

Witold PIEKOSZEWSKI*, Marian SZCZEREK*,**

**ZACIERANIE I PITTING STALOWEGO WĘZŁA
TARCIA Z ELEMENTAMI POKRYTYMI
POWŁOKAMI NISKOTARCIOWYMI
NANOSZONYMI METODAMI PVD**

**SCUFFING AND PITTING OF A STEEL FRICTION JOINT WITH
LOW FRICTION PVD COATED ELEMENTS**

Słowa kluczowe:

zacieranie, pitting, oleje bazowe, oleje przekładniowe, powłoki przeciwzuży-
ciowe, powłoki niskotarciowe, powłoki PVD

Key words:

scuffing, pitting, base oils, gear oils, anti-wear coatings, low friction coatings,
PVD coatings

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań zacierania i powierzchniowej trwało-
ści zmęczeniowej (pittingu) modelowego wężła tarcia aparatu czterokulowego
smarowanego mineralnym olejem wzorcowym RL 219, syntetycznym polialfa-

* Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Zakład Tribologii, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Ra-
dom, Polska.

** Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. K. Pułaskiego, Wydział Mechaniczny, ul.
Krasickiego 54, 26-600 Radom, Polska.

olefinowym PAO 8 oraz olejami klasy jakościowej GL-5 na bazie mineralnej GL5m i syntetycznej GL5s. Przebadano skojarzenia materiałowe stal–stal oraz stal–stal z naniesionymi powłokami niskotarciowymi WC/C (a-C:H:W) oraz MoS₂/Ti. Analiza uzyskanych wyników badań upoważnia do stwierdzenia, że cienkie powłoki PVD mogą pozwolić na wyeliminowanie ze smarów potrzeby stosowania dodatków smarnościowych, które z powodu toksyczności są przyczyną dużej uciążliwości środków smarowych dla środowiska naturalnego.

WPROWADZENIE

Szczególnie szybko rozwijające się aplikacje powłok otrzymywanych w procesach PVD do zwiększania trwałości narzędzi skrawających lub do obróbki plastycznej nie idą w parze z procesem wdrażania tych powłok na elementy węzłów tarcia. Szacuje się, że ok. 80% wszystkich narzędzi skrawających pokrywanych może być powłokami przeciwzużyciowymi. Problem ten rozwiązano tylko w odniesieniu do ok. 2% trących elementów maszyn.

Brak dostatecznej wiedzy dotyczącej zachowania się elementów z cienkimi, twardymi, powłokami przeciwzużyciowymi w styku tarciovym jest główną przyczyną ograniczonego ich zastosowania na kinematyczne węzły elementów maszyn [L. 1]. Związane jest to z tym, że informacje wynikające z analizy zjawisk tarcia zachodzących na powierzchni elementów stalowych nie dają się przenieść na elementy z naniesioną powłoką. Pokrycie chociażby jednego z elementów trących cienką twardą powłoką oznacza zmianę interakcji chemicznej kontaktujących się materiałów, zmianę stanu naprężeń, zmianę struktury geometrycznej ich powierzchni, i tym samym zmianę fizykochemicznych oddziaływań pomiędzy nimi i między nimi a środkiem smarowym. Powoduje to, że zjawiska i procesy generowane tarcie nie przebiegają w taki sam sposób jak na powierzchniach elementów stalowych bez powłok.

Przeprowadzona analiza literaturowa pozwala stwierdzić, że najgroźniejszymi formami zużycia tribologicznego elementów maszyn pracujących w styku skoncentrowanym jest zacieranie i pitting. Przeciwdziałanie zużyciu wysokoobciążonych węzłów tarcia sprowadza się, więc do zapobiegania wystąpienia zużycia katastroficznego – zacierania oraz zwiększenia powierzchniowej trwałości zmęczeniowej.

Główną przyczyną wystąpienia zacierania prowadzącego do utraty zdolności węzła tarcia do przenoszenia wymuszeń jest przerwanie filmu smarowego oraz rozrost szczepień adhezyjnych [L. 2]. Zabiegi mające na celu przeciwdziałanie zacieraniu polegają na przerywaniu ciągu zdarzeń prowadzących do powstania szczepień adhezyjnych. Ich istotą jest odpowiednie ukształtowanie właściwości warstwy wierzchniej elementów trących. Jednym ze sposobów konstituowania warstwy wierzchniej o odpowiednich właściwościach przeciwzużyciowych jest nanoszenie na elementy maszyn cienkich powłok metodami próż-

niowymi. Liczne publikacje, a także badania własne dowodzą, że zastosowanie powłok PVD na smarowane elementy trące maszyn może zwiększyć ich odporność na zacieranie [L. 3, 4].

Zadowalającym rezultatom konstituowania warstw powierzchniowych elementów trących poprzez nałożenie powłok przeciwzużyciowych w przypadku zacierania nie odpowiada zwiększenie powierzchniowej trwałości zmęczeniowej tych elementów. Przeprowadzone badania własne mające na celu weryfikację nielicznych jeszcze i bardzo sprzecznych doniesień literaturowych wykazały, że elementy poddane nowoczesnym obróbkom powierzchniowym (np. próżniowa obróbka cieplno-chemiczna, powłoki PVD) zdecydowanie pogarszają odporność na powierzchniowe zużycie zmęczeniowe [L. 5, 6]. Jest to główna przyczyna braku ich aplikacji na trące, w szczególności wysokoobciążone, smarowane elementy maszyn.

