

JANUSZ LUBAS*

TRIBOLOGICZNE WŁAŚCIWOŚCI STALI Z BOREM W WĘZŁACH CIERNYCH SMAROWANYCH OLEJAMI SILNIKOWYMI

TRIBOLOGICAL PROPERTIES STEEL WITH BORON IN LUBRICATED ENGINE OIL OF FRICTION PAIRS

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości tribologicznych ulepszonej cieplnie stali stopowej zawierającej dodatek boru w warunkach ograniczonego smarowania. Badania tribologiczne przeprowadzono na testerze typu rolka-kłoczek w warunkach smarowania obszaru tarcia olejami Lotos mineralny i syntetyczny. Do prób zastosowano przeciwpróbki wykonane ze stopu łożyskowego CuPb30. Zastosowanie stali z borem na element pary ciernej umożliwia uzyskanie zbliżonego poziomu zużycia stopu łożyskowego do obserwowanego w skojarzeniu z elementem azotowanym jonizacyjnie. Natomiast zastosowanie w tych parach ciernych oleju syntetycznego wpływa na obniżenie współczynnika tarcia i temperatury w obszarze tarcia w większym stopniu niż zastosowanie oleju mineralnego.

Słowa kluczowe: zużycie, obróbka powierzchniowa, tarcie ślizgowe

Abstract

The paper presents test results of the tribological properties of quenched and tempered steel containing boron additive. The tribological test was performed on the block on ring wear tester, under limited lubrication conditions: the friction area was lubricated with the mineral and synthetic Lotos oils. Counterparts made of the CuPb30 bearing alloy were used for the tests. The application of steel with boron on the element of a friction pair allows for obtaining a comparable level of wear of the bearing alloy to the one observed in the friction pair with the nitrided element. On the other hand, the use of synthetic oil in these friction pairs has a larger impact on lowering of a friction coefficient and temperature in the friction area than the application of the mineral oil.

Keywords: wear, surface treatment, sliding friction

* Dr inż. Janusz Lubas, Instytut Techniki, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Uniwersytet Rzeszowski.

1. Wstęp

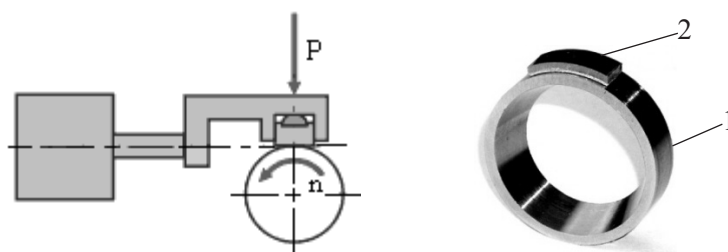
Poszukiwanie materiałów konstrukcyjnych spełniających wysokie wymagania eksploatacyjne przy niskich kosztach jego produkcji spowodowało zainteresowanie stalami zawierającymi bor. Ponieważ większość stosowanych pierwiastków stopowych w stalach charakteryzuje się ograniczoną dostępnością i znacznymi kosztami, w takiej sytuacji bor wydaje się jednym z najlepszych pierwiastków stopowych pod względem kosztów i dostępności. Również nowoczesne metody metalurgiczne pozwalają na produkcję stali stopowych z borem przy minimalnej zawartości boru i korzystnych właściwościach mechanicznych tych stali uzyskiwanych po procesach obróbki cieplnej [1].

Wyniki badań wykazują, że stale stopowe z dodatkiem boru charakteryzują się lepszymi właściwościami mechanicznymi, zwiększoną odpornością na zużycie i odpornością na korozję. Dodatek boru do stali stopowej zwiększa jej właściwości mechaniczne jak twardość, wytrzymałość na rozciąganie, granice plastyczności oraz zmniejsza zużycie w kontakcie z materiałami ściernymi [2, 3]. Badania eksperymentalne odporności na zużycie w warunkach tarcia suchego wykazały redukcję zużycia, a także stabilizację wartości współczynnika tarcia zarówno w warunkach tarcia suchego, jak i smarowania wodą [2].

Jednak nie ma dotąd opublikowanych badań określających właściwości tribologiczne stali z borem w połączeniu z innymi metalami stosowanymi w urządzeniach mechanicznych. Dlatego istotne jest określenie wpływu ulepszonej cieplnie stali z borem na warunki pracy węzła ciernego i zużycie jego elementów w warunkach ograniczonego smarowania.

2. Opis badań

Celem pracy jest wykazanie możliwości zastosowania stali stopowej z borem w węzłach ciernych pracujących w warunkach tarcia mieszanego. Badania tribologiczne przeprowadzono na testerze typu rolka-kłosek (rys. 1).



