

**Michał LIBERA**

Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów  
Samochodowych

## **ESTYMACJA POWIERZCHNIOWEJ TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ ŁOŻYSK TOCZNYCH NA PODSTAWIE STANU WARSTWY WIERZCHNIEJ**

### **Słowa kluczowe**

Powierzchniowa trwałość zmęczeniowa, łożyska toczne, metody eksploracji danych.

### **Key words**

Surface fatigue life, roller bearings, data exploration methods.

### **Streszczenie**

W pracy przedstawiono propozycję modelu powierzchniowej trwałości zmęczeniowej (PTZ) stworzonego na podstawie wyników badań wałeczków łożysk NU309 do których analizy wykorzystano różne metody eksploracji danych. Badano parametry struktury geometrycznej, stan naprężeń własnych (zarówno mikronaprężeń jak i makronaprężeń), twardość i mikrotwardość, zawartość austenitu szczątkowego, stężenie węgla, dyspersję węglików oraz stopień zanieczyszczenia wtrąceniami niemetalicznymi warstwy wierzchniej (WW) wałeczków łożyskowych. Za miarę trwałości przyjęto ilość cykli wykonanych przez element toczny do powstania wykruszenia zmęczeniowego (pittingu). Do opracowania wyników badań stosowano analizę korelacji, analizę czynnikową, zbiorów przybliżonych oraz regresję wielokrotną.

### **WPROWADZENIE**

Zużycie zmęczeniowe jest rodzajem zużycia, w którym miejscowa utrata spójności i związane z nią ubytki materiału są spowodowane zmęczeniem materiału w wyniku cyklicznego oddziaływania naprężeń kontaktowych w warstwach wierzchnich kojarzonych elementów tarciovych. W warstwie wierzchniej poddanej cyklicznemu działaniu naprężeń kontaktowych odbywa

się inicjacja, wzrost i propagacja pęknięć zmęczeniowych (zużycie przez pitting). Początek ubytku materiału, wywołany zmęczeniem powierzchniowym, uważa się praktycznie za początek końcowego okresu przydatności części maszyny do eksploatacji. Typowymi częściami maszyn, w których może wystąpić zużycie zmęczeniowe są łożyska toczne i koła zębate [1].

Powierzchniowa trwałość zmęczeniowa (PTZ) tych elementów maszyn może być determinowana przez ogromną ilość czynników i to zarówno konstrukcyjnych, technologicznych, jak i eksploatacyjnych. Zużycie przez pitting nie jest procesem do końca poznany. Problemem do tej pory nie wyjaśnionym jest lokalizacja miejsca inicjacji pęknięć zmęczeniowych prowadzących dalej do wykruszeń materiału. Nawet jeśli rozważania ograniczone zostaną wyłącznie do czynników związanych z technologiczną warstwą wierzchnią to i tak analizie poddać należy zarówno parametry struktury geometrycznej powierzchni jak i własności fizyczno-chemiczne warstw podpowierzchniowych. Ponadto odporność warstwy wierzchniej na zmęczenie powierzchniowe może być w pewnym stopniu zależna od wartości średnich tych parametrów, ale także od ich zmienności czy wartości ekstremalnych dla rozpatrywanego obszaru warstwy wierzchniej. W konsekwencji analiza wpływu wybranych parametrów technologicznej warstwy wierzchniej na powierzchniową trwałość zmęczeniową obejmuje ogromną liczbę czynników, z których część jest wzajemnie powiązana.

## **METODYKA BADAŃ**

Podstawę do analiz stanowiły wyniki badań 43 wałeczków łożysk NU309 pochodzących od jednego producenta a więc nominalnie identycznych. Badano stan warstwy wierzchniej wałeczków oraz ich powierzchniową trwałość zmęczeniową.

