

## Autoreferat

### 1. Imię i Nazwisko.

Janusz Lubas

### 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania.

- 1983 rok dyplom zawodowy technik mechanik specjalność: obróbka skrawaniem, Technikum Mechaniczne, Zespół Szkół Mechanicznych w Rzeszowie,
- 1988 rok tytuł zawodowy magister inżynier mechaniki specjalność technologia maszyn, Wydział Mechaniczny Politechnika Rzeszowska, pracy magisterska pt. „Modelowanie warunków łączenia metali o różnych własnościach podczas jednoczesnego ich odkształcenia plastycznego ze szczególnym uwzględnieniem procesu wyciskania”.
- 1998 rok stopień doktora nauk technicznych specjalność: budowa i eksploatacja maszyn, Wydział Mechaniczny Politechnika Krakowska, Rozprawy doktorska „Wpływ technologii powierzchni czopa na własności tribologiczne węzła ślizgowego pracującego w warunkach tarcia mieszanego”.

### 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu.

- 1989 – 1991 Biuro Projektów Budownictwa Przemysłowego w Rzeszowie, stanowisko: asystent projektanta (sekcja niemiecka).
- 1991 – 2008 Wyższa Szkoła Pedagogiczna w Rzeszowie, Wydział Matematyczno-Fizyczny, Instytut Techniki, stanowisko: asystent.
- 2008 – 2001 Wyższa Szkoła Pedagogiczna w Rzeszowie, Wydział Matematyczno-Fizyczny, Instytut Techniki, stanowisko: adiunkt.
- 2001 – 2011 Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Instytut Techniki, stanowisko: adiunkt
- od 2011 Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Instytut Techniki, stanowisko: starszy wykładowca.

### 4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

- a) Lubas J., 2013, Zastosowanie warstw powierzchniowych z borem w smarowanych węzłach ciernych silnika spalinowego, Wydawnictwo Uniwersytetu Rzeszowskiego, s. 160, Rzeszów, ISBN 978-83-7338-843-7.
- b) omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Zastosowanie boru do kształtowania warstwy wierzchniej wpływa na zwiększenie odporności na zużycie ściernie i korozyjne, a wyniki badań laboratoryjnych wykazują wpływ tego pierwiastka i jego związków na zmniejszenie oporów tarcia. Pomimo wymienionych

korzystnych cech tribologicznych i użytkowych, a także możliwości uzyskiwania warstw powierzchniowych z borem różnymi metodami, warstwy te nie znalazły szerokiego zastosowania w budowie maszyn. Istotnym czynnikiem ograniczającym ich zastosowanie jest wybór optymalnej metody kształtowania i określenie warunków technologicznych procesu dla konkretnych warunków eksploatacji i mechanizmów zużycia występujących w parze kinematycznej.

Istniejący stan wiedzy umożliwia podjęcie zagadnienia sformułowanego w następującej oryginalnej autorskiej tezie: technologicznie ukształtowane warstwy powierzchniowe z borem mają istotny wpływ na charakterystykę pracy węzłów ciernych w warunkach ograniczonego smarowania. Podstawowym celem badań jest określenie metody kształtowania technologicznej warstwy wierzchniej dla elementu węzła ciernego w istniejących warunkach jego pracy, określenie zależności funkcyjnych pomiędzy parametrami ukształtowanej warstwy wierzchniej a charakterystyką pracy węzłów ciernych w warunkach smarowania oraz weryfikacja przyjętego modelu zużycia. Jak również wykazanie, że współczesne procesy technologiczne umożliwiają zastosowanie boru do kształtowania warstw wierzchnich elementów węzłów ciernych pracujących w warunkach dynamicznych obciążeń, czy zachowaniu trwałości i niezawodności węzła. Natomiast praktycznym celem było zwiększenie trwałości i odporności na zużycie wybranych węzłów ciernych silnika spalinowego.