Istotnym problemem, który do chwili obecnej nie został wyjaśniony, jest rola środka smarowego w tribosystemie z naniesionymi na elementy trące przeciwzużyciowymi powłokami PVD. Wynika to przede wszystkim z braku danych dotyczących fizykochemicznych oddziaływań środków smarowych z materiałami powłok. Liczne prace eksperymentalne wskazują na to, że odpowiednia powłoka ukonstituowana na elementach trących, takich jak łożyska toczne czy koła zębate, może pozwolić na utrzymanie osiągniętych obecnie parametrów pracy tych węzłów z zastosowaniem ekologicznych olejów naturalnych i syntetycznych, bez konieczności stosowania dodatków smarnościowych będących na ogół środkami toksycznymi [L. 7]. Wynika to z możliwości przeniesienia przeciwzatarciowych i przeciwzużyciowych funkcji dodatków smarnościowych na powłokę.

Zagadnienie zmniejszenia lub całkowitego wyeliminowania na ogół uciążliwych dla środowiska naturalnego dodatków smarnościowych jest niezwykle ważne ze względów ekologicznych [L. 8–11]. Należy również podkreślić, że istnieją sytuacje, w których zastosowanie środka smarowego z aktywnymi dodatkami jest niepożądane ze względu na funkcje mechanizmu, np. węzły tarcia, w urządzeniach przemysłu spożywczego, sprzętu medycznego. Poza tym bardzo pozytywny w odniesieniu do zacierania wpływ modyfikacji warstwy wierzchniej stalowych elementów trących pierwiastkami zawartymi w dodatkach smarowych, w szczególności typu *EP*, zazwyczaj jest niekorzystny z punktu widzenia powierzchniowej trwałości zmęczeniowej.

CEL I OBIEKTY BADAŃ

Celem tych badań było określenie wpływu olejów na charakterystyki zatarciowe i trwałościowe elementów z naniesionymi powłokami niskotarciowymi. Badane skojarzenia smarowano olejami: mineralnym wzorcowym RL 219, syntetycznym polialfaolefinowym PAO 8 oraz olejami handlowymi klasy jako-

ściowej GL-5 na bazie mineralnej (GL5m) i syntetycznej (GL5s). Właściwości fizykochemiczne tych olejów zestawiono w **Tabeli 1**.

Elementami testowymi były stożki ze stali 100Cr6 z naniesionymi powłokami niskotarciowymi WC/C (a-C:H:W) i MoS₂/Ti otrzymanymi w procesach PVD. Temperatura nanoszenia powłok nie przekraczała 180°C, a grubość 2 µm. Bazę odniesienia stanowiły próbki ze stali 100Cr6.

Tabela 1. Właściwości fizykochemiczne badanych olejów

Table 1. The selected properties of investigated oils

Właściwość	Jednostka	Wartość			
		RL 219	PAO 8	GL5m	GL5s
Lepkość w 40 °C	mm ² /s	49,31	47,04	40	81
Wskaźnik lepkości	–	99,3	140	106	194
Gęstość w 15 °C	g/ml	0,874	0,832	0,880	0,879
Temperatura zapłonu	°C	225	260	220	205
Temperatura krzepnięcia	°C	–12	–48	–30	–45

METODA BADAWCZA

Badanie zacierania w ruchu ślizgowym przeprowadzono z wykorzystaniem aparatu czterokulowego T-02 [L. 12, 13]. Ocenę właściwości przeciwwzartarcowych przeprowadzono w oparciu o obciążenie zacierające P_t określone według procedur normy PN 76/C 04147 [L. 14] i graniczne obciążenie zatarcia p_{oz} określone wg autorskiej metody Zakładu Tribologii ITeE – PIB [L. 15].

Oznaczenie polegało na przeprowadzeniu biegu zespołu czterech kulek stalowych w obecności badanego środka smarowego pod wzrastającym w sposób ciągły obciążeniem (zaczynającym się od obciążenia równego 0), aż do wystąpienia zacierania sygnalizowanego nagłym wzrostem oporów ruchu, a następnie do zatarcia. Za zatarcie przyjmowano zatrzymanie się wrzeciona aparatu bądź przekroczenie dopuszczalnego momentu tarcia wynoszącego dla rozpatrywanego systemu 10 Nm [L. 16].

Graniczny nacisk zatarcia określano z zależności (1):

$$p_{oz} = 0,52 \frac{P_{oz}}{d^2} \quad (1)$$

gdzie: p_{oz} – graniczny nacisk zatarcia, P_{oz} – obciążenie P, przy którym nastąpiło zatarcie wężła, d – średnia średnica śladów wytarcia na kulkach dolnych.

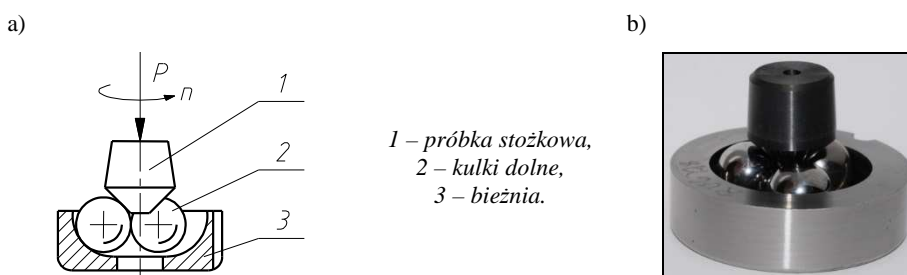
Badania przeprowadzono w następujących warunkach: prędkość obrotowa wrzeciona 500 obr./min (prędkość poślizgu 0,19 m/s), prędkość narastania ob-

ciężenia 409 N/s, początkowe obciążenie wężła 0 N, temperatura początkowa oleju ok. 20°C. Minimalna liczba powtórzeń wynosiła 3.

