

Witold PIEKOSZOWSKI* , Ryszard RUTA* , Magdalena TRZOS*

OCENA MOŻLIWOŚCI OGRANICZENIA LICZBY POWTÓRZEŃ W BADANIACH TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

ANALYSIS OF THE RESULTS OF CONVERGENCE IN FATIGUE DURABILITY RESEARCH

Słowa kluczowe:

powierzchniowa trwałość zmęczeniowa, pitting, zbieżność wyników, błąd prognozy

Key-words:

fatigue durability, pitting, results convergence, prediction error

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań ukierunkowanych na ocenę prognoz trwałości zmęczeniowej węzła tarcia. Analizie poddano wyniki badań pittingu. Zgodnie z procedurą badanie tego typu zużycia obejmuje

* Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Pułaskiego 6/10, 260-600 Radom, tel. (048) 364-42-41.

wykonanie 24 biegów badawczych, co wymaga znacznego nakładu czasu oraz poniesienia znaczących kosztów związanych z eksperymentem. Głównym celem badań było oszacowanie możliwości skrócenia cyklu badawczego przy zachowaniu zadanego poziomu błędu. Badania eksperymentalne zrealizowano na zmodernizowanym stanowisku czterokulowym w Laboratorium Badań Tribologicznych ITeE – PIB. Przeprowadzono 37 serii eksperymentów badawczych, dla różnych skojarzeń materiałowych i środków smarowych. Jako kryterium oceny zbieżności wyników przyjęto 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.

WPROWADZENIE

Problem powierzchniowego zużycia zmęczeniowego dotyczy szerokiej klasy maszyn i urządzeń, w których współpracują elementy poddawane cyklicznym obciążeniom. W wyniku zmęczenia obserwowany jest wzrost mikrouszkodzeń i szczelin prowadząc w rezultacie do utraty spójności elementu. Dotyczy to przede wszystkim węzłów z elementami tocznymi oraz połączeń poddawanych wibracjom i jest głównym czynnikiem degradacji własności użytkowych obiektów, do których należą między innymi elementy łożysk tocznych, przekładni, mechanizmów rozrządów. Wysoko obciążone węzły tribologiczne, w których występuje smarowany styk skoncentrowany, narażone są na powierzchniowe zużycie zmęczeniowe, które doprowadza do awarii kinematycznego węzła tarcia najczęściej wykluczającej urządzenie z eksploatacji na dłuższy czas.

Obserwowany systematyczny wzrost zainteresowania poprawą niezawodności, trwałości oraz parametrów jakościowych, w tym uwzględniających pracę węzłów toczno-ślizgowych w warunkach ekstremalnych powoduje intensywny rozwój badań ukierunkowanych na zwiększenie powierzchniowej trwałości zmęczeniowej [L. 1–6].

Trwałość zmęczeniową (typu pitting) elementów maszyn, mimo zapewnienia tych samych warunków pracy, jednakowej konstrukcji elementów, niezmiennych parametrów pracy charakteryzuje bardzo duży rozrzut [L. 7]. Źródło tego problemu tkwi w ogromnej ilości czynników determinujących trwałość elementów maszyn warunkowaną zmęczeniem

powierzchniowym. Podstawą oceny przydatności nowych rozwiązań, w tym materiałów i środków smarowych do zastosowań na elementy narażone na powierzchniowe zużycie zmęczeniowe są wyniki badań eksperymentalnych. W praktyce stosowanych jest wiele metod i urządzeń do badania powierzchniowej trwałości zmęczeniowej. Do najczęściej stosowanych stanowisk należą: zmodernizowany aparat czterokulowy, urządzenia typu dwie rolki–walec, trzy kulki–walec, stanowiska dwurołkowe, stanowisko FZG oraz rozwiązania własnej konstrukcji [L. 8–11]. Oceny trwałości zmęczeniowej dokonuje się w praktyce na bazie badań statystycznych wymagających licznych powtórzeń biegów badawczych. Paradoksalnie im trwalszy i bardziej odporny na zmęczenie powierzchniowe węzeł tarcia tym dłuższy czas badań i większe poniesione koszty. Naturalnym więc jest pytanie o możliwość skrócenie biegów badawczych przy zachowaniu zadanego poziomu dokładności i wiarygodności uzyskanych wyników. W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczące tej problematyki.

