

УДК 62-6  
UDC 62-6

### **KSZTAŁTOWANIE POWŁOK PVD DO ZASTOSOWAŃ W ŚLIZGOWYCH WĘZŁACH CIERNYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH.**

LUBAS Janusz, Prof. dr hab. inż., Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, Polska  
WOŚ Paweł, dr inż., Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, Polska

### **ФОРМУВАННЯ PVD ПОКРИТТІВ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В ВУЗЛАХ ТЕРТЯ КОВЗАННЯ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ.**

ЛЮБАС Януш, Доктор інженер, Жешовська Політехніка, Жешув, Польща  
ВОС Павел, Доктор інженер, Жешовська Політехніка, Жешув, Польща

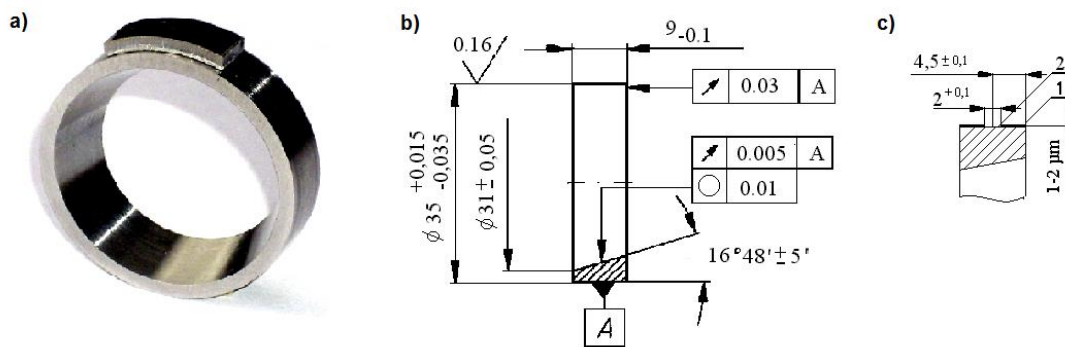
### **THE FORMATION OF PVD COATINGS FOR USE IN SLIDING FRICTION PAIRS OF COMBUSTION ENGINES.**

LUBAS Janusz, Prof. DSc, Rzeszow University of Technology, Rzeszow, Poland  
WOS Pawel, PhD., Rzeszow University of Technology, Rzeszow, Poland

**Wprowadzenie.** Niezawodność maszyn jest efektem poprawnej pracy węzłów łożyskowych, a szczególnie łożyskowych węzłów ślizgowych. W projektowaniu i wytwarzaniu tych elementów konstrukcyjnych wykorzystuje się dostępne metody umożliwiające zmniejszenie intensywności zużycia oraz zapewniających korzystne parametrów pracy elementów węzła ciernego. Szczegółowa analiza warunków pracy tych węzłów i badania modelowe dają podstawę do tworzenia nowych konstrukcji i technologii spełniających rosnące wymagania eksploatacyjne. W przypadku specyficznych warunków pracy węzłów ślizgowych (np. rozruchu, przeciążenia układu, zanieczyszczenia oleju produktami zużycia, zatrzymania), koniecznym jest zastosowanie nowych metod obróbki powierzchniowej zapewniających korzystne warunki pracy przy występującym tarcia mieszanym [1].

W pracy węzłów tarcia w warunkach tarcia mieszanego, istotne znaczenie mają warstwy powierzchniowe wytworzone na elementach pary cierniej i rodzaj czynnika smarnego. Eksploatacja i badania wykazują, że w tych warunkach tarcia zachodzą istotne korelacje między warstwami powierzchniowymi elementów węzła ciernego a czynnikiem smarnym tworzącym warstwy graniczne ograniczające niekorzystne warunki pracy. Na podstawie zaleceń eksploatacyjnych czopy łożysk ślizgowych powinny charakteryzować się: dużą odpornością na zużycie, odpornością na korozyjne oddziaływanie czynnika smarnego, niskim współczynnikiem tarcia. W badaniach [ 2-6 ] przedstawiono badania właściwości fizycznych i mechanicznych powłok CrN i TiN. badania te wykazują również na korzystne właściwości tribologiczne tych materiałów jak niski współczynnik tarcia, wysoka powierzchniowa mikrotwardość i wysoka wytrzymałość mechaniczna. Dodatkowo materiały te charakteryzują się znaczą odpornością na zużycie tribologiczne. Jednak zachowanie się tych powłok w warunkach obciążania zależy od właściwości materiału podłoża, grubości powłoki, rodzaju zużycia (ściernie, adhezyjne, korozyjne) obróbki cieplnej oraz warunków pracy. Pomimo prowadzonych badań powłok CrN i TiN w warunkach tarcia nie uwzględniono dotychczas ich charakterystyk tribologicznych w warunkach ograniczonego smarowania parach ciernych. Celem badań jest porównanie procesów tarcia występujących w skojarzeniach powłok CrN i TiN we współpracy z materiałem łożyskowym AlSn20 w warunkach smarowania obszaru tarcia olejami silnikowymi.

