

**Magdalena TRZOS\***, **Witold PIEKOSZEWSKI\***, **Ryszard RUTA\***

**WPLYW LICZBY BIEGÓW BADAWCZYCH  
NA OSZACOWANIE ROZRZUTU  
POWIERZCHNIOWEJ TRWAŁOŚCI  
ZMĘCZENIOWEJ SMAROWANYCH WĘZŁÓW  
TOCZNYCH**

**THE INFLUENCE OF THE NUMBER OF RESEARCH  
COURSES ON THE ESTIMATION OF CONTACT FATIGUE  
LIFE SCATTER OF LUBRICATED ROLLING  
FRICTION PAIRS**

**Słowa kluczowe:**

powierzchniowa trwałość zmęczeniowa, badania eksperymentalne, rozrzut trwałości, metoda oceny błędu

**Key words:**

fatigue durability, experimental research, durability scatter, method of error estimation

---

\* Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel. (48) 364-42-41.

## Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań nad zmianą wyznaczonego rozrzutu powierzchniowej trwałości zmęczeniowej powodowaną zmianą liczby biegów badawczych w eksperymencie tribologicznym. Przedstawione rozważania stanowią kontynuację badań dotyczących oceny trwałości zmęczeniowej węzła tarcia opisanych w artykule [L. 1]. Przeprowadzone analizy zostały wykonane na bazie wyników badań przeprowadzonych na zmodernizowanym stanowisku czterokulowym w Laboratorium Badań Tribologicznych ITeE – PIB. W artykule przedstawiono opracowaną metodę oceny wpływu liczby biegów badawczych na wyznaczenie rozrzutu powierzchniowej trwałości zmęczeniowej. Przeanalizowano zmiany rozrzutu w zależności od skojarzenia materiałowego węzła tarcia oraz zastosowanego środka smarowego.

Przedstawione wyniki potwierdziły możliwość skrócenia czasu eksperymentu przez zmniejszenie liczby biegów badawczych.

## PRZEDSTAWIENIE PROBLEMU

Uszkodzenie powierzchni elementów maszyn na skutek zużycia zmęczeniowego jest jedną z głównych przyczyn ograniczających trwałość wysokoobciążonych elementów współpracujących w smarowanych tocznych lub toczno-ślizgowych węzłach kinematycznych. Istotnym problemem, zarówno w projektowaniu, jak i badaniach powierzchniowej trwałości zmęczeniowej jest duży rozrzut trwałości tych elementów. Na przykład w przypadku łożysk tocznych pracujących w tych samych warunkach rozrzut może osiągać wartość nawet jak 1 do 40 [L. 2]. Wysokie rozrzuty notowane są również w przypadku badań laboratoryjnych trwałości zmęczeniowej [L. 3, 4].

Za miarę rozrzutu trwałości zmęczeniowej przyjmuje się stosunek trwałości  $L_{90}$  do  $L_{10}$ , szacujących trwałość, jaką osiąga odpowiednio 10% i 90% badanych elementów [L. 5] lub też stosunek trwałości  $L_{50}$  do  $L_{10}$ , na podstawie którego można wnioskować ilokrotnie czas pracy połowy badanych węzłów tarcia jest większy od czasu pracy 90% węzłów. Wartości kwantyli  $L_{10}$ ,  $L_{50}$  oraz  $L_{90}$  obliczono na podstawie parametrów rozkładu Weibulla, który wykorzystano do opisu rezultatów 24 przebiegów testowych badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej przeprowa-

dzonych według oryginalnej procedury Laboratorium Badań Tribologicznych ITeE – PIB<sup>1</sup>).