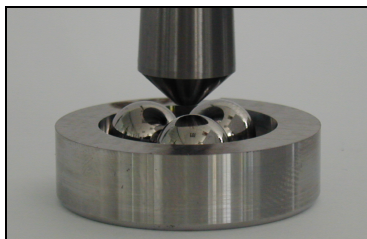
PRZEDMIOT I METODYKA BADAŃ

Przedmiotem analizy były wyniki badań eksperymentalnych trwałości zmęczeniowej węzłów tarcia przeprowadzonych na zmodernizowanym stanowisku czterokulowym w Laboratorium Badań Tribologicznych ITeE-PIB, według oryginalnej procedury uwzględniającej wymogi ujęte w brytyjskiej normie IP 300/82 (*Rolling contact fatigue tests for fluids in a modified four-ball machine*).

Węzeł tarcia (**Rys. 1**) stanowił stożek w styku z trzema kulkami, elementy trące wykonane były ze stali 100CrMn6. Badania przeprowadzono dla stożków bez powłoki oraz z powłokami: TiN, CrN, MoS₂, WC/C, nanoszonymi w procesach PVD. Jako środek smarny użyto: olej mineralny bez dodatków smarnościowych (**M1**), olej mineralny z dodatkami typu AW (**M2**) oraz typu EP (**M3**), oleje syntetyczne PAO 8 (**S1**) i PAG 8 (**S2**), oleje roślinne rafinowane: rzepakowy (**R1**), słonecznikowy (**R2**), sojowy (**R3**), rycynowy (**R4**) oraz olej ekologiczny ELAS B (**E1**) i maszynowy (**L1**). W **Tabeli 1** przedstawiono matrycę przebadanych w ramach eksperymentów skojarzeń i środków smarowych.

Dla poszczególnych skojarzeń materiałowych i środków smarowych przeprowadzono serię 24 biegów badawczych przy stałym obciążeniu (392 daN) i stałej prędkości obrotowej (1450 obr/min.). Rejestrowano

czas do wystąpienia pittingu. Trwałość modelowego węzła tarcia jest zmienną losową, w przypadku powierzchniowej trwałości zmęczeniowej podlegająca rozkładowi Weibulla [L. 12]



Rys. 1. Fotografia węzła tarcia

Fig. 1. Friction contact photo.

Tabela 1. Przeprowadzone eksperymenty

Table 1. Experiments performed

środek smarowy \ powłoka	bez powłoki	TiN,	CrN,	MoS ₂ ,	WC/C
M1,	X,X,X	X	X	X	X
M2	X	X	X	X	X
M3	X	X	X	X	X
S1	X			X	X
S2	X			X	X
R1	X	X	X	X	X
R2	X			X	X
R3	X				
R4	X				
E1	X			X	X
L1	X				

Zgodnie z przyjętą metodyką, wyznaczono dla każdej serii badań 20 modeli opisanych trójparametrowymi rozkładami Weibulla, odpowiednio po n próbach, gdzie $n = 5, 6, \dots, 24$. Umowne wartości trwałości węzłów wyznaczano na podstawie dystrybuanty rozkładów. Jako wskaźniki trwałości przyjęto kwantyle L_{10} i L_{90} oznaczające odpowiednio trwałość badanych węzłów tarcia; 90% oraz 10%. Wyznaczano również kwantyl L_{50} oznaczający przeciętną trwałość węzła.

Podjęte prace zostały ukierunkowane na zbadania możliwości zmniejszenia liczby biegów badawczych oraz oszacowanie błędu wynikającego ze zmniejszenia liczebności próby.

Jako kryterium oszacowania tego błędu przyjęto różnicę prognozy trwałości skojarzenia, dokonanej na podstawie n prób w stosunku do wartości prognozowanej na podstawie 24 prób.

