

Krzysztof STACHURA^{*}, Marek KALBARCZYK^{**},
Marian SZCZEREK^{**}, Waldemar TUSZYŃSKI^{**}

DYFRAKCYJNY POMIAR NAPRĘŻEŃ W TESTACH TRIBOLOGICZNYCH ELEMENTÓW Z POWŁOKAMI NISKOTARCIOWYMI

DIFFRACTION MEASUREMENT OF RESIDUAL STRESSES IN TRIBOLOGICAL TESTS OF ELEMENTS COVERED WITH LOW FRICTION COATINGS

Słowa kluczowe:

dyfrakcja rentgenowska, powierzchniowe zużycie zmęczeniowe (pitting), naprężenia

Key words:

X-ray diffraction, rolling contact fatigue (pitting), residual stresses

Streszczenie

W artykule przedstawiono założenia metodyczne wyznaczania naprężeń w warstwie wierzchniej elementów poddawanych tribologicznym testom zmęczeniowym. Elementami tymi były próbki o kształcie stożka wykonane ze stali łożyskowej 100Cr6, szybkołnącej SW7M, bez powłoki i z powłoką niskotarciową WC/C oraz stożki ze stali 100Cr6 pokryte powłoką DLC. Zaproponowane podejście obejmuje szereg pomiarów stanu naprężeń wokół śladu współpracy

* Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny, Wydział Mechaniczny, ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom, Polska.

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

elementów trących. Do wyznaczania rozkładu naprężeń zastosowano dyfrakcyjną metodę $\sin^2\psi$, wykorzystywaną dotychczas w nauce i przemyśle przede wszystkim do oceny poprawności procesów technologicznych, zwłaszcza pod kątem uzyskiwanej wytrzymałości obrabianych elementów.

WPROWADZENIE

Zużycie zmęczeniowe stanowi kluczową przyczynę awarii wysokoobciążonych węzłów tarcia pracujących w warunkach toczno-ślizgowych. Prowadzone badania tribologiczne nakierowane są, z jednej strony, na ocenę wpływu stosowanych rozwiązań materiałowych oraz środków smarowych na trwałość zmęczeniową, a z drugiej, na rozpoznanie mechanizmów, według których przebiegają procesy związane ze zużyciem [L. 1]. Zużycie to występuje w warstwach powierzchniowych, objawiając się miejscową utratą spójności w formie wykruszeń (pittingu) elementów łożysk i kół zębatych. Do badania mechanizmów pittingu służą stanowiska, które mają za zadanie symulację skojarzeń trących poddawanych cyklicznym obciążeniom. Przykładem takiego urządzenia jest aparat czterokulowy ze zmodernizowanym węzłem tarcia czy stanowisko do badań przekładniowych [L. 2].

Jedną z przyczyn inicjacji pęknięć zmęczeniowych jest zmiana naprężeń własnych w warstwie wierzchniej współpracujących elementów [L. 3–4]. Analiza przeglądu literatury wskazuje jednak na brak spójnego zespołu założeń badawczych do wyznaczania zmian stanu naprężeń w elementach tocznych węzłów tarcia poddawanych testom tribologicznym.

Rozwój technologii powoduje, iż poszukuje się metod badawczych, które umożliwiałyby taką ocenę stanu mikrostruktury materiału, która pozwoliłaby przewidzieć jego zachowanie w warunkach eksploatacyjnych.

W przypadku badań mikrostruktury materiałów istotne znaczenie mają: udział ilościowy i jakościowy faz, orientacja przestrzenna krystalitów (tekstura materiału), a także utrzymujący się stan naprężeń własnych, na podstawie których dokonuje się diagnozowania stanu mikrostruktury [L. 5–6]. Technika pozwalającą na ich wyznaczenie jest dyfrakcja rentgenowska.

Celem prac przedstawionych w niniejszym artykule było zbadanie zależności między naprężeniami własnymi a destrukcją zmęczeniową, w oparciu o rozkłady naprężeń własnych wyznaczone przed testami zmęczeniowymi oraz wyniki badań trwałości zmęczeniowej.