W badaniach zastosowano próbki pierścieniowe z stali: 38CrAlMo5 – 10, 46Cr2 i 30MnB4. Próbki pierścieniowe z stali 38CrAlMo5 – 10 poddano azotowaniu jonizacyjnemu a próbki z stali 46Cr2: borowano w proszku, borowano laserowo oraz pokryto powłoką TiB<sub>2</sub> (wybrane gatunki stali stosowane są w konstrukcji pojazdów samochodowych). Natomiast próbki pierścieniowe z stali 30MnB4 ulepszono cieplnie. Technologiczne warstwy powierzchniowe z borem na próbkach pierścieniowych (stosowanych w badanych stanowiskowych) ukształtowano przy pomocy metod umożliwiających ich wytworzenie na wybranych elementach silnika spalinowego. Próbki pierścieniowe podczas testów skojarzono w styku konforemnym z przeciwpróbkami wykonanymi z stopów łożyskowych CuPb30 i AlSn20. Natomiast próby w styku niekonforemnym realizowano z zastosowaniem próbek płaskich, które wycięto z dźwigni popychacza badanego silnika spalinowego. Obszar tarcia podczas prób na testerze typu rolka-klocek T – 05 smarowano olejami silnikowymi Lotos mineralny 15W/40 i Lotos syntetyczny 5W/40.

Występujące procesy tarcia i zużycia w obszarze styku elementów węzła ciernego spowodowały zmiany w strukturze geometrycznej powierzchni badanych elementów. Pomiar wykazały, że chropowatość powierzchni próbek pierścieniowych w styku konforemnym wzrosła nawet o 80% w stosunku do wartości początkowej (warstwa borowana laserowo podczas współpracy z stopem łożyskowym AlSn20), a przeciwpróbek zwiększyła się aż o 280% (przeciwpróbki z stopu łożyskowego CuPb30 przy współpracy z warstwą borowaną w proszku). W niektórych skojarzeniach chropowatość powierzchni uległa zmniejszeniu, dotyczy to próbek pierścieniowych borowanych w proszku i z powłoką TiB<sub>2</sub>, a także przeciwpróbek w skojarzeniu z warstwą ulepszoną cieplnie i z powłoką TiB<sub>2</sub>. Zmiana parametrów chropowatości powierzchni elementów węzła wykazała, że w wyniku procesu tarcia i zużycia warstwy wierzchniej, w większości par ukształtowała się optymalna struktura

geometryczna powierzchni dla określonej konfiguracji pary ślizgowej i warunków obciążenia. Wyjątkiem było skojarzenie warstwy borowanej w proszku i stopu łożyskowego CuPb30, gdzie wystąpiły intensywne procesy szepiania i przenoszenia materiałów, co wpłynęło na duży rozrzut wartości chropowatości powierzchni obu współpracujących warstw wierzchnich. Pomiary chropowatości w styku skoncentrowanym wykazały natomiast istotny wzrost chropowatości w stosunku do początkowej na próbce pierścieniowej ulepszanej cieplnie (większość parametrów zwiększyła swoje wartości dwukrotnie). Znacznie mniejsze zmiany zmierzono na próbce pierścieniowej borowanej, a parametry wysokościowe  $R_z$  i  $R_y$  uległy zmniejszeniu o kilkadziesiąt procent. Pomiary przeciwpróbki płaskiej ujawniły natomiast istotny wpływ czynnika smarnego. Zastosowanie do smarowania pary ciernej oleju lotos syntetyczny spowodowało w większości mierzonych parametrów chropowatości mniejsze zmiany niż w parach smarowanych olejem lotos syntetyczny.

