ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: TRANSPORT z. 57 Nr kol. 1675

Andrzej POSMYK

POWŁOKI KOMPOZYTOWE NA GŁADZIE TULEI CYLINDROWYCH UŁATWIAJĄCE ROZRUCH ZIMNEGO SILNIKA

Streszczenie. W pracy przedstawiono wpływ powłok kompozytowych typu APT+Ni na możliwości poprawy warunków rozruchu zimnych maszyn tłokowych, np. silnika spalinowego lub sprężarki. Powłoka kompozytowa APT+Ni jest wytwarzana na osnowie anodowej powłoki tlenkowej (APT) uzyskanej w wyniku anodowania twardego i metalizowanej niklem. Ostatnim etapem wytwarzania powłok jest ich nasączanie olejem. Na skutek kurczenia się powłoki w obniżonych temperaturach olej zawarty w porach tlenku jest wyciskany nieznacznie nad powierzchnie tlenku, co ułatwia smarowanie. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że najgorsze warunki współpracy ślizgowej panują w temperaturze powyżej 273 K, gdy para wodna nie tworzy lodu, a olej jest za zimny w celu zapewnienia skutecznego smarowania rozbryzgowego.

COMPOSITE LAYERS FOR CYLINDER LINERS WHICH FACILITATE THE MOTOR COLD START

Summary. The AHC+Ni type composite layers influence on cold start conditions improvement possibilities of piston machines (e.g. combustion engine or compressor) has been presented in the paper. The AHC+Ni type composite layer is produced on anodic hard coating (AHC) matrix and then metallized with nickel. The layer after metallization is soaked with oil. Due to the layer shrinkage in decreased temperature, oil included in oxide's pores is insignificantly winkled out over the oxide surface and it makes lubrication easier. Based on the investigations it has been ascertained that the worst conditions for sliding are at the temperature higher then 273 K, when there is no ice, and the oil is too cold for ensuring the efficient lubrication at that temperature.

1. WSTĘP

Zjawiska tribologiczne podczas rozruchu silników spalinowych zależą w dużej mierze od warunków klimatycznych i miejsca garażowania pojazdu czy maszyny wyposażonej w silnik. Z danych statystycznych wynika, że w Polsce najniższa temperatura panuje w miesiącu lutym i wynosi średnio 262 K. Większość olejów silnikowych i sprężarkowych w temperaturze poniżej 253 K ma zbyt dużą lepkość i smarowanie rozbryzgowe gładzi cylindrowej jest niewystarczające. Dodatkowym czynnikiem pogarszającym smarowanie w silniku jest zmywanie resztek oleju przez mieszankę paliwowo-powietrzną. Dlatego od wielu lat są prowadzone badania nad takim ukształtowaniem topografii gładzi tulei cylindrowych, w wyniku, którego uzyskuje się gładź zawierającą zarówno obszary zapewniające dużą rzeczywistą powierzchnię styku, jak i zasobniki na środek smarny [1, 2] Nowszą odmianą tego typu techno-

logii jest laserowa obróbka gładzi polegająca na lokalnym wytapianiu niewielkich kraterków, które stanowią zasobniki oleju. Umocnione na skutek zahartowania krawędzie tych kraterków zwiększają odporność na zużycie tulei cylindrowej. Zgromadzony w kraterkach olej nie spływa z gładzi, zwiększając skuteczność smarowania, a co najważniejsze, zmniejszając zużycie paliwa. Tego typu technologie są częścią projektu mającego umożliwić produkcję samochodu spalającego 2 litry paliwa na 100 km (w literaturze niemieckojęzycznej: Auto 2 Liter) [2, 3].

W przypadku tulei cylindrowych wykonanych ze stopów aluminium lub kompozytów na ich osnowie istnieje wiele możliwości kształtowania gładzi zwiększającego przyczepność oleju, a tym samym ułatwiającego rozruch zimnego silnika i ograniczającego zużycie paliwa. Generalnie można podzielić je nad dwie grupy metod, tj. metody z nakładaniem powłok i metody z wytrawianiem części osnowy.

