

**Witold PIEKOSZEWSKI\***, **Anita MAŃKOWSKA\***

## **BADANIE WPLYWU OLEJÓW BAZOWYCH NA TRWAŁOŚĆ ELEMENTÓW Z CIENKIMI, POWŁOKAMI NISKOTARCIOWYMI**

### **INVESTIGATION OF BASE OILS INFLUENCE ON THE DURABILITY OF ELEMENTS WITH THIN, LOW-FRICTION COATINGS**

#### **Słowa kluczowe:**

technologie próżniowe, powłoki niskotarciowe PVD, pitting, powierzchniowa trwałość zmęczeniowa

#### **Key words:**

vacuum techniques, PVD coatings, pitting, rolling contact fatigue

#### **Streszczenie**

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu olejów bazowych pochodzenia mineralnego, syntetycznego oraz roślinnego na powierzchniową trwałość zmęczeniową wysokoobciążonych węzłów tarcia z elementami z naniesionymi powłokami niskotarciowymi. Przebadano różne skojarzenia materiałowe (stal–stal oraz stal skojarzona z elementami z powłokami PVD) smarowane wybranymi olejami bazowymi. W wyniku

---

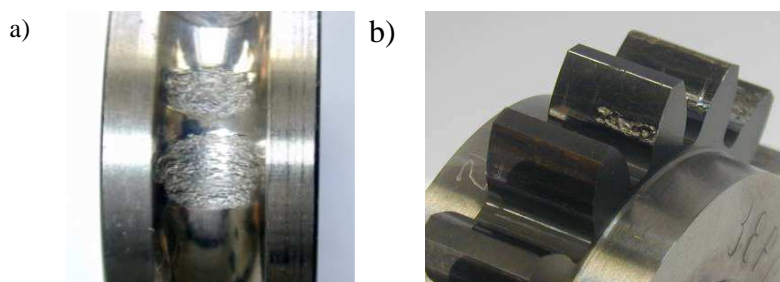
\* Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, ul. K. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel.: (48) 3644241, fax: (48) 36447-65, e-mail: witold.piekoszewski@itee.radom.pl

przeprowadzonych badań stwierdzono istotny wpływ oleju bazowego na trwałość zmęczeniową badanych skojarzeń. Wpływ ten był zróżnicowany i zależny w dużym stopniu od badanego skojarzenia materiałowego.

## WPROWADZENIE

Głównym problemem, z jakim stykają się użytkownicy wysokoobciążonych węzłów tarcia, w których występuje smarowany styk skoncentrowany, jest ich trwałość. Awaria kinematycznego węzła tarcia (przekładni zębatej, łożyska tocznego, układu krzywka–popychacz itp.) najczęściej wyklucza urządzenie z eksploatacji na dłuższy czas i wiąże się ze zwiększeniem kosztów eksploatacji. Ogólnie panująca w technice tendencja zmniejszania zużycia surowców w praktyce sprowadza się do miniaturyzacji urządzeń, a przez to do zwiększania mocy przenoszonej przez kinematyczne węzły tarcia. Wzrost wartości obciążenia przenoszonego przez te węzły wiąże się ze wzrostem ryzyka wystąpienia zacierania [L. 1, 2] lub zmęczenia powierzchni roboczych elementów trących [L. 3, 4].

W ośrodkach zajmujących się konstrukcją i projektowaniem wysokoobciążonych węzłów tarcia panuje przekonanie, że możliwości klasycznych materiałów ze względu na trwałość i wytrzymałość zostały już wyczerpane. Przyszłościowymi sposobami zwiększenia odporności na zużycie są nowoczesne technologie konstituowania warstw wierzchnich elementów maszyn, do których należą powłoki nanoszone metodami PVD, które ze względu na korzystne właściwości przeciwzużyciowe w warunkach ekstremalnych nacisków znajdują zastosowanie do zwiększenia odporności na zacieranie elementów maszyn.