Wpływ ukształtowanych technologicznych warstw powierzchniowych na warunki tarcia, od momentu rozruchu pary ciernej, obserwowano w oparciu o wartość i przebieg momentu rozruchowego w funkcji prędkości ślizgania. Spośród badanych konfiguracji par ciernych najwyższe wartości momentu rozruchowego zarejestrowano w parach ciernych z warstwą borowaną laserowo, niezależnie od zastosowanego gatunku stopu łożyskowego i oleju silnikowego. Zastosowanie borowania laserowego zwiększyło opory ruchu o 10–50% w stosunku do zmierzonych w parach z warstwami azotowanymi i ulepszanymi cieplnie. Zastosowanie w tych skojarzeniach równocześnie stopu łożyskowego AlSn20 i oleju Lotos syntetyczny sprzyja wzrostowi oporów ruchu o 20–30%. Natomiast w skojarzeniach z stopem łożyskowym CuPb30 i smarowaniu olejem Lotos mineralny występowały najniższe wartości momentu rozruchowego. Po zakończeniu okresu rozruchu, rejestrowane zmiany współczynnika tarcia ulegają stabilizacji lub ewentualnie występuje niewielki jego wzrost wraz z czasem trwania współpracy. Stabilizację oporów ruchu rejestrowano w skojarzeniach: próbki pierścieniowe azotowane, ulepszone cieplnie, borowane w proszku i z powłoką  $TiB_2$  przy współpracy z stopem łożyskowym CuPb30, próbki pierścieniowe ulepszone cieplnie i borowane w proszku przy współpracy z stopem łożyskowym AlSn20. Istotny przyrost wartości oporów ruchu wraz z czasem trwania próby zmierzono w parach z warstwą borowaną laserowo i to głównie w skojarzeniu z stopem łożyskowym CuPb30. Pomiary siły tarcia i temperatury realizowane przy ustalonej prędkości ślizgania, a zmiennych naciskach jednostkowych, wykazały najniższe opory tarcia i najniższe temperatury w skojarzeniach z warstwami azotowanymi, ulepszanymi cieplnie współpracującymi z stopem CuPb30 (poniżej 150 N i 70°C) oraz skojarzeń z warstwami azotowanymi, ulepszanymi cieplnie i borowanymi w proszku z stopem AlSn20 (poniżej 200 N i 100°C) (przy smarowaniu olejem Lotos mineralny). Najwyższe wartości oporów tarcia wystąpiły w skojarzeniach z warstwami borowanymi laserowo – stop CuPb30 (max. 280 N i 110°C) oraz w skojarzeniach z warstwami borowanymi laserowo, powłoką  $TiB_2$  a stopem AlSn20 (max. 342 N i 111°C).

Pomiary zużycia próbek pierścieniowych z ukształtowanymi warstwami powierzchniowymi z borem nie wykazały mierzalnego zużycia liniowego, ale istotny ubytek masy zarejestrowano dla przeciwpróbek z stopów łożyskowych AlSn20 i CuPb30. Największe zużycie wagowe stopu CuPb30 zmierzono w parach z warstwą borowaną

w proszku (powyżej 0,1 mg przy 20 MPa) i było ono około 5-krotnie większe, niż w parach z warstwami azotowanymi i ulepszanymi cieplnie (0,017 do 0,03 mg przy 20 MPa). W parach z powłoką  $TiB_2$  i po borowaniu laserowym zużycie stopu CuPb30 wyniosło ~0,06-0,07 mg przy 20 MPa. Natomiast w parach z stopem łożyskowym AlSn20 największe zużycie zmierzono przy skojarzeniu z powłoką  $TiB_2$  (0,017-0,018 mg przy 20 MPa). Najniższe wartości zużycia stopu łożyskowego wystąpiły w parach z warstwami azotowanymi, borowanymi w proszku i ulepszanymi cieplnie podczas smarowania olejem mineralnym. Wartości zużycia stopu łożyskowego w tych skojarzeniach są zbliżone do siebie i nie przekraczają 0,01 mg. Natomiast pomiary zużycia liniowego przeciwpróbek z stopu CuPb30 i AlSn20 (eliminujące ciężar stopów) wykazały, że w skojarzeniach z warstwą azotowaną i ulepszaną cieplnie poziom zużycia obu stopów jest podobny i nie przekracza 0,02 mm. W pozostałych badanych konfiguracjach par ciernych zużycie liniowe stopu AlSn20 było mniejsze, niż stopu CuPb30. Pomiary zużycia w styku skoncentrowanym wykazały 4-krotnie większe zużycie par ciernych z próbkami pierścieniowymi ulepszanymi cieplnie w stosunku do par z próbkami borowanymi. Przy czym pomiary zużycia elementów składowych par ciernych dowiodły, że istotna różnica w zużyciu wynika przede wszystkim z zużycia próbki pierścieniowej. Zużycie próbek pierścieniowych z warstwą powierzchniową ulepszaną cieplnie było o 400% wyższe w stosunku do próbek z warstwą borowaną w proszku.