Rys. 1. Schemat testera rolka-kłosek (a) i struktura badana para cierna (b) (P – siła obciążająca, n – prędkość obrotowa czopa, 1 – próbka pierścieniowa, 2 – przeciwpróbka)

Fig. 1. Scheme of block on ring tester (a) and structure of the tested friction pair (b) (P – force loading, n – rotation speed of pin, 1 – ring sample, 2 – counterpart)

Do realizacji programu badań wykonano próbki pierścieniowe z dwóch gatunków stali: 38CrAlMo5–10 i 30MnB4. Próbki ze stali 38CrAlMo5-10 azotowano jonowo w atmosferze $H_2 + N_2$, w temperaturze 500°C i czasie 6 h, a wytworzona warstwa azotowana charaktery-

zuje się mikrotwardością rzędu 1100 HV_{0,1} i jest szeroko stosowana na elementach narażonych na zużycie w warunkach tarcia. Próbki pierścieniowe ze stali 30MnB4 (0,0025–0,004% B) ulepszano cieplnie (temperatura hartowania 800°C, temperatura odpuszczania 450°C). Próbki ze stali 30MnB4 po obróbce cieplnej uzyskały strukturę martenzytyczną o twardości 38–40 HRC. Próbki pierścieniowe skojarzone zostały podczas testu z przeciwpróbkami wykonanymi ze stopu łożyskowego CuPb30, a obszar tarcia smarowano olejami silnikowymi Lotos mineralny 15W/40 i Lotos syntetyczny 5W/40.

Badania stanowiskowe realizowano wg określonego algorytmu, obejmującego wstępne docieranie próbek oraz właściwy proces współpracy przy założonych parametrach obciążenia. Proces docierania realizowano na stanowisku badawczym pod obciążeniem wynoszącym 5 MPa, do momentu uzyskania całkowitego przylegania przeciwpróbki ze stopu łożyskowego do próbki pierścieniowej. W badaniach w cyklu rozruchu pary kinematycznej przyjęto, że parę rozpędzano od prędkości $n = 0$ do 500 obr./min w czasie 30 s. Wielkościami mierzonymi była wartość współczynnika tarcia i wartość temperatury w obszarze tarcia w zależności od nacisku jednostkowego. Pomiar współpracy pary ciernej w ustalonych warunkach tarcia przeprowadzono przy prędkości obrotowej próbki pierścieniowej 100 obr./min i skokowej zmianie nacisku jednostkowego. Podczas tych prób rejestrowano w czasie rzeczywistym przebieg wartości współczynnika tarcia i temperatury w węźle tarcia w funkcji zmiennego obciążenia, a także rejestrowano wartości zużycia liniowego. Po zakończeniu prób stanowiskowych warstwy powierzchniowe elementów pary ciernej poddano sprawdzeniu w celu określenia zmian chropowatości powierzchni. Przedstawione wyniki badań momentu tarcia, siły tarcia i zużycia są uśrednioną wartością z trzech pomiarów, natomiast wyniki pomiarów parametrów chropowatości są uśrednioną wartością z pięciu pomiarów.

3. Wyniki badań

Pomiary chropowatości próbek pierścieniowych i przeciwpróbek ze stopów łożyskowych wykazały istotne zmiany w warstwie wierzchniej po zakończeniu testu (tabele 1 i 2). Wyniki pomiarów nie pozwalają na wyznaczenie jednoznacznej funkcji łączącej te zmiany z ukształtowaniem warstwy powierzchniowej. Jednak w określonych kompozycjach par ślizgowych można wyodrębnić pewne charakterystyczne trendy zmian w wybranych parametrach chropowatości. Pomiarów próbek pierścieniowych z warstwą azotowaną i ulepszaną cieplnie wykazały wzrost wartości badanych parametrów chropowatości od kilku do kilkudziesięciu procent, w stosunku to wartości początkowej zmierzonej przed próbami. Natomiast pomiary geometrii powierzchni współpracujących z nimi przeciwpróbek wykazały wzrost od kilkunastu do kilkuset procent. Przy czym w parze ciernej z próbką ulepszaną cieplnie i smarowaniu obszaru tarcia olejem syntetycznym zarejestrowano zmniejszenie parametru R_a przeciwpróbki o kilka procent w stosunku to wartości początkowej wartości. W parach z próbkami azotowanymi nie zarejestrowano istotnych zmian w strukturze geometrycznej powierzchni próbki pierścieniowej w zależności od gatunku zastosowanego oleju, natomiast geometria powierzchni próbki ulepszanej cieplnie wykazuje istotne różnice. Zastosowanie do smarowania obszaru tarcia oleju mineralnego wpłynęło na zmniejszenie parametrów R_a i S_m i zwiększenie parametrów R_z i R_y w stosunku do skojarzeń smarowanych olejem syntetycznym (tabela 1).

