do badań wykorzystano typową kulkę łożyskową o twardości 63 ± 1 HRC i chropowatości $R_a = 0,032 \mu\text{m}$. Tarczę obrobiono cieplnie uzyskując twardość 62 ± 2 HRC, następnie szlifowano i polerowano uzyskując chropowatość $R_a = 0,17 \mu\text{m}$. Przed każdym biegiem badawczym próbki (kulka i tarcza) były myte, przez około 10 min, w myjce ultradźwiękowej wypełnionej benzyną ekstrakcyjną.

Przeprowadzono badania trzech skojarzeń: 100Cr6-100Cr6, 100Cr6-CrN oraz 100Cr6-MoS₂. Właściwości tribologiczne badanego węzła tarcia oceniano na podstawie przebiegu zmian współczynnika tarcia, intensywności zużywania liniowego, średnicy wytarcia kulki oraz wyglądu wytartych powierzchni z wykorzystaniem mikroskopu optycznego i mikroskopu sił atomowych (AFM).

WYNIKI BADAŃ I Dyskusja

Wyniki badań zmian współczynnika tarcia i sumarycznego zużycia liniowego węzła tarcia w funkcji drogi tarcia, dla skojarzeń: 100Cr6-100Cr6, 100Cr6-CrN i 100Cr6-MoS₂, pracujących w warunkach tarcia technicznie suchego w powietrzu oraz w próżni przedstawiono odpowiednio na **Rys. 2, 6 i 8**.



Rys. 2. Przebieg zmian współczynnika tarcia i sumarycznego zużycia liniowego skojarzenia stal–stal (100Cr6–100Cr6): a) w powietrzu, b) w próżni

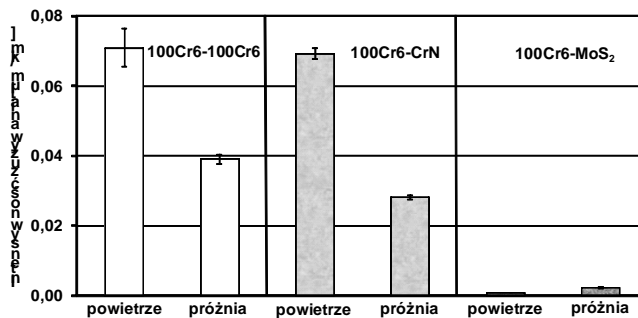
Fig. 2. Friction coefficient and total linear wear of steel-steel tribosystem (100Cr6-100Cr6) versus the sliding distance: a) in air, b) in vacuum

Na **Rys. 3** przedstawiono porównanie intensywności zużywania badanych skojarzeń wyznaczonego na podstawie ich sumarycznego zużycia liniowego odniesionego do drogi tarcia, natomiast na **Rys. 4** przedstawiono porównanie średnic wytarcia kulki w poszczególnych skojarzeniach. Głębokość śladu wytarcia w tarczy była znacznie mniejsza i w związku z tym nie wyróżniano jej wartości przy ocenie właściwości tribologicznych skojarzenia. Do oceny warunków tarcia i form zużycia wykorzystano obrazy śladów wytarcia na kulce i tarczy wykonane na mikroskopie optycznym i mikroskopie sił atomowych (AFM). Sporządzone fotografie fragmentów wytartych powierzchni przedstawiono odpowiednio na **Rys. 5, 7 i 9**.