**Rys. 1. Fotografia elementów ze śladami zniszczenia powierzchni na skutek pittingu: a) bieżnia łożyska kulkowego, b) koła zębatego [Zakład Tribologii ITeE – PIB]**

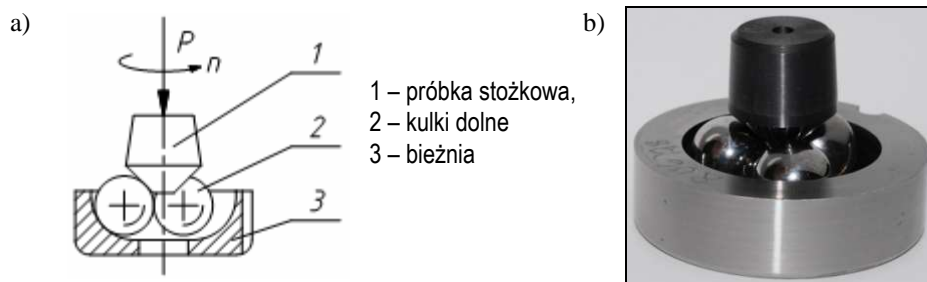
Fig. 1. The picture of machine parts with pitting effects: a) ball bearing race, b) gear-wheel [Tribology Department ITeE – PIB]

Kluczowym problemem doboru środków do smarowania węzłów tarcia z elementami pokrytymi twardymi, cienkimi powłokami przeciwzużyciowymi jest brak danych dotyczących wpływu powszechnie stosowanych środków smarowych na ich charakterystyki tribologiczne. Ponieważ nie opracowano jeszcze teoretycznych podstaw doboru środka smarowego i materiałów powłok do konkretnych zastosowań technicznych, dobór ten jest realizowany eksperymentalnie. W tym nurcie znajdują się prezentowane niżej badania.

## METODA BADAŃ

Celem pracy było zbadanie wpływu bazowych olejów smarowych (mineralnych, syntetycznych i roślinnych) na powierzchniową trwałość zmęczeniową (pitting) wysokoobciążonych elementów, pokrytych cienkimi, twardymi powłokami przeciwzużyciowymi pracującymi w smarowanym styku tocznym.

Do badań wykorzystano zmodernizowany aparat czterokulowy opracowany i produkowany w ITeE – PIB. Zarówno zmodernizowany aparat, jak i metoda badawcza została przedstawiona w wielu publikacjach [L. 5, 6].



**Rys. 2. Węzeł tarcia aparatu T-03 do badania zużycia zmęczeniowego materiałów stosowanych na wysokoobciążone elementy toczne: a) schemat, b) widok**

Fig. 2. Friction joint of T-03 tester used for investigation of fatigue wear of materials intended for heavy-loaded rolling parts: a) drawing, b) view

Badanie polegało 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, sporządzeniu rozkładu Weibulla i na jego podstawie określeniu trwałości węzła tarcia.

Trwałość zmęczeniową charakteryzowano za pomocą tzw. trwałości 10% i 90% oznaczonej odpowiednio  $L_{10}$  i  $L_{90}$ . Jest to czas eksploatacji tocznych elementów węzła tarcia (smarowanych badanym olejem), w którym 10% lub 90% ich populacji ulega uszkodzeniu.

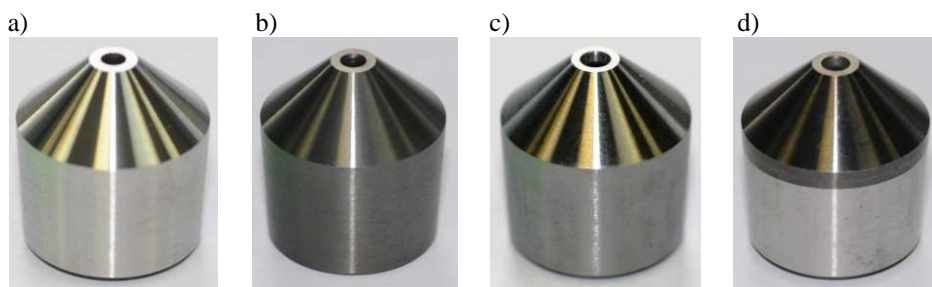
Warunki, w których przeprowadzono biegi badawcze były następujące:

- obciążenie węzła tarcia: 3924 N,
- prędkość obrotowa wrzeciona:  $1450^{\pm 50}$  obr./min,
- obciążenie wstępne węzła tarcia: 981 N,
- temperatura otoczenia:  $23^{\pm 2}$ °C.