Chropowość powierzchni próbek pierścieniowych

Parametry chrop.	Lotos mineralny		Lotos syntetyczny	
	Wartość	[%]	Wartość	[%]
Próbka azotowana				
R_a	0,39	22	0,37	16
R_z	2,9	16	2,8	14
R_v	4	25	4,1	28
S_m	81	56	79	52
Próbka ulepszana cieplnie ze stali 38MnB4				
R_a	0,31	8	0,33	15
R_z	2,4	13	2,3	8
R_v	3,9	50	2,8	8
S_m	53	11	45	29

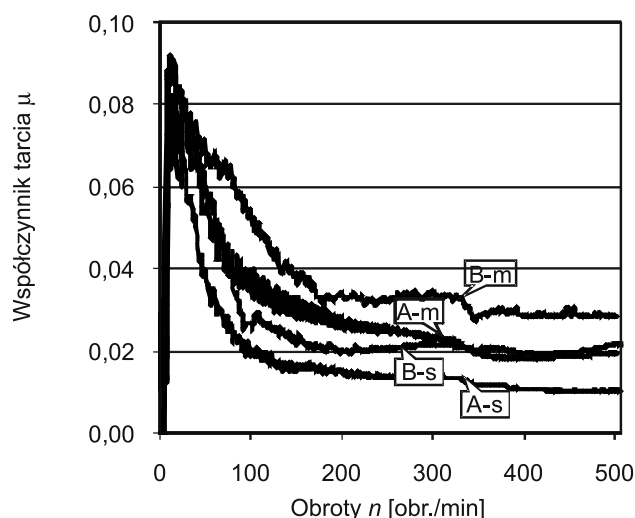
Pomiary geometrii powierzchni przeciwpróbek wykazały, że w skojarzeniach z próbką ulepszaną cieplnie i smarowaniu olejem syntetycznym zmiany chropowości powierzchni przeciwpróbek są znacznie mniejsze niż w warunkach smarowania olejem mineralnym. W skojarzeniach z próbką pierścieniową azotowaną parametry chropowości przeciwpróbki R_a i S_m są mniejsze w warunkach smarowania olejem syntetycznym (R_a jest mniejsze o 50%), natomiast parametry R_z i R_v są większe w stosunku do smarowania obszaru tarcia olejem mineralnym. Pomiary struktury geometrycznej przeciwpróbek po współpracy z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie wykazały mniejsze zmiany parametrów chropowości w warunkach smarowania olejem syntetycznym (najistotniejsze zmiany dotyczą parametru R_a , który uległ zmniejszeniu, i parametrów R_z i R_v , które są mniejsze o 60% i 39% w stosunku do smarowanych olejem mineralnym) (tabela 2).

Tabela 2

Chropowość powierzchni przeciwpróbek CuPb30

Parametry chrop.	Lotos mineralny		Lotos syntetyczny	
	Wartość	[%]	Wartość	[%]
Próbka azotowana				
R_a	0,64	28	0,57	14
R_z	3,7	23	4,2	40
R_v	5,7	68	6,4	88
S_m	115	140	105	119
Próbka ulepszana cieplnie ze stali 38MnB4				
R_a	0,60	20	0,45	-4
R_z	5,1	70	3,8	27
R_v	6,9	103	5,5	62
S_m	109	127	97	102

Zmierzone wartości parametrów chropowatości powierzchni informują o intensywności tarcia oraz jego wpływie na kształtowanie struktury geometrycznej elementów wężła ślizgowego. W wyniku procesów zachodzących w obszarze tarcia pod wpływem wymuszeń zewnętrznych system tribologiczny przetwarza istniejące początkowo struktury geometryczne obu elementów w układ o strukturze zapewniającej najbardziej korzystne warunki tarcia. W wyniku tych zmian powstaje struktura geometryczna odzwierciedlająca zmiany zapewniające danemu skojarzeniu uzyskanie pewnego optimum funkcjonalności i ukształtowanie eksploatacyjnej warstwy wierzchniej [4, 5]. Procesy tarcia formujące warstwy powierzchniowe w parze ciernej nie muszą prowadzić do zmniejszania wysokości chropowatości powierzchni współpracujących elementów w stosunku do początkowych wartości, ale ukształtowana chropowatość współpracujących elementów jest indywidualną cechą określonej kompozycji skojarzenia i warunków pracy wężła ciernej [5].