Do pierwszej grupy można zaliczyć nakładanie powłok z porowatego chromu oraz powłok kompozytowych, np. NiSiC (galwaniczny nikiel z cząstkami SiC) [4]. Nikiel z podpowłokami zapewnia dobrą przyczepność i elastyczność, a cząstki SiC wystające ponad powierzchnię Ni stanowią odporne na zużycie punkty podparcia pierścieni. Przestrzenie pomiędzy wydzieleniami SiC stanowią zasobniki na smar, produkty zużycia i zanieczyszczenia. Takie rozwiązanie sprawdziło się w silnikach dwusuwowych, np. kosiarek [4, 5]

Cel drugiej grupy metod jest podobny, tj. uzyskanie powłoki zawierającej odporne na zużycie, wystające nad powierzchnie osnowy cząstki, np. krzemu oraz przestrzenie pomiędzy wydzieleniami stanowiące zasobniki oleju. W tej grupie usuwa się część osnowy poprzez trawienie, odsłaniając twarde wydzielenia krzemu [1]. Inne możliwości zwiększenia skuteczności smarowania w warunkach zimnego rozruchu dają powłoki kompozytowe wytworzone na osnowie ceramicznej, porowatej powłoki tlenkowej i modyfikowane metalami [6]. Niniejszy artykuł jest próbą udzielenia odpowiedzi na pytanie: Jakie efekty można uzyskać, jeżeli gładź tulei cylindrowej pokryje się ww. powłoką kompozytową?

2. PODSTAWY TEORETYCZNE

Powłoki kompozytowe ceramiczno metalowe opracowano, wykorzystując hipotezę tarcia Bowdena i Tabora [7] zmodyfikowaną przez Ernsta i Merchanta [8]. Zgodnie z mechaniczno-molekularną hipotezą, opory tarcia w skojarzeniach ślizgowych zależą od cech współpracujących materiałów i od geometrii strefy styku skojarzenia. Jedną z matematycznych postaci tej hipotezy jest wzór podany przez Ernsta i Merchanta:

$$\mu = \frac{\tau}{HB} + tg\alpha$$

gdzie:

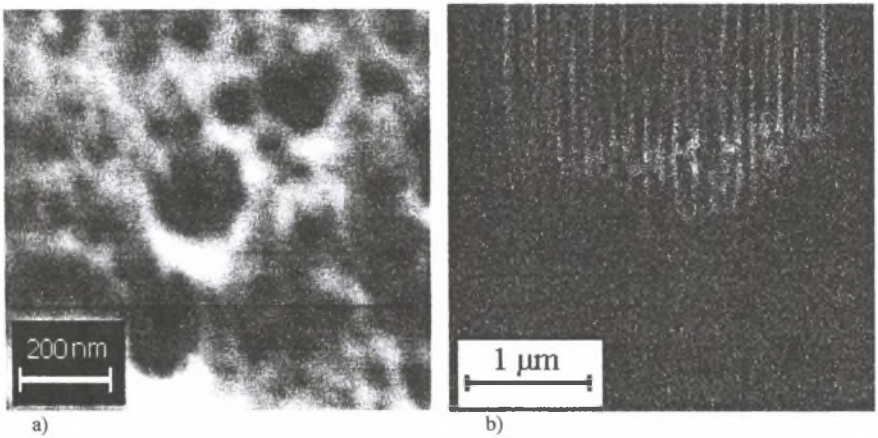
- τ - obliczona teoretycznie z równania Clausiusa-Clapeyrona wytrzymałość na ścinanie czystego, pozbawionego jakichkolwiek sorbowanych warstw połączenia adhezyjnego w strefie styku, z badań własnych autora wynika, że jest to wytrzymałość na ścinanie materiału słabszego, którym w powłokach kompozytowych jest metal (np. Ni, Cu, Ag);
- HB - twardość materiału twardszego w skojarzeniu, w powłokach kompozytowych jest to twardość ceramicznej powłoki tlenku aluminium;
- α - kąt pochylenia powierzchni styku do kierunku ruchu, w strefie tarcia jest to średni kąt pochylenia wierzchołków nierówności.