Rozkład Weibulla jest modelem probabilistycznym najczęściej wykorzystywanym zarówno do opisu trwałości i niezawodności obiektów technicznych jak również czasu przeżycia organizmów żywych. Jest to możliwe ze względu na postać funkcji gęstości (dystrybuanty), która (z udziałem odpowiednio dobranych wartości trzech parametrów (skali, kształtu i przesunięcia) bardzo dobrze opisuje procesy uszkodzeń różnego rodzaju obiektów. Szczególne znaczenie ma parametr kształtu, którego wartości ( $B < 1$ ,  $B = 1$  i  $B > 1$ ) pozwalają opisać zmienność procesu uszkodzeń badanych obiektów w czasie eksploatacji. I tak dla wartości parametru kształtu równej 1 intensywność uszkodzeń jest stała w czasie eksploatacji obiektów, co odwzorowuje sytuację, w której uszkodzenia spowodowane są tylko losowym oddziaływaniem zewnętrznym. Natomiast dla wartości mniejszej od 1 funkcja intensywności maleje z czasem, co zazwyczaj spowodowane jest ujawnianiem się wad produkcyjnych, zaś dla wartości większej od 1 funkcja intensywności jest rosnąca, co odzwierciedla wpływ procesów starzenia na awaryjność obiektów.

Jednakże stosowanie w praktyce rozkładu Weibulla wiąże się z koniecznością rozwiązania, niełatwego dla tego rozkładu, zagadnienia estymacji jego parametrów. Najczęściej stosuje się rozwiązanie polegające na linearyzacji dystrybuanty rozkładu w odpowiednio skonstruowanym ortogonalnym układzie współrzędnych (siatce funkcyjnej dwuparametrowego rozkładu Weibulla). Wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów parametry linii prostej odwzorowującej przebieg dystrybuanty poszukiwanego rozkładu pozwalają obliczyć parametry rozkładu [L. 2]. Uzyskane wartości mogą się różnić w zależności od sposobu konstruowania dystrybuanty empirycznej, co należy zaliczyć do wady tej metody. Dokładniejszą metodą jest metoda NW (największej wiarygodności), według której wartości parametrów rozkładu wyznacza się jako wartości maksymalizujące wartość funkcji wiarygodności. Dokładność wyznaczenia parametrów według tej metody zależy tylko od dokładności wyznaczenia wartości maksymalnej. Niestety przy estymacji parametrów rozkładu trójparametrowego dla pewnych zestawów wartości (np. dla parametru kształtu  $< 1$ ) rozwiązanie metodą NW nie istnieje, a także istnieją

---

<sup>1</sup> Opracowana procedura uwzględnia wymagania ujęte w brytyjskiej normie Rolling contact fatigue tests – IP 300/82.

obszary, w których funkcja wiarygodności posiada kilka maksimów lokalnych. W związku z powyższym w opracowaniu do estymacji parametrów rozkładu trójparametrowego Weibulla wykorzystano zaimplementowaną w arkuszu kalkulacyjnym MS Excel metodę linearyzacji dystrybuanty empirycznej.

W artykule [L. 1] przedstawiono wyniki badań ukierunkowanych na ocenę prognoz trwałości zmęczeniowej węzła tarcia przy różnej liczbie biegów badawczych. Jako kryterium oceny zbieżności autorzy zaproponowali błąd względny prognozy przy skróconym cyklu badawczym w odniesieniu do prognozy trwałości zmęczeniowej opracowanej na podstawie 24 biegów badawczych. Uzyskane wyniki potwierdziły zasadność podjętych badań, wskazując przesłanki skrócenia cyklu badawczego oraz poszukiwania czynników mających wpływ na zbieżność prognoz.

W artykule przedstawiono kontynuację badań nad wpływem liczby biegów badawczych na prognozy powierzchniowej trwałości zmęczeniowej. Przedmiotem prezentowanych w niniejszym artykule analiz są wyniki badań wpływu liczby prób na wartość rozrzutu trwałości zmęczeniowej dla różnych skojarzeń materiałowych oraz środków smarowych.