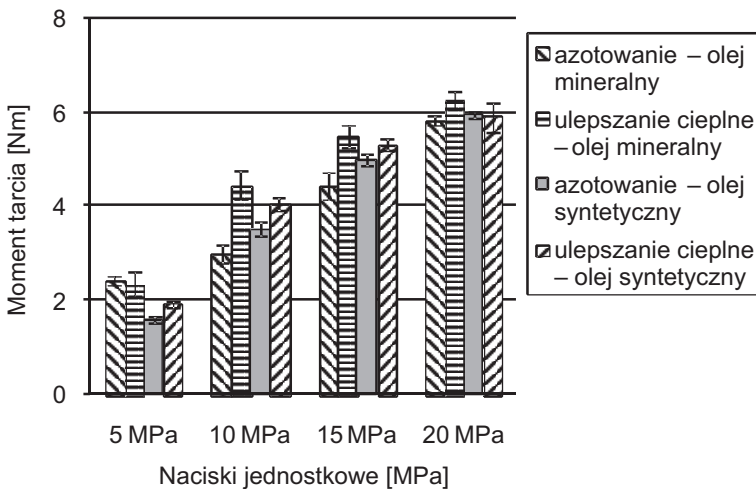


Rys. 2. Zmiana współczynnika tarcia podczas rozpędzania pary ciernej (nacisk jednostkowy 20 MPa); A – próbka azotowana, B – próbka ulepszana cieplnie, m – olej mineralny, s – olej syntetyczny

Fig. 2. Change of the friction coefficient during the ramp-up of friction pair (unit pressure 20 MPa); A – nitrided sample, B – quenched and tempered sample, m – mineral oil, s – synthetic oil

W warunkach tarcia mieszanej współpracę wężła ślizgowego charakteryzuje duża dynamika zmian wartości mierzonych parametrów pod wpływem zewnętrznych wymuszeń. Określenie tendencji tych zmian jest szczególnie istotne w czasie rozruchu pary ciernej. Ocena zachodzących zmian jest możliwa poprzez rejestrację obliczeniowego współczynnika tarcia w funkcji zmiennej prędkości ślizgania. Zarejestrowane wykresy przedstawiają typowe przebiegi współczynnika tarcia dla par ciernej przy naciskach 20 MPa, w warunkach rozruchu wężła kinematycznego (rys. 2). Podczas pierwszej fazy rozruchu pary ciernej następuje gwałtowny wzrost oporu tarcia, a następnie istotny jego spadek. Rejestrowane przebiegi współczynnika tarcia dla wyższych prędkości ślizgania są zróżnicowane i można obserwować po przekroczeniu ~180 obr./min stabilizację oporów tarcia w parach ciernej z próbkami pierścieniowymi ulepszanymi cieplnie. Przy czym w skojarzeniach smarowanych olejem

mineralnym stabilizacja współczynnika tarcia występuje na poziomie $\mu = 0,032$, a parach ciernych smarowanych olejem syntetycznym $\mu = 0,02$. Natomiast w parach ciernych z próbkami azotowanymi obserwuje się spadek oporów tarcia wraz ze wzrostem prędkości obrotowej próbki pierścieniowej. Charakterystyczny spadek wartości współczynnika tarcia obserwuje się po przekroczeniu 320 obr./min i smarowaniu pary ciernej olejem mineralnym. Wówczas spadek oporów tarcia wystąpił zarówno w skojarzeniu z próbką azotowaną jak i z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie, przy czym w skojarzeniu z próbką pierścieniową ulepszaną cieplnie spadek wartości współczynnika tarcia jest znacznie większy niż w parze z próbką azotowaną. Obserwacja przebiegów współczynnika tarcia wykazała, że smarowanie obszaru tarcia olejem syntetycznym generuje mniejsze opory tarcia niż smarowanie olejem mineralnym. Najniższe opory tarcia zmierzono w parach ciernych z próbką pierścieniową azotowaną podczas smarowania obszaru tarcia olejem syntetycznym $\mu \approx 0,01$, a najwyższe w parach z próbką ulepszaną cieplnie podczas smarowania olejem mineralnym $\mu \approx 0,028$.



Rys. 3. Moment tarcia podczas rozruchu pary ciernej

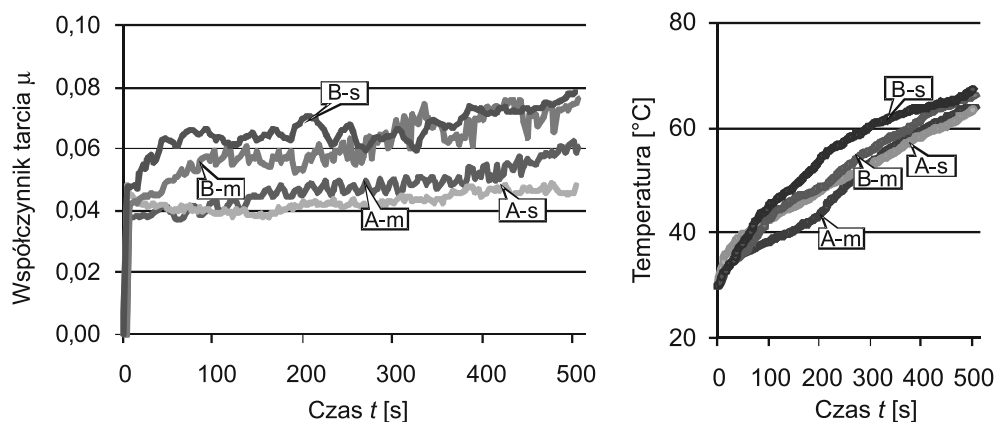
Fig. 3. Moment of friction at the start-up of the friction pair