METODYKA BADAŃ

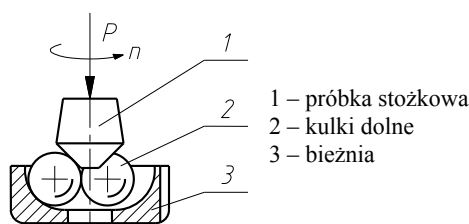
Obiekty badań

Metodyka badań obejmuje testy zmęczeniowe oraz dyfrakcyjne pomiary naprężeń w elementach testowych, którymi były stożki wykonane ze stali łożyskowej 100Cr6 i szybkołatającej SW7M bez, jak i z naniesioną powłoką niskotarciową

WC/C i DLC. Powłoki zostały otrzymane w procesach PVD [L. 7]. Procesy osadzania powłok przeprowadzono poniżej temperatury 200°C, by uniknąć negatywnych skutków przemian fazowych w materiałach stożków.

Metoda badań zmęczeniowych

Badania powierzchniowej trwałości zmęczeniowej w ruchu tocznym przeprowadzono na aparacie czterokulowym ze zmodernizowanym testowym węzłem tarcia (Rys. 1), w którym górną kulę zastąpiono stożkiem. W metodzie tej destrukcji zmęczeniowej ulega stożek.



Rys. 1. Zmodernizowany węzeł tarcia aparatu T-03 do badania zużycia zmęczeniowego materiałów

Fig. 1. The modified cone-three ball tribosystem of T-03 tester intended for pitting investigation

Badania prowadzono wg następujących parametrów:

- stałe obciążenie węzła tarcia: 3924 N,
- prędkość obrotowa wrzeciona: 1450+50 obr./min,
- baza olejowa: PAO 8.

Bieg badawczy kończy się z chwilą wystąpienia wykruszenia zmęczeniowego na stożku.

Zastosowana metoda badań naprężeń

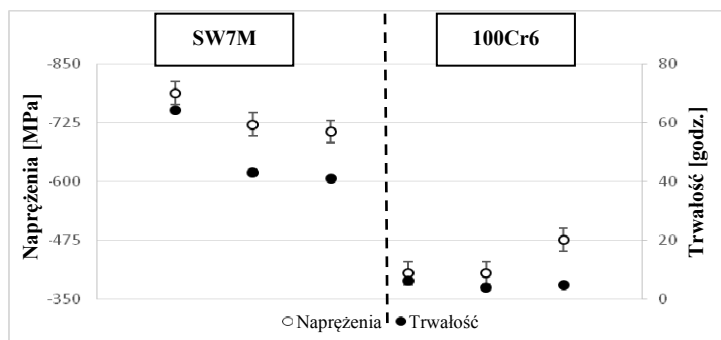
Wyznaczanie naprężeń własnych dokonywano w oparciu o metodę $\sin^2\psi$ poprzez pomiar odkształcenia sieci krystalicznej dla wybranej rodziny płaszczyzn sieciowych (hkl) [L. 8]. Do pomiarów odkształceń sieci krystalicznej w stali ferrytycznej została wybrana rodzina płaszczyzn sieciowych (211) dająca sygnał dyfrakcyjny przy wysokim kącie padania wiązki rentgenowskiej zwiększającym dokładność pomiaru sieci; duża krotność płaszczyzn zmniejsza wpływ tekstury materiału na odbicie [L. 8–9]. Badania prowadzono za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego, wykorzystującego monochromatyczne promieniowanie lampy o anodzie kobaltowej ($\lambda = 1,79026$ [Å]) i mocy 1400 [W]. Urządzenie to wyposażone jest w koło Eulera z uchwytem przygotowanym dla próbek stożkowych. Czynnikiem decydującym o kierunku, w jakim możliwe jest wyznaczenie naprężeń, jest kształt badanego elementu. W przypadku próbek stożkowych, które są przedmiotem badań, kierunek, w którym można wyznaczyć

naprężenia, jest zgodny z tworzącą stożka. Ze względu na zastosowanie stałego obciążenia testowego węzła tarcia położenie śladu współpracy zmienia się w stopniu pomijalnie małym. Pozwala to na doświadczalne wyznaczenie miejsca pomiaru naprężeń zgodnego z przebiegiem śladu współpracy jeszcze przed przeprowadzeniem testu tribologicznego.