Z wyników zamieszczonych na **Rys. 2** wynika, że przy tarcii w powietrzu, w otoczeniu zawartego w nim tlenu i wilgoci (pary wodnej), przy stałej prędkości poślizgu i stałym obciążeniu normalnym, współ-

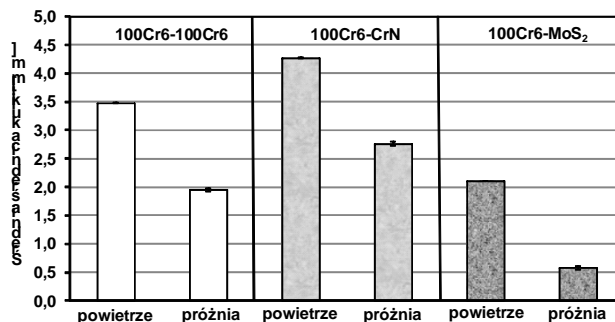
czynnik tarcia w styku 100Cr6–100Cr6 zachowuje się stabilnie na całej drodze tarcia, a jego średnia wartość wynosi $\mu \approx 0,6$.

Sumaryczne zużycie liniowe systematycznie się zwiększa. Natomiast w warunkach próżni, w początkowej fazie biegu testowego wartość μ rośnie do wartości $\mu \approx 0,75$, po czym dość szybko maleje, aby w połowie drogi tarcia przyjąć stabilną wartość wynoszącą $\mu \approx 0,25$. Przy zmniejszonej wartości μ stabilizuje się również zużycie i ostatecznie jest ponad trzykrotnie mniejsze niż w powietrzu. Średnia wartość współczynnika tarcia skojarzenia 100Cr6–100Cr6, pracującego w warunkach próżni, jest więc znacząco mniejsza, podobnie jak zużycie i jego intensywność (Rys. 3, 4).



Rys. 3. Porównanie intensywności zużywania badanych skojarzeń w powietrzu i w próżni

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



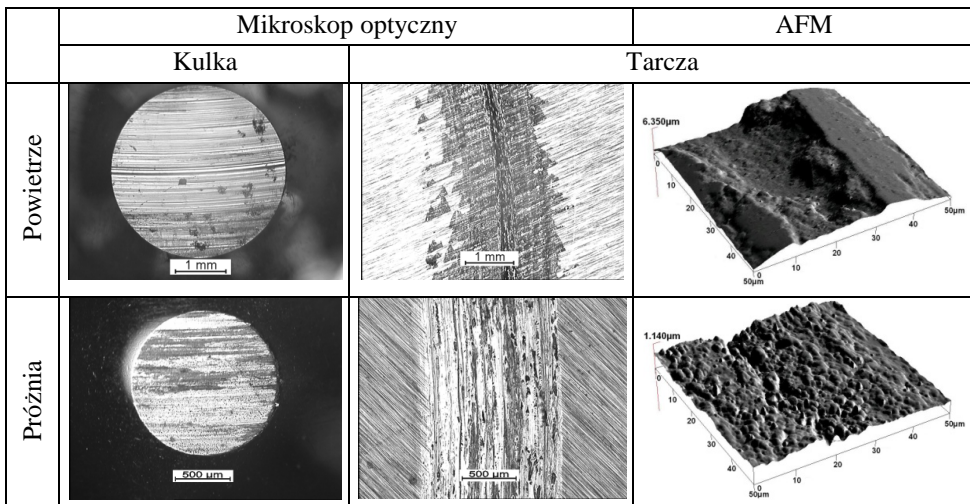
Rys. 4. Porównanie średniej średnicy śladu wytarcia kulki (przeciwpróbki) dla badanych skojarzeń w powietrzu i w próżni

Fig. 4. The average diameters of wear scars on the balls investigated in air and vacuum for tested pairs

Przedstawione wyżej wyniki są podobne do wyników opublikowanych w pracy [L. 8] przy tarcii ślizgowym stalowej kulki (EN 31) po stalowej tarczy (SS41) w powietrzu i próżni (1.3 Pa).