W parach ślizgowych istotnym zagadnieniem jest wyznaczenie wartości maksymalnego momentu rozruchowego pary ciernej, który wpływa na procesy tarcia w dalszym cyklu pracy. Na podstawie otrzymanych pomiarów można stwierdzić, że wzrost obciążenia w istotnym sposób kształtuje wartość momentu rozruchowego (rys. 3). Przy niskich naciskach jednostkowych (5 MPa) obserwuje się niższe wartości momentu rozruchowego w warunkach smarowania olejem syntetycznym o około 18–30% w stosunku do par ciernych smarowanych olejem mineralnym. Przy wyższych obciążeniach (10–15 MPa) nie obserwuje się tak wyraźnej różnicy oporów tarcia w zależności od zastosowanego oleju silnikowego, a zaczyna dominować ukształtowanie warstwy powierzchniowej próbki pierścieniowej. Zaś przy maksymalnych naciskach jednostkowych (20 MPa) zmierzone wartości momentu tarcia są porównywalne dla wszystkich badanych kompozycji par ciernych. Najwyższe wartości momentu tarcia występują w skojarzeniu z próbką ulepszaną cieplnie w warunkach sma-

rowania olejem mineralnym przy obciążeniu od 10 do 20 MPa, natomiast najniższe wartości momentu tarcia w tych warunkach obciążenia zmierzono w parach z próbką azotowaną i smarowaniu olejem mineralnym.

Obserwacja zmian parametrów tarcia w okresie rozruchu informuje o zachowaniu się układu w czasie dalszej jego pracy. Najkorzystniejsze warunki pracy występują w parach kinematycznych, w których po wzroście współczynnika tarcia w początkowym etapie rozruchu następuje jego znaczne obniżenie i stabilizacja na stałym poziomie. Wartość momentu rozruchowego decyduje o zapotrzebowaniu energetycznym układu kinematycznego w chwili jego uruchomienia. Natomiast w parach, w których w tym czasie następuje ukształtowanie równowagi tribochemicznej, powstają optymalne warunki do pracy układu. Wzrost obciążenia w układzie ciernym intensyfikuje procesy fizykochemiczne w obszarze tarcia i zmiany mikrogeometrii powierzchni tarcia w wyniku adaptacji systemu do warunków wymuszeń zewnętrznych. Zarejestrowane zmiany zmniejszą przyrost oporów tarcia w wyniku plastycznej deformacji nierówności szczególnie miększego materiału łożyskowego i intensyfikacji procesów tworzenia warstw przeciwwzrostowych. W węzłach ciernych, w których po okresie rozruchu występuje znaczny spadek współczynnika tarcia, o poprawie warunków tarcia decyduje wzrost efektywności smarowania warstwy oleju w wyniku zaistniałych zmian tribochemicznych. Powstała warstwa graniczna wpływa na stabilizację lub zwiększenie obszarów, w których występują mikrokliny smarne. Zmiany te prowadzą do obniżenia oporów tarcia przy wzroście prędkości ślizgania próbki pierścieniowej. W parach o stabilnym przebiegu współczynnika tarcia w funkcji prędkości ślizgania próbki pierścieniowej, warstwa powierzchniowa tego elementu zapewnia właściwości ślizgowe, które umożliwiają równowagę zachodzących zjawisk tribochemicznych w obszarze styku. Powstały stan równowagi umożliwia samoregulację procesów zachodzących w obszarze tarcia, co wpływa na stabilizację oporów ruchu pomimo wzrostu prędkości ślizgania próbki pierścieniowej [6, 7].

