

Przemysław Tyczewski

Badanie wpływu zastosowania powłoki Ti-Al-Cr-N na stan powierzchni elementów sprężarki chłodniczej

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2018.478
Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

Elementy ruchowe sprężarek chłodniczych, mogą być narażone na różnego rodzaju procesy zużywania. Obecność czynnika chłodniczego powoduje, iż właściwości smarne i przeciwzużyciowe mieszaniny olej – czynnik są dużo gorsze niż oleju bez czynnika chłodniczego. W pracy przedstawiono wpływ zastosowania powłoki Ti-Al-Cr-N na stan powierzchni węzła tarcia występującego w sprężarkach agregatów chłodniczych. Badania wykonano przy użyciu modelowej maszyny tarciowej symulującej element sprężarki chłodniczej.

Słowa kluczowe: sprężarka chłodnicza, powłoki, zużycie

Wstęp

Dla zapewnienia odpowiedniej temperatury warunków podczas transportu szybko psujących się artykułów żywnościowych najczęściej stosuje się agregaty chłodnicze, które są montowane na zabudowach izotermicznych pojazdów drogowych. Najistotniejszym elementem agregatu jest sprężarka. W układach chłodniczych między innymi stosuje się tłokowe sprężarki. Dla zapewnienia prawidłowej pracy sprężarki niezbędne jest jej właściwe smarowanie.

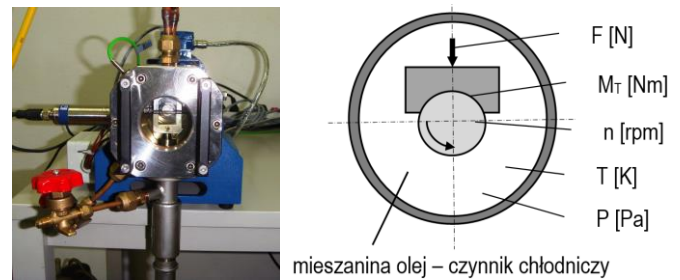
Z przeglądu literatury wynika, iż węzły ruchome sprężarek chłodniczych narażone są na różnego rodzaju procesy zużycia, zależne między innymi od stosowanych olejów i czynników chłodniczych w układzie chłodniczym [3, 10]. Zarejestrowane przez serwisy agregatów chłodniczych awarie związane z uszkodzeniem sprężarki wynoszą około 15% [9]. Mechaniczne przyczyny uszkodzeń sprężarek to brak oleju, niewłaściwe smarowanie, nieodpowiedni olej, nieodpowiednie właściwości oleju oraz uderzenie cieczowe [8].

W celu zmniejszenia zużycia sprężarek chłodniczych, postanowiono zbadać wpływ zastosowania powłoki ochronnej na powierzchni tarcia elementów sprężarki chłodniczej.

1. Metodyka badań

W literaturze istnieją prace dotyczące właściwości tribologicznych mieszaniny olej – czynnik chłodniczy na elementy sprężarki chłodniczej. Badania wykonywano na różnych tribotestach z wykorzystaniem modelowych węzłów tarcia znajdujących się w komorach ciśnieniowych. Jako węzeł tarcia realizujący ruch obrotowy najczęściej wykorzystywano tarczę-trzpień [1, 2, 4, 5, 6]. Stosowano również węzeł typu płytka-kula odzwierciedlający ruch posuwisto zwrotny [7] oraz węzeł ślizgowy typu rolka-kłoczek [11]. Z doświadczeń autor nad uszkodzeniami rzeczywistych sprężarek wynika, że w sprężarce najwcześniej zostaje zniszczone łożysko ślizgowe [9]. Zatem w badaniu wykorzystano węzeł tarcia typu rolka-panewka jako najbardziej odzwierciedlający pracę poprzecznych łożysk ślizgowych.

Badania przeprowadzono na stanowisku, w którym wykorzystano węzeł tarcia w komorze wysokociśnieniowej (rys. 1).



Rys. 1. Stanowisko badawcze: a) komora doświadczalna, b) schemat komory z węzłem tarcia

Zastosowana na stanowisku, wysokociśnieniowa komora pozwala na wytworzenie mieszaniny olej – czynnik chłodniczy porównywalnych do rzeczywistych warunków pracy sprężarek chłodniczych. Na stanowisku można zadawać różne ciśnienie oraz temperaturę mieszaniny. Ponadto można zadawać siłę nacisku na powierzchnię tarcia oraz prędkość obrotową próbki. Oprogramowanie stanowiska pozwala na ciągły pomiar wartości momentu tarcia, prędkości obrotowej rolki, ciśnienia i temperatury w komorze.