Wyznaczony w pracy [L. 8] współczynnik tarcia wyniósł w powietrzu $\mu \approx 0,6$, a w próżni z podobnej wartości zmniejszył się o połowę po przebyciu drogi tarcia wynoszącej 2000 m. Zmiana ta tłumaczona jest różną strukturą i różnymi właściwościami tlenków żelaza będących produktami zużycia [L. 8, 9]. Tlenek $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ pokrywał powierzchnie trące w powietrzu i powodował współczynnik tarcia $\mu = 0,6$ oraz duże zużycie. Natomiast ciemniejszy Fe_3O_4 powstający przy tarcii w średniej próżni powodował współczynnik tarcia $\mu = 0,3$ i o ponad połowę mniejsze zużycie niż w powietrzu. W wyższej próżni (5×10^{-5} Pa) tarcie i zużycie było już większe niż w powietrzu.

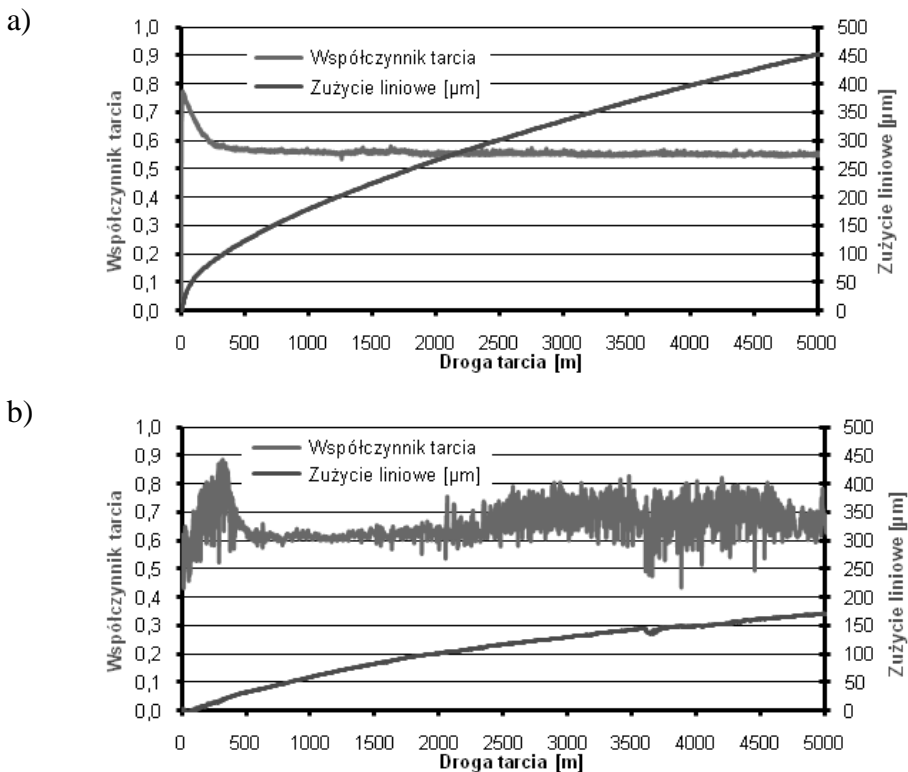
Powierzchnia wytarcia tarczy po testach w próżni (Rys. 5) jest bardziej gładka niż po tarcii w powietrzu. Ciemnoszare smugi w kierunku ruchu, widoczne na powierzchni wytarcia kulki i tarczy, świadczą o tworzeniu warstwy transferowej podczas tarcia. Istotny udział w tworzeniu tej warstwy mogły mieć produkty zużycia. Nie widać ich przy brzegach wytartej w tarczy ścieżki, jak to ma miejsce przy tarcii w powietrzu.