Przebieg procesów tarcia w obszarze tarcia zmienia się wraz z upływem czasu, co prowadzi to zmiany współczynnika tarcia i temperatury w obszarze tarcia (rys. 4). Zarejestrowane zmiany współczynnika tarcia w funkcji czasu trwania próby wykazały korzystne właściwości próbek pierścieniowych azotowanych w stosunku do próbek ulepszanych cieplnie. Najniższe opory tarcia występują w skojarzeniach z próbką pierścieniową azotowaną przy smarowaniu olejem mineralnym. W współczynnik tarcia w tych skojarzeniach nie przekracza 0,05. Pomimo początkowych wysokich wartości oporów tarcia w parze tej obserwuje się spadek współczynnika tarcia, a następnie powolny wzrost. W skojarzeniu z próbką azotowaną podczas smarowania olejem syntetycznym zarejestrowany przebieg współczynnika tarcia wykazuje tendencję do trwałego wzrostu oporów tarcia wraz z czasem trwania próby i przy końcu próby $\mu \approx 0,06$. Najwyższe pory tarcia zmierzono w skojarzeniach z próbkami pierścieniowymi ulepszanymi cieplnie, a zarejestrowane trendy zmian współczynnika tarcia są zbliżone w obu skojarzeniach. W początkowym okresie współpracy występuje znaczący wzrost współczynnika tarcia, a następnie jego stabilizacja i ponowny wzrost aż do osiągnięcia wartości $\mu = 0,07$. Rejestrowane temperatury w obszarze tarcia nie wykazują tak istotnych zmian, jednak można zaobserwować w skojarzeniach z próbką pierścieniową azotowaną podczas smarowania olejem mineralnym w początkowym okresie współpracy wolniejszy wzrost temperatury, a bardziej intensywny w okresie końcowym. Odmienny charakter zmian wystąpił w skojarzeniu z próbką ulepszaną cieplnie podczas smarowania olejem syntetycznym, gdzie w początkowym okresie wystąpił intensywny przyrost temperatury, by w okresie końcowym próby przyrost temperatury się zmniejszył. Zmierzone temperatury w obszarze tarcia pod koniec próby mieściły się dla badanych skojarzeń w przedziale od 64 do 67°C.



Rys. 4. Zmiana współczynnika tarcia i temperatury w parze ciernej z czasem trwania próby (przy naciskach jednostkowych 20 MPa); A-m – para z próbką azotowaną i smarowana olejem mineralnym, A-s – para z próbką azotowaną i smarowana olejem syntetycznym, B-m – para z próbką ulepszaną cieplnie i smarowana olejem mineralnym, B-s – para z próbką ulepszaną cieplnie i smarowana olejem syntetycznym

Fig. 4. Change of the friction coefficient and temperature with time duration of the test (at unit pressures of 20 MPa); A-m – friction pair with nitrided sample and lubricated with mineral oil, A-s – friction pair with nitrided sample and lubricated with synthetic oil, B-m – friction pair with quenched and tempered sample and lubricated with mineral oil, B-s – friction pair with quenched and tempered sample and lubricated with synthetic oil (at unit pressures of 20 MPa)

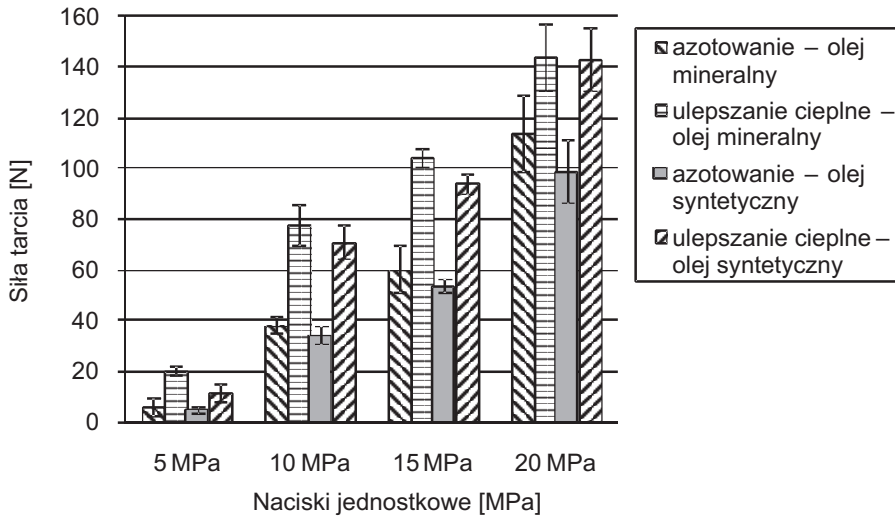
Zarejestrowane przebiegi współczynnika tarcia i temperatury wskazują na zdolność adaptacji pary ślizgowej do warunków tarcia wraz z wydłużaniem się czasu pracy węzła ślizgowego. Występujące zmiany w reakcji węzła ślizgowego na ustabilizowane wymuszenie w chwili startu i upływ czasu dają odpowiedź, czy układ umożliwi długotrwałą i niezawodną pracę. W początkowym okresie pracy pary ślizgowej zawsze występuje intensywny wzrost współczynnika tarcia, a następnie zarejestrowane wartości współczynnika tarcia wskazują na stabilizację warunków tarcia lub intensyfikację procesu tarcia. Stabilizacja oporów tarcia w badanych skojarzeniach wskazuje na dopasowanie się kompozycji skojarzenia do istniejących wymuszeń i ukształtowanie trwałych warstw przeciwzuzyciowych i przeciwwzartarciowych. Warstwy te zapewniają rozdzielenie współpracujących obszarów warstw powierzchniowych i ograniczanie intensywności występowania bezpośrednich kontaktów nierówności powierzchni. W tych warunkach tarcia występuje stan równowagi między procesami niszczenia i powstawania warstw w procesach tribochemicznych przebiegających w węzle tarcia. Poziomy zarejestrowanych wartości współczynnika tarcia i temperatury mogą posłużyć do oszacowania prawdopodobieństwa uszkodzenia pary ślizgowej w wyniku jej zatarcia pod wpływem wystąpienia wymuszeń zewnętrznych lub awaryjnego zużycia elementów pary [6].

