

Anita MAŃKOWSKA-SNOPCZYŃSKA*, Witold PIEKOSZEWSKI*

WPLYW GRUBOŚCI POWŁOK TiN I CrN NA POWIERZCHNIOWĄ TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ

THE INFLUENCE OF THICKNESS OF TiN AND CrN COATINGS ON ROLLING CONTACT FATIGUE

Słowa kluczowe:

technologie próżniowe, powłoki PVD, pitting, powierzchniowa trwałość zmęczeniowa

Key words:

vacuum techniques, PVD coatings, pitting, rolling contact fatigue

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu grubości powłoki elementów skojarzonych w wysokoobciążonym modelowym styku tocznym. Przebadano stal łożyskową 100Cr6 oraz powłoki azotku tytanu (TiN) i azotku chromu (CrN) naniesione na próbki ze stali 100Cr6. Badany modelowy styk smarowany był mineralnym olejem wzorcowym RL 144 bez dodatków. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że wraz

* Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Tribologii, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel. (48)364 42 41.

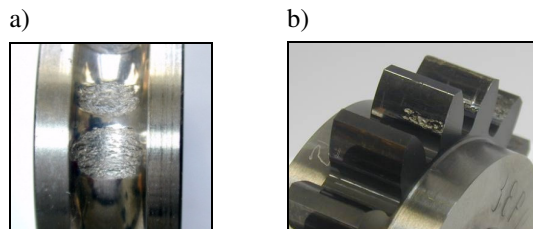
ze wzrostem grubości powłoki zmniejsza się trwałość zmęczeniowa węzła tarcia.

WPROWADZENIE

Głównym problemem, z jakim stykają się użytkownicy wysokoobciążonych węzłów tarcia, w których występuje smarowany styk skoncentrowany, jest ich trwałość. Awaria kinematycznego węzła tarcia (przekładni zębatej, łożyska tocznego, układ krzywka–popychacz itp.) najczęściej wyklucza urządzenie z eksploatacji na dłuższy czas i wiąże się ze zwiększeniem kosztów eksploatacji. Ogólnie panująca w technice tendencja zmniejszania zużycia surowców w praktyce sprowadza się do miniaturyzacji urządzeń, a przez to do zwiększania mocy przenoszonej przez kinematyczne węzły tarcia. Wzrost wartości obciążenia przenoszonego przez te węzły wiąże się ze wzrostem ryzyka wystąpienia zmęczenia powierzchni roboczych elementów trących.

Pitting jest formą zużywania warstw wierzchnich smarowanych elementów maszyn, objawiającą się wgłębieniami na powierzchniach trących bieżni łożysk i kół zębatych (**Rys. 1**). Zużycie to postępuje niejawnie w sposób ciągły i jest wynikiem kumulacji energii w warstwie wierzchniej która po przekroczeniu pewnego poziomu przejawia się wykruszeniami [**L. 1, 2**].

W ośrodkach zajmujących się konstrukcją i projektowaniem wysokoobciążonych węzłów tarcia panuje przekonanie, że możliwości klasycznych materiałów ze względu na trwałość i wytrzymałość zostały już wyczerpane. Przyszłościowymi sposobami zwiększenia odporności na zużycie są nowoczesne technologie konstytuowania warstw wierzchnich elementów maszyn, do których należą powłoki nanoszone metodami PVD.



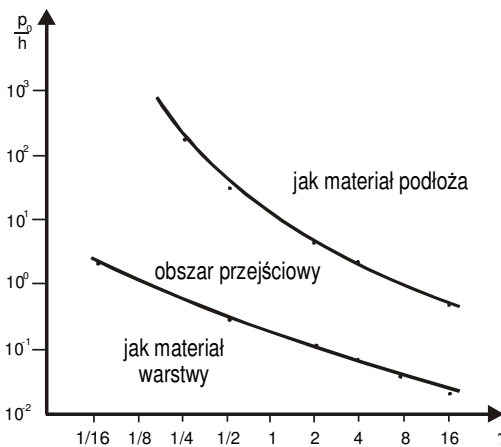
Rys. 1. Elementy maszyn ze śladami zniszczenia powierzchni na skutek pittingu: a) bieżnia łożyska kulkowego, b) koło zębate

Fig. 1. The picture of machine parts with pitting wear: a) ball bearing race, b) gear wheel

Ze względu na niejednoznaczne i sprzeczne doniesienia literaturowe [L. 3, 4, 5] dot. wpływu grubości powłoki na powierzchniową trwałość zmęczeniową autorzy postanowili wyjaśnić ten problem eksperymentalnie. Grubość powłoki ma istotny wpływ na zużycie tribologiczne. Wzrost odporności na zużycie zmęczeniowe zaobserwowano głównie dla powłok o grubości nieprzekraczającej 1 μm . Cienka powłoka częściej odkształca się bez utraty spójności [L. 6]. I tak, według różnych prac, optymalna grubość powłoki TiN wynosi:

- 0,75 μm [L. 5],
- 0,2– 1,0 μm [L. 6].