## OPIS BADAŃ

Analizie poddano wyniki rozrzutów trwałości zmęczeniowej  $L_{90}/L_{10}$  dla pięciu różnych skojarzeń materiałowych oraz jedenastu środków smarowych. Wyniki pochodziły z badań przeprowadzonych w Laboratorium Tribologicznym ITeE – PIB na zmodyfikowanym aparacie czterokulowym T-03 z węzłem tarciovym: stożek–kulki. Istota modyfikacji polegała na zastąpieniu górnej, obracającej się kulki, próbką w postaci stożka. Takie rozwiązanie konstrukcyjne węzła tarcia aparatu czterokulowego, umożliwia oprócz prowadzenia badań standardowych (środków smarowych) również badanie dowolnych skojarzeń materiałowych.

Kulki i stożek wykonane były ze stali łożyskowej ŁH15, badania przeprowadzono dla różnych powłok nakładanych na stożek (**Tab. 1**).

Badanie trwałości zmęczeniowej elementów testowych w obecności środka smarowego (pittingu) przeprowadzono wg oryginalnej metody [L. 6], którą opracowano w Zakładzie Tribologii ITeE – PIB. Istota badania wg opracowanej metody nie uległa zmianie w stosunku do metody opisanej w normie brytyjskiej IP 300/82 i polega na przeprowadzeniu, przy stałym zadaniem obciążeniu i stałej prędkości obrotowej, 24 biegów

badawczych elementów testowych współpracujących tocznie w obecności środka smarowego, ciągłym pomiarze amplitudy drgań generowanych w badanym węzle, pomiarze czasu poszczególnych biegów badawczych do wystąpienia pittingu, sygnalizowanej przekroczeniem założonej amplitudy drgań.

Warunki przeprowadzenia biegu badawczego wg opracowanej metody są następujące:

- obciążenie węzła tarcia: 3924 N (400 kG),
- prędkość obrotowa wrzeciona: 1450+50 obr./min,
- obciążenie wstępne węzła tarcia: 981 N,
- temperatura otoczenia: 23±2°C.

**Tabela 1. Skojarzenia materiałowe oraz środki smarowe zastosowane w eksperymentach badawczych**

Table.1. Materials of friction contacts and lubricants used in the research experiment

skojarzenie materiałowe: kulki/powłoka	olej mineralny (M1)	oleje syntetyczne	oleje roślinne
ŁH15/ŁH15	M1, M1+AW*, M1+EP*	PAO8 (S1), PAG8 (S2)	rzepakowy (R1), słonecznikowy (R2), sojowy (R3), rycynowy (R4)
ŁH15/(WC/C)	M1, M1+AW*, M1+EP*	PAO8 (S1), PAG8 (S2)	rzepakowy (R1)
ŁH15/MoS <sub>2</sub>	M1, M1+AW*, M1+EP*	PAO8 (S1), PAG8 (S2)	rzepakowy (R1)
ŁH15/TiN	M1, M1+AW*, M1+EP*	PAO8 (S1), PAG8 (S2)	rzepakowy (R1)
ŁH15/CrN	M1, M1+AW*, M1+EP*	PAO8 (S1), PAG8 (S2)	rzepakowy (R1)

\* AW – dodatek przeciwzużyciowy, EP – dodatek przeciwzatarciowy

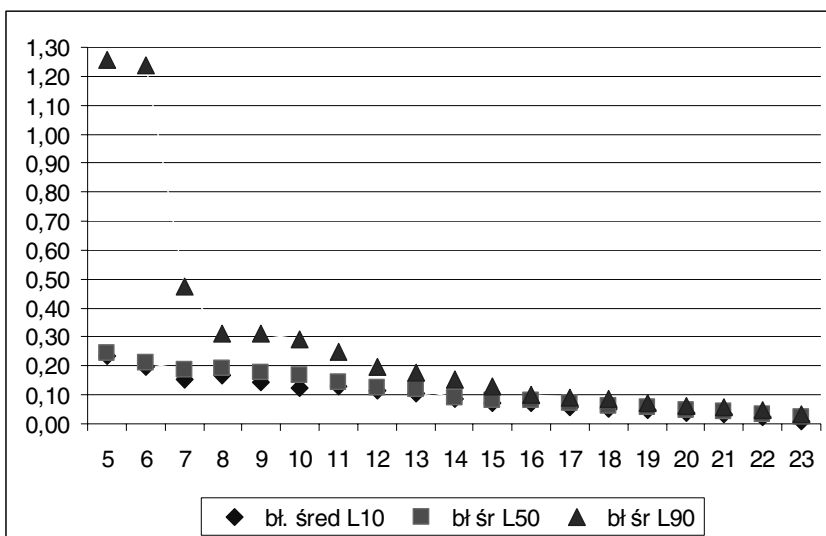
W analizach uwzględniono badania, w których pitting wystąpił na obracającej się górnej próbce. Jeżeli wykruszenie wystąpiło na jednej z kul dolnych bądź na bieżni, dany wynik odrzucano. W każdym biegu badawczym używano nowych kulek, nowych stożków oraz środków smarowych. Wystąpienie pittingu na bieżni powodowało konieczność wymiany jej na nową.