Przyjęto błąd względny prognozy B zdefiniowany jako różnicę prognozy wartości czasu pracy skojarzenia scharakteryzowanego wartościami trwałości, obliczonej na podstawie n ($n = 5, 6, \dots, 23$) kolejnych prób w stosunku do wartości trwałości prognozowanej na podstawie 24 prób.

$$B_k^n = \frac{L_k^n - L_k^{24}}{L_k^{24}} 100\%$$

gdzie: k – numer oznaczający rząd kwantyla odpowiednio 10, 50, 90,

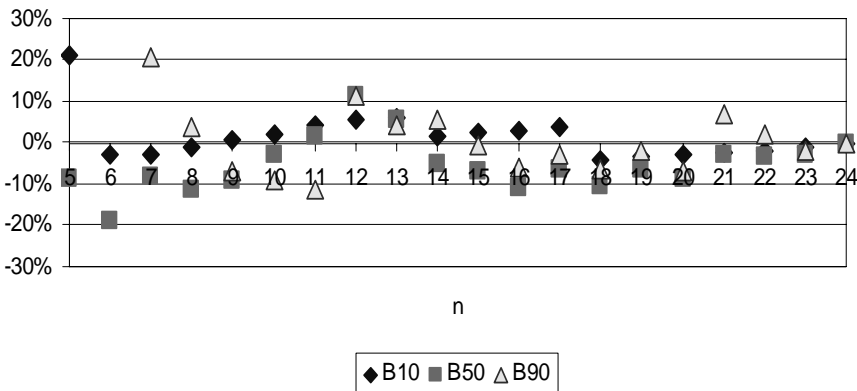
n – liczba prób,

L_k^n – czas pracy do uszkodzenia (trwałość).

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

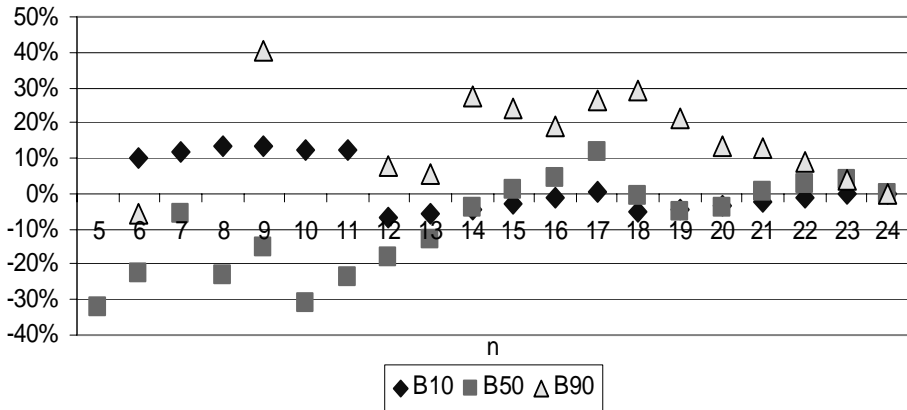
W pierwszej kolejności zbadano zbieżność kwantyli L_{10} , L_{50} i L_{90} (mierzoną wielkością błędu względnego) w zależności od liczby wyników kolejnych testów użytych do wyznaczenia parametrów rozkładu Weibulla.

Na **Rys. 2–6** przedstawiono wartości błędów prognoz trwałości oszacowanych na podstawie n prób w odniesieniu do prognozy wyznaczonej na podstawie 24 biegów badawczych dla wybranych różnych skojarzeń materiałowych i środków smarowych.



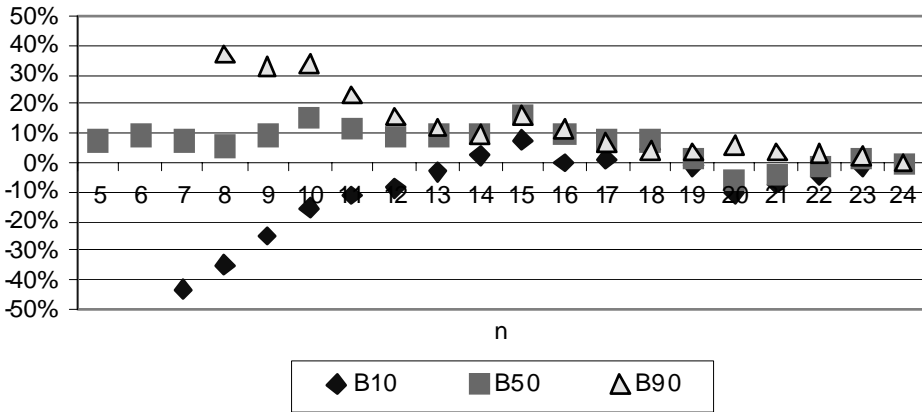
Rys. 2. Wartości błędów względnych wyliczenia czasu pracy do uszkodzenia wężła tarcowego dla kwantyli 10, 50, 90 skojarzenia: stożek (TiN) kulki (stal ŁH15), smar olej mineralny z dodatkami typu AW