## OBIEKTY BADAŃ

Celem eksperymentów było określenie trwałości zmęczeniowej modelowego, tocznego węzła tarcia z elementami pokrytymi powłokami przeciwużyźciowymi PVD, smarowanego olejami: mineralnym, syntetycznym, roślinnymi.

Do badań wytypowano powłoki będące reprezentantami powłok niskotarciowych o złożonej strukturze (WC/C,  $\text{MoS}_2$  i  $\text{MoS}_2/\text{Ti}$ ). Powłoki niskotarciowe dedykowane są specjalnie do nanoszenia na elementy węzłów kinematycznych.



**Rys. 3. Widok stożków (próbek): a) ze stali 100Cr6, b) z powłoką WC/C, c) z powłoką  $\text{MoS}_2/\text{Ti}$ , d) z powłoką  $\text{MoS}_2$**

Fig. 3. The view of test cones (upper specimens): a) 100Cr6 bearing steel, b) with WC/C coating, c) with  $\text{MoS}_2/\text{Ti}$  coating, d) with  $\text{MoS}_2$  coating

Do wykonania próbek wybrano stal łożyskową 100Cr6 ze względu na to, że po obróbce cieplnej charakteryzuje się jednorodną strukturą

w całej swojej objętości. Z tych względów nadaje się jako materiał referencyjny i została wybrana jako podstawowy materiał do nanoszenia powłok. Dodatkowym argumentem przemawiającym za tym wyborem jest to, że stal 100Cr6 jest powszechnie stosowana na elementy łożysk tocznych, w związku z czym została przebadana wszechstronnie pod względem trwałości zmęczeniowej [L. 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

Wszystkie procesy osadzania zostały przeprowadzone poniżej temperatury wystąpienia przemian fazowych w materiale podłoża (poniżej 200°C).

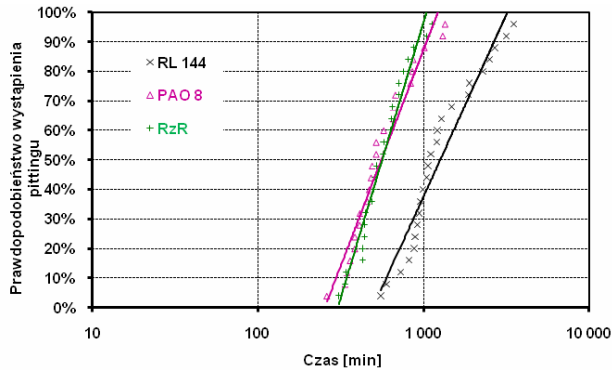
We wszystkich badanych skojarzeniach materiałowych przeciwpróbkami współpracującymi tocznie z próbką (stożkiem) były typowe kulki łożyskowe ½” wykonane ze stali 100Cr6.

W programie badań skojarzenie stal–stal (100Cr6–100Cr6) smarowane mineralnym olejem wzorcowym zostało przyjęte jako podstawowe, do którego odnoszono rezultaty pozostałych przebadanych skojarzeń i środków smarowych.

## WYNIKI BADAŃ

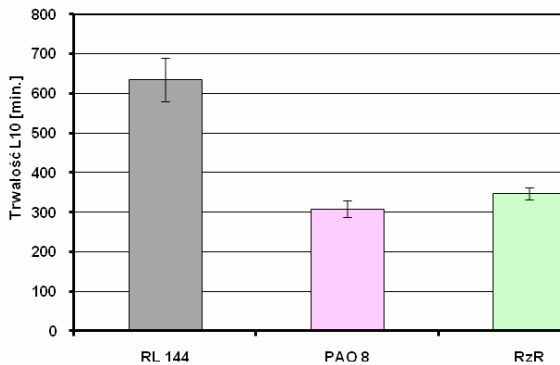
Aby określić wpływ oleju bazowego na występowanie pittingu, przeprowadzono serię badań wybranych skojarzeń materiałowych, w których jeden z elementów pokryty był powłoką nanoszoną technologiami próżniowymi, pracujących w obecności czystych, bez dodatków, olejów: mineralnego (*RL 144*), syntetycznego (*PAO 8*) oraz roślinnego (rzepakowy rafinowany).