Badanie powierzchniowej trwałości zmęczeniowej elementów testowych pokrytych powłoką PVD w obecności środka smarowego (pittingu) przeprowadzono wg metody opisanej w poz. [L. 17].

Istota badania wg tej metody polega na przeprowadzeniu, przy stałym, zadanym obciążeniu i stałej prędkości obrotowej, 24 biegów badawczych elementów testowych współpracujących tocznie w obecności środka smarowego, ciągłym pomiarze amplitudy drgań generowanych w badanym węźle, pomiarze czasu poszczególnych biegów badawczych do wystąpienia pittingu sygnalizowanego przekroczeniem założonej amplitudy drgań, sporządzeniu rozkładu Weibulla uzyskanych wyników badań i na jego podstawie określeniu trwałości badanego wężła tarcia. Jako miarę trwałości wężła tarcia przyjęto trwałość L_{10} .

Węzeł tarcia tworzą trzy kulki łożyskowe i stożek, który, zamocowany w obracającym się wrzecionie, napędza 3 kulki umieszczone i toczące się w specjalnej bieżni (Rys. 1).



Rys. 1. Zmodernizowany węzeł tarcia aparatu T-03 do badania zużycia zmęczeniowego materiałów stosowanych na wysokoobciążone elementy toczne: a) schemat, b) fotografia

Fig. 1 The T-03 tester modified cone-three ball tribosystem intended for pitting investigation of heavily loaded friction joints: a) schematic view, b) the image

Do badań trwałości zmęczeniowej wykorzystano zmodernizowany aparat czterokulowy opracowany i produkowany w Instytucie Technologii Eksploatacji – Państwowym Instytucie Badawczym.

Warunki przeprowadzenia badań wg metody ujętej w tej normie są następujące:

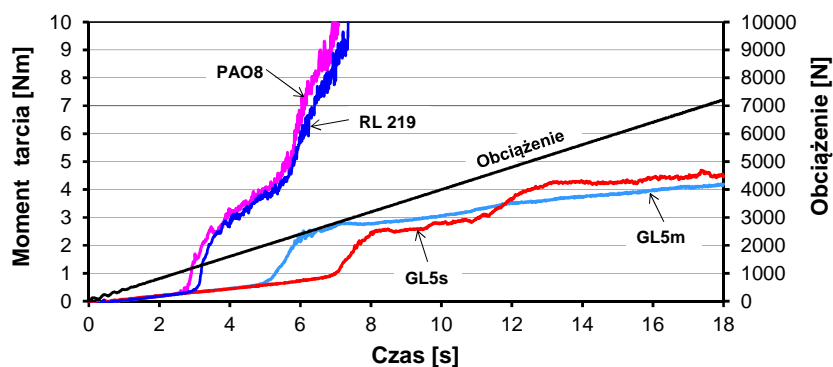
- obciążenie wężła tarcia: 3924 N,
- naciski stykowe dla skojarzenia stożek/kule 6,41 GPa
- prędkość obrotowa wrzeciona: 1450±50 obr./min,
- obciążenie wstępne wężła tarcia: 981 N,
- temperatura otoczenia: 23±2°C.

Sterowanie urządzeniem odbywa się za pomocą systemu sterująco-pomiarowego, który umożliwia automatyzację procesu sterowania, zaś program komputerowy pozwala na realizację określonych procedur badawczych. Bieg badawczy kończy się automatycznie z chwilą przekroczenia przez węzeł tarcia dopuszczalnej, zadanej amplitudy drgań spowodowanej powstaniem na elemencie testowym wykruszenia zmęczeniowego.

WYNIKI BADAŃ ZACIERANIA

Jako miary odporności na zacieranie przyjęto: obciążenie zacierające P_t , przy którym następuje gwałtowny wzrost momentu tarcia oraz graniczny nacisk zatarcia p_{oz} charakteryzowany przez wartość siły obciążającej, przy której nastąpiło zatarcie węzła (zatrzymane wrzeciono aparatu) odniesione do średniego śladu wytarcia na kulkach dolnych. Należy zaznaczyć, że graniczny nacisk zatarcia p_{oz} charakteryzuje w sposób pośredni również odporność elementów badanego węzła na zużycie ścierne w ruchu ślizgowym. Im wyższe wartości obu wielkości P_t i p_{oz} , tym większa odporność na zacieranie badanego węzła. Wartości P_t i p_{oz} ujęte w tabelach obliczone były na podstawie wyników z przynajmniej 3 biegów badawczych, natomiast charakter zmian momentu tarcia w funkcji czasu przedstawia jeden z wykresów dot. określonego skojarzenia smarowanego badanym środkiem smarowym.

Wyniki badań wpływu środków smarowych na zacieranie poszczególnych skojarzeń materiałowych przedstawiono na **Rys. 2÷7**. Jak widać wartość obciążenia zacierającego zależna jest nie tylko od rodzaju użytego środka smarowego, ale także w dużym stopniu od badanego skojarzenia materiałowego.



Rys. 2. Przebiegi momentów tarcia skojarzenia stalowego (100Cr6/100Cr6) smarowanego badanymi olejami

Fig. 2 The friction torque obtained for steel friction joint (100Cr6/100Cr6) lubricated with tested oils

Analizując przebiegi momentów tarcia skojarzenia stal–stal (100Cr6-100Cr6), można stwierdzić, że tylko oleje klasy jakościowej GL-5 nie powodują zatarcia smarowanego skojarzenia. Stanowi to potwierdzenie ich dobrej jakości, gdyż oleje te przeznaczone są do smarowania wysokoobciążonych stalowych skojarzeń kinematycznych. Oleje bazowe bez dodatków spowodowały zatarcie badanego węzła tribologicznego. Małe wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} (o rząd mniejsze w porównaniu z olejami handlowymi – **Tabela 2**) świadczą o dużym zużyciu ściernym skojarzenia po przerwaniu filmu smarowego.