Fig. 2. Relative errors of time to fatigue for 10, 50 and 90 quintiles of friction contacts: cone (TiN), balls (steel), lubricant (mineral oil with AW additives)



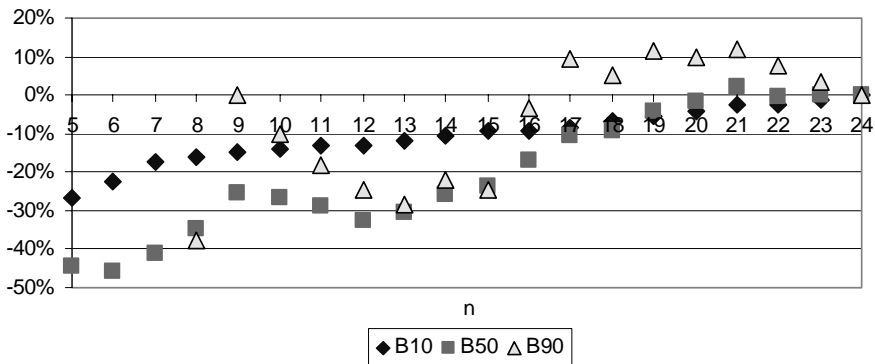
Rys. 3. Wartości błędów względnych wyliczenia czasu pracy węzła tarcowego do uszkodzenia dla kwantyli 10, 50, 90 skojarzenia: stożek (CrN) kulki (stal ŁH 15), olej mineralny (źródło: opracowanie własne)

Fig. 3. Relative errors of time to fatigue for 10, 50 and 90 quintiles of friction contacts: cone (CrN), balls (steel), lubricant (mineral oil)



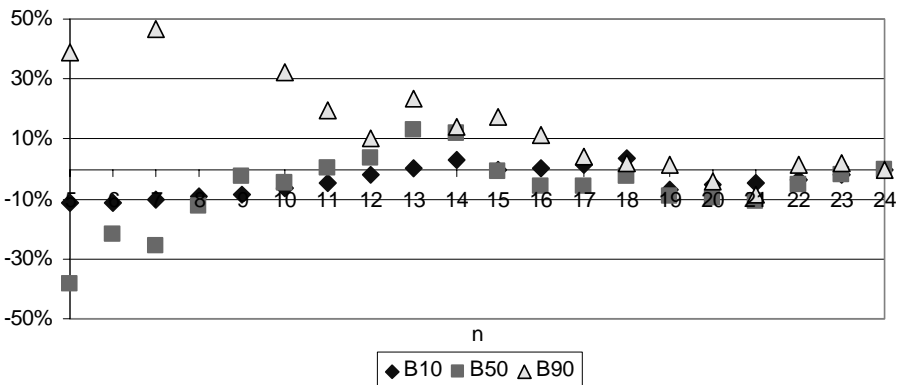
Rys. 4. Wartości błędów względnych wyliczenia czasu pracy węzła tarcowego do uszkodzenia dla kwantyli 10, 50, 90 skojarzenia stożek (stal ŁH 15) kulki (stal ŁH 15), smar olej rycynowy

Fig. 4. Relative errors of time to fatigue for 10, 50 and 90 quintiles of friction contacts: cone (steel), balls (steel), lubricant (castor oil)



Rys. 5. Wartości błędów względnych wyliczenia czasu pracy węzła tarcowego do uszkodzenia dla kwantyli 10, 50, 90 skojarzenia stożek (MoS_2) kulki (stal ŁH 15), olej rzepakowy

Fig. 5. Relative errors of time to fatigue for 10, 50 and 90 quintiles of friction contacts: cone (MoS_2), balls (steel), lubricant (rape oil)



Rys. 6. Wartości błędów względnych wyliczenia czasu pracy węzła tarcowego do uszkodzenia dla kwantyli 10, 50, 90 skojarzenia stożek (WC/C) kulki (stal ŁH 15), smar olej syntetyczny