Osnową proponowanej powłoki kompozytowej jest anodowa powłoka tlenkowa (APT) wytworzona w wyniku elektrolitycznego anodowania twardego. Powłoka ta charakteryzuje się bardzo dobrą przyczepnością do podłoża, nanoporowatością, dużą twardością (do 500 μHV) i odpornością na zużycie tribologiczne. Porowatość w skali mikro i nano powłok

tlenkowych pozwala na ich nasączanie olejem lub wypełnianie stałymi środkami smarnymi (MoS_2, węgiel szklisty, tworzywa sztuczne), co istotnie poprawia właściwości tribologiczne.

Do wad ograniczających zastosowanie APT należy zaliczyć ich kruchość, nieodporność na obciążenia skupione i dynamiczne oraz zbyt dużą agresywność w stosunku do partnera ślizgowego, co powoduje jego przyspieszone zużywanie. W celu zminimalizowania wymienionych wad wprowadzono do APT wybrane metale w postaci wydzieleń o określonych cechach stereologicznych (udział powierzchniowy, średnia średnica i wysokość nad powierzchnie osnowy) i właściwościach wytrzymałościowych. Dzięki temu ograniczono bezpośredni styk pomiędzy partnerem ślizgowym i APT, co poprawiło właściwości tribologiczne skojarzenia. W powłoce kompozytowej typu APT+Me potrzebną do zależności Ernsta i Merchanta dużą twardość wnosi tlenek glinu, a małą wytrzymałość na ścinanie metal wprowadzony do porów powłoki i wyprowadzany nad powierzchnię powłoki. Przy odpowiednim prowadzeniu procesu wytwarzania powłok kompozytowych uzyskuje się możliwość wprowadzenia do powłoki tlenkowej metalu o małej wytrzymałości na ścinanie (Sn, Cu, Ag, Ni) oraz oleju. Jeżeli taką powłoką zostanie pokryta gładź tulei cylindrowej maszyny tłokowej, to podczas stygnięcia maszyny zgromadzony w porach olej zostanie lekko wypchnięty do ujścia kurczących się porów. Podczas zimnego rozruchu wypchnięty olej wystarcza do złagodzenia skutków chwilowego niedoboru oleju. Po nagrzaniu się powłoki do temperatury pracy silnika pory rozszerzają się ponownie i usunięty podczas rozruchu olej zostaje uzupełniany. Po zakończeniu pracy i wystygnięciu silnika na powierzchni gładzi pojawiają się ponownie mikroskopijne ilości oleju wyciśniętego z kurczących się porów.

Pojęcie porowatości powłok tlenkowych wymaga jednego wyjaśnienia. Z punktu widzenia wielkości porów rozróżniamy dwie ich grupy, tj. nanopory o średnicy od 10 – 50 nm i mikropory o średnicy mikrometrów. Średnica porów zależy od warunków utleniania, tj. od składu chemicznego elektrolitu i od parametrów technologicznych procesu. Nanopory w powłoce tlenkowej nie zapełnione i z wprowadzonym metalem przedstawiono na rysunku 1.



a) b)

Rys. 1. Nanopory o różnych średnicach w anodowej powłoce tlenkowej; a - widok z powierzchni; b - przekrój poprzeczny z wypełnionych niklem nanoporów

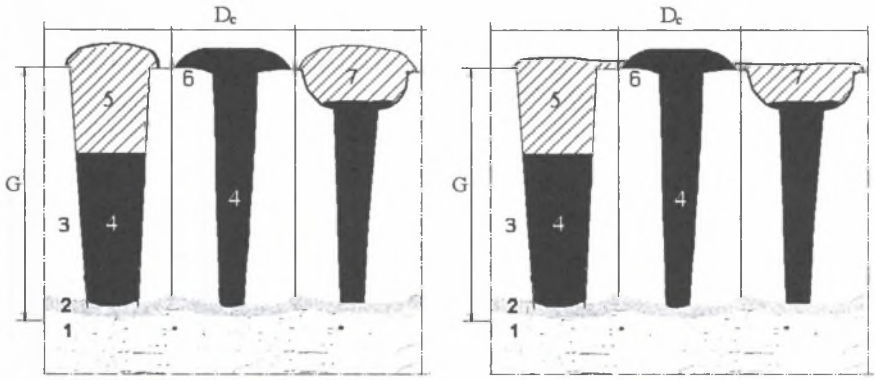
Fig. 1. Nanopores with different diameters in anodic hard coating; a - surface view; b – cross-section through the nanopores filled with nickel