W badaniach zastosowano nieruchome próbki wklęsłe w kształcie klocka oraz obracające się rolki. Węzeł tarcia ma na celu odzwierciedlenie pracy poprzecznych łożysk ślizgowych w tłokowych sprężarkach chłodniczych. Wykorzystanie węzła ślizgowego we wysokociśnieniowej komorze pozwala na badania tribologiczne mieszanin olejów i czynników chłodniczych w warunkach pracy rzeczywistych sprężarek chłodniczych.

W związku z rodzajem materiałów podłoża, z którego wykonuje się sprężarki chłodnicze, a więc rolki ze stali 100Cr6 (materiał o niskiej temperaturze odpuszczenia) i klocka wykonanego z stopu siluminu AlSi17Cu4 postanowiono nałożyć powłokę wieloskładnikową Al-Cr-Ti-N. Wieloskładnikowe powłoki azotków wytwarzanych na bazie Ti, Al, Cr stosuje się w przemyśle jako tribologiczne powłoki przeciwzużyciowe.

Powłoki typu Ti-Al-Cr-N we współpracy ze stalą charakteryzują się niskim współczynnikiem tarcia, wyższą odpornością na wysokotemperaturowe utlenianie. Wysoka stabilność termiczna i chemiczna powłok Ti-Al-Cr-N spowodowana jest obecnością w ich składzie chemicznym chromu, który w podwyższonych temperaturach aktywuje wzrost cienkiej i zwartej powierzchniowej warstwy tlenkowej $(CrAl)_2O_3$ i jednocześnie hamuje wzrost TiO_2 . Wytworzona w wyniku procesu utleniania stabilna chemicznie buforowa warstwa tlenkowa blokuje dyfuzję tlenu z atmosfery otaczającej powłokę. Dodatkowo wytworzona na powierzchni powłok (Ti, Cr, Al, N) tlenkopodobna warstwa chromu, charakteryzująca się dobrymi właściwościami smarnymi, poprawia ich właściwości tribologiczne.

W celu sprawdzenia przydatności stosowania powyższych powłok na elementy ślizgowe występujące w sprężarkach chłodniczych, wykonano testy zużyciowe na próbkach z powłokami i bez powłok. W tabeli 1 przedstawiono warunki i parametry badań.

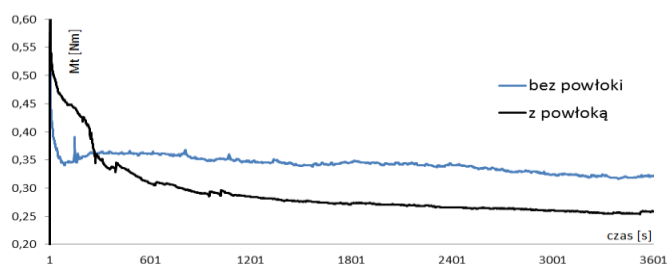
Tab. 1. Warunki badań

parametry testu	materiał	środowisko testu
siła nacisku 120 N	rolka 100Cr6	olej poliestrowy (POE)
prędkość obrotowa 500 rpm	rolka 100Cr6 + Ti-Al-Cr-N	Planetelf ACD 32
temperatura 298 K	kłosek AISi17Cu4	czynnik chłodniczy R134a
ciśnienie 0,022 MPa	kłosek AISi17Cu4+ Ti-Al-Cr-N	
czas próby 3600s		