Badania w warunkach stanowiskowych na testerze T – 05 pozwoliły na stworzenie obrazu zjawisk przebiegających w węzłach ciernych z technologicznymi warstwami powierzchniowymi modyfikowanymi borem. Wyniki badań wykazały, że przedstawiona teza pracy została potwierdzona i istnieje możliwość zastosowania tego typu warstw powierzchniowych w rzeczywistych węzłach ślizgowych. A o wyborze metody kształtowania warstwy powierzchniowej z borem w przypadku elementów konstrukcyjnych, istotne znaczenie ma dobór technologii wytwarzania warstw powierzchniowych dla danego elementu i warunków eksploatacji węzła ciernego.

Do badań eksploatacyjnych wytypowane zostały węzły ślizgowe silnika spalinowego: dźwignia zaworu – krzywka rozrządu, korbówód – czop wału korbowego i otwór główki korbowodu – sworzeń tłokowy. Dla elementów silnika zastosowano następujące technologiczne procesy kształtowania warstwy powierzchniowej; dźwignia zaworu i sworzeń tłokowy borowano w proszku, a czop wału korbowodu borowano laserowo.

Pomiary struktury geometrycznej powierzchni elementów par ciernych eksploatowanych w silniku spalinowym wykazały istotne zmniejszenie chropowatości powierzchni w parze dźwignia zaworu – krzywka rozrządu. Zmniejszenie chropowatości powierzchni dotyczy przede wszystkim dźwigni borowanej w proszku, gdzie pomimo wysokiej początkowej chropowatości powierzchni (dwukrotnie większa od nieborowanej), po zakończeniu pracy jej chropowatość powierzchni ( $R_a=0,13 \mu m$ ) była porównywalna do zmierzonej na dźwigni nieborowanej ( $R_a=0,08 \mu m$ ). A pomiary zużycia dźwigni zaworowej wykazały, że proces borowania w proszku spowodował prawie trzykrotne zmniejszenie zużycia materiału dźwigni (głębokość wytarcia 0,017 mm) w stosunku do dźwigni nieborowanej (głębokość wytarcia 0,07 mm). Natomiast w parze czop wału korbowego po borowaniu laserowym – korbówód pomiary chropowatości powierzchni wykazały większy wzrost chropowatości w skojarzeniach nieborowanych niż borowanych. W tej parze zużycie

materiału korbowodu w skojarzeniu z czopem borowanym wzrosło o około 45% (~0,048 mm), a stopy korbowodu o 30% (~0,044 mm) w stosunku do czopa nieborowanego. Zaś w parze z czopem nieborowanym zużycie materiałów korbowodu i stopy korbowodu było na zbliżonym poziomie dla obu badanych elementów (~0,033 mm).

Uzyskane wyniki badań pozwoliły stwierdzić, że przyjęta teza badawcza została potwierdzona również w badaniach eksploatacyjnych, a zastosowanie boru do kształtowania technologicznej warstwy powierzchniowej i zastosowane metody kształtowania warstw powierzchniowych w istotny sposób wpływają na warunki tarcia i procesy zużycia w węzłach ciernych pracujących w warunkach ograniczonego smarowania. Uzyskane pozytywne tribologiczne efekty ukształtowanych warstw powierzchniowych z borem potwierdzają, że technologia ta w większym zakresie może być stosowana w budowie maszyn. Ukształtowane warstwy wpływają nie tylko na zmniejszenie zużycia, ale również pozwalają konstituować trwałe eksploatacyjne warstwy powierzchniowe w węzłach kinematycznych silników spalinowych, co wpływa na zwiększenie ich trwałości. Dalszy rozwój procesów kształtujących tego typu warstwy powierzchniowe na elementach węzłów ciernych, związany jest z wprowadzeniem nowej generacji olejów smarujących i materiałów łożyskowych, jak również nowych technologii wytwarzania tego typu warstw powierzchniowych.