Rys. 5. Obrazy z mikroskopu optycznego i mikroskopu AFM śladów wytarcia kulki i tarczy dla skojarzenia 100Cr6-100Cr6 w powietrzu i w próżni

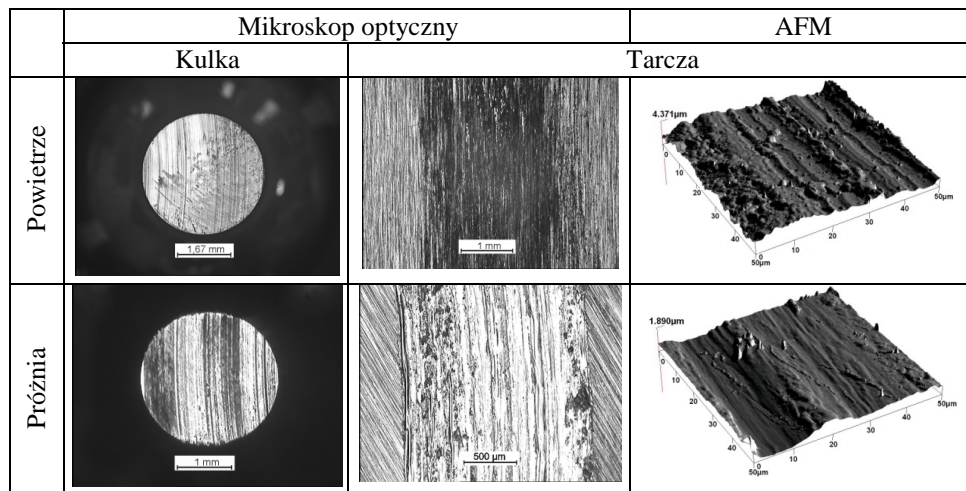
Fig. 5. Optical microscope and AFM images of worn surfaces on balls and discs in air and in vacuum for friction pair 100Cr6-100Cr6

Podobne relacje w wartościach współczynnika tarcia w próżni ($\mu \approx 0,25$) i w powietrzu ($\mu \approx 1$) uzyskano w pracy [L. 10], dla ślizgowego skojarzenia kulki ze stali 9Cr18 (łożyskowej) współpracującej z tarczą z tej samej stali. Natomiast w pracy [L. 11], w przypadku oscylacyjnego ruchu liniowego skojarzenia 100Cr6–100Cr6 w wysokiej próżni (1×10^{-9} mbar), współczynnik tarcia ($\mu = 0,9$ do $\mu = 2$) i zużycie w próżni było większe niż w powietrzu, co zwykle ma miejsce przy tarcu ślizgowym stali po stali [L. 1]. Mniejsze zużycie skojarzeń stal–stal przy tarcu w powietrzu (w obecności tlenu i pary wodnej) wynika z możliwości tworzenia warstwy adsorpcyjnej i tlenkowej, która przeciwdziała szepianiu adhezyjnemu.



Rys. 6. Przebieg zmian współczynnika tarcia i sumarycznego zużycia liniowego skojarzenia stal–powłoka CrN (100Cr6–CrN): a) w powietrzu, b) w próżni

Fig. 6. Friction coefficient and total linear wear of steel–CrN coating tribosystem (100Cr6–CrN) versus the sliding distance: a) in air, b) in vacuum



Rys. 7. Obrazy z mikroskopu optycznego i mikroskopu AFM śladów wytarcia kulki i tarczy dla skojarzenia 100Cr6–CrN w powietrzu i w próżni