3. POWŁOKI KOMPOZYTOWE W WARUNKACH ZIMNEGO ROZRUCHU

Chcąc uzyskać odpowiedź na postawione we wstępie pytanie: Jakie efekty można uzyskać, jeżeli gładź tulei cylindrowej pokryje się powłoką kompozytową typu APT+Me, wyko-

nano odpowiednie badania stanowiskowe w obniżonych temperaturach i silnikowe w silniku małej mocy. Celem przeprowadzonych badań było sprawdzenie zachowania się powłok kompozytowych APT+Me w warunkach zimnego rozruchu, co występuje bardzo często zimą w samochodach stojących poza garażem lub w sprężarkach tłokowych służących do gaszenia łuku elektrycznego w stacjach przesyłowych energetyki [9].
Jeżeli gładź tulei cylindrowej zostanie pokryta APT, to przebieg smarowania w czasie zimnego rozruchu ulegnie zmianie. Podczas pracy gorącego silnika pory w tlenku są rozszerzone i sorbują określoną ilość oleju. Jeżeli silnik lub sprężarka zostaną schłodzone do 253 K, to zmagazynowany w porach tlenku olej zostanie wyciśnięty z kurczących się porów, tworząc na powierzchni sferyczne mikrozasobniki. Napływ paliwa nie zmyje całkowicie oleju i gładź pozostaje dalej posmarowana. Określona liczba zapłonów mieszanki wystarczy do podgrzania oleju, spadku jego lepkości i poprawy warunków smarowania. Usunięty z porów olej zostaje uzupełniony podczas pracy rozgrzanego silnika, a po ponownym jego wyłączeniu i schłodzeniu będzie wyciśnięty na powierzchnię roboczą. Sytuację taką przedstawiono schematycznie na rysunku 2.

W warunkach geograficznych Polski średnia temperatura w najzimniejszym miesiącu spada do 262 K. Dlatego mając na uwadze potencjalne zastosowanie badanych powłok kompozytowych na gładzie sprężarek lub silników tłokowych uruchamianych w warunkach otoczenia, ograniczono zakres badań do średniej temperatury zewnętrznej, tj. 263 K.



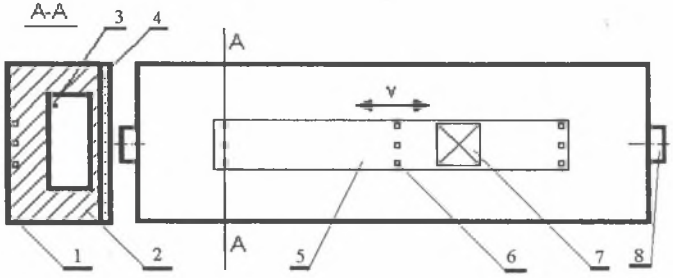
Rys. 2. Schematyczne przedstawienie powłoki kompozytowej APT+Me z zasobnikami oleju wystającego z porów przed zimnym rozruchem (a) i po rozruchu (b): 1- materiał podłoża; 2 – warstwa barierowa powłoki tlenkowej; 3 – warstwa porowata powłoki tlenkowej; 4 – metal modyfikujący wypełniający całkowicie nanopory o małych i częściowo o dużych średnicach; 5 – olej wprowadzony w pory podczas wytwarzania powłoki kompozytowej; 6 – cześć powłoki tlenkowej uszczelniona podczas procesu metalizowania; 7 – olej wypełniający nanopory zakończone mikroporami; D_c – średnica komórki tlenkowej; G – grubość powłoki tlenkowej