Na **Rys. 4** i **5** przedstawiono wyniki badań tocznego, modelowego węzła tarcia, którego wszystkie elementy wykonano ze stali 100Cr6 obrabianej cieplnie do twardości  $63^{\pm 1}$  HRC. Z przeprowadzonej analizy wynika, że największą powierzchniową trwałością zmęczeniową charakteryzuje się węzeł tarcia pracujący w obecności mineralnego oleju wzorcowego RL 144, chociaż pochylenie linii trendu charakteryzujące współczynnik rozrzutu powierzchniowej trwałości zmęczeniowej dla tego oleju jest najmniej korzystny ze wszystkich badanych olejów.



**Rys. 4. Wyniki badań zmęczeniowych skojarzenia materiałowego 100Cr6–100Cr6 smarowanego badanymi środkami smarowymi**

Fig. 4. The fatigue life research results for 100Cr6–100Cr6 couple lubricated with investigated oils

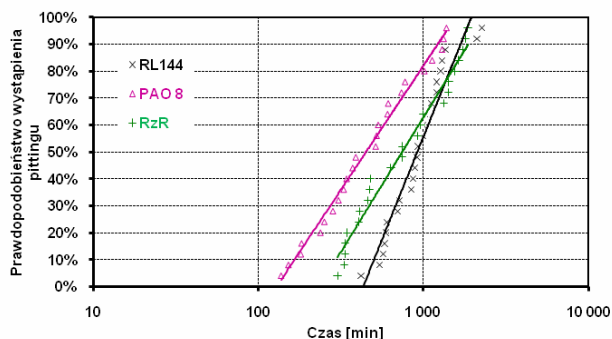


**Rys. 5. Trwałość zmęczeniowa  $L_{10}$  skojarzenia materiałowego 100Cr6–100Cr6 smarowanego badanymi środkami smarowymi**

Fig. 5. Fatigue life  $L_{10}$  of 100Cr6–100Cr6 couple lubricated with investigated oils

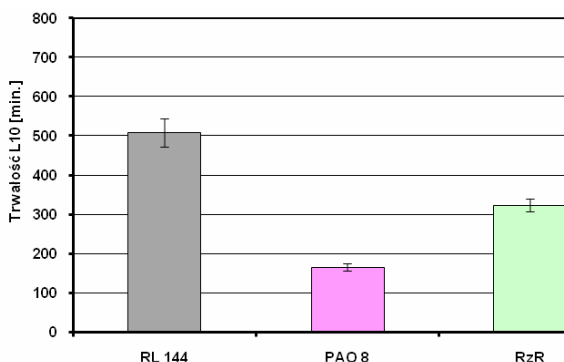
Przedstawione na **Rys. 5** trwałości zmęczeniowe  $L_{10}$  badanego skojarzenia wskazują, że oleje pochodzenia roślinnego i syntetycznego pogarszają, w stosunku do oleju mineralnego, trwałość zmęczeniową rozpatrywanego skojarzenia.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że chociaż lepkość kinematyczna badanego oleju roślinnego jest zdecydowanie niższa (prawie dwukrotnie) od oleju syntetycznego, to trwałość zmęczeniowa tego skojarzenia smarowanych olejem rzepakowym jest większa od trwałości węzłów tarcia smarowanych olejem syntetycznym *PAO 8*.



**Rys. 6. Wyniki badań zmęzeniowych skojarzenia materiałowego powłoka WC/C–100Cr6 smarowanego badanymi środkami smarowymi**

Fig. 6. The fatigue life research results for WC/C coating–100Cr6 couple lubricated with investigated oils

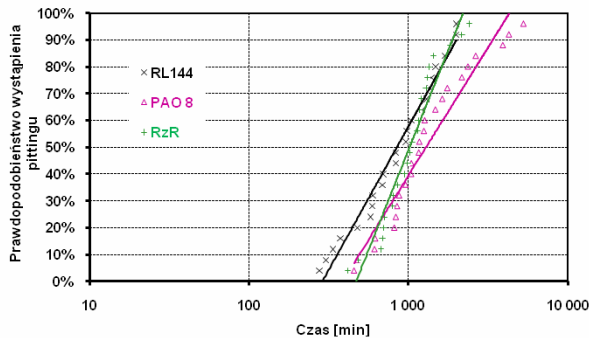


**Rys. 7. Trwałość zmęzeniowa L<sub>10</sub> skojarzenia materiałowego powłoka WC/C–100Cr6 smarowanego badanymi środkami smarowymi**