**Opis badań.** Celem badań jest określenie wpływu technologicznie ukształtowanych warstw powierzchniowych czopa i gatunku oleju silnikowego na parametry tarcia w parze kinematycznej czop-panew w warunkach tarcia mieszanego. W badaniach zastosowano czopy z warstwą powierzchniową po azotowaniu jonizacyjnym oraz z powłokami jednoskładnikowymi (TiN, CrN) i dwuskładnikowymi (TiN-stal 45H CrN-stal 45H) (Rys. 1). Czopy współpracowały w parze cierniej z przeciwpróbką ze stopu łożyskowego AlSn20, a obszar tarcia smarowano olejami silnikowymi Lotos Syntetyk 5W/40 i Castrol Magnatec 5W/40. Badania porównawcze współpracy czopa i panwi przeprowadzono na maszynie trybologicznej produkcji MCNEMT w Radomiu typu T-05 [7].



Rys. 1. Para czerne pierścienie- przeciwpróbka z materiału łożyskowego (a), wymiary próbki pierścieniowej (b) i struktura warstwy dwuskładnikowej: 1–powłoka (CrN, TiN), 2–materiał pierścienia (c)

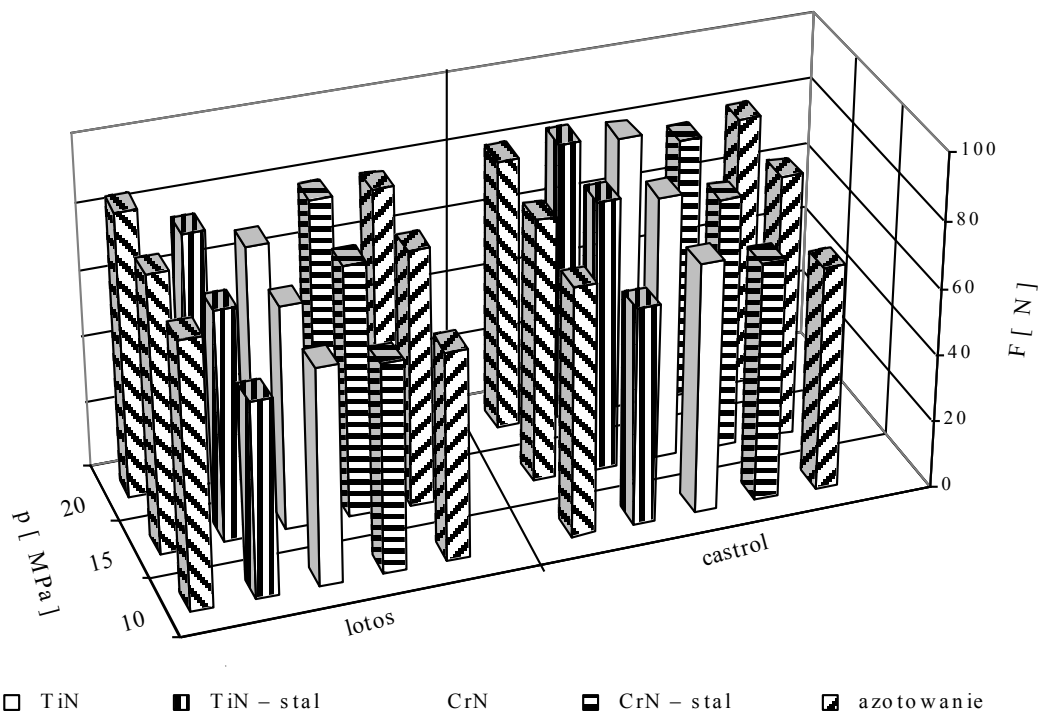
**Wyniki badań.** Wpływ wytworzonych technologicznych warstw powierzchniowych czopa na warunki tarcia jest istotnym zagadnieniem przy projektowaniu pary czarnej czop-panew.