Podczas pomiaru próbkę pochylano wzdłuż tworzącej stożka pod kątami ψ od 0 do 50 stopni w odstępach co 5 stopni. W wyniku dodatkowego obrotu stożka wokół własnej osi uzyskano rozkład naprężeń z 17 miejsc pomiarowych na śladzie współpracy w miejscach równo oddalonych od siebie. Wykorzystano również kolimator, uzyskując wiązkę rentgenowską o średnicy 1 mm, pokrywającą całą szerokość śladu wytarcia.

WYNIKI BADAŃ I ICH DISKUSJA

Na **Rys. 2** zestawiono wyniki badań naprężeń i wytrzymałości zmęczeniowej dla stożków ze stali 100Cr6 i SW7M. Dla próbek ze stali SW7M uzyskano różnicę naprężeń na poziomie 10% przy 30% różnicy trwałości. Próbki ze stali 100Cr6 nie wykazują istotnych różnic pod względem naprężeń ani trwałości. W próbkach ze stali SW7M stwierdzono średni poziom naprężeń ściskających wyższy o 300 MPa w odniesieniu do stożków ze stali 100Cr6; charakteryzują się one również 10-krotnie wyższą trwałością.

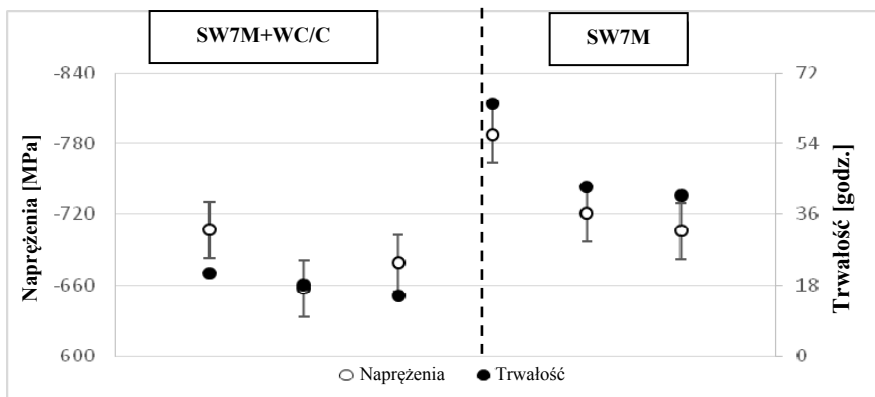


Rys. 2. Porównanie średniej wartości naprężeń i wytrzymałości zmęczeniowej dla próbek ze stali SW7M i 100Cr6

Fig. 2. Average residual stresses and rolling contact fatigue for the SW7M and 100Cr6 steel samples

Na **Rys. 3** przedstawiono wyniki badań naprężeń i wytrzymałości zmęczeniowej dla stożków ze stali SW7M i stożków ze stali SW7M z powłoką WC/C.

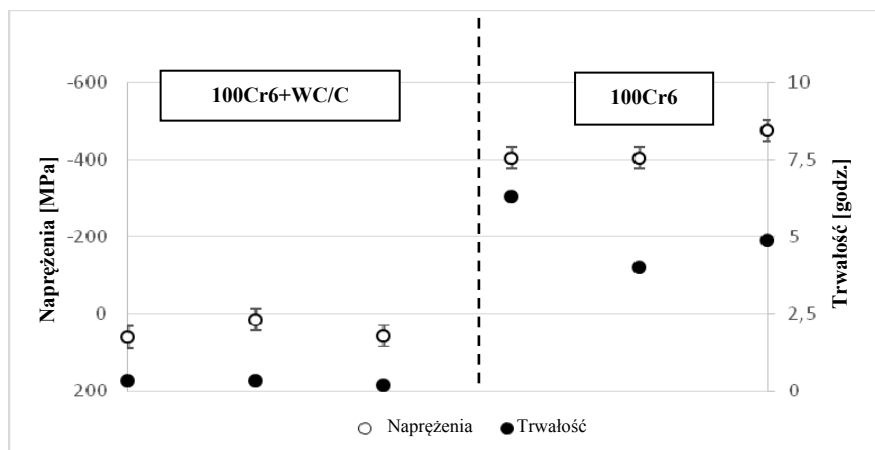
Próbki ze stali SW7M z powłoką WC/C nie wykazują istotnych różnic pod względem naprężeń ani trwałości. Dla próbek niepokrytych powłoką uzyskano średni poziom naprężeń ściskających wyższy o 70 MPa jak i dwukrotnie wyższą trwałość w odniesieniu do próbek pokrytych.