Stan warstwy wierzchniej oceniano poprzez pomiary parametrów struktury geometrycznej powierzchni tocznych badanych wałeczków jak i własności fizyczno-chemicznych. Pomiary parametrów struktury geometrycznej powierzchni tocznej wałeczków wykonano profilografometrem Formtalysurf firmy Taylor Hobson. Naprężenia własne mierzono wykorzystując dyfraktometr rentgenowski STRAINFLAX-PSF firmy Rigaku. Stosowano metodę  $\sin^2\psi$ , w której przesunięcie linii dyfrakcyjnej jest miarą makronaprężeń  $N$ , a jej rozmycie (połówkowa szerokość linii dyfrakcyjnej -  $FWHM$ ) miarą mikronaprężeń  $\mu N$  w badanej warstwie. Korzystając z tego samego dyfraktometru wykonano również pomiary zawartości austenitu szczytkowego  $K$  w badanych wałeczkach. Pomiary stężenia węgla  $\%C$  przeprowadzano korzystając z mikroskopu skaningowego XL30 firmy Philips ze zintegrowanym

systemem mikroanalizy rentgenowskiej EDAX. Do oceny dyspersji węglików  $M_3C$  oraz stopnia zanieczyszczenia wtrąceniami niemetalicznymi  $WN$  zastosowano metodę opartą na metalografii ilościowej a wykorzystującą kamerę CCD sprzężoną z optycznym mikroskopem metalograficznym EPIQUANT i komputerem z oprogramowaniem do akwizycji i przetwarzania obrazu. Mikrotwardość mierzono metodą Vickersa ( $HV0,2$ ) na powierzchni tocznej wałeczków mikrotwardościomierzem Zwick 3212. Twardość mierzono metodą Rockwella ( $HRC$ ) na powierzchniach czołowych wałeczków, przyrządem firmy Łucznik.

W przypadku każdego z parametrów wykonano wiele pomiarów na każdym wałeczku (od 5 do 15 – w zależności od parametru). Po analizie rozkładu wartości poszczególnych parametrów traktowanych jako zmienna losowa, na podstawie testów Kołmogorowa-Smirnowa oraz  $\chi^2$  stwierdzono, że dla większość z nich nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu (poza parametrami związanymi z dyspersją węglików, które podlegają rozkładowi logarytmo- normalnemu). Przyjęto więc (częściowo za pracą [2]), iż miarą tendencji centralnej parametrów charakteryzujących stan warstwy wierzchniej będzie średnia arytmetyczna  $x_{sr}$ , miarą zmienności będzie odchylenie standardowe  $\sigma$  oraz współczynnik zmienności  $W$  mierzonych wartości parametrów a miarą wartości ekstremalnych – granice przedziału ufności  $x_d$  i  $x_g$  wyznaczone na poziomie istotności  $0,1$ . Zestawienie wszystkich rozpatrywanych 149 cech statystycznych 39 parametrów opisujących stan warstwy wierzchniej przedstawiono w tab 1.

Badania powierzchniowej trwałości zmęczeniowej przeprowadzono na stanowisku, w którym trzy pierścienie wewnętrzne łożyska walcowego typu NU(J) 309 współpracują z jednym elementem tocznym. Jako miarę trwałości badanego wałeczka przyjęto liczbę cykli obciążeń, którym poddany został dany wałeczek do wystąpienia na nim wykruszenia zmęczeniowego (wzrost poziomu drgań spowodowany wystąpieniem pittingu powodował wyłączenie stanowiska).

**Tab. 1. Zestawienie analizowanych własności warstwy wierzchniej waleczków**  
**Table 1. Analyzed surface layer properties of bearing rollers**