Tabela 2. Wartości obciążenia zacierającego P_t dla skojarzeń stalowych (100Cr6-100Cr6) smarowanych badanymi olejami

Table 2. The P_t scuffing load values for steel-steel friction joint (100Cr6/100Cr6) lubricated with investigated oils

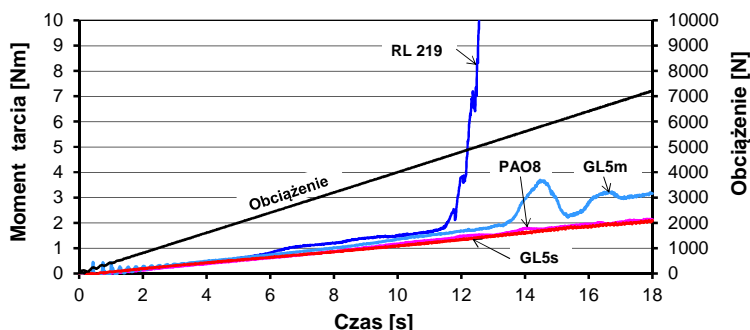
Olej		RL 219	PAO 8	GL5m	GL5s
P_t [N]	Wartość śr.	1 250,00	1 112,50	2 066,67	3 033,33
	Odch. std.	50,00	103,80	160,73	251,66
p_{oz} [N/mm ²]	Wartość śr.	202,42	198,59	2 409,54	2 300,25
	Odch. std.	2,04	22,52	127,99	47,52

Wprowadzenie do systemu tribologicznego elementu pokrytego powłoką WC/C powoduje radykalne zwiększenie odporności na zacieranie skojarzenia smarowanego wszystkimi rodzajami olejów. W każdym przypadku wartość obciążenia zacierającego wzrosła ponad 2-krotnie w stosunku do skojarzenia stal–stal.

Największą odporność na zatarcie rozpatrywanego skojarzenia odnotowano dla olejów syntetycznych; zarówno czystego oleju bazowego (PAO 8), jak i z pełnym pakietem dodatków (GL-5s). Krzywe charakteryzujące momenty tarcia przedstawione na **Rys. 3** prawie się pokrywają, co może świadczyć o przejściu przez powłokę funkcji dodatków przeciwzatarciowych zawartych w oleju handlowym. Jest to potwierdzenie zaobserwowanych wcześniej przez R. Michalczewskiego [**L. 3**] zachowań styku tarcowego z elementami z powłoką przeciwzużyciową.

Analizując wartości obciążenia zacierającego tego skojarzenia smarowanego olejami mineralnymi bazowym i z pełnym pakietem dodatków, daje się zaobserwować znaczny rozrzut wyników badań w porównaniu z wynikami badań olejów syntetycznych. Podkreślić jednak należy, że o ile w przypadku czystego oleju mineralnego następuje zatarcie węzła, to w przypadku oleju z dodatkami pomimo wzrostu momentu oporowego zatarcie nie następuje. W przeciwieństwie do olejów syntetycznych w przypadku olejów mineralnych wpływ dodatków przeciwzatarciowych jest znaczący. Interesujący jest również ponad 6-krotnie mniejszy graniczny nacisk zatarcia w przypadku czystego oleju

mineralnego w porównaniu z czystym olejem syntetycznym, pomimo że lepkości tych olejów są porównywalne.



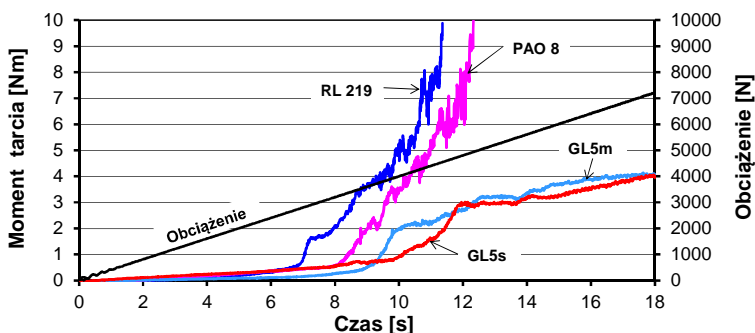
Rys. 3. Przebiegi momentów tarcia skojarzenia WC/C-100Cr6 smarowanego różnymi olejami bazowymi

Fig. 3. The friction torque obtained for WC/C-100Cr6 friction joint lubricated with tested oils

Tabela 3. Wartości obciążenia zacierającego P_t i granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla skojarzenia WC/C-100Cr6 smarowanego różnymi olejami bazowymi

Table 3. The P_t scuffing load values and p_{oz} limiting pressure of seizure for WC/C-steel friction joint lubricated with investigated oils

Olej		RL 219	PAO 8	GL5m	GL5s
P_t [N]	Wartość śr.	4 533,33	7 200,00	5 250,00	7 200,00
	Odch. std.	825,13	0,00	314,64	0,00
P_{oz} [N/mm ²]	Wartość śr.	610,76	3 996,59	3 010,45	4 293,12
	Odch. std.	65,97	44,02	252,44	82,03



Rys. 4. Przebiegi momentów tarcia skojarzenia MoS₂/Ti-100Cr6 smarowanego różnymi olejami bazowymi

Fig. 4. The friction torque obtained for MoS₂/Ti-100Cr6 friction joint lubricated with investigated oils

Różny wpływ badanych olejów na zacieranie zaobserwowano również w przypadku skojarzenia testowego z elementami z naniesioną powłoką

MoS₂/Ti (**Rys. 4**). Wartości obciążenia zatarcia P_t dla badanych olejów nie są tak zróżnicowane, jak w przypadku wcześniej omawianych skojarzeń materiałowych (**Tabela 4**). Niemniej obciążenia zatarcia tego skojarzenia są zdecydowanie większe w porównaniu ze skojarzeniem stal–stal, ale mniejsze niż w przypadku skojarzenia stal–stal z powłoką WC/C.