Rys. 3. Porównanie średnich naprężeń i wytrzymałości zmęczeniowej dla próbek ze stali SW7M i próbek z powłoką SW7M+WC/C

Rys. 3. Average residual stresses and rolling contact fatigue for the SW7M steel samples and SW7M samples with WC/C coating

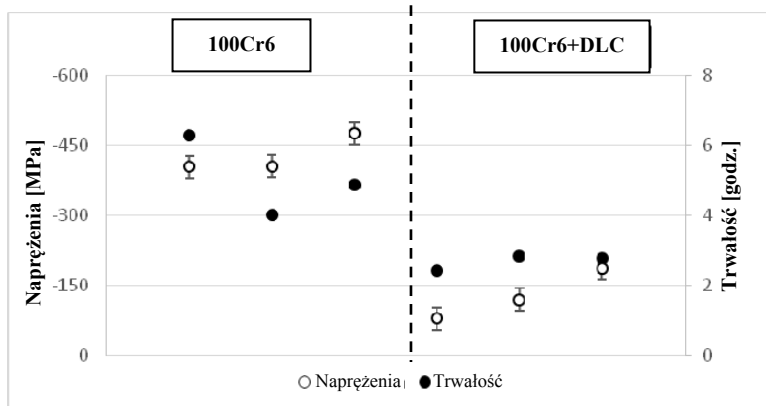
Na **Rys. 4** zestawiono wyniki badań naprężeń własnych i trwałości dla próbek ze stali 100Cr6 i próbek ze stali 100Cr6 z powłoką WC/C. Dla stożków z powłoką WC/C uzyskano 20% różnicę naprężeń oraz brak istotnych różnic pod względem trwałości. W próbkach z powłoką stwierdzono występowanie naprężeń rozciągających, a ich średni poziom naprężeń był niższy o ponad 400 MPa w odniesieniu do stożków bez powłoki. Wykruszenie zmęczeniowe wystąpiło po czasie 16-krotnie krótszym niż w przypadku próbek bez powłoki.



Rys. 4. Porównanie średnich naprężeń i wytrzymałości zmęczeniowej dla próbek ze stali 100Cr6 i próbek z powłoką 100Cr6+WC/C

Fig. 4. Average residual stresses and rolling contact fatigue for the 100Cr6 steel samples and 100Cr6 samples with WC/C coating

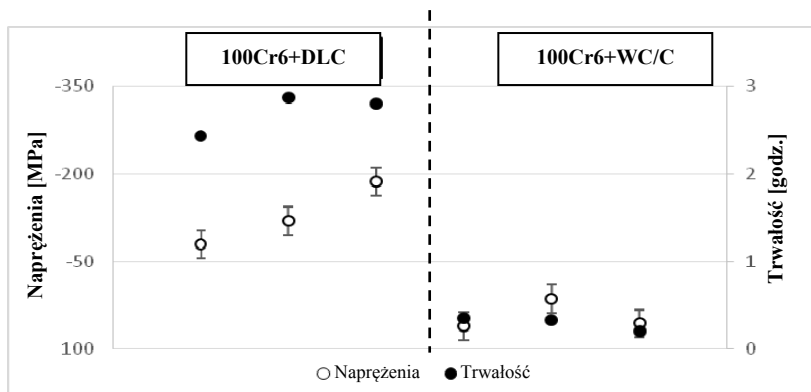
Na **Rys. 5** zestawiono wyniki badań naprężeń własnych i trwałości dla elementów ze stali 100Cr6 i elementów ze stali 100Cr6 z powłoką niskotarciową DLC. Dla próbek z powłoką DLC uzyskano różnicę w naprężeniach ścisających na poziomie 35% oraz brak istotnych różnic pod względem trwałości. W próbkach ze stali 100Cr6 z powłoką DLC stwierdzono średni poziom naprężeń ścisających niższy o 250 MPa, jak również prawie 2-krotnie niższą trwałość w odniesieniu do próbek ze stali 100Cr6.