Kształt i wymiary stożka przedstawiono na **Rys. 3.6**.

Należy zaznaczyć, że średnica obtaczania się stożka po kulkach dolnych jest identyczna, jak w przypadku kulki, która używana jest do standardowych badań wpływu środka smarowego na powierzchniowe zużycie zmęczeniowe.

Każdy z eksperymentów obejmował 24 biegi badawcze. Dla każdego eksperymentu miary trwałości zmęczeniowej  $L_{10}$ ,  $L_{50}$  i  $L_{90}$  zostały obliczone z wykorzystaniem parametrów rozkładu Weibulla wyznaczonych dla różnych licznosci prób obejmujących od 5 do 24 kolejnych biegów badawczych.

Punktem wyjścia analizy rozrzutu była ocena wartości średnich błędów względnych (w odniesieniu do 24 biegów badawczych) prognozy powierzchniowej trwałości zmęczeniowej wyliczonych w zależności od liczby biegów badawczych dla kwantyli:  $L_{10}$ ,  $L_{50}$  i  $L_{90}$  (Rys. 1).



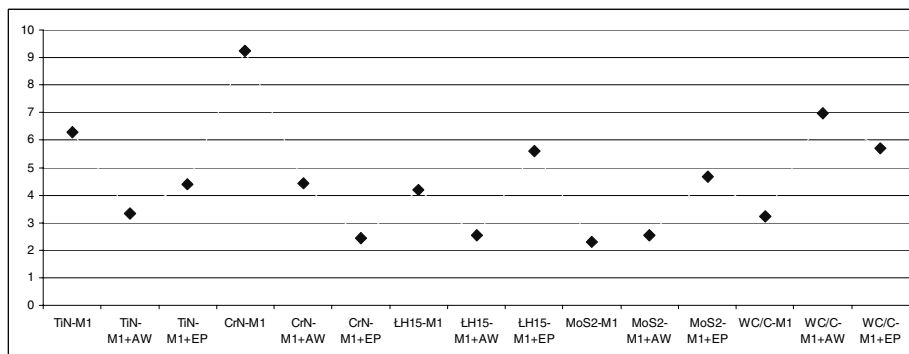
**Rys. 1. Wartości średnie błędów prognoz powierzchniowej trwałości zmęczeniowej w zależności od liczby biegów badawczych dla kwantyli: 10, 50 i 90**

Fig. 1. Prediction errors average values of the friction fatigue life depending on number of research courses for quantiles: 10, 50 and 90

Analiza błędów dla poszczególnych eksperymentów oraz wartości błędów średnich daje przesłankę skrócenia liczby biegów badawczych eksperymentu badawczego, w zależności od założonego dopuszczalnego błędu.

## ANALIZA ROZRZUTÓW POWIERZCHNIOWEJ TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

Na **Rys. 2** przedstawiono rozrzuty  $L_{90}/L_{10}$  powierzchniowej trwałości zmęczeniowej obliczone (na podstawie 24 biegów badawczych), dla różnych materiałów oraz środków smarowych.