Przy omawianiu tego zagadnienia należy zwrócić uwagę, że dla każdego rodzaju warstwy powierzchniowej można wyróżnić trzy strefy wpływu (Rys. 2). Szczegółowo zostały one omówione w monografii M. Szczerka [L. 2], który wykazał, że wielkość zmian naprężeń i odkształceń w strefie styku w znaczącym stopniu zależy od właściwości sprężystych i grubości warstwy oraz od obciążenia, a więc od warunków pracy styku.



$$\gamma = \frac{E_1(1-\nu_2^2)}{E_2(1-\nu_1^2)} \quad P_o = \left[\frac{E_2 P}{(1-\nu_2^2) \pi R} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$b_o = 2 \left[\frac{(1-\nu_2^2) P R}{E_2 \pi} \right]^{\frac{1}{2}}$$

gdzie:

E_1, E_2 – moduły Younga materiału warstwy

i podłoża,

ν_1, ν_2 – liczby Poissona materiału warstwy i podłoża,

P – obciążenie styku,

R – zastępczy promień krzywizny stykających się elementów,

h – grubość powłoki.

Rys. 2. Strefy wpływu warstwy wprowadzonej pomiędzy stykające się ciała na naciski kontaktowe [L. 2]

Fig. 2. The chart with zones indicating the influence of the layer introduced between contacting bodies on the contact pressure [L. 2]

Według K. Holmberg'a i A Matthes'a [L. 7] cieńsze powłoki mają większe własne naprężenia ściskające, przez co są bardziej odporne na zużycie zmęczeniowe. Są również publikowane odmienne informacje, np. obliczenia teoretyczne dla powłoki TiN wskazują, że zwiększoną odporność na powierzchniowe zużycie zmęczeniowe można będzie uzyskać dla powłok o grubości większej niż 3 μm . [L. 8]. Nie zostało to jednak potwierdzone eksperymentalnie.

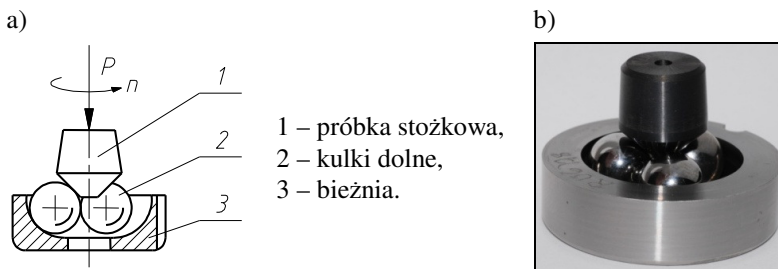
W pracy zbadano, jaki wpływ ma grubość powłoki na powierzchniową trwałość zmęczeniową (pitting) wysokoobciążonych elementów, które pracują w smarowanym styku tocznym.

METODA BADAŃ

Badania tribologiczne przeprowadzono na zmodernizowanym aparacie czterokulowym opracowanym i produkowanym w ITeE – PIB. Zarówno zmodernizowany aparat, jak i metoda badawcza została przedstawiona w wielu publikacjach [L. 8, 9].

Badanie polegało na przeprowadzeniu, przy stałym zadanim obciążeniu i stałej prędkości obrotowej, 24 biegów badawczych elementów testowych współpracujących tocznie w obecności środka smarowego, ciągłym pomiarze amplitudy drgań generowanych w badanym węźle, pomiarze czasu poszczególnych biegów badawczych, sporządzeniu rozkładu Weibulla i na jego podstawie określeniu trwałości węzła tarcia.

Trwałość zmęczeniową charakteryzowano za pomocą tzw. trwałości 10% i 90% oznaczonej odpowiednio L_{10} i L_{90} . Jest to czas eksploatacji tocznych elementów węzła tarcia (smarowanych badanym olejem), w którym 10% lub 90% ich populacji ulega uszkodzeniu.



Rys. 3. Węzeł tarcia aparatu T-03 do badania zużycia zmęczeniowego materiałów stosowanych na wysokoobciążone elementy toczne: a) schemat, b) widok

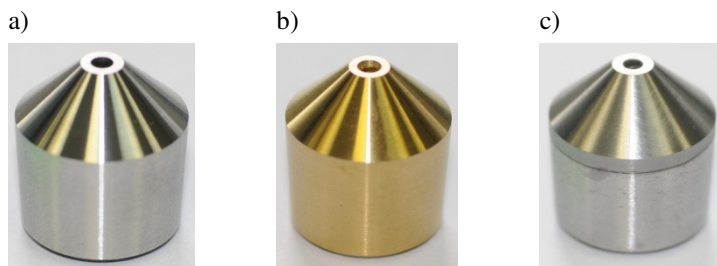
Fig. 3. Friction pair of T-03 tester used for investigation of fatigue wear of materials intended for heavy-loaded rolling parts: a) drawing, b) view

Warunki, przy których przeprowadzono biegi badawcze były następujące:

- obciążenie wężła tarcia: 3924 N,
- prędkość obrotowa wrzeciona: 1450 obr./min,
- obciążenie wstępne wężła tarcia: 981 N,
- temperatura otoczenia: 23°C.