Tabela 1. Średnie wartości siły tarcia w momencie rozruchu.

| Warstwa powierzchniowa czopa | Gatunek oleju silnikowego   |      |      |                  |      |      |
|------------------------------|-----------------------------|------|------|------------------|------|------|
|                              | Lotos Syntetyk              |      |      | Castrol Magnatec |      |      |
|                              | Naciski jednostkowe [ MPa ] |      |      |                  |      |      |
|                              | 10                          | 15   | 20   | 10               | 15   | 20   |
| Azotek tytanu                | 79,5                        | 82,6 | 85,3 | 74,4             | 78,8 | 81,5 |
| Azotek tytanu – stal         | 58,6                        | 68,8 | 76,3 | 64,6             | 80,8 | 83,5 |
| Azotek chromu                | 64,7                        | 66,7 | 69,3 | 74,3             | 79,0 | 82,2 |
| Azotek chromu – stal         | 62,4                        | 75,4 | 79,7 | 71,1             | 74,9 | 78,2 |
| Azotowana jonizacyjnie       | 62,2                        | 76,2 | 79,5 | 66,6             | 78,8 | 81,6 |

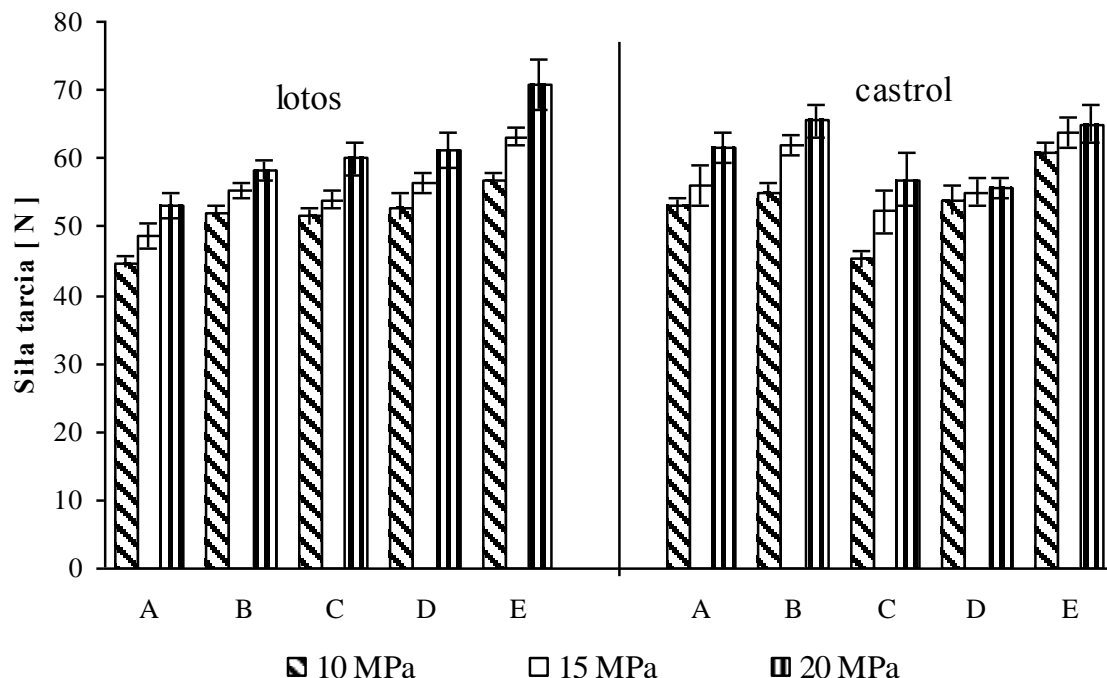
Wyznaczenie wpływu tych czynników na proces tarcia w parze czarnej w warunkach smarowania możliwe jest na podstawie pomiarów momentu tarcia i temperatury w obszarze tarcia pary ślizgowej. Przeprowadzone badania wykazały, że technologiczne warstwy powierzchniowe i gatunek oleju silnikowego wpływają na parametry tarcia pary czarnej. W celu określenia tych zmian przeprowadzono pomiary wartości oporów tarcia wstępujących w czasie rozruchu pary czarnej. W chwili startu pary czarnej rejestrowano wartości siły tarcia w zależności od warstwy powierzchniowej czopa, gatunku oleju silnikowego i obciążenia pary kinematycznej ( tablica 1 ).