Analizując wartości p_{oz} zestawione w **Tabeli 4**, można zauważyć, że w przypadku czystych olejów właściwości przeciwzużyciowe są zdecydowanie gorsze (ponad 8-krotnie mniejsze) w porównaniu z olejami z pełnym pakietem dodatków. Związane jest to prawdopodobnie ze zniszczeniem powłoki po przerwaniu filmu smarowego, co w konsekwencji doprowadziło do współpracy stal–stal. Uzyskane większe wartości p_{oz} w porównaniu ze skojarzeniem 100Cr6-100Cr6 wynikają z ochronnego działania powłoki w początkowy okresie współpracy tarciowej. Najlepszym olejem do smarowania tego skojarzenia materiałowego okazał się olej handlowy na bazie syntetycznej; należy jednak mieć na uwadze to, że lepkość tego oleju jest prawie dwukrotnie większa od pozostałych.

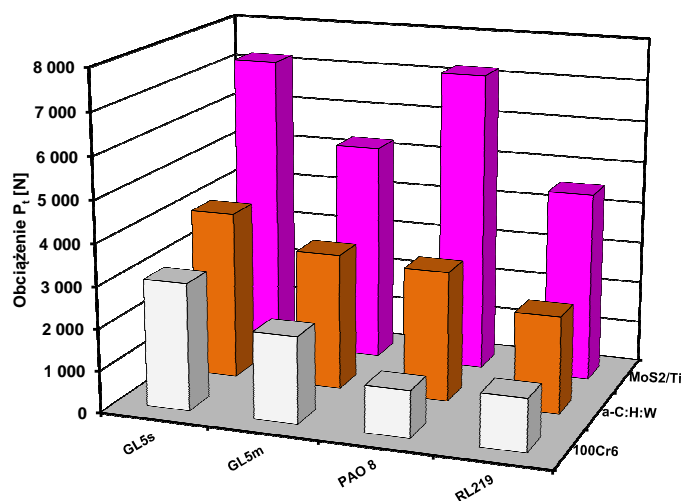
Tabela 4 Wartości obciążenia zacierającego P_t i granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla skojarzenia MoS₂/Ti-100Cr6 smarowanego różnymi olejami bazowymi

Table 4 The P_t scuffing load values and p_{oz} limiting pressure of seizure for MoS₂/Ti-steel friction joint lubricated with tested oils

Olej		RL 219	PAO 8	GL5m	GL5s
P_t [N]	Wartość śr.	2 316,67	3 100,00	3 258,33	4 016,67
	Odch. std.	246,64	173,21	174,40	175,59
p_{oz} [N/mm ²]	Wartość śr.	360,79	410,62	2 680,19	2 940,02
	Odch. std.	59,63	55,63	172,37	152,79

Zestawienie średnich wartości obciążenia zacierającego P_t w zależności od badanego skojarzenia i zastosowanego środka smarowego przedstawiono na **Rys. 5**.

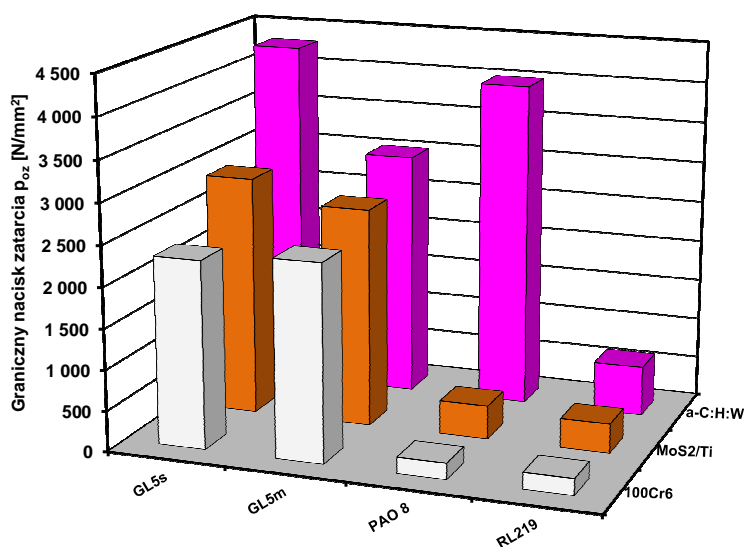
Z zestawienia tego wyraźnie widać zróżnicowany wpływ poszczególnych środków smarowych na badane skojarzenia materiałowe. Należy jednak zwrócić uwagę, że – bez względu na rodzaj środka smarowego – powłoki pozytywnie wpływają na zwiększenie odporności na zacieranie badanych skojarzeń.