OBIEKTY BADAŃ

Skojarzenie badawcze składało się z próbki (stożka) oraz przeciwpróbki (kulki). Próbki wykonano ze stali łożyskowej 100Cr6 ze względu na to, że stal ta po obróbce cieplnej charakteryzuje się jednorodną strukturą. Z tych względów nadaje się jako materiał referencyjny i została wybrana jako podstawowy materiał do nanoszenia powłok. Dodatkowym argumentem przemawiającym za tym wyborem jest to, że stal 100Cr6 jest powszechnie stosowana na elementy łożysk tocznych, w związku z czym została przebadana wszechstronnie pod względem trwałości zmęczeniowej [L. 11÷17].



Rys. 4. Widok stożków (próbek): a) ze stali 100Cr6, b) z powłoką TiN, c) z powłoką CrN

Fig. 4. The view of test cones (upper specimens): a) 100Cr6 bearing steel, b) with TiN coating, c) with CrN coating

Na próbki naniesiono dwie powłoki jednowarstwowe azotku tytanu (TiN) i azotku chromu (CrN). We wszystkich przypadkach badania skojarzeń z powłokami, powłoka naniesiona była tylko na jeden z elementów testowych. Powłoki TiN oraz CrN osadzono w procesie PVD metodą łukowo-próżniową. Przebadane powłoki TiN miały następujące grubości: 0,65, 1,0, 2,0 i 2,14 μm , natomiast powłoki CrN miały grubość: 0,25, 0,8, 1,2 i 1,6 μm . Wszystkie procesy osadzania zostały przeprowadzone poni-

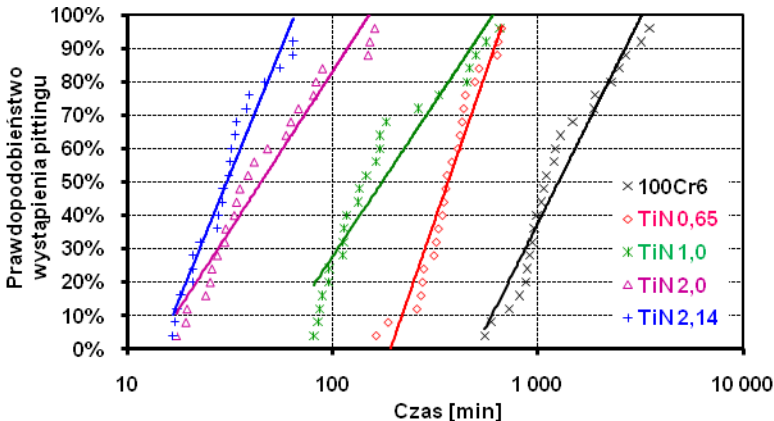
żej temperatury wystąpienia przemian fazowych w materiale podłoża (poniżej 200°C).

W badaniach zmęczeniowych przeciwpróbkami były 3 kulki łożyskowe o średnicy nominalnej 1/2", wykonane ze stali łożyskowej 100Cr6 w 16 klasie dokładności (PN-83/M-86452). Chropowatość powierzchni charakteryzowana parametrem Ra wynosiła 0,032 μm , a twardość 62÷64 HRC.

Aby uniknąć wpływu rodzaju środka smarowego na rezultaty badań, przyjęto do smarowania badanych skojarzeń materiałowych mineralny olej wzorcowy RL 144 bez dodatków o lepkości 49,31 mm^2/s w temperaturze 40°C.

WYNIKI BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

Rezultaty badań testowych węzłów, w których stożek pokryty był powłokami TiN, przedstawiono na **Rys. 5 i 6**. Uzyskane wyniki wskazują jednoznacznie, że grubość powłoki ma istotny wpływ na czas inicjacji pittingu. Grubsza powłoka powoduje zmniejszenie trwałości zmęczeniowej badanego węzła tarcia. Zróżnicowanie to bardzo wyraźnie wynika z danych przedstawionych na **Rys. 6**. Należy zaznaczyć, że trwałość L_{10} skojarzenia 100Cr6-100Cr6 (jako bazy odniesienia) i TiN 0,65 – 100Cr6 jest tego samego rzędu, chociaż powłoka powoduje 3-krotne jej zmniejszenie.