Rys. 5. Porównanie średnich naprężeń i wytrzymałości zmęczeniowej dla próbek ze stali 100Cr6 i próbek z powłoką 100Cr6+DLC

Fig. 5. Average residual stresses and rolling contact fatigue for 100Cr6 steel samples and 100Cr6 samples with DLC coating

Na **Rys. 6** zestawiono wyniki badań naprężeń i trwałości dla stożków ze stali 100Cr6 z powłokami niskotarciowymi DLC i WC/C.



Rys. 6. Porównanie naprężeń i wytrzymałości zmęczeniowej dla próbek ze stali 100Cr6 z powłoką DLC i WC/C

Fig. 6. Average residual stresses and rolling contact fatigue for 100Cr6 steel samples with the DLC and WC/C coating

W wyniku badań stwierdzono, że w przypadku próbek z powłoką DLC naprężenia ściskające są wyższe niż w próbkach stożkowych z powłoką WC/C o ponad 160 MPa; a trwałość jest 7-krotnie wyższa.

PODSUMOWANIE

Badania wykazały, że procesy osadzania powłok wpływają na zmianę naprężeń warstwy wierzchniej stalowego podłoża, co skutkuje zmianą jego trwałości zmęczeniowej. Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że nałożenie powłoki na próbki testowe powoduje obniżenie naprężeń ściskających.

W oparciu o uzyskane wyniki stwierdzono jednoznacznie korelację pomiędzy obniżeniem naprężeń ściskających a spadkiem trwałości zmęczeniowej elementów pokrytych powłoką.

Zaproponowana metoda wyznaczania naprężeń z zastosowaniem dyfrakcji rentgenowskiej może stanowić wartościowe uzupełnienie badań zmęczeniowych i może przyczynić się do wyjaśnienia czynników wpływających na powierzchniową trwałość zmęczeniową.

LITERATURA

1. Piekoszewski W., Szczerek M.: Mechanizmy niszczenia warstw powierzchniowych elementów z powłokami PVD przez pitting. *Tribologia*, vol. 238 (4/2011), s. 229–243.
2. Michalczewski R., Piekoszewski W.: The method for assessment of rolling contact fatigue of PVD/CVD coated elements in lubricated contacts. *Tribologia. Finish journal of Tribology* 2006, t. 25 (4), pp. 34–43.
3. Stewart S., Ahmed R.: Rolling contact fatigue of surface coating – a review. *Wear* 2002, t. 253, pp. 1132–1144.
4. Bart W.: *Ecotribology: Environmentally acceptable tribological practices*. *Tribology International* 2006, t. 39, pp. 728–733.
5. Bonarski J.T.: *Rentgenowska tomografia teksturowa*. Kraków, IMIM PAN 2001.
6. Bonarski J.T.: *Pomiar i wykorzystanie teksturowo-naprężeniowej charakterystyki mikrostruktury w diagnostyce materiałów*. Kraków, IMIM PAN 2013.
7. Marcolino N.J.: *Low friction and wear resistant coating microstructure and mechanical properties*. Rozprawa doktorska. Groningen University Press, Groningen (Finlandia) 2001.
8. Cullity B.D.: *Elements of X-Ray Diffraction*. 2nd Ed., Addison-Wesley Publ. Comp. Inc., London, Amsterdam, Don Mills, Ontario, Sydney (1978).
9. Fitzpatrick M.E., Fry A.T., Holdway P., Kandil F.A., Shackleton J., Suominen L.: *Determination of Residual Stress by X-Ray Diffraction*, in *Measurement Good Practice Guide No. 52*, National Physical Laboratory Teddington, Middlesex, UK, TW11 0LW.

Summary

The aim of this article was to present the methodological assumptions of determining residual stresses in the surface layer of components undergoing tribological tests. The presented approach to residual stresses measurements includes a series of measurements conducted through the middle of the specimen friction track. The $\sin^2\psi$ diffraction method, which is widely used in science and industrial sectors, was applied to determine the distribution of residual stresses. The cone-shaped samples from bearing steel 100Cr6 and high-speed steel SW7M were tested. By means of developed method the authors analysed the influence of WC/C and DLC coating deposition on the residual stresses of steel samples. The application of developed method makes it possible to determine the changes of residual stresses in the tribological samples.