Zarejestrowane wyniki siły tarcia w momencie rozruchu badanych parach czarnych czop-panew, pokazały, że nie można określić ogólnych zależności między badanymi wielkościami (Rys. 2). Uzyskane przebiegi siły tarcia, jak również jej wartości są indywidualne dla badanej pary kinematycznej czop-panew. Zarejestrowane wartości siły tarcia potwierdziły, że jej wartość wzrasta wraz ze wzrostem obciążenia pary czarnej. Najniższe wartości siły tarcia są charakterystyczne dla par kinematycznych z czopami z powłoką azotek chromu, a najwyższe dla pary z czopem z powłoką azotek tytanu (smarowanie olejem Lotos). Podczas prób obserwowano niższe wartości siły tarcia dla par z czopami z warstwami dwuskładnikowymi niż dla par z czopami z warstwami jednoskładnikowymi. Wartości siły tarcia podczas rozruchu par z warstwami dwuskładnikowymi są porównywalne do uzyskanych dla par z czopami z warstwami azotowanymi. Smarowanie par olejem Lotos pozwala na uzyskanie niższych wartości siły tarcia niż w przypadku smarowania olejem Castrol.



Rys. 2. Średnie wartości siły tarcia w momencie rozruchu pary ciernej

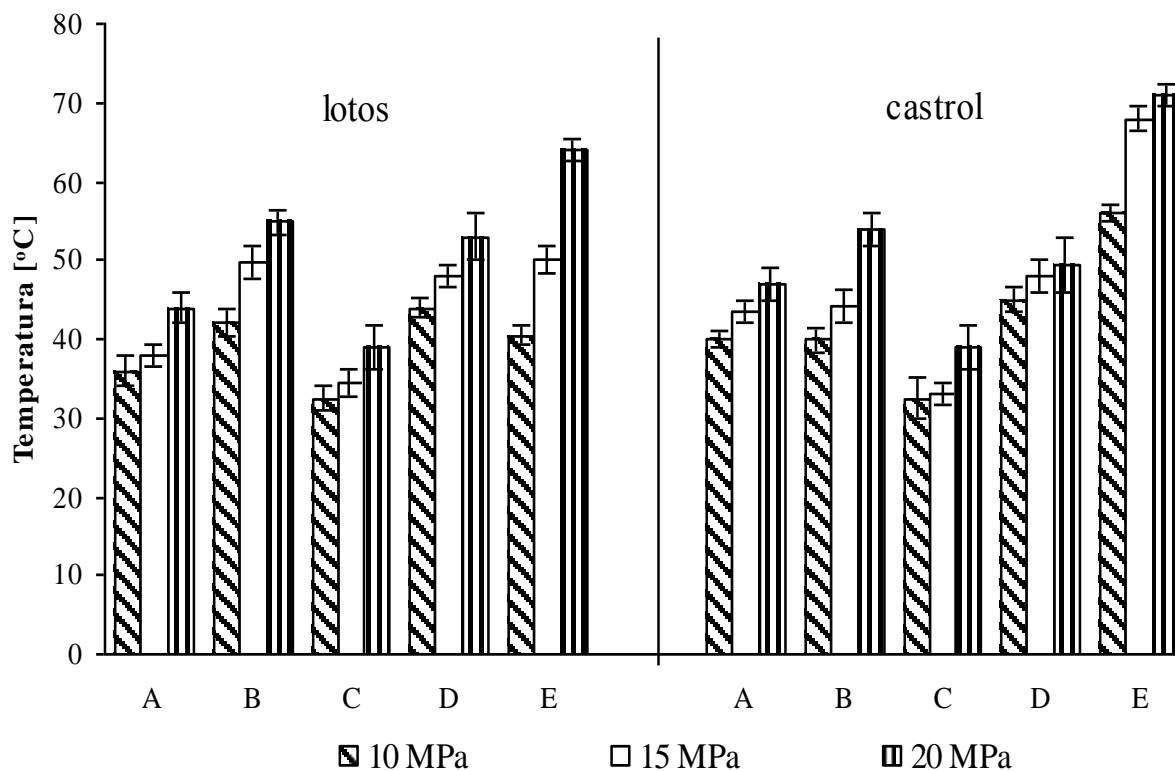
W celu wyznaczenia wpływu badanych czynników na siłę tarcia w parze kinematycznej czop–panew i temperaturę w obszarze tarcia, przeprowadzono badania przy założonych warunków obciążenia; stała prędkość obrotowa czopa  $n = 100$  obr/min i zmienne naciski jednostkowe  $p = 10\text{--}20$  MPa. Uzyskane wyniki posłużyły do opracowania wykresów zmian siła tarcia i temperatury w obszarze tarcia w funkcji obciążenia pary kinematycznej czop–panew ( Rys. 3 i 4 ).