Fig. 7. Fatigue life L<sub>10</sub> of WC/C coating–100Cr6 couple lubricated with investigated oils

Nieco odmienne oddziaływanie oleju roślinnego zaobserwowano dla elementu z powłoką WC/C skojarzonego z kulkami stalowymi (Rys. 6 i 7). Podobnie jak w przypadku skojarzenia 100Cr6 - 100Cr6 najwyższą trwałość zmęzeniową uzyskano dla węzłów tarcia smarowanych olejem mineralnym RL 144, ale na drugim miejscu uplasował się olej rzepakowy, chociaż różnice w trwałości pomiędzy olejem rzepakowym a syntetycznym nie są tak duże, jak w przypadku oleju RL 144 i rzepakowego (Rys. 7).

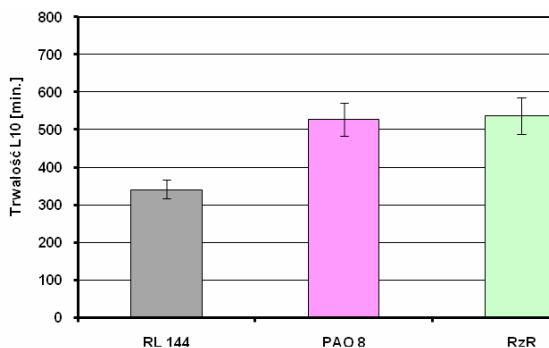
Zdecydowanie odmienny wpływ olejów bazowych na pitting odnotowano w przypadku węzłów tarcia z elementami z naniesioną powłoką niskotarciową  $MoS_2/Ti$  (**Rys. 8**). Dla tego typu skojarzenia najniższą powierzchniową trwałość zmęczeniową otrzymano dla oleju mineralnego (**Rys. 9**). Trwałości  $L_{10}$  tego skojarzenia smarowanego olejem syntetycznym i roślinnym były porównywalne i o ponad 30% większe od trwałości skojarzenia smarowanego olejem mineralnym.



**Rys. 8. Wyniki badań zmęczeniowych skojarzenia materiałowego powłoka  $MoS_2/Ti-100Cr6$  smarowanego badanymi środkami smarowymi**

Fig. 8. The fatigue life research results for  $MoS_2/Ti$  coating-100Cr6 couple lubricated with investigated oils

Ma to istotne znaczenie ze względu na możliwość zmniejszenia uciążliwości ekologicznej procesu smarowania poprzez wyeliminowanie smarów na bazie mineralnej.

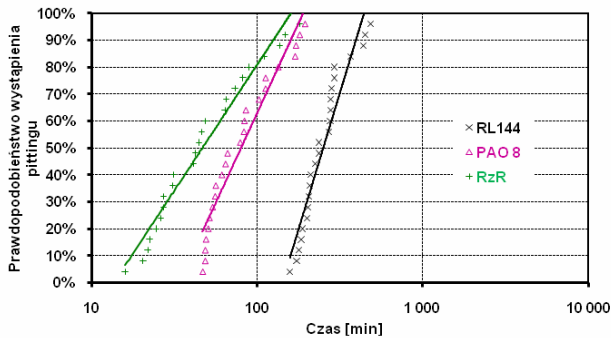


**Rys. 9. Trwałość zmęczeniowa  $L_{10}$  skojarzenia materiałowego powłoka  $MoS_2/Ti-100Cr6$  smarowanego badanymi środkami smarowymi**

Fig. 9. Fatigue life  $L_{10}$  of  $MoS_2/Ti$  coating-100Cr6 couple lubricated with investigated oils