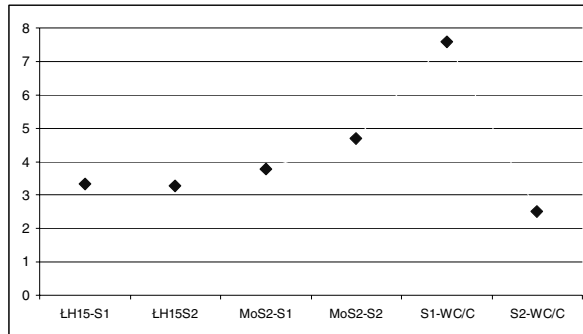
**Rys. 2. Rozrzut trwałości zmęczeniowej ( $L_{90}/L_{10}$ ) dla różnych powłok stożka przy smarowaniu olejem mineralnym bez dodatków (M1) oraz z dodatkami (EP, AW)**

Fig. 2. Values of friction fatigue life scatter ( $L_{90}/L_{10}$ ) for different materials of coating and mineral oils: without additives (M1), with additives (AW, EP)

Wyniki przedstawione na **Rysunku 2** pokazują, że rozrzuty trwałości zmęczeniowej w większości przypadków utrzymują się na poziomie 2 do 5. Większe wartości rozrzutu (ponad 5) zanotowano dla stożka bez powłoki współpracującego tarciowo w obecności smaru z dodatkiem EP, stożka z powłoką TiN, smar bez dodatków – rozrzut ponad 6, stożka z powłoką WC/C i smarów z dodatkami odpowiednio: EP – rozrzut 6, AW – rozrzut 7, w przypadku stożka z powłoką CrN i smaru bez dodatków rozrzut przekroczył 9. W przypadku olejów syntetycznych (**Rys. 3**) wartości rozrzutów dla badanych powłok mieściły się w granicach 2–5 z wyjątkiem powłoki WC/C i oleju PAO8 (S1), gdzie rozrzut przekroczył wartość 7. Znacznie gorsze wyniki zanotowano dla olejów roślinnych: słonecznikowego (R2), sojowego (R3), rycynowego (R4) (**Rys. 4**), dla których rozrzut trwałości wyniósł od 5 do blisko 11.

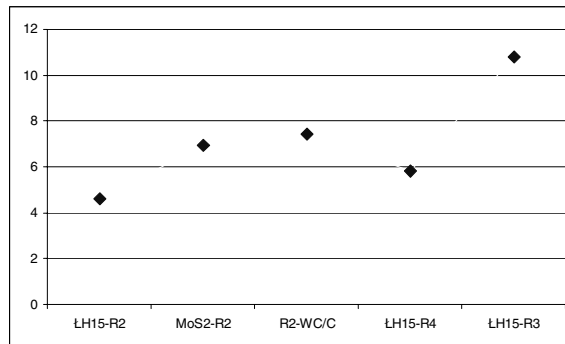
Analiza rozrzutów powierzchniowej trwałości zmęczeniowej oszacowanej na podstawie badań modelowych węzłów tarcia nie wykazała istotnego wpływu skojarzenia materiałowego i smaru na wartość rozrzu-

tu. Zaobserwowano w przypadku olejów roślinnych występowanie większych rozrzutów (średnia wartość 6,6) niż dla olejów mineralnych (średnia wartość 4,8) i syntetycznych (średnia wartość 4,2). Analizując wpływ materiałów, mniejsze rozrzuty trwałości zmęczeniowej zanotowano dla stożka bez powłoki (4,3) z powłoką TiN (4,6) oraz z powłoką MoS<sub>2</sub> (4,4) niż stożka z powłoką WC/C (5,7) oraz powłoką CrN (6).