Rys. 5. Wyniki badań zmęczeniowych skojarzeń materiałowych stal–stal (100Cr6) i stal–powłoka TiN (różna grubość powłoki w μm), smarowanych olejem mineralnym RL 144

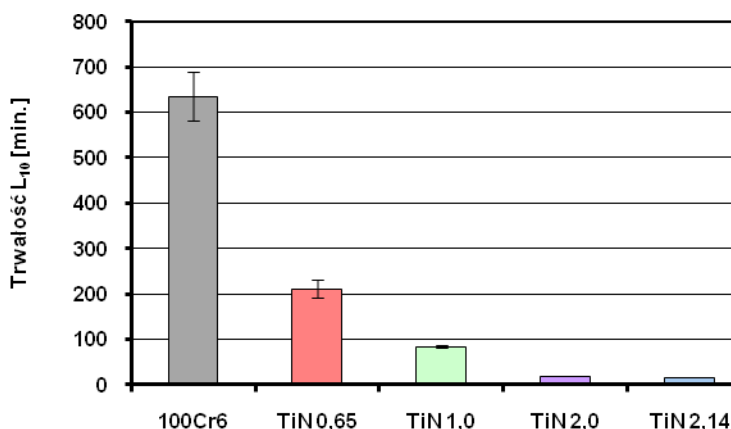
Fig. 5. The fatigue life research results for 100Cr6 – 100Cr6 and 100Cr6-TiN couple with different thickness lubricated with RL 144 mineral oil

Powłoki o grubości powyżej 1 μm powodują drastyczny spadek trwałości w stosunku do skojarzenia elementów bez powłoki (**Tabela 1**). Krzywa charakteryzująca tą zależność, w przypadku powłoki TiN, ma charakter wykładniczy (**Rys. 7**).

Tabela 1. Zestawienie trwałości L_{10} i współczynnika rozrzutu „W” skojarzeń materiałowych stal–stal (100Cr6) i stal–powłoka TiN (różna grubość powłoki w μm), smarowanych olejem mineralnym RL 144

Table 1. The combination of fatigue life L_{10} and scatter factor W for 100Cr6 – 100Cr6 and 100Cr6-TiN couple with different thickness lubricated with RL 144 mineral oil

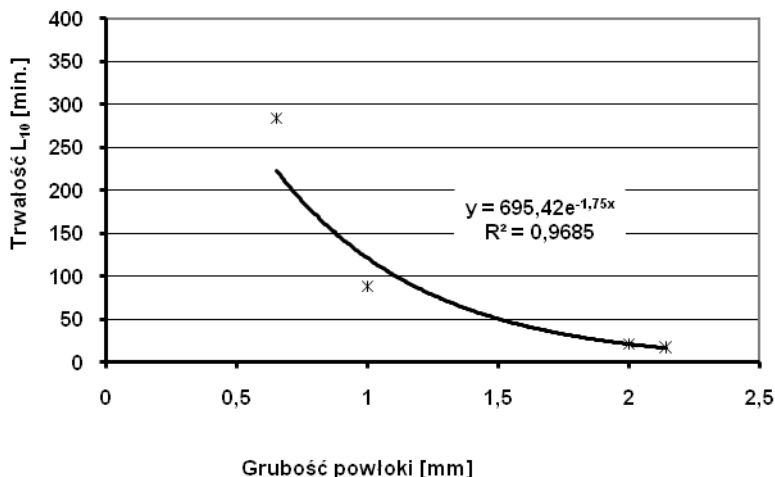
| Materiał stożka/powłoki \Rightarrow | 100Cr6 | TiN 0,65 | TiN 1,0 | TiN 2,0 | TiN 2,14 |
|---------------------------------------|--------|----------|---------|---------|----------|
| L_{10} [min] | 634,95 | 211,56 | 84,60 | 19,35 | 17,58 |
| $W = L_{90}/L_{10}$ | 4,19 | 2,74 | 5,88 | 6,29 | 3,30 |



Rys. 6. Trwałość zmęczeniowa skojarzeń: stal–stal (100Cr6) i stal–powłoka TiN (różna grubość powłoki w μm), smarowanych olejem mineralnym RL 144

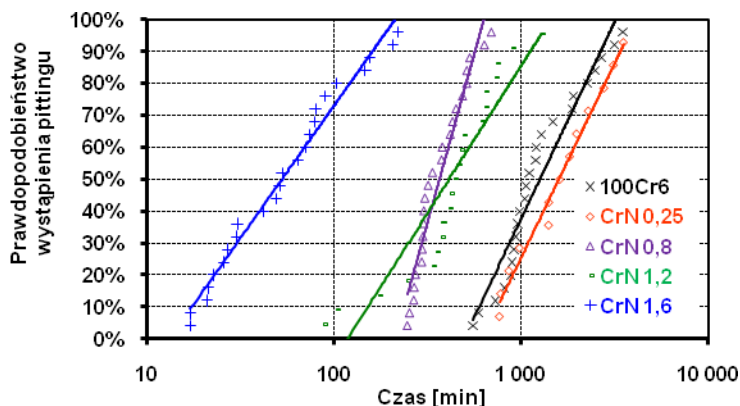
Fig. 6. Fatigue life L_{10} for 100Cr6 – 100Cr6 and 100Cr6-TiN couple with different thickness lubricated with RL 144 mineral oil

Badania węzła tarcia z elementami z naniesionymi powłokami CrN potwierdziły zaobserwowany w przypadku powłok TiN wpływ grubości powłoki na jego trwałość. Wyniki badań węzłów z elementami z powłokami CrN o grubości 0,25, 0,8 1,2 i 1,6 μm smarowanych olejem RL 144 przedstawiono na **Rys. 8 i 9**.