Rys. 3. Zmiany siła tarcia w funkcji obciążenia pary kinematycznej czop–panew; A) TiN, B) TiN–stal, C) CrN, D) CrN–stal, E) azotowanie jonizacyjne

W tak ustalonych warunkach pracy pary kinematyczne czop–panew uzyskano istotne różnice w wartości rejestrowanej siły tarcia w zależności od struktury badanej pary ciernej i zastosowanego oleju silnikowe (Rys. 3). Uzyskane w czasie prób wyniki pomiarów dla par ciernych smarowanych olejem lotos

wykazały istotne zmniejszenie siły tarcia dla czopów z warstwami jedno i dwuskładnikowymi modyfikowanymi azotkiem boru i azotkiem tytanu w stosunku do czopa z warstwą azotowaną. Najwyższe wartości siły tarcia charakteryzują pary z czopami z warstwami powierzchniowymi z azotkiem tytanu. Pary z czopami z warstwami z azotkiem tytanu i azotowane jonizacyjne smarowane olejem castrol wykazują zbliżone wartości siły tarcia. W tych przypadkach niższe wartości siły tarcia rejestrowano podczas pracy par z warstwami zawierającymi azotek chromu.



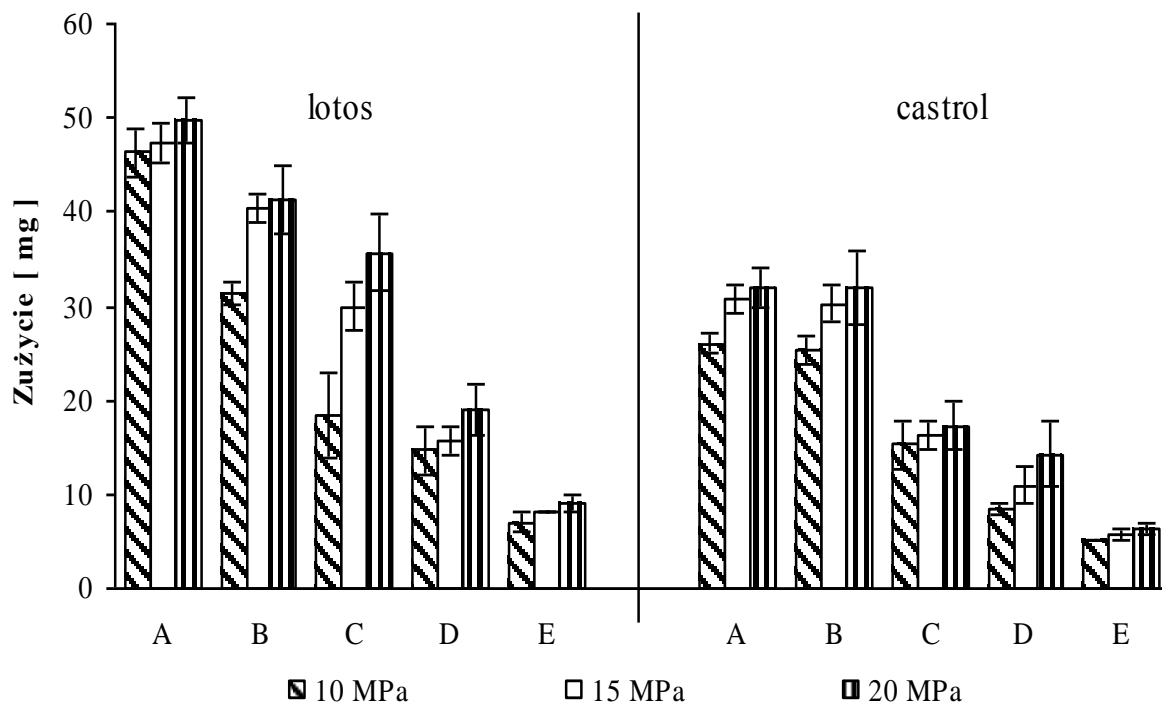
Rys. 4. Zmiany temperatury w funkcji obciążenia pary kinematycznej czop–panew; A) TiN, B) TiN–stal, C) CrN, D) CrN–stal, E) azotowanie jonizacyjne

Wartości i przebiegi temperatury dla warunków smarowania olej lotos i olej castrol są zbliżone (Rys. 4). Istotne zmiany temperatury są efektem zastosowanego sposobu modyfikacji warstwy powierzchniowej czopa i dla czopów z warstwami jedno i dwuskładnikowymi modyfikowanymi azotkiem boru i azotkiem tytanu są niższe w stosunku do czopa z warstwą azotowaną. Zastosowanie azotku chromu wpłynęło na znaczne obniżenie temperatury w obszarze tarcia czop-panew. Uzyskane wyniki pomiaru temperatury wykazały że najniższe temperatury rejestrowano podczas prób par czopami z warstwami jednoskładnikowymi azotek tytanu i azotek chromu.