Wyniki uzyskane w tych badaniach zostały opracowane i przedstawione w monografii pt. „Zastosowanie warstw powierzchniowych z borem w smarowanych węzłach ciernych silnika spalinowego”. W monografii została poszerzona wiedza o tribologicznych właściwościach warstw powierzchniowych z borem oraz o możliwościach zastosowania tego pierwiastka w nowoczesnych procesach wytwarzania. Ponadto wykorzystanie tych technologii do kształtowania technologicznych warstw wierzchnich na elementach silnika spalinowego stanowi nowoczesną i oryginalną technologię, która umożliwia zwiększenie trwałości i niezawodność całego obiektu. Przeprowadzona symulacja trwałości węzła ślizgowego silnika spalinowego w oparciu o badania stanowiskowe i eksploatacyjne, pozwoliła na określenie trwałości węzła ślizgowego przy granicznej wielkości zużycia w funkcji parametrów obciążenia i konfiguracji materiałowej rzeczywistego węzła ślizgowego. Przeprowadzone badania i analizy wyników badań wykazały, że ukształtowanie warstw powierzchniowych z borem w węzłach ślizgowych może zapewnić korzystniejsze warunki tarcia, niż stosowane obecnie technologie obróbki powierzchniowej. Ostatecznym czynnikiem decydującym o zastosowaniu warstw powierzchniowych z borem jest znajomość warunków współpracy elementów węzła ciernego, wybór odpowiedniej technologii, parametrów procesu modyfikacji elementów węzła ciernego oraz rachunek ekonomiczny.

Wyniki badań zostały przedstawione w 16 publikacjach w czasopismach naukowych w języku polskim i angielskim o zasięgu krajowym i międzynarodowym (w tym 4 publikacje w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports).

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych.

Na wcześniejszym etapie badań naukowych realizowałem projekt ukształtowania interaktywnej struktury powierzchniowej składającej się z materiałów o różnych właściwościach tribologicznych, przy usytuowaniu ich bezpośrednio obok siebie na elementach pary cierniej. Tego typu konstrukcje są stosowane, ale obiecujące wyniki uzyskano

głównie w konstrukcji panwi łożysk ślizgowych, czego przykładem są panwie łożyska ślizgowego rowkowego i pasmowego. Wykonanie tego typu powierzchni ślizgowej na czopie jest bardziej skomplikowane pod względem konstrukcyjnym i bardziej kosztowne. Istniejące rozwiązania konstrukcyjne czopów wykonywane są poprzez wprowadzenie wstawek w procesach: zaprasowywania, wciskania, odlewania lub nagniatania. Stosowane wstawki wykonywane są przede wszystkim z miedzi i jej stopów. Prowadzone badania z innymi materiałami konstrukcyjnymi ołów, aluminium, wolfram nie wykazały korzystnych właściwości tribologicznych.

Trudność w kształtowaniu tego typu warstw powierzchniowych, na czopach stosowanych w węzłach ciernych, ogranicza ich zastosowanie, pomimo ich korzystnych właściwości tribologicznych potwierdzonych w opublikowanych wynikach badań. W pracy postawiono tezę, że istnieje technologia pozwalająca na kształtowanie tego typu warstw powierzchniowych w jednym procesie technologicznym, z materiałów charakteryzujących się dużą twardością i odpornością na zużycie. A uzyskane warstwy powierzchniowe można zastosować w węzłach ciernych zapewniając wymaganą trwałość, nawet w warunkach ograniczonego smarowania.

Do kształtowania struktury pasmowej na czopie węzła ciernego zastosowano procesy osadzania próżniowego w wyniku, których można uzyskać powłoki charakteryzujące się małą grubością (w zakresie od kilkudziesiętnych części mikrometra do kilku mikrometrów). Wytworzone powłoki tymi metodami, przy korzystnych właściwościach tribologicznych (duża twardość, odporność na zużycie, odporność na korozję), nie były stosowane wcześniej w smarowanych skojarzeniach ciernych, jak również nie kształtowano tymi technologiami warstw powierzchniowych o zmiennych właściwościach fizykochemicznych.

Do realizacji badań stanowiskowych wykonano próbki pierścieniowe z stali 46Cr2 z warstwami jednorodnymi z azotku tytanu i azotku chromu oraz próbki pierścieniowe z warstwami o ukształtowanej strukturze pasmowej TiN–stal 46Cr2 i CrN–stal 46Cr2. Dla celów porównawczych wykonano również próbki azotowane jonizacyjnie z stali 38CrAlMo5–10 (proces azotowania jest obecnie powszechnie stosowany do obróbki powierzchniowej czopów łożyskowych w silnikach spalinowych). Ukształtowane warstwy powierzchniowe próbek pierścieniowych w badaniach skojarzono z przeciwpróbkami wykonanymi z panwi łożyskowych z stopów łożyskowych CuPb30 i AlSn20. Próby tribologiczne zgodnie z przyjętym programem badań przeprowadzono na testerze T–05, w warunkach smarowania pary cieiernej olejami silnikowymi Lotos syntetyk 5W/40 i Castrol magnatec 5W/40.