Rys. 7. Zależność powierzchniowej trwałości zmęczeniowej L_{10} od grubości powłoki TiN naniesionej na stalową próbkę

Fig. 7. The dependence of rolling contact fatigue life L_{10} on thickness of TiN coating deposited on steel specimen

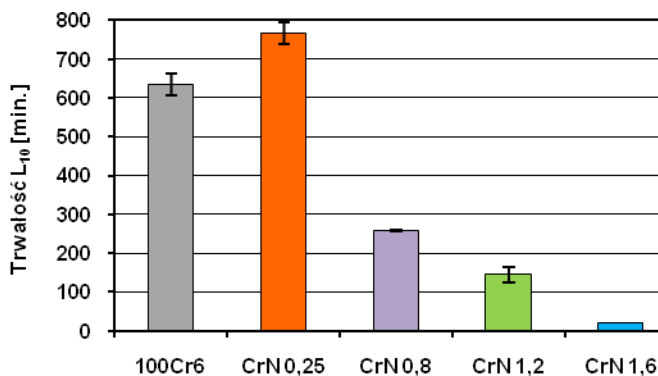


Rys. 8. Wyniki badań zmęczeniowych skojarzeń materiałowych stal–stal (100Cr6) i stal–powłoka CrN (różna grubość powłoki w μm), smarowanych olejem mineralnym RL 144

Fig. 8. The fatigue life results for 100Cr6 – 100Cr6 and 100Cr6-CrN couple with different thickness lubricated with RL 144 mineral oil

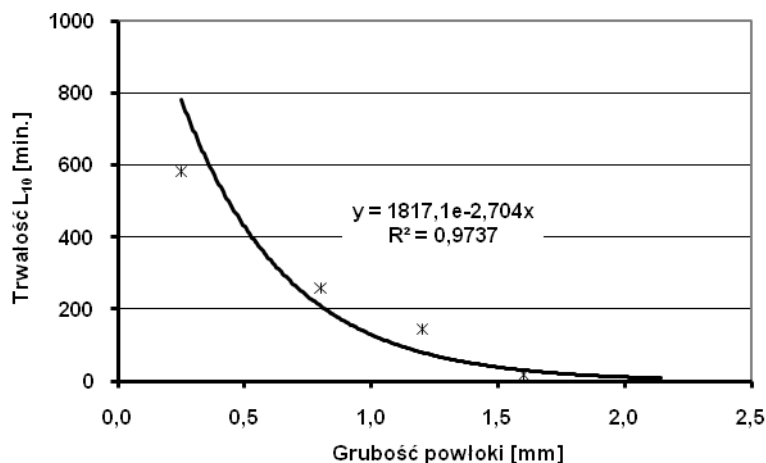
Podobnie, jak w przypadku powłok TiN, grubsza powłoka CrN powoduje wyraźne zmniejszenie trwałości zmęczeniowej. Zróżnicowanie to przedstawiono również na **Rys. 9**. Trwałość L_{10} skojarzenia elementu z naniesioną powłoką CrN 0,8 – 100Cr6 jest ponad 2,5-krotnie mniejsza od trwałości elementów stalowych. Zwiększenie grubości powłoki do ok.

1,6 μm powoduje jej drastyczny spadek (ok. 30-krotny) w stosunku do skojarzenia elementów bez powłoki (**Tabela 2**).



Rys. 9. Trwałość zmęczeniowa skojarzeń: stal-stal (100Cr6) i stal-powłoka CrN (różna grubość powłoki w μm), smarowanych olejem mineralnym RL 144

Fig. 9. Fatigue life L_{10} for 100Cr6 – 100Cr6 and 100Cr6-CrN couple with different thickness lubricated with RL 144 mineral oil



Rys. 10. Zależność powierzchniowej trwałości zmęczeniowej L_{10} od grubości powłoki CrN naniesionej na stalową próbkę

Fig. 10. The dependence of rolling contact fatigue life L_{10} on thickness of CrN coating deposited on steel specimen

Tabela 2. Zestawienie trwałości L_{10} i współczynnika rozrzutu W skojarzeń materiałowych stal–stal (100Cr6) i stal–powłoka CrN (różna grubość powłoki w μm), smarowanych olejem mineralnym RL 144

Table 2. The combination of fatigue life L_{10} and scatter factor W for 100Cr6 – 100Cr6 and 100Cr6–CrN couple with different thickness lubricated with RL 144 mineral oil

| Materiał stożka/powłoki \Rightarrow | 100Cr6 | CrN 0,25 | CrN 0,8 | CrN 1,2 | CrN 1,6 |
|---------------------------------------|--------|----------|---------|---------|---------|
| L_{10} [min] | 634,95 | 765,08 | 257,70 | 143,69 | 18,73 |
| $W = L_{90}/L_{10}$ | 4,19 | 4,91 | 3,92 | 6,58 | 9,24 |

Potwierdzono również tym samym, że korzystne oddziaływanie bardzo cienkiej powłoki (na jakie powołują się autorzy pracy [L. 18]) o grubości ok. 0,2 μm wiąże się z utrudnieniem w propagacji pęknięć odpowierzchniowych, sprzyjając zwiększeniu trwałości elementów z powłokami.