Otrzymane wyniki badań siły tarcia i temperatury można tłumaczyć właściwościami olejów, własnościami fizycznymi warstw powierzchniowych o odmiennych strukturach metalograficznych, strukturą warstwy jednoskładnikowej i dwuskładnikowej jak również własnościami stopu łożyskowego. W przypadku badanych struktur istotne zmiany mogą być spowodowane adsorpcją oleju, która jest uzależniona od zwilżalności współpracujących warstw powierzchniowych, jak również podatności tych struktur na oddziaływanie powierzchniowo aktywnych dodatków zawartych w oleju. Poważnym zagadnieniem w przypadku warstw dwuskładnikowych są możliwości występowania zakłóceń w przepływie czynnika smarnego, możliwości magazynowania oleju w mikroobszarach warstw powierzchniowej, występowanie gradientu temperatury na szerokości styku, wpływu produktów zużycia i powstaniem nowych struktur metalograficznych jako mieszanin materiałów stanowiących budowę pary.

Analiza uzyskanych wyników zużycia stopu łożyskowego pozwala stwierdzić, że zastosowanie dwuskładnikowej warstwy powierzchniowej czopa umożliwia uzyskanie ważnych zmian w procesie tarcia (Rys. 5). Najmniejsze zużycie stopu łożyskowego uzyskano w parach ciernych współpracujących z czopem z warstwą powierzchniową po azotowaniu jonizacyjnym (niezależnie od zastosowanego gatunku oleju silnikowego). Istotne zmniejszenie zużycia stopu łożyskowego zaobserwowano dla par z czopem z warstwą

powierzchniową dwuskładnikową w stosunku do par z czopem z warstwą jednoskładnikową. W przypadku par z czopem z warstwą zawierającą azotek chromu zużycie panwi jest około dwukrotnie mniejsze, przy zastosowaniu w parze ciernej czopa z warstwą dwuskładnikową azotek chromu – stal. Również dla czopów z warstwami z azotkiem tytanu – stal obserwuje się zmniejszenie zużycia o około 10 – 20% w stosunku do par z czopem z warstwą jednoskładnikową azotek tytanu (smarowanie olejem lotos). W parach ciernych smarowanych olejem castrol obserwuje się mniejsze różnice w wartości zużycia panwi w funkcji ukształtowanej jedno i dwuskładnikowej warstwy powierzchniowej czopa. Próby wykazały korzystny wpływ na zmniejszenie zużycia stopu łożyskowego zastosowanie w warstwie wierzchniej azotku chromu.



Rys. 5. Zużycie stopu łożyskowe; A) TiN, B) TiN–stal, C) CrN, D) CrN–stal, E) azotowanie jonizacyjne

Występujące zmiany w zużyciu stopu łożyskowe można tłumaczyć wzajemnym oddziaływaniem współpracujących warstw powierzchniowych, jak również występowaniem zjawisk fizyko-chemicznych na ich powierzchniach pod wpływem wymuszeń zewnętrznych. Istotne znaczenie odgrywa tutaj oddziaływanie czynnika smarowego, który ulegając przemianom może tworzyć korzystne lub niekorzystne warunki tarcia. Zachodzące zmiany w oleju mogą prowadzić do powstawania warstw granicznych na wytworzonych warstwach powierzchniowych o dużej odporności na przerywanie lub ulegające szybkiemu zniszczeniu. W wyniku procesu tarcia mogły przebiegać zjawiska przenoszenia materiału panwi na powierzchnie czopa lub wbijania się twardych cząstek zużycia materiału czopa w powierzchnie stopu łożyskowego.

Wytworzone warstwy powierzchniowe charakteryzują się dużą odpornością na zużycie ścierne, i w pewnych określonych warunkach tarcia posiadają korzystne cechy tribologiczne. Badania modelowe wykazały, że istnieje możliwość stworzenia par ciernych z czopami dwuskładnikowymi, które są w stanie pracować w istniejących węzłach tarcia. Pary te mogą posiadać korzystniejsze charakterystyki tribologiczne niż stosowane obecnie. Przy czym zmiana ta może wymagać zastosowania nowej generacji olejów smarujących (umożliwiających wytworzenie bardziej trwałych warstw granicznych), lub opracowanie nowej generacji materiałów łożyskowych o zwiększonej odporności na zużycie ścierne.