Grupa parametrów		Parametr	Oznaczenie	Analizowane cechy statystyczne					
				Miara tendencji centralnej	Miary rozrzutu wartości	Miary wartości ekstremalnych			
						Min	max		
Parametry struktury geometrycznej	Wertykalne	Ekstremalne	Maksymalna wysokość wzniesienia profilu chropowatości	$R_p$	$x_{sp}$	$\sigma, W$	-	$x_g$	
			Maksymalna głębokość wglębenia profilu chropowatości	$R_v$	$x_{sp}$	$\sigma, W$	$x_d$	$x_g$	
			Maksymalna wysokość chropowatości $R_z$	$R_m$	$x_{sp}$	$\sigma, W$	-	-	
			Największa wartość z $R_H$	$R_t$	$x_{sp}$	$\sigma, W$	-	$x_g$	
			Wysokość wzniesienia profilu chropowatości	$R_{nm}$	$x_{sp}$	$\sigma, W$	-	$x_g$	
		Statystyczne	Średnia odległość między trzecim co do wysokości wzniesieniem i trzecim co do głębokości zagłębieniem	$R_{3z}$	$x_{sp}$	$\sigma, W$	-	-	
			Najwyższa wartość $R_{3z}$ dla mierzonych ode. element.	$R_{3z}$	$x_{sp}$	$\sigma, W$	$x_d$	$x_g$	
			Wysokość chropowatości wg 10 punktów	$R_a$	$x_{sp}$	$\sigma, W$	-	$x_g$	
			Średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości	$R_q$	$x_{sp}$	$\sigma, W$	-	$x_g$	
			Średnie kwadratowe odchylenie profilu chropowatości	$R_q$	$x_{sp}$	-	-	$x_g$	
	Horyzontalne	Horyzontalne	Wysokość chropowatości rdzenia	$R_k$	$x_{sp}$	$\sigma, W$	$x_d$	$x_g$	
			Zredukowana głębokość wglęben	$R_{pk}$	$x_{sp}$	$\sigma, W$	$x_d$	$x_g$	
			Zredukowana wysokość wzniesień	$R_{pk}$	$x_{sp}$	$\sigma, W$	-	$x_g$	
			Średni odstęp miejscowych wzniesień profilu	$S$	$x_{sp}$	$\sigma, W$	$x_d$	$x_g$	
			Średni odstęp chropowatości	$S_m$	$x_{sp}$	$\sigma, W$	$x_d$	$x_g$	
		Hybrydowe	Współczynnik skośności profilu chropowatości	$R_{sk}$	$x_{sp}$	-	$x_d$	$x_g$	
			Eksces (kurtoza)	$R_{ku}$	$x_{sp}$	$\sigma, W$	$x_d$	$x_g$	
			Średnie kwadratowe pochylenie profilu chropowatości	$\Delta_p$	$x_{sp}$	-	-	-	
			Stan naprężeń	Naprężenia (makronaprężenia)	$N$	$x_{sp}$	$\sigma, W$	$x_d$	$x_g$
				Mikronaprężenia (średnia z $FWHM$ )	$\mu N$	$x_{sp}$	$\sigma, W$	$x_d$	$x_g$
Połówkowe szerokości linii dyfrakcyjne dla różnych kątów padania wiązki – różne głębokości wnikania (informacja o stanie naprężeń z różnych głębokości)	$FWHM0^\circ$	$x_{sp}$		$\sigma, W$	$x_d$	$x_g$			
	$FWHM15^\circ$	$x_{sp}$		$\sigma, W$	$x_d$	$x_g$			
	$FWHM30^\circ$	$x_{sp}$		$\sigma, W$	$x_d$	$x_g$			
	$FWHM45^\circ$	$x_{sp}$		$\sigma, W$	$x_d$	$x_g$			
Skład fazowy i chemiczny	Zawartość austenitu szczałkowego	Zawartość węglików	$K$	$x_s$	-	-	-		
		Zawartość węglików	$M_3C$	$x_{sp}$	$\sigma, W$	$x_d$	$x_g$		
	Dyspersja węglików	Pola węglików	$M_2C_{POLE}$	$x_{oc}$	$\sigma, W$	-	$x_g$		
		Obwody węglików	$M_3C_{OBW}$	$x_{oc}$	$\sigma, W$	-	$x_g$		
		Długości węglików	$M_3C_{DL}$	$x_{oc}$	$\sigma, W$	-	$x_g$		
		Współczynnik kształtu węglików	$M_3C_{WK}$	$x$	-	-	-		
		Stężenie węgla	$\%C$	$x_{sp}$	$\sigma, W$	$x_d$	$x_g$		
	Wtrącenia niemetaliczne	Stopień zanieczyszczenia wtrąceniami niemetaliczne	$WN$	$x_{sp}$	-	-	$x_g$		
		Pola wtrąceń niemetalicznych	$WN_{POLE}$	$x_{oc}$	-	-	$x_g$		
		Obwody wtrąceń niemetalicznych	$WN_{OBW}$	$x_{oc}$	-	-	$x_g$		
		Długości wtrąceń niemetalicznych	$WN_{DL}$	$x_{oc}$	-	-	$x_g$		
		Współczynnik kształtu wtrąceń niemetaliczne	$WN_{WK}$	$x$	-	-	-		
		Mikrotwardość wzdłuż tworzącej	$\mu HV^T$	$x_{sp}$	$\sigma, W$	$x_d$	$x_g$		
	Twardość	Mikrotwardość na czole	$\mu HV^C$	$x_{sp}$	$\sigma, W$	$x_d$	$x_g$		
Twardość		$HRC$	$x_{sp}$	$\sigma, W$	$x_d$	$x_g$			

## ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

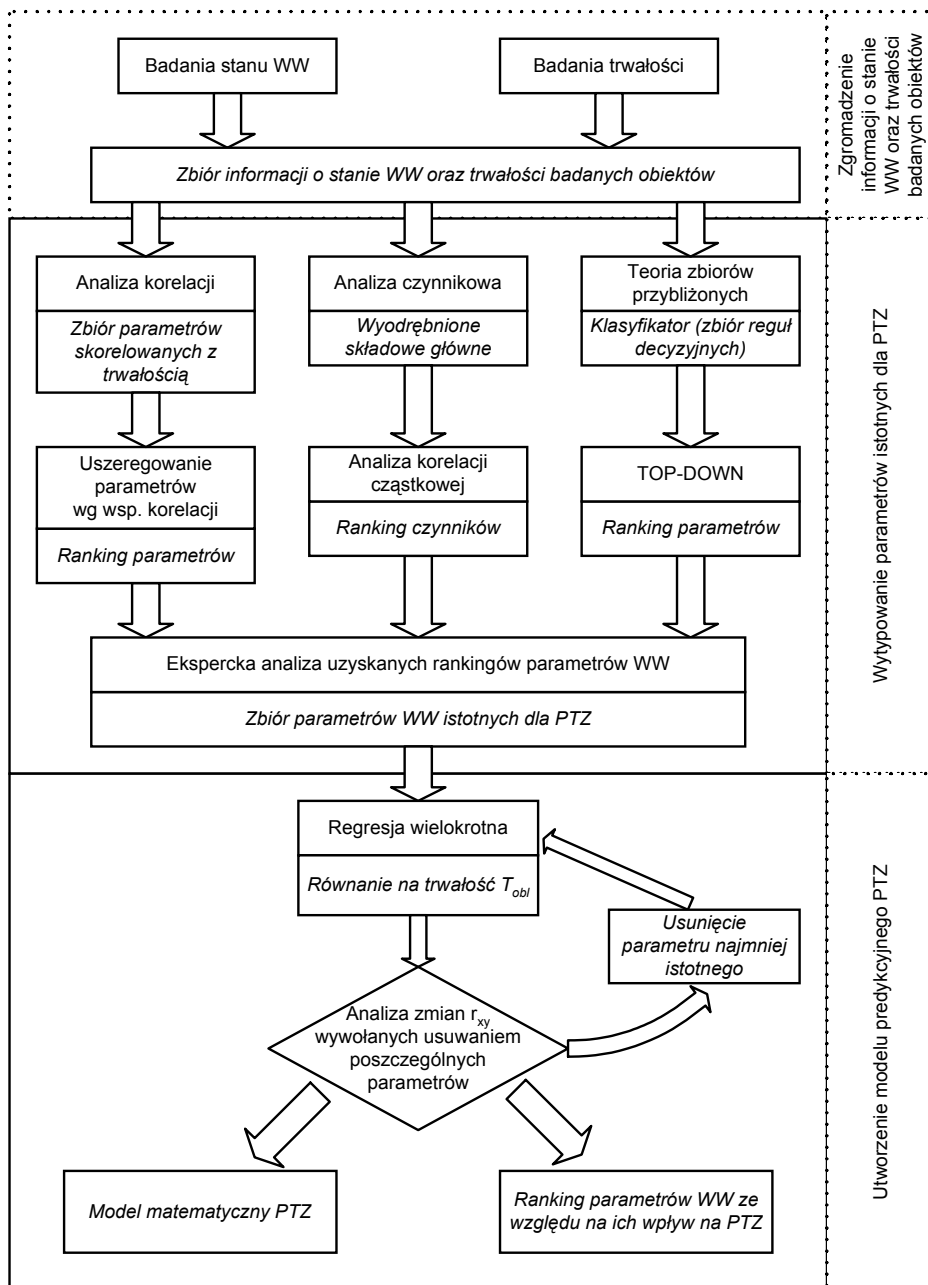
Biorąc pod uwagę ogromną liczbę czynników, których wpływ na trwałość trzeba rozważyć, analizę przeprowadzono w dwu etapach (rys. 1): mianowicie w pierwszym dokonano selekcji parametrów (eliminując niektóre z nich) by w drugim etapie określić wpływ pozostałych parametrów na powierzchniową trwałość zmęczeniową. Aby uniknąć pominięcia jakiegoś ważnego parametru podczas identyfikacji parametrów istotnych w aspekcie powierzchniowej trwałości zmęczeniowej (co eliminowało parametr z drugiego etapu) zastosowano trzy metody analizy, a mianowicie:

- analizę korelacji między poszczególnymi parametrami a trwałością,
- analizę czynnikową (analiza składowych głównych),
- analizę przydatności parametrów WW do predykcji PTZ za pomocą wygenerowanego klasyfikatora opartego na regułach decyzyjnych i teorii zbiorów przybliżonych.

W analizie korelacji wykorzystano tzw. współczynnik korelacji liniowej Pearsona. Ten powszechnie stosowany współczynnik korelacji określa stopień wzajemnej proporcjonalności wartości dwóch zmiennych - to znaczy że korelacja jest silna jeśli może być aproksymowana linią prostą (rosnącą lub malejącą). Miarą korelacji liniowej zmiennych losowych  $x$  i  $y$  jest współczynnik korelacji liniowej  $r_{xy}$  określany jako stosunek kowariancji  $cov(x, y)$  do iloczynu wariancji  $\sigma_x$  i  $\sigma_y$ . W efekcie analizy korelacji między parametrami warstwy wierzchniej obiektów badań a ich powierzchniową trwałością zmęczeniową uzyskano zbiór parametrów istotnie skorelowanych z trwałością, który uszeregowano wg współczynnika korelacji tworząc ranking parametrów [3].

Drugą metodą selekcji parametrów warstwy wierzchniej była analiza czynnikowa. Czynnikiem nazywa się kombinacje liniową kilku parametrów wzajemnie skorelowanych a więc redundantnych (czyli nadmiarowych). Tak więc analiza czynnikowa umożliwia redukcję liczby zmiennych poprzez ich klasyfikację w czynniki. W efekcie analizy czynnikowej uzyskano zbiór czynników (składowych głównych), który uszeregowano wg współczynnika korelacji cząstkowej z trwałością tworząc ranking czynników [4].

W ostatniej z metod hierarchię parametrów warstwy wierzchniej stworzono techniką sekwencyjnej eliminacji atrybutów TOP-DOWN, z wykorzystaniem reguł decyzyjnych generowanych w oparciu o teorię zbiorów przybliżonych, stosując algorytm LEM2.