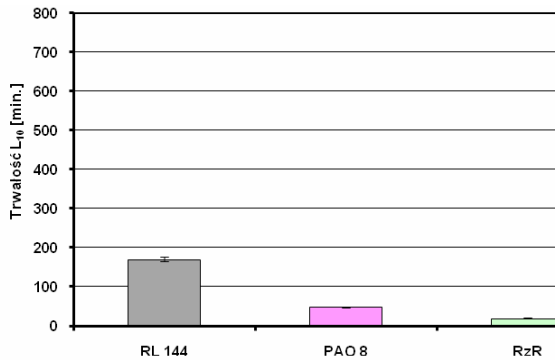


Kolejnym z przebadanych skojarzeń był testowy węzeł tarcia z elementami pokrytymi powłoką niskotarciową  $MoS_2$ . Analiza otrzymanych wyników badań upoważnia do stwierdzenia, że powłoka ta znacząco obniża trwałość zmęczeniową elementów węzła, bez względu na rodzaj użytego oleju bazowego. Trwałość  $L_{10}$  skojarzenia  $100Cr6-100Cr6$  smarowanego olejem RL 144, wynosząca ok. 630 min, w przypadku skojarzenia elementów z powłoką  $MoS_2-100Cr6$  spada do ok. 170 min, czyli ponad 3,5-krotnie.



**Rys. 10. Wyniki badań zmęczeniowych skojarzenia materiałowego powłoka  $MoS_2-100Cr6$  smarowanego badanymi środkami smarowymi**

Fig. 10. The fatigue life research results for  $MoS_2$  coating- $100Cr6$  couple lubricated with investigated oils



**Rys. 11. Trwałość zmęczeniowa  $L_{10}$  skojarzenia materiałowego powłoka  $MoS_2-100Cr6$  smarowanego badanymi środkami smarowymi**

Fig. 11. Fatigue life  $L_{10}$  of  $MoS_2$  coating- $100Cr6$  couple lubricated with investigated oils

Temu dużemu spadkowi trwałości towarzyszy również odmienne oddziaływanie olejów bazowych na badany styk. I tak w przypadku oleju

syntetycznego następują redukcja trwałości zmęczeniowej ponadtrzykrotna, a w przypadku oleju roślinnego ponad 8-krotna. Najlepiej obrazują to wykresy przedstawione na **Rys. 11**.

## PODSUMOWANIE

Analiza uzyskanych wyników upoważnia do stwierdzenia, że na trwałość zmęczeniową (pitting) wpływ rodzaju oleju bazowego, zastosowanego do smarowania tocznego modelowego wężła tarcia z elementami z naniesionymi powłokami przeciwzużyciowymi (niskotarciowymi), jest bardzo istotny i w dużym stopniu zależy od materiałów tworzących badany styk (**Tabela 1, Rys. 12**).

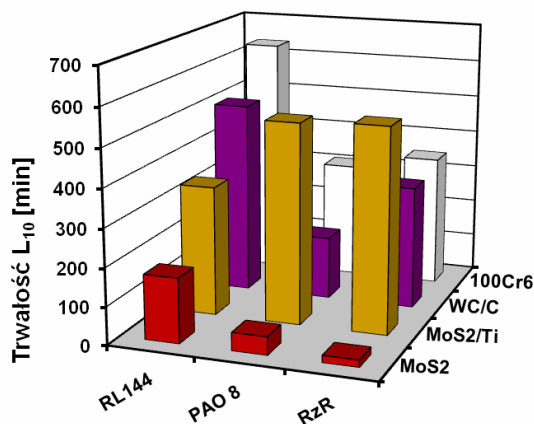
I tak olej mineralny był najodpowiedniejszym środkiem smarowym dla skojarzenia elementów stalowych skojarzonych z elementami pokrytymi powłoką WC/C. Z kolei do smarowania styku z elementami z powłoką MoS<sub>2</sub>/Ti najlepszymi środkami smarowymi okazały się olej roślinny oraz syntetyczny.