**Wnioski.** Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych i analizy ich wyników można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Sposób ukonstytuowania warstw powierzchniowych czopa w procesie obróbki powierzchniowej wpływa na zmianę oporu tarcia w parze ciernej. Uzyskane na podstawie prób eksperymentalnych wartości siły tarcia, pozwoliły określić istotną zależność przebiegu zmian sił tarcia od nacisku jednostkowego.
2. Na podstawie doświadczeń stwierdzono wpływ ukształtowanej warstwy powierzchniowej czopa na zużycie stopu łożyskowego panwi. Wykazano, że przy współpracy czopów z warstwą powierzchniową dwuskładnikową azotek chromu–stal i azotowanej jonizacyjnie występuje najmniejsze zużycie stopów

łożyskowych. Natomiast największe zużycie zarejestrowano dla par z czopami z warstwą powierzchniową z azotkiem tytanu.

3. Współpraca pary kinematycznej czop – panew wykazała korzystny wpływ oleju silnikowego castrol GTX magnatec 5W/40 w stosunku do oleju lotos syntetic 5W/40 na zmniejszenie zużycia stopów łożyskowych.

#### LITERATURA

- [1] Kula P., Inżynieria warstwy wierzchniej. Politechnika Łódzka, Łódź, 2000.
- [2] Ma G., Wang L., Gao H., Zhang J., Reddyhoff T., The friction coefficient evolution of a TiN coated contact during sliding wear. Applied Surface Science, Vol. 345, 2015, s. 109-115.
- [3] Tang S., Gao S., Wang S., Wang J., Zhu Q., Chen Y., Li X., Characterization of CVD TiN coating at different deposition temperatures and its application in hydrocarbon pyrolysis. Surface and Coatings Technology, Vol. 258, 2014, s. 1060-1067.
- [4] Sęp J., Zielecki W., Preliminary evaluation of the application possibility of bearing journal with two component surface layer. Tribologia, nr 3, 1995.
- [5] Bandeira, A.L. Trentin, R. Aguzzoli, C. Maia da Costa M.E.H., Michels A.F., Baumvol I.J.R, Farias M.C.M., Figueroa C.A., Sliding wear and friction behavior of CrN-coating in ethanol and oil-ethanol mixture, Wear, Vol. 301, 2013, s. 786–794.
- [6] Ramadossa R., Kumarb N., Dashb S., Arivuolia D., Tyagib A.K. Wear mechanism of CrN/NbN superlattice coating sliding against various counterbodies. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials Vol. 41, 2013, s 547–552.
- [7] Szczerek M.: Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. ITE, Radom 1997.

#### STRESZCZENIE

LUBAS Janusz. Kształtowanie powłok PVD do zastosowań w ślizgowych węzłach ciernych silników spalinowych / LUBAS Janusz, WOŚ Paweł // Wisnyk Narodowego Uniwersytetu Transportu. – K. : NUT, 2015. - № 32.

W pracy przedstawiony wyniki badań porównawczych wpływu ukształtowanej warstwy powierzchniowej jednoskładnikowej (TiN, CrN) i dwuskładnikowej (TiN-stal, CrN-stal) czopa na warunki tarcia pary ciernej. Podczas badań tribologicznych pary ślizgowe były smarowane olejami silnikowymi Castrol magnatec 5W/40 i Lotos syntetic 5W–40. Test wykonano dla par skojarzonych z przeciwpróbkami wykonanymi z materiału łożyskowego AlSn20. Badania zostały przeprowadzone na testerze tribologicznym T-05. Wyniki badań potwierdziły możliwość zostawiania warstw powierzchniowych dwuskładnikowych w ślizgowych parach ciernych pracujących w warunkach tarcia mieszanego. Badania wykazały że siła tarcia, temperatura w obszarze tarcia i zużycie stopu łożyskowego zależy od kompozycji warstwy powierzchniowej czopa pracującego w parze ciernej. Korzystne charakterystyki tribologiczne obserwowano w parach ciernych z czopami w warstwach dwuskładnikowymi CrN-stal i warstwach jednoskładnikowymi CrN.