WYNIKI BADAŃ ANALITYCZNYCH

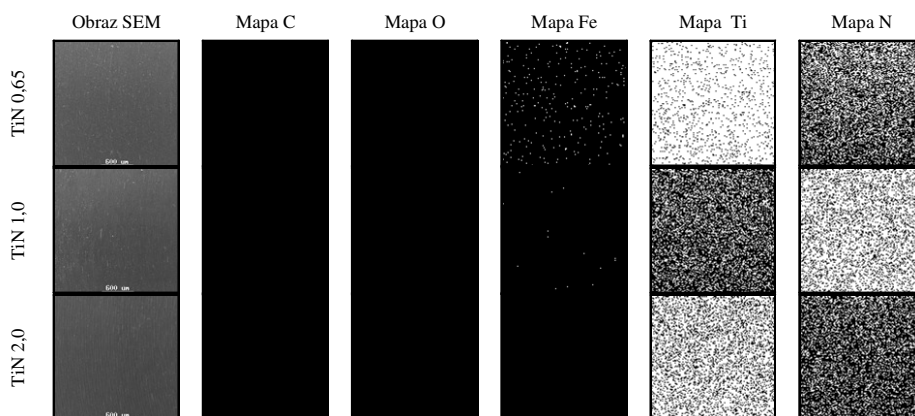
Celem analiz powierzchni śladu tarcia na próbkach było powiązanie wyników badań trwałościowych z oddziaływaniem środka smarowego na powierzchnie robocze elementów wężła tarcia.

Badania realizowano w wykorzystaniu mikroanalizy rentgenowskiej pozwalającej na identyfikację pierwiastków wchodzących w skład nieorganicznych produktów przemian tribochemicznych. Analizie poddano ślady tarcia w pobliżu występowania wykruszenia zmęczeniowego. Wstępnie wykonywano analizę punktową z obszaru powierzchni tarcia, a następnie dla wybranych pierwiastków wykonywano analizę powierzchniową rozkładu pierwiastków (mapping). Uzyskano „mapy” rozmieszczenia wybranych pierwiastków w analizowanym obszarze w postaci białych punktów, których zagęszczenie wzrasta ze wzrostem zawartości pierwiastka. Obrazy poddano obróbce cyfrowej w celu eliminacji zakłóceń.

Na wszystkich próbkach (stożkach) z powłokami na śladach tarcia zaobserwowano znaczną obecność żelaza. Analiza problemu wykazała, że może to być efekt łącznego występowania wzajemnie nakładających się procesów. Pierwszy z nich to powstanie licznych mikroskopijnych uszkodzeń powłoki, a tym samym odsłonięcie podłoża bogatego w żelazo. Drugi to transfer żelaza na powłokę ze współpracujących tarciowo kulek. Potwierdza to śladowa obecność tlenu zawartego w utlenionym żelazie. Kolejnym procesem powodującym pojawienie się żelaza

w śladzie tarcia jest ścieranie się powłok podczas testu tribologicznego (zmniejszanie ich grubości), co może prowadzić do błędów metody, przedstawionego poniżej. Ostatnia przyczyna wykrycia Fe w śladach tarcia może wynikać z ograniczeń metody mikroanalizy. Przy cienkich powłokach istnieje możliwość uzyskania sygnałów od pierwiastków zalegających pod powłoką, w tym przypadku żelaza zawartego w podłożu, co w przypadku powłok nanoszonych metodami PVD jest realne ze względu na ich małą grubość (najgrubsza powłoka miała 2,14 μm).

Aby potwierdzić ostatnią z przyczyn wykrycia żelaza w śladach tarcia, dokonano analizy powierzchniowej powłok o różnej grubości przed testami tribologicznymi. Wyniki tych analiz przedstawiono na **Rys. 11**.



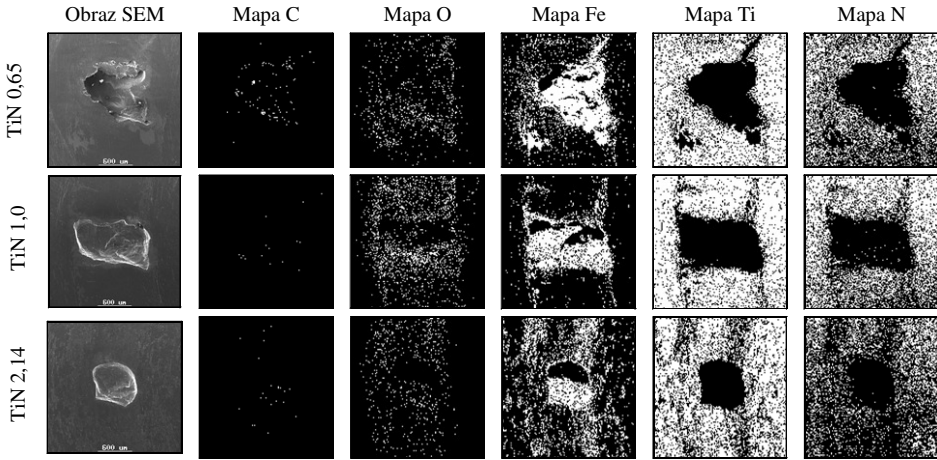
Rys. 11. Mapy rozkładu pierwiastków na stożkach z powłoką TiN o różnej grubości