**Rys. 3. Wartości rozrzutów trwałości zmęczeniowej ( $L_{90}/L_{10}$ ) w badaniach olejów syntetycznych**

Fig. 3. Values of friction fatigue life scatter ( $L_{90}/L_{10}$ ) for different synthetic oils



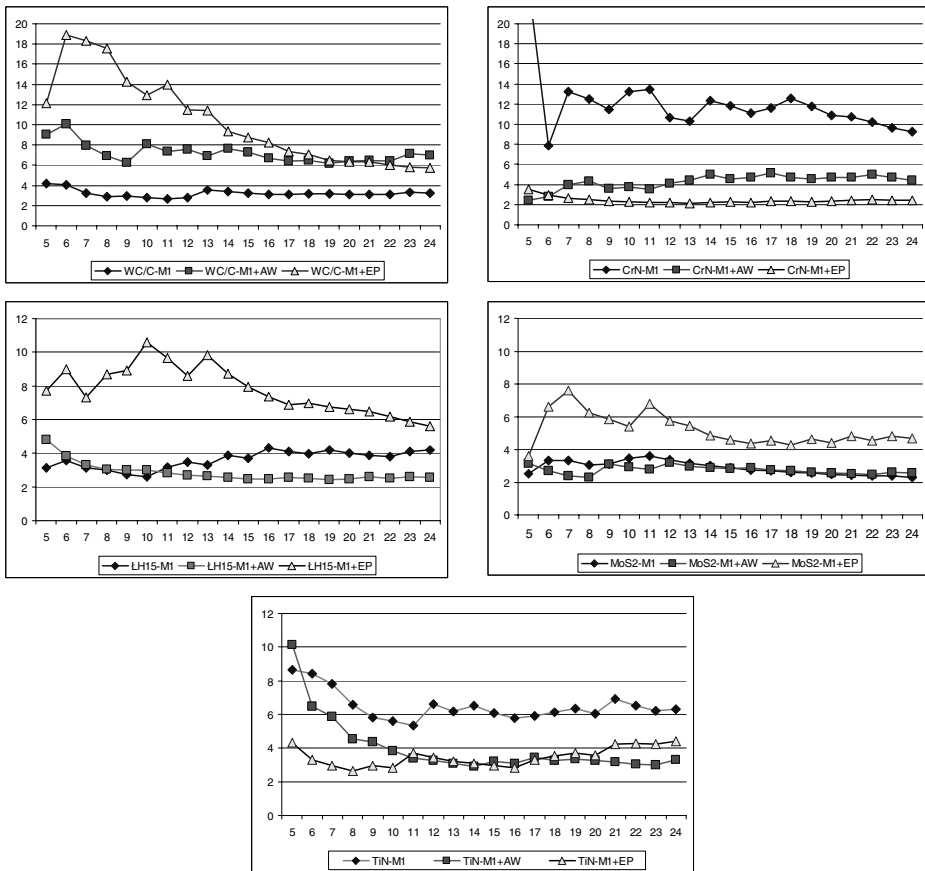
**Rys. 4. Wartości rozrzutów trwałości zmęczeniowej ( $L_{90}/L_{10}$ ) w badaniach olejów roślinnych**

Fig. 4. Values of friction fatigue life scatter ( $L_{90}/L_{10}$ ) for different vegetable oils



## ANALIZA WPŁYWU LICZNOŚCI PRÓBY NA ROZRZUT POWIERZCHNIOWEJ TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

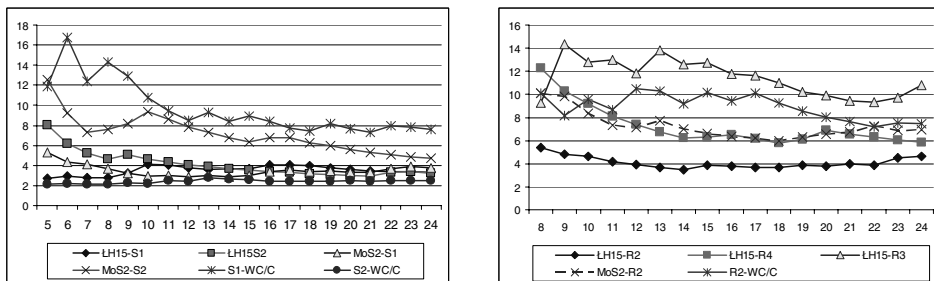
Na bazie wyników przeprowadzonych badań dokonano analizy wpływu zmniejszenia liczby biegów badawczych na prognozę powierzchniowej trwałości zmęczeniowej. Dokonano analiz trwałości obliczonej na podstawie  $n$  ( $n = 5 \dots 23$ ) biegów badawczych z odniesieniem wyniku do prognozy trwałości obliczonej na podstawie 24 biegów badawczych.