Fig. 6. Relative errors of time to fatigue for 10, 50 and 90 quintiles of friction contacts: cone (WC/C), balls (steel), lubricant (synthetic oil)

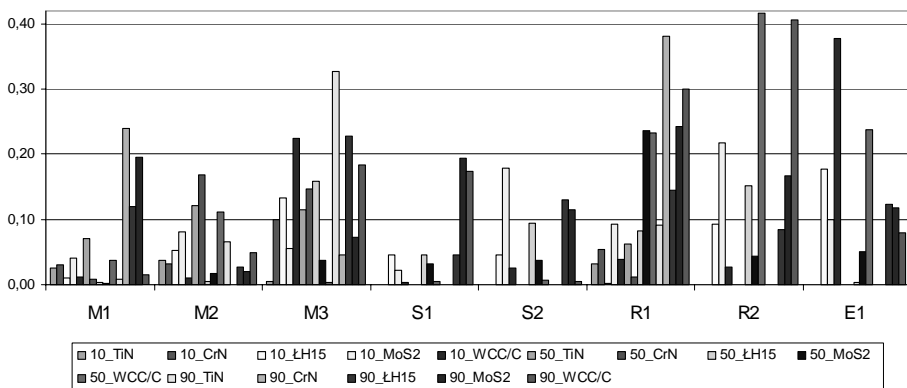
Z przeprowadzonych badań wynika, że wyznaczona na podstawie liczby biegów badawczych większej od 14 prognoza czasu do uszkodzenia 10% badanych obiektów (kwantyl L_{10}) jest obarczona błędem względnym mniejszym od $\pm 10\%$. Analizując błąd B_{10}^{15} , wartości większe od 10% zanotowano w 5 z 37 zbadanych węzłów tarcia, największy błąd 38% otrzymano dla węzłów stal-powłoka WC/C i olej ekologiczny,

w dwóch przypadkach błąd przekroczył 20% i wyniósł 22% – dla węzłów stal – powłoka WC/C i oleju mineralnego z dodatkami typu EP oraz stal–powłoka MoS₂ i olej słonecznikowy.

Większe wartości błędów zanotowano w przypadku kwantyla L₅₀ i L₉₀, przy czym jego wielkość zależy od badanego skojarzenia i środka smarowego. W większości (28) ze zbadanych przypadków błąd B_{50}^{15} nie przekroczył 10%, największy błąd B_{50}^{15} zanotowano dla węzła: stal–powłoka i olej słonecznikowy (42%), błędy powyżej 20% dla węzłów stal–powłoka WC/C, olej ekologiczny (24%); stal–powłoka MoS₂ (24%) oraz stal–powłoka WC/C, olej rzepakowy (23%).

Największe wartości błędów zaobserwowano dla kwantyla L₉₀. Błąd B_{90}^{15} do 10% otrzymano dla 17 wyników, w 7 z 37 eksperymentów błąd przekroczył 15%, a 30% w 3 przypadkach dla węzłów: stal–powłoka WC/C, olej słonecznikowy (41%), stal–powłoka CrN, olej rzepakowy (38%), stal–powłoka TiN, olej mineralny z dodatkami typu EP (33%). Średnie błędy z 37 eksperymentów wyniosły odpowiednio: B_{90}^{15} – 13%, B_{50}^{15} – 8%, B_{10}^{15} – 7%

Na wykresie (**Rys. 7**) przedstawiono wartości błędów (przedstawione jako moduł wartości) dla środków smarowych użytych w węzłach z różnymi skojarzeniami materiałowymi, pominięto wyniki dla oleju sojowego (R3), rycynowego (R4) oraz maszynowego (L1), ponieważ były one zbadane tylko dla jednego typu skojarzenia materiałowego.