Fig. 11. The maps of elementary distribution on the cones with TiN coating with various thicknesses

Z przedstawionych na tym rysunku analiz wynika, że dla powłoki o grubości wynoszącej 0,65 μm uzyskuje się sygnały od żelaza znajdującego się pod powłoką – świadczą o tym białe plamki regularnie rozłożone w analizowanym obszarze. Przeprowadzone analizy dla powłoki o grubości 1,0 μm wykazały śladowe, natomiast dla powłoki o grubości 2,0 μm zupełny brak sygnałów od żelaza znajdującego się pod powłoką.

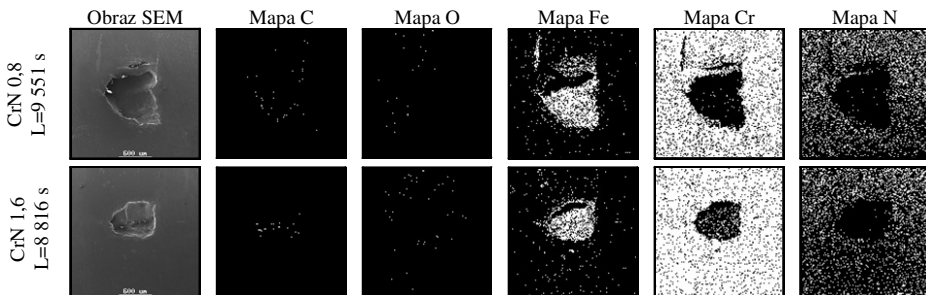
O transferze żelaza z kulek na próbki świadczą zdjęcia i analizy śladów tarcia wykonane po badaniach tribologicznych dla próbek z powłokami z azotku tytanu TiN. W tym przypadku ze wzrostem grubości po-

włoki zawartość tlenu i żelaza w warstwie powierzchniowej analizowanego obszaru nie zmienia się w istotny sposób i określa zarysy ścieżek tarcia na próbkach (**Rys. 12**). Zarysy te na mapach tytanu i azotu świadczą o powolnym ścieraniu się powłoki podczas biegu badawczego. Dla informacji należy podać, że przedstawione na tym rysunku analizy zostały wykonane dla próbek o podobnym przebiegu, który odpowiadał ok. 150 min czasu pracy testowego węzła tarcia.



Rys. 12. Mapy rozkładu pierwiastków na śladzie tarcia stożka z powłoką TiN ($L_{10} \cong 150$ min)

Fig. 12. The maps of elementary distribution on the wear track of the cone with TiN coating ($L_{10} \cong 150$ min)

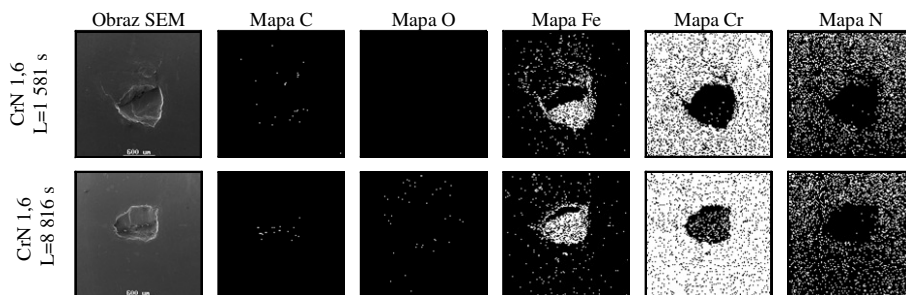


Rys. 13. Mapy rozkładu pierwiastków na śladzie tarcia stożka z powłoką CrN ($\sim L_{10} = 150$ min)

Fig. 13. The maps of elementary distribution on the cones with CrN coating ($\sim L_{10} = 150$ min)

W przypadku powłoki CrN (**Rys. 13**) zawartość tlenu, świadcząca o utlenianiu przeniesionego z kulek żelaza, jest praktycznie niewidoczna. Na śladzie tarcia nie widać przetarć powłoki, sygnalizowanych zmniejszeniem się zawartości chromu i azotu. Świadczy to o dużej odporności powłoki na zużycie ściernie. Czarne obszary idealnie odpowiadają zarysom wyrw pittingowych i świadczą o braku w tych miejscach podstawowych pierwiastków wchodzących w skład powłoki.

O dużej, zaobserwowanej wcześniej, odporności na zużycie ściernie powłok CrN podczas testów zmęczeniowych, świadczą uzyskane podobne mapy koncentracji poszczególnych pierwiastków dla próbek o zdecydowanie różnej trwałości (**Rys. 14**).