**Rys. 5** Wpływ liczności próby na oszacowaną wartość rozrzutów powierzchniowej trwałości zmęczeniowej, dla różnych skojarzeń materiałowych przy smarowaniu olejem mineralnym bez dodatków (M1) oraz z dodatkami (EP, AW)

**Fig. 5.** Number of research courses influence on estimated value of friction fatigue life for different materials of friction contact lubricated by the use of mineral oils: without additives (M1), with additives (AW, EP)

W przeprowadzonych badaniach dokonano analizy wpływu zmniejszenia liczby biegów badawczych na rozrzut powierzchniowej trwałości zmęczeniowej –  $L_{90}/L_{10}$ . Na **Rysunkach 5 i 6** przedstawiono rozrzuty powierzchniowej trwałości zmęczeniowej w zależności od liczności próby, obliczone dla różnych skojarzeń materiałowych i środków smarowych.



**Rys. 6.** Wpływ liczności próby na oszacowaną wartość rozrzutów powierzchniowej trwałości zmęczeniowej, dla różnych skojarzeń materiałowych przy smarowaniu olejami: a) syntetycznymi, b) roślinnymi

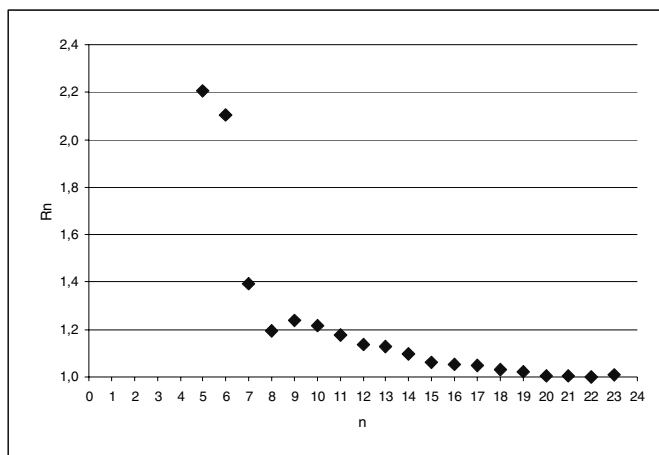
Fig. 6. Number of research courses influence on estimated value of friction fatigue durability for different materials of friction contact lubricated by the use of: a) synthetic oil, b) vegetable oil

Przedstawione na **Rysunkach 5 i 6** wartości praktycznie we wszystkich analizowanych przypadkach wskazują pewną prawidłowość. Rozrzuty trwałości zmęczeniowej, obliczone na podstawie wyników eksperymentu o różnej liczności biegów badawczych, w większości przypadków wykazują wraz ze wzrostem liczby biegów zbieżność do poziomu rozrzutu obliczonego dla eksperymentu o 24 biegach badawczych.

W celu przedstawienia zmian rozrzutu powierzchniowej trwałości zmęczeniowej przy zmniejszeniu liczby biegów badawczych wprowadzono współczynnik  $R_n$  stanowiący iloczyn rozrzutu przy  $n$  próbach do rozrzutu przy 24 biegach.