Rys. 5. Zestawienie średnich wartości obciążenia zacierającego P_t w zależności od badanego skojarzenia i zastosowanego środka smarowego

Fig. 5. The P_t scuffing load average values obtained for each of the material combination lubricated with each tested oil

Jak zaznaczono na wstępie, graniczny nacisk zatarcia p_{oz} w sposób pośredni charakteryzuje również odporność na zużycie ściernie badanego skojarzenia, gdyż wartość obciążenia granicznego P_{oz} odnieszona jest do wartości średniej średnicy skazy (ślądu wytarcia), określanej po zakończeniu testu tribologicznego. Analizując uzyskane wartości p_{oz} zestawione w **Tabeli 5** i na **Rys. 6**, można stwierdzić, że pakiety dodatków smarnościowych zawarte w olejach handlowych obniżają zużycie, jeżeli dojdzie do przerwania warstwy smarowej i uszkodzenia powłoki. Jedynym wyjątkiem jest skojarzenie, w którym jeden z elementów pokryty jest powłoką WC/C i które smarowane jest olejem syntetycznym PAO 8. W tym przypadku można wnioskować, że powłoka przejęła przeciwzużyciową funkcję dodatków przeciwzużyciowych.



Rys. 6. Zestawienie średnich wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} w zależności od badanego skojarzenia i zastosowanego środka smarowego

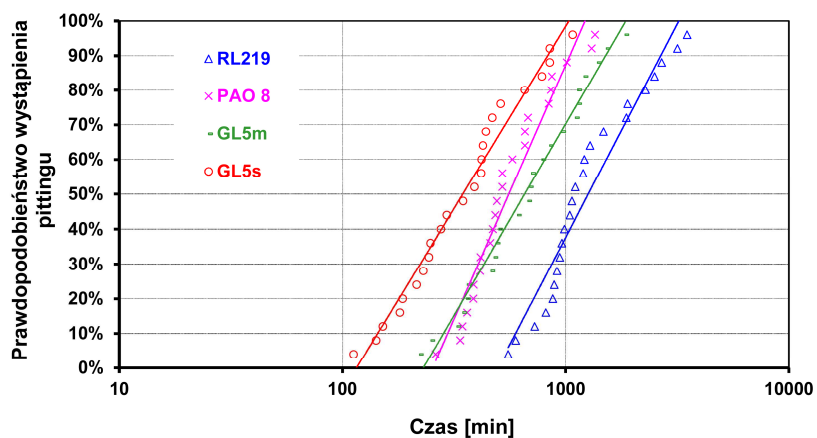
Fig. 6. The average values of p_{oz} limiting pressure of seizure obtained for each of the material combination lubricated with each tested oil

WYNIKI BADAŃ POWIERZCHNIOWEJ TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

Wyniki badań poszczególnych biegów i skojarzeń przedstawiono na **Rys. 7-9**. Na **Rys. 7** przedstawiono wyniki badań skojarzenia stal-stal. Z przebiegów linii trendu wynika, że najwłaściwszym olejem do smarowania tego skojarzenia jest mineralny olej wzorcowy RL 219. Jeśli można wytłumaczyć negatywny wpływ na pitting dodatków smarnościovych, które są zawarte w olejach handlowych, to prawie dwukrotny spadek trwałości skojarzenia smarowanego olejem syntetycznym PAO 8 w odniesieniu do oleju mineralnego RL 219 jest zastanawiający (**Tabela 5**).

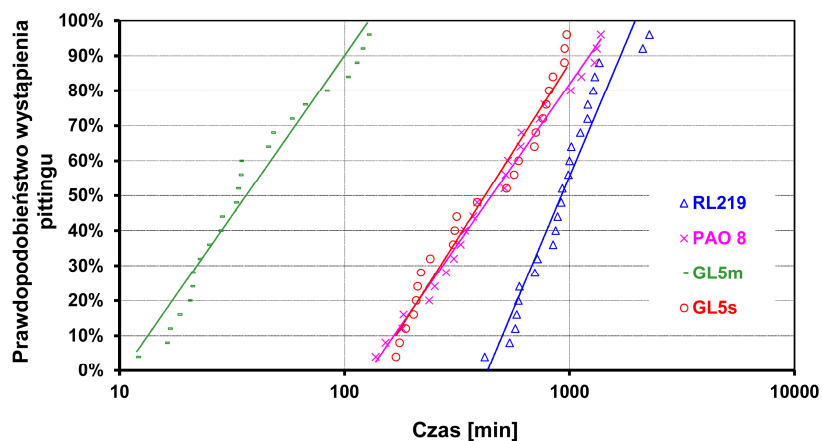
Na kolejnym rysunku przedstawione są wyniki badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej skojarzenia, w którym próbka ze stali 100Cr6 pokryta została powłoką WC/C. Podobnie jak w poprzednim przypadku, najodpowiedniejszym do smarowania tego skojarzenia, ze względu na pitting, okazał się olej mineralny RL 219. Chociaż wyniki badań olejów syntetycznych są zróżnicowane, to wyznaczone linie trendu nie odbiegają od siebie w znaczący sposób. Można by na tej podstawie wysnuć wniosek, że wpływ na pitting tych olejów (wzorcowego PAO 8 i handlowego GL 5s) jest jednakowy i dodatki smarnościovie w oleju handlowym (z pełnym pakietem dodatków) są obojętne. Przeczą jednak temu wyniki badań oleju handlowego na bazie mineralnej, które w drastyczny sposób pogarszają odporność na pitting rozpatrywanego skojarzenia.

Przypadek ten wymaga wyjaśnienia na bazie dodatkowych, dogłębnych badań analitycznych.