Zmiany w obszarze tarcia w początkowym etapie współpracy pary cieiernej, rejestrowano przez pomiar wartość momentu tarcia podczas uruchamiania pary i jego dalszych zmian wraz z wzrostem prędkości obrotowej. Niskie wartości momentu tarcia podczas rozruchu pary cieiernej zarejestrowano głównie w skojarzeniach: z jednorodną warstwą azotku tytanu – stop łożyskowy CuPb30 (smarowanie olejem Castrol), z jednorodną warstwą azotku chromu – stop łożyskowy AlSn20 (smarowanie olejem Lotos) i z warstwą pasmową azotek chromu – stal 46Cr2 i stop łożyskowy CuPb30. W tych skojarzeniach zmierzone wartości momentu tarcia była niższe, niż w skojarzeniach z próbką pierścieniową azotowaną jonizacyjnie (nawet o 20%). Obniżenie momentu tarcia podczas uruchamiania pary cieiernej wpływa na

zapotrzebowanie energetyczne układu oraz kształtuje dalsze warunki tarcia w obszarze styku. Jeśli wartość momentu tarcia podczas startu pary jest niska i w krótkim czasie wystąpi poziom stabilnych oporów tarcia, to występują mniejsze zmiany w ukształtowanych warstwach technologicznych. Ponadto niższe opory tarcia pozwalają na oszczędności energii, ułatwiają start silnika i zmniejszają zużycie elementów współpracujących.

W badaniach wykonano również pomiary siły tarcia, temperatury i zużycia przy stałej prędkości obrotowej próbki pierścieniowej, w celu określenia wpływu nacisków jednostkowych na warunki tarcia. Pomiary temperatury i siły tarcia w ustabilizowanych warunkach pracy wykazały, że pary cierne z próbkami pierścieniowymi z warstwą z azotku chromu i azotku chromu – stal 46Cr2 (smarowanie olejem Castrol), generują mniejsze o 10 – 15% opory tarcia w stosunku do pozostałych badanych par. Charakterystyczne są dla tych par niższe lub zbliżone wartości siły tarcia do wyników otrzymanych dla par z próbką azotowaną jonizacyjnie (nie zależnie od gatunku oleju silnikowego). W pozostałych parach ciernych występują duże zróżnicowanie wyników pomiarów tych wielkości, co nie pozwala nie określić wiarygodnych uogólnień, co do wpływu zastosowanej obróbki powierzchniowej na parametry tarcia. Zaobserwowano natomiast, że zastosowanie stopu łożyskowego AlSn20 wpływa na obniżenie wartości siły tarcia i temperatury w obszarze tarcia, w większym stopniu niż stopu CuPb30. A temperatury w obszarze tarcia w parach z próbkami z warstwami z azotkiem chromu i tytanu (dla struktur jednorodnych jak i pasmowych) były niższe o około 15 – 35% w stosunku do par z próbkami azotowanymi.

Obserwacja mikroskopowa powierzchni i pomiary chropowatości powierzchni próbek po próbach, wykazały istotne zmiany w strukturze geometrycznej powierzchni tarcia w stosunku do powierzchni wyjściowej. Zmiany te obserwuje się przede wszystkim na powierzchni tarcia przeciwpróbek z stopów łożyskowych, współpracujących z próbkami pierścieniowymi z pasmową warstwą powierzchniową, gdzie wystąpiły pasma z różniącą się strukturą geometryczną powierzchni. Podczas współpracy par ciernych z warstwami powierzchniowymi jednorodnymi, głównie obserwowano wzajemne wyrównywanie się wysokości chropowatości powierzchni współpracujących warstw wierzchnich obu elementów pary ciernej. A ukształtowana chropowatość powierzchni była indywidualną cechą określonego skojarzenia ciernego i występujących warunków tarcia podczas próby. W skojarzeniach z próbkami z pasmową warstwą powierzchniową, zmierzona chropowatość powierzchni przeciwpróbki w styku z podłożem pierścienia była nawet dwukrotnie większa, niż chropowatość powierzchni przeciwpróbki stykającej się z naniesioną powłoką. Natomiast chropowatość powierzchni próbek pierścieniowych podczas prób uległa tylko niewielkim zmianom. Istniejące różnice w chropowatości powierzchni są wynikiem występowania odmiennych warunków tarcia w tych obszarach, innych właściwości fizykochemicznych współpracujących materiałów, warunków smarowania i oddziaływania produktów zużycia. Wysoka chropowatość powierzchni przeciwpróbki z stopu łożyskowego odpowiadająca powierzchni podłoża próbki pierścieniowej jest efektem mikroskrawania przez produkty zużycia, jak również występowaniem szczepień adhezyjnych.