Prawidłowość zbliżania się rozrzutu wraz ze wzrostem liczby biegów do rozrzutu uzyskiwanego przy 24 biegach przedstawiono na **Rys. 7**, wyliczając dla każdego  $n$ , oznaczającego liczbę biegów badawczych eksperymentu, średni iloraz rozrzutów jako:

$$R_n = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{L_{n,i,90}}{L_{n,i,10}} \frac{L_{24,i,10}}{L_{24,i,90}}}{k}; \text{ gdzie: } k - \text{liczba eksperymentów o liczności próby } n.$$



**Rys. 7. Wartości średnie ilorazów rozrzutów powierzchniowej trwałości zmęczeniowej dla eksperymentów o liczności próby  $n$  (5 .. 23) i eksperymentów o liczności próby wynoszącej 24 biegi badawcze**

Fig. 7. Average values of the quotient of friction fatigue life scatter for experiment of  $n$  courses, (where  $n = 5..23$ ) and experiment of 24 courses

Jak wynika z przedstawionych na **Rys. 7** wyników różnicę rozrzutów trwałości zmęczeniowej wyliczonej na podstawie eksperymentów o  $n$  biegach i eksperymentów o 24 biegach badawczych mniejszą od 10% zanotowano dla liczności prób  $n \geq 15$ .

## PODSUMOWANIE

Przeprowadzone analizy wyników badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej uwzględniające badanie rozrzutu, wynikającego z różnicy czasu pracy do uszkodzenia odpowiednio: 10% i 90% badanych węzłów tarcia, wykazały, że proces opracowania prognozy może zostać skrócony poprzez ograniczenie liczby biegów badawczych.

Rozrzut powierzchniowej trwałości zmęczeniowej wyznaczony na podstawie 24 biegów badawczych w przeprowadzonym eksperymencie różnił się w zależności od badanego skojarzenia materiałowego od 2 do 7, skrócenie liczby biegów badawczych do 14 powoduje zmianę wyznaczenia tego rozrzutu o ok. 10%.

Zaproponowana metoda szacowania błędu prognozy powierzchniowej trwałości zmęczeniowej oraz współczynnika określającego błąd wyznaczenia rozrzutu spowodowanych zmniejszeniem liczby biegów badawczych, pozwalają na znaczące skrócenie czasu eksperymentu. Skró-

cenie czasu eksperymentu powinno być ustalane dla różnych skojarzeń materiałowych i zastosowanych środków smarowych węzła tarcia w zależności od przyjętego dopuszczalnego poziomu błędu.

Przedstawione analizy zostały opracowane na podstawie 37 serii eksperymentów badawczych wykonanych na aparacie czterokulowym, ich uogólnienie jest warunkowane dalszymi badaniami.

## LITERATURA

1. Piekoszewski W., Ruta R., Trzos M.: Ocena możliwości ograniczenia liczby powtórzeń w badaniach trwałości zmęczeniowej. *Tribologia* 3/2009 (225), s. 197–230.
2. Waligóra W.: Rozrzut powierzchniowej trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 2002.
3. Kolar D., Libera M., Waligóra W.: Ocena wpływu dodatku smarnościewego (EP) do oleju przekładniowego na powierzchniową trwałość zmęczeniową elementów maszyn. *Tribologia* 3/2000(171), s. 391–398.
4. Piekoszewski W.: Wpływ oleju bazowego na powierzchniową trwałość zmęczeniową modelowego tocznego węzła tarcia // *Tribologia* – 2007, nr 3, s. 105–119.
5. Waligóra W.: Miara rozrzutu trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych. *Problemy Eksploatacji* 4/1997 (27) s. 573–583.
6. Michalczewski R., Piekoszewski W., Wulczyński J.: Metoda badania powierzchniowej trwałości zmęczeniowej elementów z powłokami przeciwdrobnoustrojowymi. *Problemy Eksploatacji*, vol. 51 (4/2003), s. 91÷99.

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

## Summary

**The article presents the research results of value changes of contact fatigue life scatter caused by changes of the number of research courses in the tribological experiment. The presented work is the continuation of the research concerning friction contact fatigue life estimation that was described in the article [L. 1]. The experimental research was conducted using the modernised four-ball apparatus in the Tribological Research Laboratory of the Institute for Sustainable Technologies – NRI in Radom.**

**The article presents the method developed for the estimation of the number of research courses influence on the friction contact fatigue life scatter prediction. Additionally, fatigue life scatter for different materials of friction contact and lubricants was analysed. The presented results and analysis proved the possibility of shortening the research procedure by reducing the number of courses.**