Rys. 7. Wyniki badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej skojarzenia 100Cr6-100Cr6 smarowanego badanymi olejami

Fig. 7. The results of surface fatigue life of 100Cr6/100Cr6 friction joint lubricated with investigated oils



Rys. 8. Wyniki badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej skojarzenia WC/C-100Cr6 smarowanego badanymi olejami

Fig. 8. The results of surface fatigue life of WC/C-100Cr6 friction joint lubricated with investigated oils

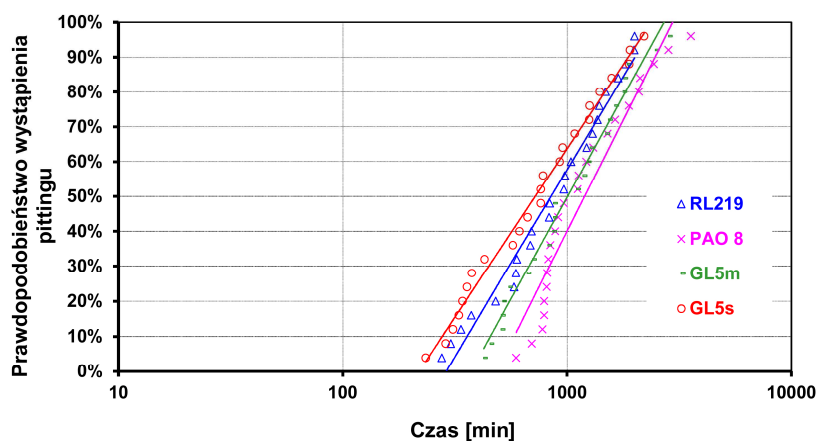
Wyniki wpływu badanych olejów na pitting skojarzenia elementu z powłoką MoST przedstawione są na Rys. 9. W tym przypadku wpływ olejów na powierzchniową trwałość zmęczeniową nie jest tak znaczący, jak w przypadku dotychczas rozpatrywanych skojarzeń materiałowych. Najodpowiedniejszym

olejem do smarowania tego styku okazał się olej syntetyczny bez dodatków PAO 8; następnie w kolejności to: olej handlowy na bazie mineralnej GL5m oraz olej mineralny wzorcowy RL 219. Najniższą odporność na powierzchniową trwałość zmęczeniową posiadało skojarzenie smarowane handlowym olejem na bazie syntetycznej GL5s.

Tabela 5. Wartości powierzchniowej trwałości zmęczeniowej L_{10} badanych skojarzeń i środków smarowych

Table 5. The values of L_{10} surface fatigue life of investigated material combinations and oils

Skojarzenie/Olej	RL 219	PAO 8	GL5m	GL5s
<i>100Cr6-100Cr6</i>	662,18	318,51	284,95	147,64
	634,95	308,09	276,67	142,57
	607,67	297,38	268,33	137,48
<i>WC/C-100Cr6</i>	525,69	169,96	15,07	185,97
	507,93	165,57	14,37	180,77
	489,48	161,23	13,68	176,10
<i>MoST-100Cr6</i>	353,72	675,97	480,78	288,43
	341,63	655,72	470,40	279,92
	329,39	635,78	460,25	271,55



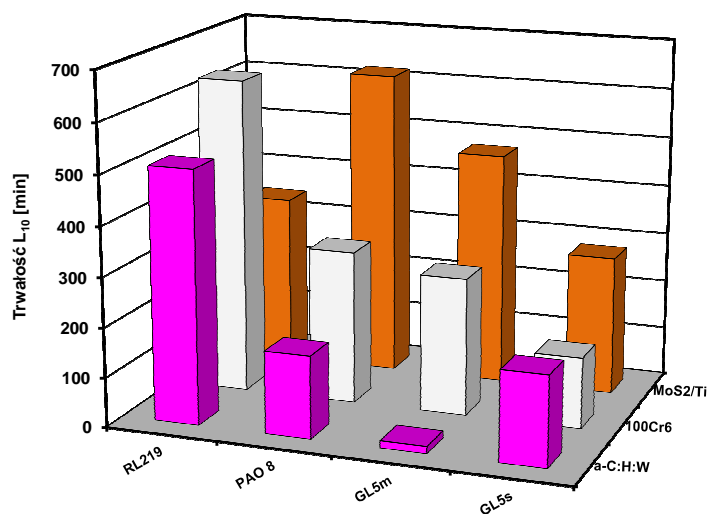
Rys. 9. Wyniki badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej skojarzenia MoST-100Cr6 smarowanego badanymi olejami

Fig. 9. The results of surface fatigue life of MoS₂/Ti-100Cr6 friction joint lubricated with investigated oils

Podsumowując wyniki badań wpływu środka smarowego na powierzchniową trwałość zmęczeniową elementów skojarzonych w smarowanym styku skoncentrowanym, należy zaznaczyć, że jako miarę tej trwałości przyjęto kwantyl L_{10} , czyli czas, w którym 10% populacji próbek uległo uszkodzeniu. Warto-

ści trwałości L_{10} poszczególnych skojarzeń materiałowych w zależności od zastosowanego środka smarowego zestawiono na **Rys. 10** oraz w **Tabeli 5**.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników można stwierdzić, że dodatki smarnościowe zawarte w olejach handlowych (z pełnym pakietem dodatków) pogarszają odporność na pitting badanych skojarzeń materiałowych. Wyjątkiem jest skojarzenie smarowane olejem na bazie mineralnej GL5m, w którym próbka pokryta była powłoką MoS_2/Ti . Tylko w tym przypadku odnotowano wzrost powierzchniowej trwałości zmęczeniowej L_{10} w porównaniu z czystym olejem wzorcowym.