Zastosowanie warstwy powierzchniowej z strukturą pasmową w parze ciernej pozwala na uzyskanie istotnych zmian w zużyciu stopu łożyskowego. W skojarzeniach z warstwą powierzchniową o strukturze pasmowej zużycie przeciwpróbki z stopu łożyskowego było

mniejsze, niż w skojarzeniu z warstwą powierzchniową jednorodną. Zużycie przeciwpróbek z stopów AlSn20 i CuPb30 w skojarzeniu z warstwą azotku chromu było dwukrotnie mniejsze, jeśli w parze ciernej zastosowano próbki pierścieniowe z warstwą o strukturze pasmowej. W skojarzeniach z strukturą pasmową azotek tytanu – stal 46Cr2 zużycie przeciwpróbki było o 20% mniejsze, w stosunku do struktury jednorodnej. Natomiast w skojarzeniu stop CuPb30 z warstwą pasmową azotek chromu – stal 46Cr2 zużycie stopu łożyskowego było zbliżone do skojarzenia z warstwą azotowaną jonizacyjnie. Pomiar wykazały również, że zastosowanie oleju Castrol do smarowania obszaru tarcia powoduje zmniejszenie zużycia stopu łożyskowego nawet o 35%, w stosunku do skojarzeń smarowanych olejem Lotos.

Dowodzono, że technologia osadzania próżniowego umożliwia wytworzenie warstw powierzchniowych o strukturze pasmowej, z materiałów o różnych właściwościach tribologicznych, w jednym procesie technologicznym. Jak również ukształtowane w tym procesie warstwy powierzchniowe, mogą pracować w węzłach ciernych w warunkach ograniczonego smarowania, zapewniając wymagane warunki tarcia i ograniczając zużycie materiału elementu współpracującego. Przyjęta autorska teza pracy została potwierdzona, a wyniki prób pozwalają stwierdzić, że wytwarzanie warstw powierzchniowych o strukturze pasmowej w procesach PVD pozwala zastosować tego typu warstwy na elementach węzłów ciernych. Warstwy te są również w stanie zastąpić stosowane obecnie warstwy powierzchniowe w warunkach znacznych obciążeń, a zastosowane do ich kształtowania technologie jarzeniowe nie zwiększają istotnie kosztów wytwarzania. Pary z elementami o strukturze pasmowej wytworzone metodami PVD są w stanie osiągnąć korzystniejsze charakterystyki tribologiczne, niż stosowane z elementami kształtowanymi obecnymi technologiami. Aby jednak w pełni wykorzystać ich właściwości tribologiczne wymagane jest zastosowanie nowej generacji olejów smarujących i materiałów łożyskowych. Wykorzystanie technologii PVD do kształtowania warstwy powierzchniowej elementów pary ciernej umożliwia wytworzenie warstw o kontrolowanym i jednorodnym składzie chemicznym, o stabilnej strukturze metalograficznej i szerokich możliwościach wyboru materiału powłoki. Technologie te umożliwiają kształtowanie warstw powierzchniowych z zastosowaniem innych materiałów, niż tylko stosowane dotąd miedź i jej stopy. A wytworzona interaktywna struktura warstwy powierzchniowej może składać się z materiałów o różnych właściwościach eksploatacyjnych obok siebie, co zapewnia korzystne właściwości tribologiczne łożysku ślizgowemu, nawet w warunkach tarcia mieszanego.

Efektom tego okresu pracy badawczej było 15 artykułów, z których 5 zostało opublikowanych w czasopiśmie naukowych (w języku polskim i angielskim oraz 1 publikacja w czasopiśmie z bazy Journal Citation Reports.), a 4 referowałem na międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych.

*Janina Lubow*