2. Metodyka badań

2.1. Moment tarcia

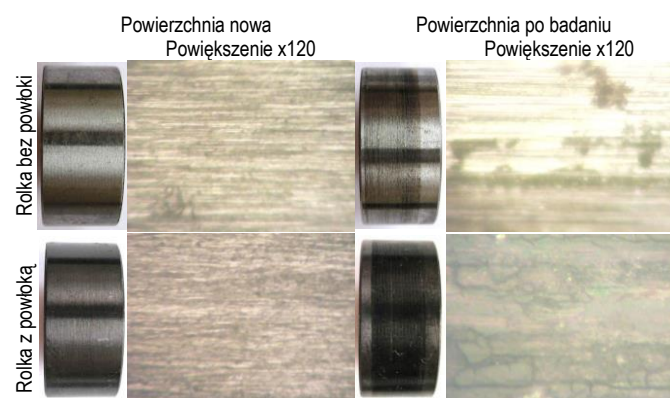
Na rysunku 2 przedstawiono średnie wykresy przebiegu momentu tarcia dla badań na próbkach bez powłoki oraz z powłoką. Z rysunku tego wynika, że zastosowanie powłoki Al-Cr-Ti-N spowodowało większy moment tarcia w pierwszych pięciu minutach badania, po czym moment spadł i ustabilizował się na poziomie o około 20% mniejszej wartości niż w przypadku próbek bez powłoki.



Rys. 2. Przebieg momentu tarcia dla węzłów tarcia z materiałami bez powłoki oraz z powłoką

2.2. Powierzchnie ślizgowe

Powierzchnie węzłów tarcia czyli powierzchnie rolki oraz kłosek poddano obserwacji za pomocą mikroskopu metalograficznego CARL ZEISS JENA. W przypadku powierzchni kłosek obserwację powierzchni rolki przeprowadzono przy 60, 120, 250 i 500 krotnym powiększeniu. Na rysunku 3 przedstawiono porównanie powierzchni rolek z powłoką oraz bez powłoki. Próbkę z powłoką charakteryzują się ciemno niebiesko fioletowym odcieniem.

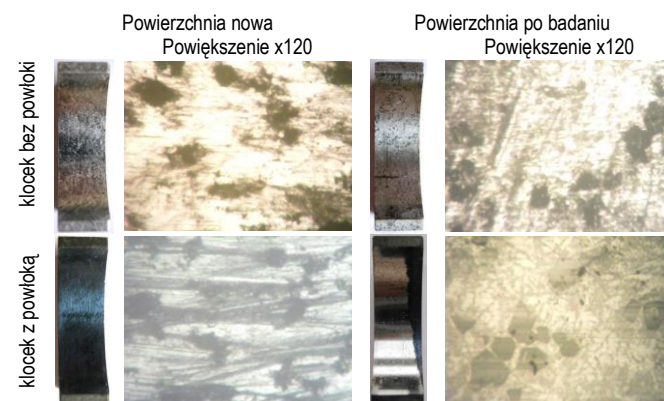


Rys. 3. Porównanie powierzchni rolki przed i po badaniu (powierzchnie z i bez powłoki)

Na powierzchniach próbek po badaniu widać wyraźnie wzdłużne ślady zużycia, zarówno na powierzchniach z powłokami jak i bez powłok (rys. 3). Na powiększonych zdjęciach uzyskanym za pomocą mikroskopu widać, iż powierzchnie po badaniu bez powłoki jest dużo płytkich, podobnych rowków sugerujących równomierne, powolne zużywanie bez produktów zużycia. Natomiast rolka z powłoką, po badaniu ma bardzo równą powierzchnię. Nie widać rys, zagłębień, bruzd. Można natomiast zauważyć jakby „plamy”, delikatnie popękaną strukturę powłoki. Może to świadczyć o zbyt du-

żych siłach oddziaływujących na powierzchnie tarcia, lub zbyt cienkiej warstwie naniesionej powłoki.

Na rysunku 4 przedstawiono powierzchnie próbek wklęsłych (kłosek). Pokazano powierzchnie z powłoką oraz bez powłoki, przed testem i po badaniu.



Rys. 4. Porównanie powierzchni kłosek przed i po badaniu (powierzchnie z i bez powłoki)

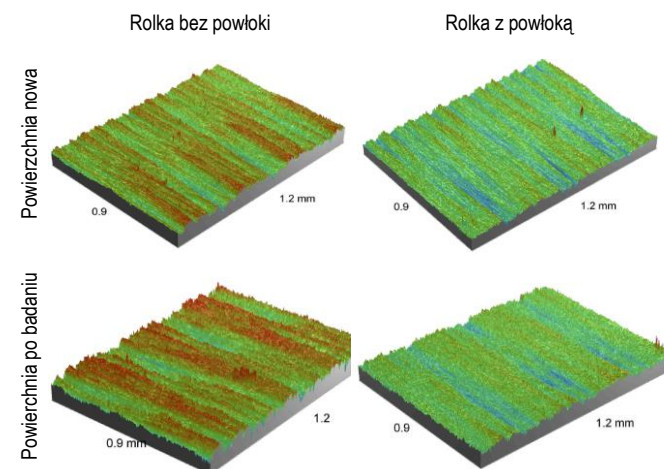
Z rysunku 4 wyraźnie widać (szczególnie przy 120 krotnym powiększeniu), że powierzchnia kłosek wykonana z stopu siluminu AISi17Cu4 jest nierówna. Znajdują się liczne zagłębienia na próbce nowej. Naniesiona powłoka nie wypełniła wszystkich otworów.