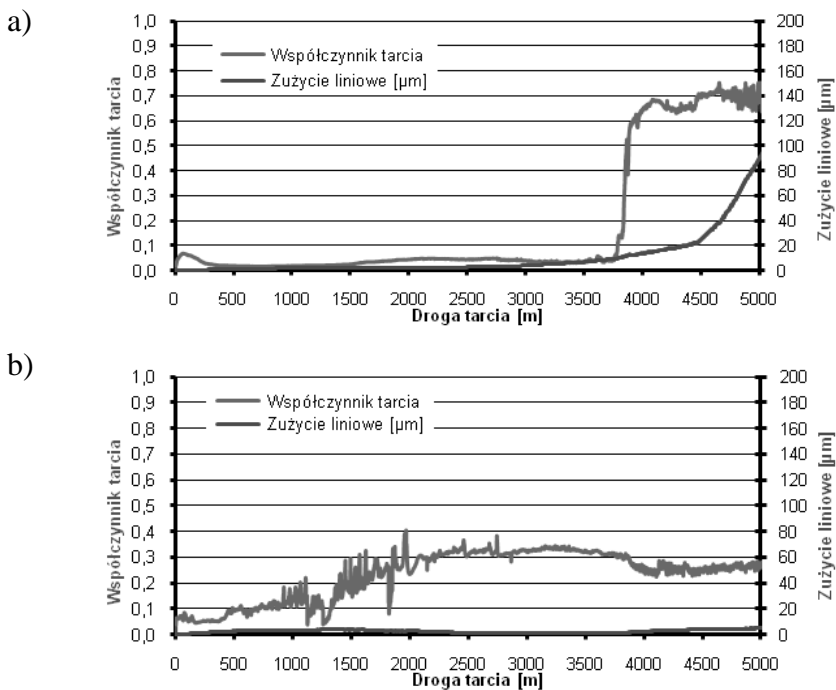
Fig. 7. Optical microscope and AFM images of worn surfaces on balls and discs in air and in vacuum for friction pair 100Cr6–CrN

W skojarzeniu stalowej kulki oraz tarczy pokrytej powłoką CrN (**Rys. 6**) wartość współczynnika tarcia w powietrzu ($\mu \approx 0,55$) była nieznacznie mniejsza niż w próżni ($\mu \approx 0,7$). Zużycie w próżni było o około 60% mniejsze niż w powietrzu i w obu środowiskach większe niż w przypadku stalowej tarczy bez powłoki (**Rys. 3 i 4**). W skojarzeniu tym dominuje zużycie stalowej kulki. Na tarczy widoczne są jedynie nieznaczne ślady zużycia (**Rys. 7**). Na obrazach mikroskopowych pokazanych na **Rys. 7** widać, że powierzchnie wytarcia są gładziej niż przy skojarzeniu 100Cr6–100Cr6. Można też zauważyć transfer materiału kulki na twardą warstwę CrN przy tarcu w powietrzu oraz jego retransfer na powierzchnię kulki przy tarcu w próżni, co wiąże się ze zmniejszonym zużyciem węzła. W powietrzu warstwa transferowa ulegała utlenianiu. Wygląd powierzchni wytarcia świadczy o dominującym zużyciu ściernym w powietrzu. W warunkach próżni pojawiły się wyraźne objawy zużycia adhezyjnego, połączone z retransferem materiału z ceramiki CrN na kulkę. Taki przebieg zjawisk potwierdzają rozważania w pracy [**L. 1**]. Skutkiem technicznym tego procesu jest zmniejszona intensywność zużycia przy większej niestabilności oporów tarcia.

Uzyskane wyniki w odniesieniu do tarcia i zużycia skojarzenia 100Cr6–CrN w powietrzu nie odbiegają istotnie od wyników uzyskanych

w podobnych warunkach przez innych badaczy [L. 2, 3, 12, 13]. Korzystne charakterystyki tribologiczne, szczególnie zużyciowe, ceramiki CrN przy współpracy ze stalą, zarówno w powietrzu, jak i w próżni, powodują, że powszechnie stosowana jest do pokrywania ostrzy narzędzi skrawających.

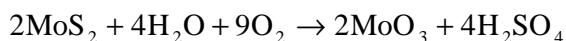
Przy tarciu w powietrzu kulki z powłoką MoS₂, na długim odcinku drogi testowej, utrzymywała się bardzo mała wartość współczynnika tarcia, wynosząca $\mu \approx 0,03$. Równie małe sumaryczne zużycie na tym odcinku, widoczne na **Rys. 8a**, nie przekracza 10 μm . Pod koniec drogi testowej następuje jednak nagły wzrost współczynnika tarcia do wartości zbliżonej przy skojarzeniu 100Cr6–100Cr6. Za wzrostem współczynnika tarcia gwałtownie wzrosło również sumaryczne zużycie liniowe tego skojarzenia.