Fig. 2. Schematic presentation of the APT+Me composite layer which includes oil depots. Oil protrude out of the pores before the cold start (a) and after the start (b): 1 – material ground; 2 – barrier part of the oxide layer; 3 – porous part of the oxide layer; 4 – modifying metal completely filling the pores with small and partially big diameters; 5- oil placed in the composite layer's pores during the production process; 6 - part of the oxide layer sealed during the metallization process; 7 – oil filling nanopores ended with micropores; D_c – oxide cell diameter; G – oxide layer thickness

3.1. Badania stanowiskowe i ich wyniki

Badania przeprowadzono na przystosowanym do warunków symulujących zimny rozruch maszyn stanowisku z węzłem tarcia typu klocek/płaska bieżnia, rys 3. Przeciwpróbka

pokryta badaną powłoką kompozytową jest chłodzona z zewnętrznego zasobnika zimna. Zarówno proporcje pojemności cieplnej próbki (masa 7,8 g) i przeciwpróbki (masa 3 kg), jak i wydajność układu chłodzenia zapewniały stałą temperaturę na powierzchni tarcia. Badania wykonano w następujących warunkach: v=1 m/s; p=1 MPa; t = 0,5 h; liczba powtórzeń n = 30; smarowanie: olejem zawartym w powłoce podczas nasączania. W trakcie badań mierzono współczynnik tarcia i temperaturę w pobliżu strefy tarcia w celu ustalenia wpływu tarcia na szybkość nagrzewania skojarzenia. Uzyskane wartości współczynnika tarcia przedstawiono w tabeli 1. Temperatura bieżni nie zmieniała się pod wpływem tarcia.



Rys. 3. Widok węzła tarcia do badań w obniżonych temperaturach: 1- badana powłoka kompozytowa; 2- materiał podłoża; 3- kanał przepływu ziębnika; 4- materiał izolujący węzeł od reszty testera; 5- droga tarcia podczas jednego cyklu pracy; 6- termopary zamocowane pod powierzchnią tarcia; 7- próbka żeliwna; 8- króćce doprowadzające ziębnik z zewnętrznego źródła zimna

Fig. 3. Friction centre diagram for tests at decreased temperatures: 1- examined composite layer; 2 – ground material; 3 – channel for cooling medium; 4 – thermal insulation; 5 – friction distance during one working cycle; 6 - temperature measurement points; 7 – cast iron sample; 8- connectors for cooling medium; v – sliding direction

Tabela 1

Wartości współczynnika tarcia w obniżonych temperatur skojarzenia żeliwo/PK (v = 1 m/s)

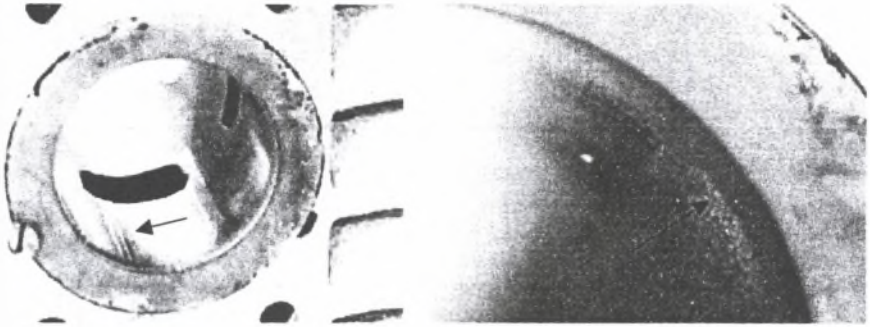
Temperatura w strefie tarcia		Czas współpracy	Nacisk jednostkowy	Współczynnik tarcia
K	[°C]	τ [s]	p [MPa]	μ[1)]
288	15	600	1	0,090
278	5	600	1 i 2	0,050
268	-5	600	1 i 4	0,075
263	- 10	600	1 i 4	0,003
258	- 15	600	1 i 4	0,003

[1)] Odchylenie standardowe nie przekraczało średniego błędu kwadratowego toru pomiarowego siły tarcia wynoszącego δ <5%.