Po badaniu na nadal widać liczne wgłębienia. Na kłosek z powłoką po badaniu widać resztki powłoki. Wyraźnie widać, że w warunkach wykonywania testu (środowisko mieszaniny olej – czynnik chłodniczy) zastosowana powłoka uległa zniszczeniu (zużyciu bądź oderwaniu się od podłoża). Na zdjęciu z mikroskopu widać, że powierzchnia z powłoką po badaniu posiada jej resztki. Powłoki jest bardzo mało, a pozostałości są popękane i oddzielone od siebie.

2.3. Chropowatość powierzchni tarcia

Powierzchnie poddano pomiarom nierówności za pomocą optycznego profilometru NT1100 firmy Veeco. Urządzenie to przeznaczone jest do trójwymiarowych pomiarów chropowatości.

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe, filtrowane (powierzchnia bez nieregularności kształtu i falistości) profile chropowatości 3D badanych powierzchni rolek o wymiarach 0,9 na 1,2 mm.

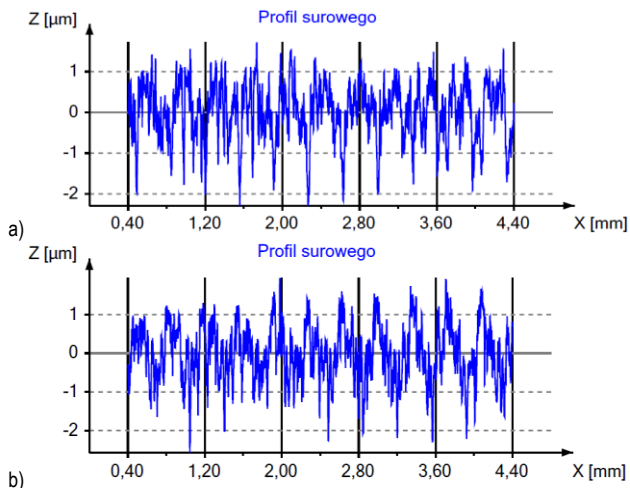


Rys. 5. Fragment powierzchni 3D ślizgowych rolek bez powłoki i z powłoką, przed i po badaniu

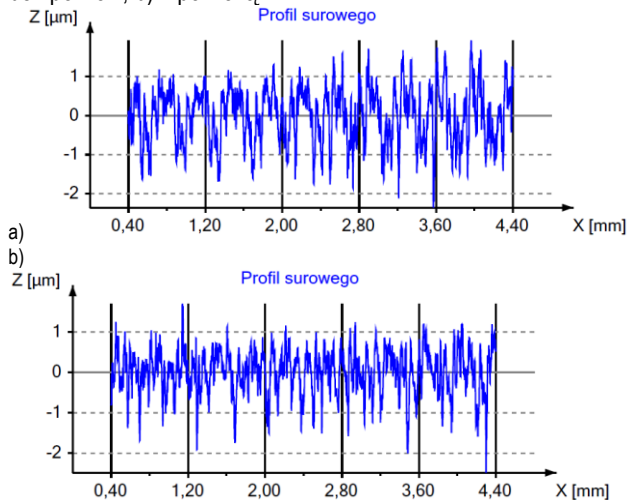
Powierzchnie uzyskane za pomocą optycznego profilometru nie są równe. Można zaobserwować regularne, powtarzające się „fale” wzniesień. Powierzchnie z powłoką mają wyraźnie mniej wzniesień,

są bardziej płaskie. Po testach zużycia powierzchnia bez powłoki ma znacznie więcej wyższych wierzchołków, posiada niewielkie ślady bruzdowania. Natomiast powierzchnia z powłoką jest bardziej płaska, jakby nie uległa zużyciu.