Rys. 8. Przebieg zmian współczynnika tarcia i sumarycznego zużycia liniowego skojarzenia stal-powłoka MoS₂ (100Cr6-MoS₂): a) w powietrzu, b) w próżni

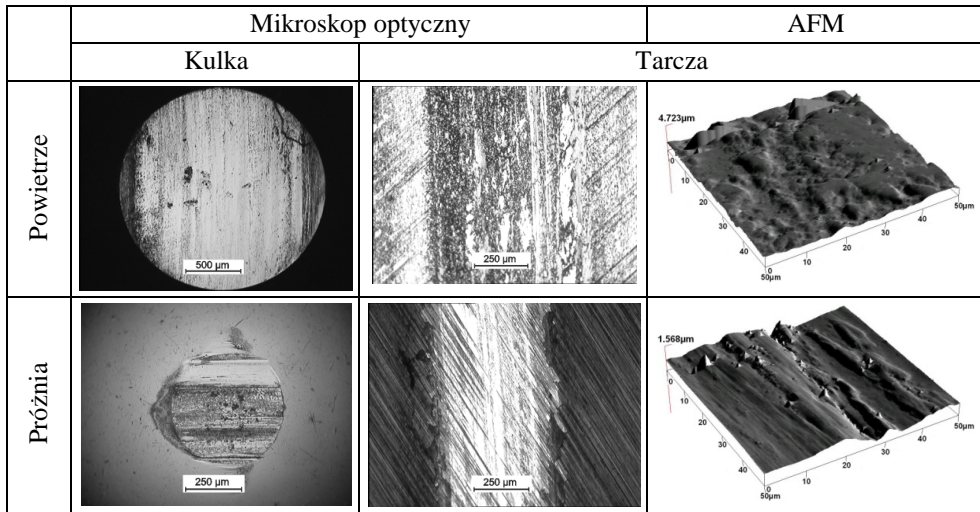
Fig. 8. Friction coefficient and total linear wear of steel-MoS₂ coating tribosystem (100Cr6-MoS₂) versus the sliding distance: a) in air, b) in vacuum

Wzrost współczynnika tarcia oraz zużycia spowodowany był przetarciem się powłoki MoS₂. Zmierzona głębokość wytartego w tarczy rowka wyniosła 1,9 μm i była większa o 0,2 μm od grubości wykonanej powłoki. Małą odporność powłok MoS₂ na zużycie w powietrzu potwierdza szereg badań [L. 1, 14–16]. W obecności tlenu i pary wodnej zawartej w powietrzu dość szybko postępował proces utleniania dwusiarczku molibdenu MoS₂, którego produktem jest trójtlenek molibdenu MoO₃. Proces ten można zilustrować następująco:



Powoduje to destrukcję struktury i utratę właściwości smarnych płytkowej struktury MoS₂. Ponadto w strefie styku pojawia się kwas siarkowy. Taki przebieg zjawisk przy tarcie w powietrzu mogą potwierdzać jasne smugi na powierzchni wytarcia tarczy widoczne na **Rys. 9**. Proces ten nie miał miejsca przy tarcie w próżni (**Rys. 8b**), gdzie wartość współczynnika tarcia wzrosła do około 0,3, ale zużycie utrzymywało się nadal na bardzo niskim poziomie (**Rys. 3 i 4**). Na wytartej powierzchni kulki w tych warunkach (**Rys. 9**) widać transferową warstwę MoS₂. Zużycie kulki ze stali 100Cr6 w styku z powłoką MoS₂ jest mniejsze niż w styku 100Cr6–100Cr6 i 100Cr6–CrN. Współczynnik tarcia w powietrzu jest również najmniejszy z badanych skojarzeń.