3.2. Badania silnikowe

W celu sprawdzenia przydatności opracowanych powłok APT+Ni na gładzie maszyn tulei cylidrowych wykonano badania, używając dwusuwowego silnika spalinowego małej mocy Romet 23 o pojemności skokowej 50 cm^3. Silnik ten smarowano mieszanką paliwowo-olejową o zmniejszonej zawartości oleju. W normalnej eksploatacji stosuje się proporcje 1:25, natomiast w przeprowadzonych badaniach zastosowano 1:50, żeby sprawdzić wpływ oleju

zawartego w powłoce. Powłokę wytworzono na tulei cylindrowej wykonanej ze stopu AlMg2. Z powłoką współpracował fabryczny tłok z pierścieniami żeliwnymi. Silnik docierano mechanicznie przez 20 godzin, zasilając go z zewnętrznego źródła energii. Po dotarciu wykonano 25-godzinne badania stanowiskowe. Na powierzchni tulei po współpracy zaobserwowano drobne rysy w okolicy kanałów dolotowych i wylotowych (rys. 4) spowodowane uszkadzaniem powłoki przez rozprężające się pierścienie.



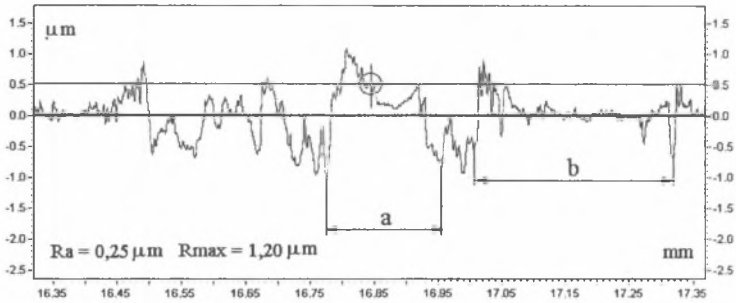
a) drobne rysy na gładzi wzdłuż otworu dolotowego powstałe po wykruszeniu powłoki przez pierścienie; powierzchnia dotarta błyszcząca
a) small scratches on liner along the inlet channel caused by rings crumbling the layer away

b) widok tulei - po badaniach - od strony głowicy (górny odcinek w kształcie pierścienia); jaśniejsze punkty to częściowo zużyte wydzielenia niklu
b) view of liner - after running - from the top (upper part in a ring form); brighter points that are nickel precipitate partially worn

Rys. 4. Widok tulei cylindrowej z powłoką kompozytową typu APT+Ni silnika ROMET po badaniach

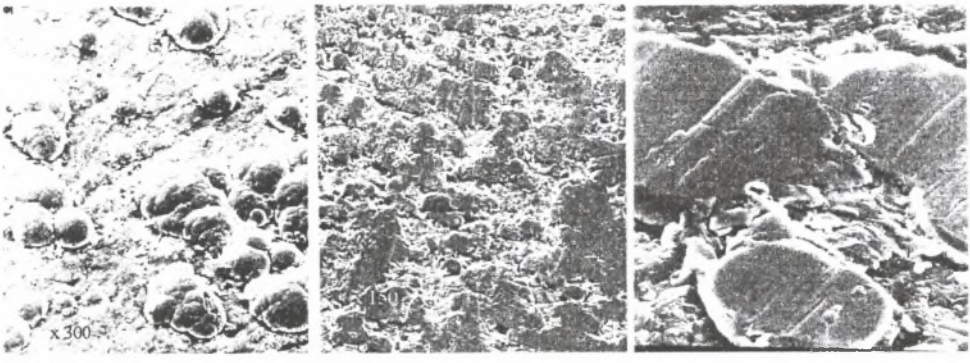
Fig. 4. Cylinder liner with AHC+Ni composite layer view for ROMET combustion engine after testing