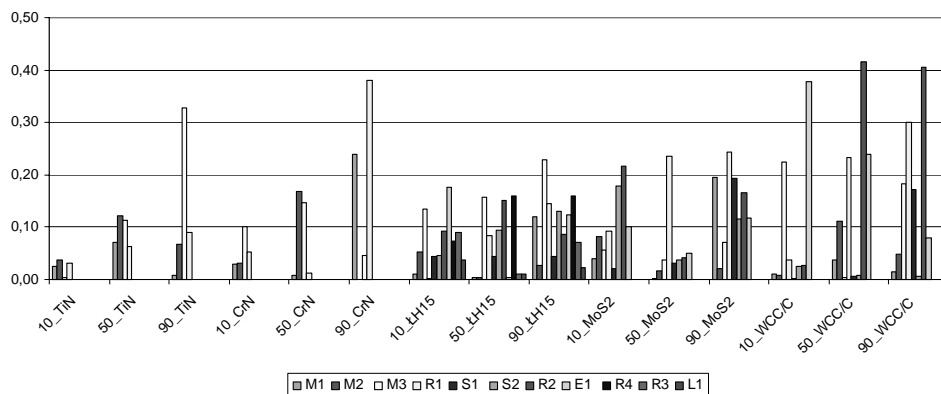


Rys. 7. Wartości błędów dla poszczególnych środków smarowych. Liczba przed symbolem materiału stożka oznacza kwantyl, dla którego wyliczono błąd

Fig. 7. Relative errors of time to fatigue for different lubricants. The number in front of cone's material symbol means the quantile

Na podstawie analizy wyników można stwierdzić, że najmniejsze błędy uzyskano w przypadku oleju mineralnego bez dodatków oraz z dodatkami typu AW, średni błąd dla tych środków smarowych wyniósł 5%. Dobre wyniki uzyskano również dla olejów syntetycznych, średni błąd dla S1 – 6%, dla S2 – 7%. Najgorszy wynik – błąd średni 18% zanotowano dla oleju słonecznikowego (R2).

Wartości błędów dla materiałów stożka w węzłach z różnymi środkami smarowymi przedstawiono na **Rys. 8**



Rys. 8. Wartości błędów dla materiału stożka. Liczba przed symbolem materiału stożka oznacza kwantyl, dla którego wyliczono błąd

Fig. 8. Relative errors of time to fatigue for different cone's materials. The number in front of cone's material symbol means the quintile

Analiza wyników pod kątem błędu prognozy popełnianego dla poszczególnych skojarzeń pokazuje, że najniższą zbieżność uzyskano dla materiału stożka stal z powłoką WC/C, w tym przypadku średni błąd wyniósł 12%, dla stożka z powłokami CrN i MoS₂ błędy wyniosły po 10%, najlepszy wynik uzyskano dla stożka bez powłoki oraz z powłoką TiN; błędy po 8%.

Wszystkie skojarzenia materiałowe uwzględnione w eksperymencie zbadano przy zastosowaniu czterech środków smarowych: oleju mineralnego bez dodatków (M1) z dodatkami AW (M2), z dodatkami EP (M3) oraz oleju rzepakowego (R1). Dlatego też przeanalizowano wpływ rodzaju skojarzenia na średni błąd prognozy uwzględniając w wyliczeniach wyniki badań dla węzłów pracujących przy smarowaniu tymi środkami. Tak obliczone średnie błędy prognoz przedstawiono w **Tab. 2a**, dla porównania w **Tab. 2b** zawarto średnie błędy dla środków smarowych.

Tabela 2. Średnie błędy prognoz: a) dla materiału stożka b) dla środka smarowego
 Table 2. Relative prognosis errors : a) the cone, b) lubricating oil

a)

materiał	średni błąd
ŁH15	8%
TiN	8%
CrN	10%
MoS2	9%
WC/C	10%

b)

śr. smarowy	średni błąd
M1	5%
M2	5%
M3	12%
R1	13%

Porównanie wyników zestawionych w **Tab. 2** wskazuje na niewielkie różnice średnich błędów prognoz trwałości, wynikające ze skrócenia liczby biegów badawczych, dla poszczególnych materiałów stożka współpracującego z kulkami stalowymi. Znacznie większe różnice średnich błędów dla prognozy powierzchniowej trwałości zmęczeniowej zanotowano analizując wpływ środka smarowego na wartość prognozy.