Rys. 1. Algorytm analizy danych  
 Fig. 1. Algorithm of data exploration

Zbiory przybliżone (*rough sets*) i ich teoria zostały rozwinięte na początku lat osiemdziesiątych przez profesora Pawlaka jako metoda radzenia sobie z niekompletnymi lub niespójnymi zbiorami informacji i stanowi obecnie jedną z szybciej rozwijających się metod sztucznej inteligencji. Teoria zbiorów przybliżonych odrzuca wymóg istnienia ściśle określonych granic zbioru, definiując zbiór w oparciu o jego przybliżenie dolne i górne. Informacja w systemie opartym na metodzie zbiorów przybliżonych przechowywana jest w postaci stabelaryzowanej (nazywanej tablicą informacyjną lub decyzyjną). W tablicy tej wyodrębnić można atrybuty warunkowe (którymi w tym przypadku są parametry WW) i atrybuty decyzyjne (którym jest trwałość). Wykorzystanie własności zbiorów przybliżonych umożliwia rozszerzenie możliwości takiej tablicy przez stworzenie uogólnionego zbioru reguł decyzyjnych pozwalających na predykcję wartości atrybutu decyzyjnego na podstawie znajomości wartości atrybutów warunkowych [5].

Dokonując eksperckiej analizy hierarchii atrybutów wygenerowanych przez owe trzy metody utworzono zbiór parametrów warstwy wierzchniej istotnych dla powierzchniowej trwałości zmęczeniowej.

Celem drugiego etapu analizy było stworzenie ostatecznego rankingu parametrów warstwy wierzchniej oraz ujawnienie związku, między wyłonionymi w pierwszym etapie parametrami i powierzchniową trwałością zmęczeniową. Do tego celu zastosowano regresję wielokrotną. Ogólnym celem regresji wielokrotnej jest badanie związków pomiędzy wieloma zmiennymi niezależnymi a zmienną zależną. Problem obliczeniowy jaki należy rozwiązać w analizie regresji wielokrotnej polega na dopasowaniu linii prostej do zbioru punktów i sprowadza się on do stworzenia takiego równania tej linii, że suma kwadratów odległości punktów od linii regresji będzie minimalna (dlatego procedura ta bywa nazywana metodą najmniejszych kwadratów).

W pierwszym kroku wygenerowano równanie na trwałość w oparciu o wszystkie parametry warstwy wierzchniej istotne dla powierzchniowej trwałości zmęczeniowej a następnie badano zmiany współczynnika korelacji wywołane usuwaniem kolejnych parametrów. Wartość spadku współczynnika korelacji po wyeliminowaniu konkretnego parametru mówiła o wadze jego wpływu na trwałość. W ten sposób utworzono finalny ranking parametrów warstwy wierzchniej ze względu na ich wpływ na powierzchniową trwałość zmęczeniową (tab. 2).

**Tab. 2. Ranking parametrów WW ze względu na ich wpływ na PTZ**  
**Table 2. Ranking of the surface layer parameters for the sake of surface fatigue life**