Na powierzchni roboczej pierścieni i na płaszczu tłoka również powstały drobne rysy. Wymagało to zmiany konstrukcji tulei polegającej na umieszczeniu wspornika w środku kanałów. W tym rozwiązaniu krawędzie już nie były niszczone. Powierzchnia tulei gładzi cylindrowej po współpracy była lekko błyszcząca od strony docisku tłoka do gładzi (R_a=0,25 μm, R_{max}=1,2 μm). Na powierzchni pozostały części wydzieleń niklu o wysokości do 2 μm. Fragment profilu chropowatości bieżni tulei po współpracy pokazano na rysunku 5. Fotografie z powierzchni gładzi tulei cylindrowej przed i po współpracy przedstawiono na rysunku 6. Porównując pracę silnika z badaną i fabryczną tuleją nie zauważono istotnych różnic.



Rys. 5. Profil chropowatości gładzi tulei cylindrowej z powłoką kompozytową APT+Ni po pracy w silniku; częściowo zużyte pojedyncze wydzielenie niklu (a) i konglomerat kilku wydzieleń (b)

Fig. 5. Roughness profile of the cylinder liner with AHC+Ni composite layer after working in the engine; separate Nickel precipitation partially worn (a) and conglomerate of a few precipitates (b)



Rys. 6. Powierzchnia powłoki kompozytowej APT+Ni: a – przed współpraca ślizgową (widoczne pojedyncze i połączone wydzielenia Ni na tle tlenku glinu); b – po współpracy (częściowo zużyte wydzielenia niklu); c – powiększony fragment powierzchniami zużytych wydzieleń niklu z widocznymi rysami wzdłuż kierunku tarcia)

Fig. 6. Surface view of AHC+Ni composite layer: a – before sliding (the single precipitate and the conglomerates can be seen); b – after sliding (nickel precipitates partially worn can be seen); c – magnified part of the worn nickel's surfaces with scratches along the movement direction

4. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ I WNIOSKI

W czasie badań stanowiskowych w temperaturach poniżej 273 K, na powierzchni tarcia powstawała cieniuteńka warstewka lodu nie dająca się usunąć przez ślizgający się po niej pierścień. Warstewka ta po ręcznym jej usunięciu odnawiała się natychmiast. Zwiększenie nacisku do 4 MPa nie pozwoliło na przerwanie lodu. W trakcie współpracy ślizgowej dochodziło do zużywania żeliwa albo przynajmniej usuwania z niego grafitu. Świadczyło o tym czarne zabarwianie lodu.

W trakcie badań w temperaturze 278 K na powierzchni tarcia kondensowała się para wodna, która - mieszając się z grafitem i olejem - tworzyła mieszaninę smarującą skojarzenie. Jednak smarowanie to nie było wystarczające dla utrzymania współczynnika tarcia na takim poziomie, jak przy ujemnych temperaturach. Budowa stanowiska zabezpieczająca przed uszkodzeniem przy wzroście sił tarcia powyżej założonego poziomu (wypadanie próbki) nie pozwalała na badania przy nacisku 4 MPa, dlatego zmniejszono go o połowę.

Podczas badań w temperaturze 285 K wzrósł współczynnik tarcia, co wymusiło dalszą redukcję nacisku do 1 MPa. Na powierzchni tarcia nie było już wody. Powstała mieszanina produktów zużycia, przede wszystkim żeliwa i oleju wydobytego z powłoki kompozytowej.

Podczas rozruchu zimnych maszyn tłokowych w temperaturach poniżej 273 K, na powierzchniach tarcia wytwarza się warstewka lodu, która bardzo szybko się odnawia. Poruszające się po gładzi pierścienie tłokowe nie są w stanie usunąć lodu. Dlatego opory tarcia nie są duże. Jeżeli temperatura w strefie tarcia zbliży się do 273 K, to lód zostanie zastąpiony wodą zmieszaną z olejem i produktami zużycia. Najgorszy etap rozruchu zimnej maszyny rozpoczyna się wtedy, gdy temperatura bieżni przekroczy poziom 273 K o kilkanaście stopni. W tym czasie brakuje lodu, wody i oleju, który jest nadal zbyt zimny, aby zapewnić wystarczające smarowanie współpracujących elementów. Dlatego ten etap rozruchu silników i sprężarek tłokowych charakteryzuje się dużym zużyciem.