PODSUMOWANIE

Badania możliwości skrócenia cyklu badawczego, w laboratoryjnych testach powierzchniowej trwałości zmęczeniowej skojarzeń materiałowych współpracujących tarciovo z zastosowaniem środków smarowych, potwierdziły zasadność ograniczenia liczby biegów badawczych. Na podstawie przeanalizowanych wyników przyjęto zmniejszenie liczby prób do 15. Przeprowadzone badania pokazały, że prognozy na podstawie skróconego eksperymentu nie różnią się znacząco od prognoz trwałości uzyskanych na podstawie 24 prób, średni błąd prognozy obliczony na podstawie wszystkich (37) eksperymentów wyniósł 10%, co przy znaczących rozrzutach wyników badań pittingu można uznać za dobre przybliżenie. Uzyskane wyniki pokazały, że na wartość błędu ma wpływ rodzaj skojarzenia oraz środek smarowy. W wyniku przeprowadzonych analiz wykazano, że zbieżność wyników w znacznie większym stopniu zależy od środka smarowego niż skojarzenia materiałowego pary trącej. Należy jednak zwrócić uwagę, że analizowane wyniki pochodziły z badań pittingu przeprowadzonych na jednym czterokulowym stanowisku badawczym, a potwierdzenie możliwości ich uogólnienia wymaga dalszych badań.

LITERATURA

1. Rinsberg J : Life prediction of rolling contact fatigue crack initiation. *International Journal of Fatigue* 2001, 23 p. 576–586.
2. Stewart S., Ahmed R.: Rolling contact fatigue of surface coatings – a review. *Wear*. 2002, t. 253, s. 1132–1144.
3. Rico E.,F., Minondo I., Cuervo D., G.: Rolling contact fatigue life of AISI 52100 steel balls with mineral and synthetic polyester lubricants with PTFE nanoparticle powder as an additive. *Wear* 266 (2009) p. 671–677
4. Michalczewski R., Piekoszewski W., Szczerek M.: Wpływ dodatków typu AW/EP na powierzchniową trwałość zmęczeniową elementów z powłoką TiN. *Tribologia*. 2003, nr 5, s. 99÷111.
5. Michalczewski R., Piekoszewski W.: Wpływ dodatków AW/EP Wpływ dodatków AW/EP do olejów na zacieranie i powierzchniową trwałość zmęczeniową elementów pokrytych powłoką WC/C. *ZEM. Z.* 3 (146), vol. 41, 2006, s. 67–80.
6. Piekoszewski W.; Wpływ oleju bazowego na powierzchniową trwałość zmęczeniową modelowego tocznego wężła tarcia. *Tribologia* 3/2007 (213), s. 105÷119.
7. Libera M., Piekoszewski W., Waligóra W.: Wpływ warunków pracy elementów poddawanych cyklicznym obciążeniom stykowym na rozrzut powierzchniowej trwałości zmęczeniowej. *Tribologia* 3/2005 (201) s. 205 –215
8. Podgornik B., Jacobson S., Hogmark S.: Influence of oil additives on the performance of DLC coatings. *Materiali in Technologie*. 2003, t. 37, s. 9 12
9. Gold P.W., Loos J.: Wear resistance of PVD-coatings in roller bearings. *Wear*. 2002, t. 253, s. 465–472.
10. Igartua A., Laucirica J., Aranzabe A., Leyendecker T., Lemmer O., Erkens G., Weck M., Hanrath G.: Application of low temperature PVD coatings in rolling bearings: tribological tests and experiences with spindle bearing
11. Kuhn M., Gold P.W., Loos J.: Influences on the durability of PVD-coatings in roller bearings. *Materiały 13th International Colloquium Tribology*, Esslingen (Niemcy), 15–17 stycznia 2002, s. 1797–1802.
12. Waligóra W.: Miara rozrzutu trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych. *Problemy Eksploatacji* 4'97 (27) s. 573– 583.

Recenzent:
Włodzimierz WALIGÓRA

Summary

The article presents the results of research carried out to estimate the convergence of friction contact fatigue durability predictions. The fatigue wear of the pitting type was analysed. According to the procedure, the research series encompass 24 research operations that are usually time-consuming and increase experiment costs. The major aim of the presented research was to estimate the possibilities of shortening the research procedure while the error of such approximation can be accepted. The experimental research was conducted on the modernized four-ball apparatus in the Tribological Research Laboratory of the Institute for Sustainable Technologies – NRI in Radom. The 37 research experiments were carried out for different materials and lubricants. As the criterion of research results, convergence the relative error of the shortened procedure fatigue prediction and 24 courses procedure prediction was established. The analysis of experimental results shows the premises to shorten the research procedure and arguments for research of factors that influence prediction convergence.