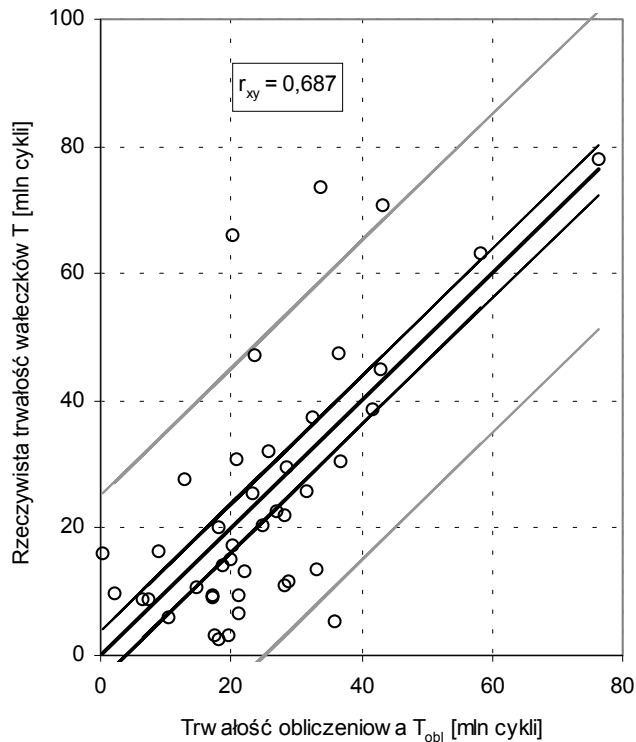
Miejsce w rankingu	Oznaczenie cechy statystycznej parametru WW	Opis cechy statystycznej parametru WW
1	$R_{3z}$	średnia odległość między trzecim co do wysokości wzniesieniem i trzecim co do głębokości wgłębień dla wszystkich odcinków elementarnych
2	$K$	zawartość austenitu szczątkowego
3	$R_{vk}$	średnia wartość zredukowanych głębokości wgłębień
4	$\mu N$	średnie mikronapężenia
5	$^{Xg}R_{ku}$	górną granicę 90% przedziału ufności dla ekscesu (kurtozy)
6	$^{Xd}N$	dolną granicę 90% przedziału ufności dla naprężeń własnych
7	$^{Xg}M_3C_{POLE}$	górną granicę 90% przedziału ufności dla pól węglików
8	$R_a$	średnia wartość średnich arytmetycznych odchyleń profilu chropowatości

Utworzony na podstawie cech statystycznych parametrów warstwy wierzchniej zawartych w tab. 2, akceptowalny z punktu widzenia eksperta wzór o najwyższym współczynniku korelacji ma postać:

$$T_{obl} = 293 - 178 \cdot R_{3z} - 9,4 \cdot K + 206 \cdot R_{vk} - 41 \cdot \mu N - 0,1 \cdot ^{Xg}R_{ku} - 0,06 \cdot ^{Xd}N - 34 \cdot ^{Xg}M_3C_{POLE} - 286 R_a$$

Wykres przedstawiający zależności między rzeczywistą trwałością badanych wałeczków łożyskowych a wartością obliczoną wg powyższego wzoru zaprezentowano na rys. 2.





Rys. 2. Wykres rzeczywistej trwałości badanych walczków łożyskowych i trwałości obliczonej wg przedstawionego wzoru wraz z przedziałami ufności dla wartości średniej i dla poszczególnego wyniku wyznaczonymi na poziomie istotności 0,1

Fig. 2. Chart of real life tested bearing rollers  $T$  versus computational life  $T_{obl}$

## PODSUMOWANIE

Generalnym wnioskiem jest poparcie zawartych w literaturze stwierdzeń, iż jednym z istotnych czynników wpływających na powierzchniową trwałość zmęczeniową elementu jest stan jego warstwy wierzchniej oraz że na powierzchniową trwałość zmęczeniową wpływają zarówno parametry struktury geometrycznej jak i własności fizyko-chemiczne warstwy wierzchniej elementu.

Z prezentowanych badań i analiz dla nominalnie identycznych elementów toczonego łożyska walcowego wysnuć można następujące wnioski:

1. Najważniejszym parametrem opisującym stan warstwy wierzchniej powierzchni toczonego w aspekcie powierzchniowej trwałości zmęczeniowej jest wysokościowy parametr struktury geometrycznej  $R_{3z}$ . Drugim

parametrem co do ważności jest zawartość austenitu szczątkowego  $K$ . Kolejnym parametrem istotnym dla PTZ jest parametr struktury geometrycznej  $R_{vk}$  ujmujący głębokość wgłębienia profilu chropowatości powierzchni. Czwarte miejsce w rankingu parametrów warstwy wierzchniej z punktu widzenia powierzchniowej trwałości zmęczeniowej zajmują mikronapężenia  $\mu N$  a po nich kolejno maksymalne wartości parametru  $R_{ku}$ , maksymalne wartości ściskających naprężeń własnych  $N$ , maksymalne wielkości węglików  $M_3C_{POLE}$  i parametr  $R_a$ .