W silniku spalinowym do strefy tarcia dostaje się mieszanka paliwowo-powietrzna, która powinna łagodzić skutki braku smarowania. Gdy gładź tulei cylindrowej zostanie nasączona olejem, to paliwo będzie go wypłukiwać i tworzyć z nim mieszaninę smarującą.

Możliwość wytwarzania gładzi tulei cylindrowych zawierających wbudowany olej daje anodowa powłoka tlenkowa. Wprowadzony dodatkowo metal (Ni, Cu, Sn) ogranicza zużycie pierścieni żeliwnych.

Przeprowadzone badania wykazały, że najważniejszy jest etap przejściowy od temperatur ujemnych do temperatury, w której lepkość oleju zapewnia odpowiednie smarowanie rozbryzgowe. Dla skojarzenia żeliwo/PK przedział ten rozpoczyna się powyżej 5°C. Badania wykazały istotny wpływ oleju wprowadzonego technologicznie do PK na przebieg zimnego rozruchu maszyny. Ma to szczególne znaczenie w bezobsługowych sprężarkach tłokowych, których częstotliwość załączania jest względnie duża, a czas pracy zbyt krótki, aby zapewnić skuteczne smarowanie rozbryzgowe poprzez rozgrzanie oleju ciepłem sprężania.

Z przeprowadzonych badań wynikają następujące wnioski:

1. Olej wprowadzony technologicznie do powłoki kompozytowej łagodzi w istotny sposób tarcie podczas zimnego rozruchu skojarzenia ($\mu = 0{,}003$ przy $T = 258$ K, $p = 4$ MPa, $v = 1$ m/s).
2. Chcąc ustalić zużycie skojarzenia: pierścienie tłokowe/gładź tulei cylindrowej podczas zimnego rozruchu, należy prowadzić badania w temperaturze powyżej 273 K i przy ograniczonej ilości oleju, tj. w warunkach ograniczonego smarowania.

Literatura

1. Kozaczewski W.: Konstrukcja złożeń tłok-cylinder silników spalinowych. WKŁ. Warszawa 1987.
2. Korcek S., Sorab J., Johnson M. D., Jensen R. K.: Automotive Lubrications for Next Millennium. Tribology 2000-Plus, Verlag TAE Esslingen, Vo. 1, Esslingen 2000, 43-53.
3. Wiesner M., Schäfer R., Schulz M., Gasthuber H: Tribologie des Verbrennungsmotors-Kann es einen ölfreien/ölwechselfreien Motor geben? Tribology 2000-Plus, Verlag TAE Esslingen, Vo. 1, Esslingen 2002, 343-351.
4. Broschzeit E.: Galvanisch und chemisch abgeschiedene Nickelschichten mit und ohne Hartstoffeinlagerungen. Verschleiß metallischer Werkstoffe und seine Verminderung durch Oberflächenschichten. Expert Verlag, Grafenau 1/Württ. 1982, 135-170.
5. Ostermann A. E.: Anwendung von Verschleißschutzschichten auf Aluminium am Beispiel des Verbrennungsmotors. Verschleiß metallischer Werkstoffe und seine Verminderung durch Oberflächenschichten. Expert Verlag, Grafenau 1/Württ. 1982, 226-245.
6. Posmyk A. Kształtowanie właściwości tribologicznych warstw wierzchnich tworzyw na bazie aluminium. Wydawnictwa Politechniki Śląskiej Gliwice 2002.
7. Bowden F. P.; Tabor D.: The Friction and Lubrication of Solids. Clarendon Press, Oxford 1964.
8. Ernst H., Merchant M. E.: Surface friction of clean metals. A basic factor in the metal cutting process. Proc. Special Summer Conf. Friction and Surface Finish, MIT Press, Cambridge (Mass.) 1940, 76-101.
9. Agregat sprężarkowy bezolejowy AB5/2-380. Karta informacyjna ZM Pomet, Poznań 1985.

Recenzent: Dr hab. Władysław Skoneczny