Rys. 10. Zestawienie powierzchniowej trwałości zmęczeniowej L_{10} badanych skojarzeń i środków smarowych

Fig. 10. The L_{10} surface fatigue life obtained for each of the material combination lubricated with each tested oil

PODSUMOWANIE

Podsumowując wyniki badań, można stwierdzić, że rodzaj środka zastosowanego do smarowania styku skoncentrowanego ma istotny wpływ na charakterystyki tarcia i zużyciowe, przy czym wpływ ten zależny jest w znacznej mierze od rodzaju materiałów skojarzonych.

Bardzo ważnym spostrzeżeniem jest to, że niemal we wszystkich przypadkach powłoka przejmowała, w większym lub mniejszym stopniu, funkcję dodatków smarnościowych, zwiększając odporność na zacieranie badanego węzła tarcia. Szczególnie uwidocznilo się to w przypadku badania węzła tarcia z elementem pokrytym powłoką WC/C smarowanego olejami syntetycznymi bazywymi i handlowym, z pełnym pakietem dodatków, w którym funkcję dodatków

smarowościowych w całości przejęła powłoka. Jest to spostrzeżenie szczególnie istotne z punktu widzenia rozwoju ekologicznych, biodegradowalnych środków smarowych, bez toksycznych dodatków smarowościowych.

Praca zrealizowana w ramach Programu Strategicznego „Innowacyjne systemy wspomagania technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki” nr POIG.01.01.02-14-034/09-00.

LITERATURA

1. Piekoszewski W.: Wpływ powłok na zmęczenie powierzchniowe smarowanych stalowych węzłów tarcia. W.N. ITeE – PIB, Radom 2011.
2. Szczerek M., Tuszyński W.: Badania tribologiczne. Zacieranie. ITeE, Radom 2000.
3. Michalczewski R.: Badania tribologiczne elementów z powłokami przeciwzużyciowymi, tworzącymi smarowany styk skoncentrowany. Rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, 2002.
4. Matuszewska A., Grądkowski M., Szczerek M.: Komponowanie środków smarowych do smarowania węzłów tarcia z powłoką niskotarciową. Tribologia, 2007, 2, 445–457.
5. Majkowska B., Piekoszewski W., Szczerek M., Wołowicz E.: The effect of depth of surface layers constituted by vacuum technologies on pitting. Archives of Materials Science and Engineering, vol. 59/2 (2013) s. 76–81.
6. Piekoszewski W.: Wpływ na powierzchniową trwałość zmęczeniową wybranych materiałów i technologii konstituowania warstw powierzchniowych elementów węzła tocznego. Tribologia, vol. 225 (3/2009), s. 185–196.
7. Piekoszewski W., Tuszyński W.: Właściwości przeciwzużyciowe, przeciwzatarciowe i trwałość zmęczeniowa węzła tarcia jako efekt rodzaju i stężenia dodatków smarowościowych w oleju. Tribologia, vol. 191 (5/2003), s. 203–220.
8. Łuksa A. red.: Ekologia płynów eksploatacyjnych. Wyd. MCNEMT, 1990.
9. Kalin M., Vižintin J., Vercammen K., Barriga J., Arnsek A.: The lubrication of DLC coatings with mineral and biodegradable oils having different polar and saturation characteristics. Surface and Coatings Technology, 2005, nr 200, s. 4515–4522.
10. Vercammen K., Van Acker K.A., Vanhulsel A., Barriga J., Arnsek A., Kalin M., Meneve J.: Tribological behaviour of DLC coatings in combination with biodegradable lubricants. Tribology International, 2004, nr 37, s. 983–989.
11. Dziosa K., Makowska M., Grądkowski M.: Lubricating effectiveness of secondary metabolites from microalgae in different material systems. Solid State Phenomena, 2015, 237, 289–294.
12. Tuszyński W.: Badanie przeciwzatarciowych oddziaływań środków smarowych. Rozprawa doktorska. WITPiS, Sulejów 1999.

13. Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszyński W.: Metoda i urządzenie do badania przeciwzatarciowych oddziaływań środków smarowych. *Problemy Eksploatacji*, vol. 50 (3/2003), s. 81–94,
14. PN-76/C04147 Przetwory naftowe. Badanie własności smarnych olejów i smarów.
15. Lech J., Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszyński W.: Sposób oceny przeciwzatarciowych własności środków smarowych na aparacie 4-kulowym. Patent nr 179123 - B1 - G01N 33/30, Decyzja Urzędu Patentowego RP z dn. 31.07.2000.
16. Szczerek M., Tuszyński W.: A method for testing lubricants under conditions of scuffing. Part I. Presentation of the method. *Tribotest Journal*, t. 8, nr 4, 2002, s. 273–284.
17. Piekoszewski W.: Metoda i stanowisko do badania powierzchniowej trwałości zmęczeniowej. *Tribologia* 3/2012, s. 145–157.

Summary

The paper presents the test results of scuffing and the surface fatigue life (pitting resistance) of the modified four-ball tester friction joint, lubricated with the following oils: RL219 reference oil, PAO 8 poly-alfa-olefin oil, GL-5 mineral oil (GL5m), and GL-5 synthetic oil (GL5s). From the material point of view, the following three combinations were tested: a friction joint with the elements made of uncoated steel, and two friction joints with steel elements with PVD low friction coatings, (WC/C (a-C:H:W), and MoS₂/Ti, respectively). The obtained results indicate that the thin PVD coatings make it possible to eliminate the need of using the toxic oil additives, which are hazardous to the natural environment.