Za pomocą profilometru stykowego firmy Hommel-Etamic uzyskano liniowe profile chropowatości (rys. 6-9). Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono krzywe udziału materiałowego profilu chropowatości, uzyskane za pomocą wyżej wymienionego urządzenia.



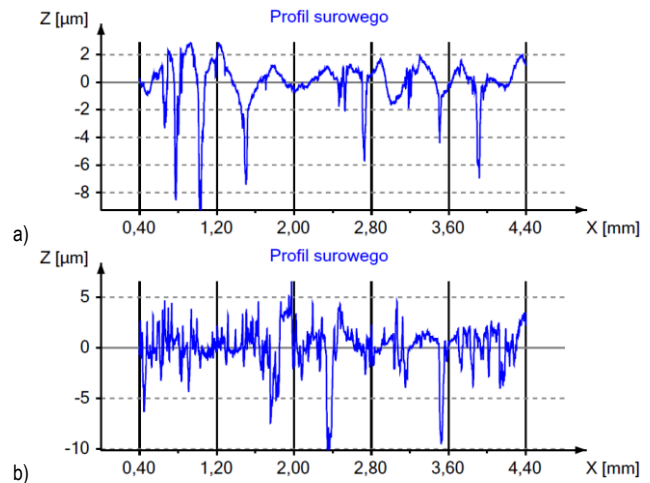
Rys. 6. Profile chropowatości rolek przed badaniem (rolki nowe), a) bez powłoki, b) z powłoką



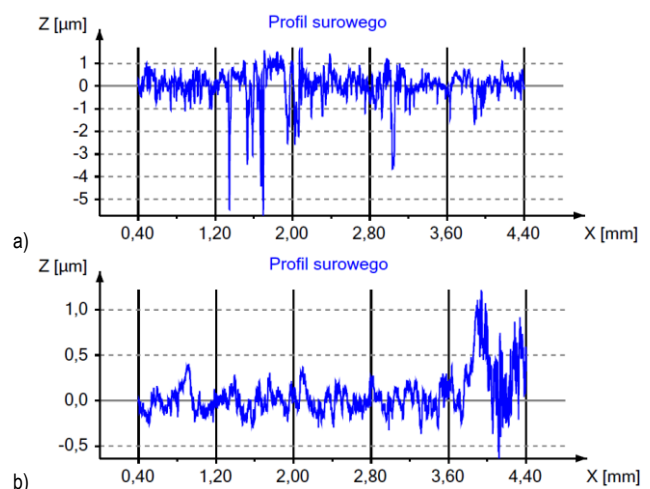
Rys. 7. Profile chropowatości rolek po badaniu, a) bez powłoki, b) z powłoką

Krzywa udziału materiału jest sposobem opisu zróżnicowania właściwości profilu lub powierzchni, zmieniających się wraz z jego głębokością. Krzywa przedstawia udział materiałowy jako funkcję wysokości cięcia. Krzywa udziału materiałowego topografii powierzchni jest to skumulowana gęstość prawdopodobieństwa wysokości rzędnych profilu powierzchni.

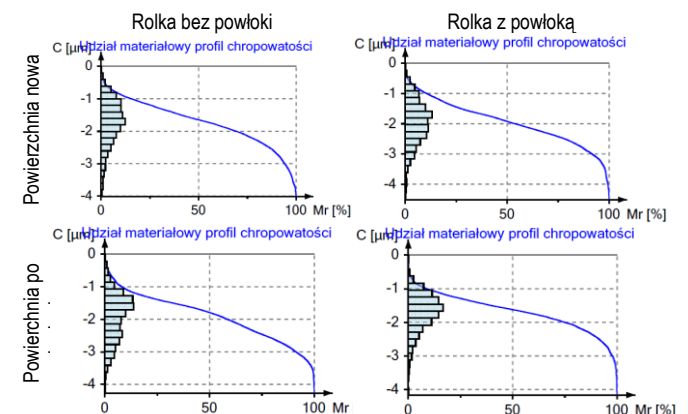
Krzywa udziału materiałowego wyznacza dla danej głębokości procent materiału przecinanego w odniesieniu do pokrywanego obszaru. Oś pozioma reprezentuje współczynnik nośny w procentach, oś pionowa jest głębokością wyznaczoną w jednostkach pomiarowych.