2. Rozpatrując cechy statystyczne poszczególnych parametrów warstwy wierzchniej dla których zaobserwowano ich wpływ na trwałość trzeba zwrócić uwagę, iż wg utworzonego rankingu dla parametrów  $R_{3z}$ ,  $K$ ,  $R_{vk}$ ,  $\mu N$  i  $R_a$  ważną cechą jest wartość średnia a dla parametrów  $R_{ku}$ ,  $N$ ,  $M_3C$  - wartości ekstremalne.
3. Ze względu na powierzchniową trwałość zmęczeniową istotne jest aby parametry struktury geometrycznej powierzchni tocznych  $R_{3z}$ ,  $R_{ku}$  i  $R_a$  przyjmowały małe wartości a parametr  $R_{vk}$  duże.
4. Dla parametrów fizyko-chemicznych ze względu na powierzchniową trwałość zmęczeniową istotne są małe zawartości austenitu szczątkowego  $K$ , małe mikronapężenia  $\mu N$ , duże makronapężenia ściskające  $N$  a także duża dyspersja węglików.
5. Wydaje się, iż istnieje możliwość prognozowania trwałości elementów węzłów tocznych poprzez pomiar wartości ustalonych parametrów i wykorzystanie uzyskanego wzoru. Prognozowanie to odbywa się jednak tylko z pewnym prawdopodobieństwem.

W celu lepszego poznania zależności między stanem warstwy wierzchniej a powierzchniową trwałością zmęczeniową celowe wydają się dalsze prace, które obejmować powinny:

- uwzględnienie eksploatacyjnych wartości parametrów warstwy wierzchniej (być może duży wpływ na PTZ mają wartości parametrów WW ukształtowane w początkowym procesie eksploatacji a tylko częściowo zależne od wartości technologicznych);
- rozwój metod pomiarowych w celu zwiększenia dokładności pomiaru a także precyzyjniejszego określenia położenia badanego obszaru (np. metoda oparta o szумы Barkhaussena, która pozwala na wyznaczenie poziomu lokalnych mikronaprężeń w różnych odległościach od powierzchni);
- dalsze próby stosowania na potrzeby problematyki powierzchniowej trwałości zmęczeniowej nowoczesnych metod analizy danych (np. modelowanie równań strukturalnych lub wykorzystanie algorytmów genetycznych).

W perspektywie celowe wydaje się opracowanie kompletnego i niepodważalnego zbioru parametrów WW wraz z optymalnym zakresem zmienności i utylitarne jego wykorzystanie do zmian technologii produkcji łożysk.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] Hebda M., Wachal A.: Trybologia. WNT, Warszawa 1980.
- [2] Zwierzycki W.: Analiza danych o statystycznym charakterze własności materiałowych. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, z.2(90), 1992, s. 217-236
- [3] Benjamin J., Cornell A.: Rachunek prawdopodobieństwa, statystyka matematyczna i teoria decyzji dla inżynierów. WNT Warszawa 1977
- [4] Stanisław A.: Przystępny kurs statystyki w oparciu o program STATISTICA PL na przykładach z medycyny. StatSoft Polska, Kraków 1998
- [5] Grzymala-Busse J.W., 'LERS — A system for learning from examples based on rough sets', In: Slowinski R., (ed.), Intelligent Decision Support. Handbook of Applications and Advances of the Rough Set Theory, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1992, pp. 3–18

## **Mathematical model of surface fatigue life**

### **Summary**

In this work was presented the proposition of mathematical model of surface fatigue life created on the basis of the investigation of roller bearings NU309. Many factors can have an influence on surface fatigue life. Even if the considerations were limited to factors connected with surface layer the analysis have to included both roughness as well as physical properties. Moreover the surface fatigue life can be dependent on mean values or variability of these parameters. In this paper for estimation the influence of some surface layer parameters on surface fatigue life was application the correlation analysis, the factor analysis, the rough sets theory and multiple regression. In the consequence the equation which partly explains the spread of surface-fatigue life was proposed.