Poprawne funkcjonowanie skojarzenia cierne ograniczają warunki obciążenia spowodowane głównie wielkością nacisków jednostkowych. Pomiar siły tarcia wykazały istotne różnice w wartości oporów tarcia pomiędzy badanymi parami ciernymi. Najniższe siły tarcia zmierzono w skojarzeniach z próbkami azotowanymi, a najwyższe w skojarzeniach z próbkami ulepszanymi cieplnie (rys. 5). Różnice w wielkości siły tarcia pomiędzy parami

z próbkami azotowanymi i ulepszanymi cieplnie wynoszą od 40 do 55%. Zaobserwowano również wyższe opory tarcia w parach ciernych smarowanych olejem mineralnym niż w parach ciernych smarowanych olejem syntetycznym. I w przypadku par ciernych z próbkami pierścieniowymi azotowanymi można zaobserwować zwiększanie się różnicy pomiędzy wartością siły wraz z wzrostem nacisków jednostkowych i tak przy niskich obciążeniach (5 MPa) różnica wynosi ~ 1 N, a przy najwyższych naciskach jednostkowych (20 MPa) siła tarcia przekracza 13 N. Natomiast w parach z próbkami ulepszanymi cieplnie przy najniższych naciskach obserwuje się największą różnicę pomiędzy parami smarowanymi olejem mineralnym i syntetycznym, a przy największych obciążeniach siła tarcia jest porównywalna dla obu olejów smarujących parę cierną.

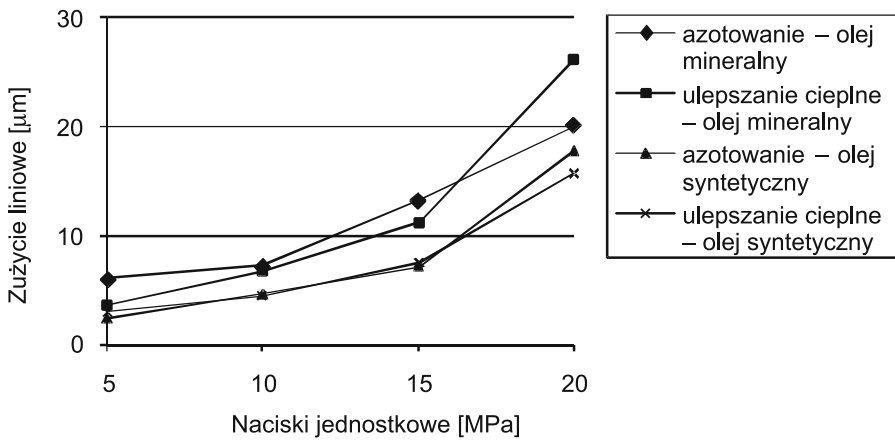
W warunkach zmiennych nacisków jednostkowych o stałej prędkości obrotowej próbki pierścieniowej (100 obr./min) przeprowadzono pomiary zużycia elementów pary ciernej. Przeprowadzone pomiary próbek pierścieniowych nie wykazały mierzalnego zużycia, co dowodzi, że uzyskane wyniki pomiarów zużycia liniowego dotyczą głównie zużycia materiału przeciwpróbki (rys. 6). Wyniki pomiaru zużycia przeciwpróbki wykazały zwiększone zużycie stopu łożyskowego w parach ciernych smarowanych olejem mineralnym w stosunku do par smarowanych olejem syntetycznym. W warunkach smarowania olejem syntetycznym wartości zużycia w parach z próbkami pierścieniowymi azotowanymi i ulepszanymi cieplnie są do siebie zbliżone w zakresie nacisków jednostkowych od 5 do 15 MPa. Natomiast dalszy wzrost nacisków powoduje wzrost zużycia stopu łożyskowego w parze ciernej z próbką pierścieniową azotowaną i jest wyższe o około 14% w stosunku do pary ciernej z próbką ulepszaną cieplnie. Natomiast zastosowanie oleju mineralnego generuje wyższe zużycie materiału przeciwpróbki, przy czym przebieg zmian jest zbliżony do rejestrowanych w wyżej opisanych parach i przy naciskach 20 MPa nie przekracza 20 μm . Inny przebieg zużycia obserwuje się w skojarzeniu z próbką ulepszaną cieplnie przy smarowaniu obszaru tarcia olejem mineralnym. Przy niskich naciskach (5 MPa) wartość zużycia przeciwpróbki jest zbliżona do zmierzonej w parach smarowanych olejem syntetycznym. Dalszy wzrost obciążenia powoduje zbliżone wartości zużycia do rejestrowanych w skojarzeniu z próbką azotowaną, zaś wzrost powyżej 15 MPa prowadzi do istotnego wzrostu zużycia i wówczas zużycie przeciwpróbki przekracza 25 μm .