Rys. 8. Profile chropowatości klocków przed badaniem, a) bez powłoki, b) z powłoką



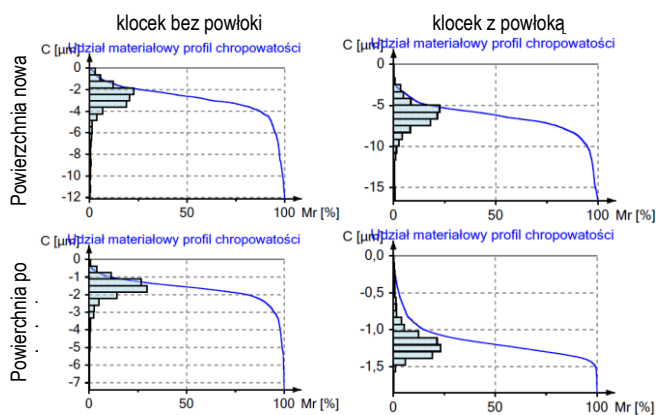
Rys. 9. Profile chropowatości klocków po badaniu, a) bez powłoki, b) z powłoką



Rys. 10. Udział materiałowy profilu chropowatości powierzchni rolek z i bez powłoki, przed i po badaniu

Ocenianie udziału materiałowego jest prostą metodą używaną do wskazania poziomu wady powierzchni. Udział materiałowy profilu (krzywa Abbot'a-Firestone'a), jest najbardziej stosowaną metodą pomiaru do określenia odporności jest ścierania elementu. Parametr Mr jest wskaźnikiem materiałowym powierzchni, podany w %.

Profile chropowatości uzyskane po badaniu nie są jednorodne. Jest dużo w miarę równomiernych wierzchołków.



Rys. 11. Udział materiałowy profilu chropowatości powierzchni klocek z i bez powłoki, przed i po badaniu

W przypadku rolek, profile chropowatości są bardzo podobne, zarówno przed i po badaniu, z powłoką i bez powłoki.

Natomiast obserwując profile nowych próbek wklęsłych, wyraźnie widać różnice. Profil chropowatości powierzchni z powłoką jest bardziej niejednorodny, posiada więcej wysokich wzniesień oraz mniej ale za to głębszych dolin. W przypadku powierzchni po badaniu, profile są bardzo różne. Powierzchnia bez powłoki ma mniej wzniesień, mniej dolin. Wgłębienia są płytsze, profil jest bardziej wyrównany. Natomiast powierzchnia po badaniu z powłoką ma znacznie mniej wzniesień, dolin i jest jeszcze bardziej płaska, o małych wzniesieniach i bez ostrych wierzchołków.

Podsumowanie

Badania wykonano na maszynie badawczej z wykorzystaniem węzła tarcia typu rolka panewka znajdującym się w komorze ciśnieniowej, symulującej pracę poprzecznych łożysk ślizgowych. Na stanowisku można odzwierciedlać rzeczywiste warunki pracy elementów ruchomych sprężarek chłodniczych, w różnych warunkach środowiskowych (oleje, czynniki chłodnicze) oraz przy różnych wartościach siły nacisku, prędkości obrotowej, ciśnieniu i temperatury mieszaniny.

Po wykonaniu badań zużyciowych na próbkach z naniesioną powłoką Al-Cr-Ti-N, zaobserwowano spadek o około 20% momentu tarcia między powierzchniami z powłoką w porównaniu z powierzchnią bez powłoki. Zatem wartość momentu tarcia powinna sugerować, że elementy z powłoką powinny być bardziej odporne na zużycie ściernie.

Obserwując uzyskane wyniki z analizy trójwymiarowej chropowatości powierzchni, można przyjąć, iż powierzchnie rolek po badaniach mają porównywalne wskaźniki nośności (udział materiałowy profilu chropowatości) zatem powierzchnie mogą mieć porównywalne właściwości tribologiczne. Uzyskane liniowe profile chropowatości potwierdzają tę zależność a więc można przyjąć, iż zastosowanie powłoki typu Al-Cr-Ti-N na stali 100Cr6 na elementy węzła tarcia pracującego w środowiska mieszaniny olej – czynnik chłodniczy nie zmienia właściwości tribologicznych. Powłoka nie polepszyła ani nie pogorszyła tych właściwości.