Rys. 14. Mapy rozkładu pierwiastków na śladzie tarcia stożka z powłoką CrN 1,6 μm o różnej PTZ smarowanych olejem mineralnym RL 144/4

Fig. 14. The maps of elementary distribution on the cones with CrN coating (thickness 1.6 μm) with various fatigue lives, tribosystem lubricated with RL 144/4 mineral oil

Z wyników badań analitycznych przedstawionych w tym rozdziale nie wynika, aby pierwiastki zidentyfikowane na powierzchniach tarcia przyczyniły się do zużycia zmęczeniowego. Potwierdza to trafność wyboru oleju mineralnego RL 144 do smarowania badanego styku.

PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono istotny wpływ na pitting grubości powłoki naniesionej na elementy tworzące wysokoobciążony smarowany styk tocny.

W oparciu o uzyskane wyniki można stwierdzić jednoznacznie, że wzrost grubości powłok przeciwzużyciowych (TiN i CrN) naniesionych

na stalowe elementy wężła tarcia powoduje spadek ich powierzchniowej trwałości zmęczeniowej. Ponadto wykazano, że wzrost grubości powłoki powoduje obniżenie trwałości zmęczeniowej w każdym z przebadanych przypadków, przy czym zależność pomiędzy tymi parametrami ma charakter eksponentyjny.

LITERATURA

1. Pytko S., Szczerek M.: Pitting – forma niszczenia elementów tocznych. *Tribologia*. 1993, nr 4/5, s. 317÷334.
2. Szczerek M.: Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. Wyd. ITeE. Radom 1996.
3. Chang T.P., Cheng H.S., Chiou W.A., Sproul W.D.: A comparison of fatigue failure morphology between TiN coated and uncoated lubricated rollers. 1991, t. 34, s. 408÷416.
4. Chang T.P., Cheng H.S.: The influence of coating thickness on lubricated rolling contact fatigue life. *Surface and Coating*. 1990, nr 43/44, s. 699÷708.
5. Polonsky I.A., Chang T.P., Keer L.M., Sproul W.D.: A study of rolling-contact fatigue of bearing steel coated with physical vapor deposition TiN films: Coating response to cyclic contact stress and physical mechanisms underlying coating effect on the fatigue life. *Wear*. 1998, Vol. 215, pp. 191÷204.
6. Erdemir A.: Rolling-contact fatigue resistance of hard coatings on bearing steels. Joint Tribology Conference of the ASME/STLE, 10–14 października 1999, s. 1÷24.
7. Holmberg K., Matthews A.: *Coating Tribology*. Elsevier. Amsterdam 1994.
8. Polonsky I.A., Chang T.P., Keer L.M., Sproul W.D.: An analysis of the effect of hard coatings on near-surface rolling contact fatigue initiation induced by surface roughness. *Wear*. 1997, nr 208, s. 204÷219.
9. Michalczewski R., Piekoszewski W.: The Method for Assessment of Rolling Contact Fatigue of PVD/CVD Coated Elements in Lubricated Contacts. *Tribologia, Finnish Journal of Tribology*, vol. 25/2006 (4), s. 34÷43.
10. Tuszyński W., Michalczewski R., Piekoszewski W., Szczerek M.: Effect of ageing automotive gear oils on scuffing and pitting. *Tribology International* 41 (2008), s. 875÷888.
11. Libera M.: Wpływ wybranych parametrów warstwy wierzchniej na powierzchniową trwałość zmęczeniową węzłów tocznych. Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska, WMRI, 2001.
12. Palmgren A.: *Łożyska toczne*. Warszawa, PWN 1951.

13. Piekoszowski W.: Wpływ na powierzchniową trwałość zmęczeniową wybranych materiałów i technologii konstituowania warstw powierzchniowych elementów wężła tocznego. Tribologia, vol. 225 (3/2009), s. 185÷196.
14. Waligóra W.: Warstwa wierzchnia elementów ze stali łożyskowej a jej odporność na zmęczenie powierzchniowe. Tribologia. 1993, nr 2, s. 199÷219.
15. Waligóra W.: Rozrzut powierzchniowej trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 2004.
16. Waligóra W.: Odporność na zmęczenie powierzchniowe stali łożyskowej poddanej obróbce laserowej. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1994.
17. Wang Y., Fernandez J.E., Cuervo D.G.: Rolling – contact fatigue lives of steel AISI 52100 balls with eight mineral and synthetic lubricants. Wear. 1996, t. 196, s. 110÷119.
18. Chang T.P., Cheng H.S., Chiou W.A., Sproul W.D.: A comparison of fatigue failure morphology between TiN coated and uncoated lubricated rollers. 1991, t. 34, s. 408÷416.

Recenzent:
Adam WILCZEK

Summary

In this paper, the results of the influence the thickness of TiN and CrN coatings on rolling contact fatigue have been presented. The 100Cr6 bearing steel and TiN and CrN coatings deposited on 100Cr6 substrate with different thickness have been tested. Tribosystems were lubricated with mineral reference oil without additives denoted as RL 144. The obtained results show that, with the increase of the coating thickness, the rolling contact fatigue life decreases.