Bardzo dobre właściwości smarne i małe zużycie powłok na bazie MoS₂ potwierdza szereg badań zrealizowanych w podobnych warunkach przez innych autorów [L. 10, 14–16]. Relacje pomiędzy współczynnikami tarcia w powietrzu ($\mu \approx 0,2$) i próżni ($\mu \approx 0,05$), przy tarcie ślizgowym kulki ze stali 9Cr18 z powłoką MoS₂ wykonaną na tarczy z tej stali, przedstawione w pracy [L. 10] są jednak odwrotne. Podobny wynik jak w [L. 10] uzyskano w pracy [L. 14] w ślizgowym styku ceramicznej kulki (Si₃N₄) z powłoką MoS₂ na stali (ANSI 52100) i pracy [L. 16] w ślizgowym styku kulki z nierdzewnej stali chromowej (440C) z powłoką MoS₂ na krzemowym substracie. W tym ostatnim przypadku wartości wyznaczonych współczynników tarcia wynosiły odpowiednio: $\mu \approx 0,1$ w powietrzu i $\mu \approx 0,05$ w próżni. Otrzymane wartości zużycia w próżni były również mniejsze niż w powietrzu.



Rys. 9. Obrazy z mikroskopu optycznego i mikroskopu AFM śladów wytarcia kulki i tarczy dla skojarzenia 100Cr6-MoS₂ w powietrzu i w próżni

Fig. 9. Optical microscope and AFM images of worn surfaces on balls and discs in air and in vacuum for friction pair 100Cr6-MoS₂

WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Środowisko próżni ma istotny wpływ na przebieg tarcia i zużycia ślizgowych skojarzeń ciernych, takich jak: stal 100Cr6 ze stalą 100Cr6, stal 100Cr6 z powłoką CrN oraz stal 100Cr6 z powłoką MoS₂, wobec czego na podstawie badań w powietrzu nie można wnioskować o ich charakterystykach uzyskiwanych w warunkach próżni;
2. Zużycie stali 100Cr6, w warunkach próżni o ciśnieniu 5×10^{-3} mbar, w ślizgowym styku ze stalą 100Cr6 i pokrytą przeciwzużyciową powłoką CrN lub niskotarciową powłoką MoS₂, jest mniejsze niż w powietrzu;
3. Zużycie stali 100Cr6, w ślizgowym styku ze stalą 100Cr6 pokrytą przeciwzużyciową powłoką CrN, zarówno przy tarcu w powietrzu, jak i w próżni, jest większe niż w skojarzeniu ze stalą 100Cr6 i powłoką MoS₂, podczas gdy zużycie samej powłoki CrN jest minimalne;
4. Zużycie stali 100Cr6 w ślizgowym skojarzeniu z przeciwzużyciową powłoką MoS₂ zarówno przy tarcu w powietrzu, jak i w próżni, jest mniejsze niż w skojarzeniach 100Cr6-100Cr6 i 100Cr6-CrN. Inten-

sywność zużywania warstwy MoS₂ w powietrzu jest jednak większa niż w próżni;

5. Współczynnik tarcia w ślizgowym skojarzeniu stali 100Cr6 z powłoką MoS₂ jest mniejszy w powietrzu niż w próżni i znacznie mniejszy niż w skojarzeniach 100Cr6–100Cr6 i 100Cr6–CrN.

W ślizgowym skojarzeniu 100Cr6–100Cr6 pracującym w próżni zarówno współczynnik tarcia, jak i zużycie było mniejsze niż w powietrzu, a współczynnik tarcia w próżni, w przypadku skojarzenia 100Cr6–MoS₂, był większy niż w powietrzu. Wyniki te są zbieżne z wynikami dotychczas opublikowanymi przez niektórych autorów. Należy jednak zaznaczyć, że wielu autorów publikuje wyniki całkowicie odmienne. Te nietypowe zachowania tych skojarzeń wymagają dalszych badań.