Natomiast powierzchnie klocka charakteryzują się dużą zmianą po naniesieniu powłoki jak również po badaniu z powłoką.

W przypadku stopu siluminu krzywe nośności z powłokami są bardziej płaskie, zatem powierzchnie te powinny być bardziej odporne na zużycie. Według profili chropowatości naniesienie powłoki spowodowało znacznie wyrównanie powierzchni nowej oraz po badaniu.

Zastosowanie powłoki typu Al-Cr-Ti-N na stopie AISi17Cu4 na elementy węzła tarcia pracującego w środowiska mieszaniny olej – czynnik chłodniczy, według profili, wskaźników chropowatości oraz

wartości momentu tarcia polepsza właściwości tribologicznych. Jednak na zdjęciu próbki po badaniu widać, że powłoki nie ma jej na powierzchni.

W wyniku procesu utleniania powinna tworzyć się na powłoce Ti-Cr-Al-N stabilnie chemiczna buforowa warstwa tlenkowa blokująca dyfuzję tlenu. Warstwa powinna charakteryzować się dobrymi właściwościami smarnymi, poprawiającymi właściwości tribologiczne. Jednak sprężarka (najczęściej hermetyczna) chłodnicza pracuje w mieszaninie olej – czynnik chłodniczy bez dostępu tlenu, a więc pierwiastki z powłoki nie mogą wchodzić w reakcję z tlenem i nie mogą tworzyć się tlenki na jej powierzchni. Zatem powłoki typu Ti-Cr-Al-N nie nadają się na powierzchnie węzłów tarcia sprężarek chłodniczych.

Bibliografia:

1. Allison Y. Suh, Jayesh J. Patel, Andreas A. Polycarpou, Thomas F. Conry: Scuffing of cast iron and Al390-T6 materials used in compressor applications, *Wear*, 260(7-8), 2006, s. 735-744
2. sors on the tribological behaviour of a Si-rich multifunctional DLC coating, *Wear* 267 (2009) 907-915
3. Górny K., Tyczewski P., Zwierzycki W., Specification of lubricating oil operation in refrigeration compressors. *Tribologia*, 3/2010, s. 63-73
4. Hong-Gyu Jeon, Se-Doo Oh, Young-Ze Lee: Friction and wear of the lubricated vane and roller materials in a carbon dioxide refrigerant, *wear*, 267(5-8), 2009, s. 1252-1256
5. M.L. Cannaday, A.A. Polycarpou: Advantages of CO2 compared to R410a refrigerant of tribologically tested Aluminum 390-T6 surfaces, *Tribology Letters*, 21 2006, s. 185-192
6. Nicholaos G. Demas, Andreas A. Polycarpou: Tribological investigation of cast iron air-conditioning compressor surfaces in CO2 refrigerant, *Tribology Letters*, 22(3), 2006, s. 271-278
7. Nigel P. Garland, Mark Hadfield: Tribological analysis of hydrocarbon refrigerants applied to the hermetic compressor, *Tribology International*, 38(8), 2005, s. 732-739
8. Tyczewski P., Analiza przyczyn uszkodzeń sprężarek chłodniczych, *Logistyka*, 3/2011, s. 28712875
9. Tyczewski P., Brak oleju przyczyny uszkodzenia samochodowej sprężarki chłodniczej, *Logistyka* 3/2014, s. 6458-6462
10. Tyczewski P., Przykłady uszkodzeń sprężarek chłodniczych, *Logistyka* 03/2012
11. Yu cel Birol, Feriha Birol: Sliding wear behaviour of thixoformed AISiCuFe alloys, *Wear*, 265(11-12), 2008, s. 1902-1908

Investigation of the influence of Ti-Al-Cr-N coating on the surface condition of cooling compressor elements

Elements of refrigeration compressors, may be exposed to various types of wear processes. The presence of the refrigerant makes the lubricating and anti-wear properties of the oil-medium mixture much worse than the oil without refrigerant. The paper presents the effect of using the Ti-Al-Cr-N coating on the surface condition of friction junction occurring in compressors of chillers. The tests were carried out using a model friction machine simulating the element of a refrigeration compressor.

Keywords: wear, compressor, anti-wear coating

Autor:

dr inż. **Przemysław Tyczewski** – Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, przemyslaw.tyczewski@put.poznan.pl