Występujące różnice w zużyciu stopu łożyskowego i brak mierzalnych zmian zużycia próbek pierścieniowych z technologicznymi warstwami powierzchniowymi są efektem oddziaływania współpracujących warstw powierzchniowych na siebie, jak również występowaniem zjawisk fizykochemicznych na ich powierzchniach w wyniku wymuszeń zewnętrznych. Zjawiska te wynikają z przebiegu elementarnych procesów zużycia w obszarze styku pary ślizgowej, na elementarnych powierzchniach styku współpracujących warstw powierzchniowych [6]. Istotne znaczenie odgrywa tutaj oddziaływanie czynnika smarnego, który ulegając przemianom, tworzy korzystne lub niekorzystne warunki tarcia. Zmiany te powodują powstawanie warstw granicznych na wytworzonych warstwach powierzchniowych charakteryzujące się dużą odpornością na przerywanie lub też uleganiem szybkiemu zniszczeniu pod wpływem zmiennych warunków pracy. W warunkach współpracy występują również wtórne zjawiska procesu tarcia i zużycia. Do tych zjawisk zalicza się oddziaływanie oddzielonych cząstek zużycia na trące warstwy powierzchniowe, przenoszenie cząstek materiału z jednego elementu na drugi, emisje elektronów i przepływ prądu korozyjnego [6–8].



Rys. 5. Zmiana siły tarcia w zależności od nacisków jednostkowych (obroty próbki pierścieniowej 100 obr./min)

Fig. 5. Change of the friction force depending on the unit pressure (rotation of the ring sample 100 rpm)



Rys. 6. Zużycie liniowe przeciwpróbek

Fig. 6. Linear wear of counterparts

4. Wnioski

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

1. Zmiany w strukturze geometrycznej elementów pary ciernej wykazały tendencję do ukształtowania chropowatości powierzchni odpowiedniej do warunków tarcia i kompozycji pary.
2. Olej lotos syntetyczny wpływa na obniżenie współczynnika tarcia, momentu tarcia i temperatury w obszarze tarcia w większym stopniu niż olej mineralny.
3. Użycie w skojarzeniu ślizgowym stali 30MnB4 po ulepszeniu cieplnym zapewnia porównywalny poziom zużycia materiału stopu łożyskowego do skojarzeń z azotowaną stałą 38CrAlMo5–10, gdy obszar tarcia jest smarowany olejem Lotos syntetyczny.
4. Pomiary zużycia próbek pierścieniowych z technologicznie ukształtowanymi warstwami powierzchniowymi (azotowana i ulepszana cieplnie) po przeprowadzonych próbach nie wykazały mierzalnego zużycia tribologicznego, natomiast wystąpił znaczący wzrost chropowatości powierzchni w obszarze styku z przeciwpróbką.

Literatura

- [1] L'opez-Chipres E., Mejia I., Maldonado C., Bedolla-Jacuinde A., El-Wahabi M., Cabrera J.M., *Hot flow behavior of boron microalloyed steels*, Materials Science and Engineering, A 480, 2008, 49-55.
- [2] Kassfeldt E., Lundmark J., *Tribological properties of hardened high strength Boron steel at combined rolling and sliding condition*, Wear, 267, 2009, 2287-2293.
- [3] Hardell J., Kassfeldt E., Prakash B., *Friction and wear behaviour of high strength Boron steel at elevated temperatures of up to 800°C*, Wear, 264, 2008, 788-799.
- [4] Kuhlmann-Wilsdorf V., *Effects of local high pressure and extreme shears at tribological contact spots*, Tribology and Interface Engineering Series, 39, 2001, 417-428.
- [5] Zwierzycki W., *Prognozowanie niezawodności zużywających się elementów maszyn*, ITE, Radom 1999.
- [6] Ozimina D., *Przeciwzużyciowe warstwy wierzchnie w układach tribologicznych*, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2002.
- [7] Szczerek M., Wiśniewski M., *Tribologia i trybochemia*, ITE, Radom 2000.
- [8] Schouwenaars R., Jacobo V.H., Ortiz A., *Microstructure aspect of wear in soft tribological alloys*, Wear, 263, 2007, 727-735.