LITERATURA

1. Kazuhisa M.: Considerations in vacuum tribology (adhesion, friction, wear, and solid lubrication in vacuum). *Tribology International*. 1999, t. 32, s. 605–616.
2. Bator A., Bujak J., Michalczewski R., Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszyński W.: Badanie przeciwzużyciowych powłok nanoszonych w procesie PVD. *Tribologia*. 2000, nr 3, s. 275–288.
3. Tuszyński W., Szczerek M., Michalczewski R.: Investigation of antiwear coatings deposited by the PVD process. *Tribotest Journal*. 2003, nr 10, s. 3–18.
4. Michalczewski R.: Charakterystyki tribologiczne cienkich powłok niskotarciowych typu DLC i MoS₂ w warunkach tarcia suchego. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*. 2006, Z. 2, s. 117–131.
5. Holmberg K., Ronkainen H., Laukkanen A., Wallin K.: Friction and wear of coated surfaces-scales, modelling and simulation of tribomechanisms. *Surface & Coatings Technology*. 2007, t. 202, s. 1034–1049.
6. Franklin S.E., Baranowska J.: Conditions affecting the sliding tribological performance of selected coatings for high vacuum bearing applications. *Wear*. 2007, t. 263, s. 1300–1305.
7. Szczerek M.: Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. *Biblioteka Problemów Eksploatacji Maszyn, ITeE Radom* 1996.
8. Kong Hosung, Yoon Eui-Sung, Kwan Kwon Oh: Self-formation of protective oxide films at dry sliding mild steel surfaces under a medium vacuum. *Wear*. 1995, t. 181–183, s. 325–333.
9. Kato K.: Wear in relation to friction-a review. *Wear*. 2000, t. 241, s. 151–157.

10. Xiang Yu, Chengbiao Wang, Gongwu Jiang, Haisheng Liu, Meng Hua: Tribological mechanism and property of 9Cr18 friction pair at atmosphere and in vacuum. *Vacuum*. 2004, t. 72, s. 461–466.
11. Santner E., Klaffke D., Meine K., Polaczyk Ch., Spaltmann: Effects of friction on topography and vice versa. *Wear*. 2006, t. 261, s. 101–106.
12. Su Y.L., Yao S.H., Leu Z.L., Wei C.S., Wu C.T.: Comparison of tribological behavior of three films-TiN, TiCN and CrN-grown by physical vapor deposition. *Wear*. 1997, t. 213, s. 165–174.
13. Zhang Z.G., Rapaud O., Bonasso N., Mercs D., Dong C., Coddet C.: Control of microstructures and properties of dc magnetron sputtering deposited chromium nitride films. *Vacuum*. 2008, t. 82, s. 501–509.
14. Seock-Sam Kim, Chan-Wook Ahn, Tae-Hyung Kim: Tribological characteristics of magnetron sputtered MoS₂ films in various atmospheric conditions. *KSME International Journal*. 2002, vol. 16, no. 9, s. 1065–1071.
15. Renevier N. M., Hampshire J., Fox V.C., Witts J., Allen T., Teer D.G.: Advantages of using self-lubricating, hard, wear-resistant MoS₂-based coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2001, t. 142–144, s. 67–77.
16. Watanabe S., Noshiro J., Miyake S.: Friction properties of WS₂/MoS₂ multilayer films under vacuum environment. *Surface & Coatings Technology*. 2004, t. 188–189, s. 644–648.

Recenzent:
Stanisław PYTKO

Summary

Tribological characteristics of coatings were investigated using a ball-on-disc tribosystem without lubrication in the presence of air and in a vacuum. The tests were performed employing friction pairs consisting of 100Cr6 bearing steel balls and a disc (uncoated or CrN and MoS₂ coated). The evaluation of tribological properties of the investigated ball-on-disc tribosystem have been done on the basis of friction coefficient, linear wear intensity, wear scar diameters on balls, and microscopy observation of the worn surfaces. The results indicate that the vacuum significantly influences the friction and wear behaviour of investigated friction pairs.