**Tabela 1. Zestawienie trwałości zmęczeniowej L<sub>10</sub> [min] modelowego tocznego wężła tarcia smarowanego olejem: mineralnym RL 144, rzepakowym rafinowanym (RzR) oraz syntetycznym PAO 8**

Table 1. The combination of fatigue life L<sub>10</sub> [min] of model rolling friction joint lubricated with following oils: mineral RL 144, rapeseed refined (RzR) and synthetic PAO 8

Skojarzenie ⇒ ↓ Olej	100Cr6- 100Cr6	WC/C- 100Cr6	MoS <sub>2</sub> /Ti- 100Cr6	MoS <sub>2</sub> - 100Cr6
RL 144	634,95	507,93	341,63	170,51
PAO 8	308,09	165,57	528,04	47,97
RzR	347,25	323,77	537,69	18,84

Na uwagę zasługuje fakt, że chociaż lepkość kinematyczna oleju roślinnego była dużo niższa od lepkości oleju syntetycznego, to trwałość zmęczeniowa skojarzeń 100Cr6-100Cr6 i WC/C-100Cr6 smarowanych olejem rzepakowym jest większa od trwałości wężłów tarcia smarowanych olejem syntetycznym PAO 8.



**Rys. 12. Zestawienie trwałości zmęczeniowej  $L_{10}$  modelowego tocznego wężła tarcia smarowanego badanymi olejami bazowymi**

Fig. 12. The combination of fatigue life  $L_{10}$  of model rolling friction joint lubricated with investigated base oils

*Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego wykonana w ramach projektu nr N N504 401035 pt. „Opracowanie tribologicznych podstaw aplikacji nowych metod konstytuowania warstw wierzchnich wysokoobciążonych elementów wężła tarcia”.*

## LITERATURA

1. Nosal S.: Tribologiczne aspekty zacierania się węzłów ślizgowych. Wyd. Politechniki Poznańskiej. Poznań 1998.
2. Szczerek M., Tuszyński W: Badania tribologiczne. Zacieranie. ITeE, Radom 2000.
3. Pytko S.: Badania mechanizmu niszczenia powierzchni tocznych elementów maszynowych. Zeszyty naukowe AGH nr 191, Kraków 1967.
4. Pytko S., Szczerek M.: Pitting – forma niszczenia elementów tocznych. Tribologia. 1993, nr 4/5, s. 317–334.
5. Michalczewski R., Piekoszewski W., Wulczyński J.: Metoda badania powierzchniowej trwałości zmęczeniowej elementów z powłokami przeciwdrożdżycowymi. Problemy Eksploatacji, vol. 51 (4/2003), s. 91–99.
6. Michalczewski R., Piekoszewski W.; The Method for Assessment of Rolling Contact Fatigue of PVD/CVD Coated Elements in Lubricated Contacts. Tribologia, Finnish Journal of Tribology, vol. 25/2006 (4), s. 34–43.

7. Libera M.: Wpływ wybranych parametrów warstwy wierzchniej na powierzchniową trwałość zmęczeniową węzłów tocznych. Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska, WMRiT, 2001.
8. Palmgren A.: Łożyska toczne. Warszawa, PWN 1951.
9. Piekoszowski W.: Wpływ na powierzchniową trwałość zmęczeniową wybranych materiałów i technologii konstituowania warstw powierzchniowych elementów węzła tocznego. Tribologia, vol. 225 (3/2009), s. 185–196.
10. Waligóra W.: Warstwa wierzchnia elementów ze stali łożyskowej a jej odporność na zmęczenie powierzchniowe. Tribologia. 1993, nr 2, s. 199–219.
11. Waligóra W.: Rozrzut powierzchniowej trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 2004.
12. Waligóra W.: Odporność na zmęczenie powierzchniowe stali łożyskowej poddanej obróbce laserowej. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1994.
13. Wang Y., Fernandez J.E., Cuervo D.G.: Rolling–contact fatigue lives of steel AISI 52100 balls with eight mineral and synthetic lubricants. Wear. 1996, t. 196, s. 110–119.

**Recenzent:**  
**Janusz JANECKI**

### Summary

**Paper presents the influence of various oil bases (mineral, synthetic, and vegetable) on rolling contact fatigue life of highly-loaded friction joints consists of elements with low-friction coatings. The tests were performed on various friction couples (steel- steel, steel – PVD coated element) under lubrication conditions of aforementioned base oils. On the bases of research results it is stated that there is a substantial influence of the oil base type on rolling contact fatigue life of investigated friction pairs. That influence of oil base is differential and significantly depends on a type of investigated friction pair.**