#### РЕФЕРАТ

ЛЮБАС Януш. Формування PVD покриттів для використання в вузлах тертя ковзання двигунів внутрішнього згоряння / ЛЮБАС Януш, ВОС Павел // Вісник Національного транспортного університету. Серія “Технічні науки”. Науково-технічний збірник. – К.: НТУ, 2015. - Вип. 2 (32).

У роботі представлені результати досліджень, які порівнюють вплив однокомпонентних поверхневих шарів (TiN, CrN) і двокомпонентних поверхневих шарів (TiN і сталі, CrN і сталі). В ході випробувань, трибологічні пари були змащені оливою Castrol magnatec engine oil 5W/40 and lotos syntetic 5W–40.

Стендові випробування виконувалися для фрикційних пар підшипника AlSn20. Випробування проводилися на трибологічному тестері T-05. Отримані результати підтвердили можливість використання двокомпонентних поверхневих шарів в парах тертя, які працюють в умовах змішаного тертя. Дослідження показали, що сила тертя, температура в зоні тертя і зносу матеріалу підшипника залежить від умов тертя і складу поверхневих шарів пар тертя. Сприятливі характеристики тертя спостерігалися в парах тертя з двокомпонентними поверхневими шарами CrN, і однокомпонентними поверхневими шарами CrN.

### ABSTRACT

LUBAS Janusz, WOS Pawel. The formation of PVD coatings for use in sliding friction pairs of combustion engines. Visnyk National Transport University. Series “Technical sciences”. Scientific and Technical Collection. - Kyiv. National Transport University, 2015. - Issue 2 (32).

The paper presents the results of studies comparing the impact of one-component surface layers (TiN, CrN) and two-component surface layers (TiN and steel, CrN and steel) of the journal on the conditions of friction in the friction pairs. During the tests, the tribological pairs were lubricated with Castrol magnatec engine oil 5W/40 and lotos syntetic 5W-40. The stand tests have been performed for the frictional pairs with AlSn20 bearing alloy. The tests were performed on a T-05 tribological tester. The results confirmed the possibility of using two-component surface layers in sliding pairs which are working under mixed friction conditions. The research showed that friction force, temperature in the area of friction and wear of the bearing material depend on the conditions of friction and the composition of the surface layers of the cooperating pairs. Favorable friction characteristics were observed in friction pairs with two-component CrN-steel surface layers and one-component CrN surface layer.

### AUTORZY:

LUBAS Janusz, Prof. dr hab. inż., Politechnika Rzeszowska, Katedra Silników Spalinowych i Transportu, Al. Powstańców Warszawy 12, tel.: +48 17 865 1100,35-959,Rzeszów, Polska

WOS Paweł, dr inż., Politechnika Rzeszowska, Katedra Silników Spalinowych i Transportu, Al. Powstańców Warszawy 12, tel.: +48 17 865 1100, 35-959, Rzeszów, Polska

### АВТОРИ:

ЛЮБАС Януш, Професор, Доктор габілітований, Жешовська Політехніка, Кафедра двигунів внутрішнього згоряння і транспорту, Бульвар Повстанців Варшави 12, tel.: +48 17 865 1100,35-959,Жешув, Польща

ВОС Павел, Доктор інженер,Жешовська Політехніка, Кафедра двигунів внутрішнього згоряння і транспорту, Бульвар Повстанців Варшави 12, tel.: +48 17 865 1100, 35-959, Жешув, Польща

### AUTHORS:

LUBAS Janusz, Rzeszow University of Technology, Department of Internal Combustion Engines and Transport, Warsaw Insurgents Boulevard 12, tel.: +48 17 865 1100, 35-959, Rzeszow, Poland

WOS Pawel, PhD., Rzeszow University of Technology, Department of Internal Combustion Engines and Transport, Warsaw Insurgents Boulevard 12, tel.: +48 17 865 1100, 35-959, Rzeszow, Poland

### РЕЦЕНЗЕНТИ:

Левківський О.П., доктор технічних наук, професор, Національний Транспортний Університет, професор кафедри виробництва, ремонту та матеріалознавства, Київ, Україна.

Гутаревич Ю.Ф, доктор технічних наук, професор, Національний Транспортний Університет, завідувач кафедри двигунів і теплотехніки, Київ, Україна.

### REVIEWERS:

Levkivskiy O.P, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Transport University, Professor of Department of Manufacturing, Repair and Materials Engineering, Kyiv, Ukraine.

Gutarevych Y.F, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Transport University, Head of Department of Engines and Heating Engineering, Kyiv, Ukraine.