

**Witold PIEKOSZEWSKI\***

**WPLYW NA POWIERZCHNIOWĄ TRWAŁOŚĆ  
ZMĘCZENIOWĄ WYBRANYCH MATERIAŁÓW  
I TECHNOLOGII KONSTYTUOWANIA WARSTW  
POWIERZCHNIOWYCH ELEMENTÓW  
WĘZŁA TOCZNEGO**

**THE EFFECT OF MATERIAL AND TECHNOLOGY  
OF SURFACE LAYER PREPARATION OF ROLLING  
ELEMENTS ON PITTING**

**Słowa kluczowe:**

technologie próżniowe, powłoki PVD, pitting, powierzchniowa trwałość zmęczeniowa

**Key-words:**

vacuum techniques, PVD coatings, pitting, rolling contact fatigue

**Streszczenie**

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu na powierzchniową trwałość zmęczeniową rodzaju materiału i technologii konstituowania warstw

---

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

powierzchniowych elementów skojarzonych w wysoko obciążonym modelowym styku tocznym. Przebadano stale: łożyskową 100Cr6, nawęglaną 16MnCr5 oraz azotowaną 33H3MF oraz powłoki TiN, CrN, WC/C i MoS<sub>2</sub> naniesione na próbki ze stali 100Cr6. Badany modelowy styk smarowany był mineralnym olejem wzorcowym RL 144 bez dodatków. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono negatywny wpływ nawęglania i azotowania na trwałość zmęczeniową stalowych węzłów tarcia. Pokrycie jednego z elementów stalowych powłokami PVD (TiN, CrN, WC/C, MoS<sub>2</sub>) nie umożliwia poprawy sytuacji (co ma miejsce w przypadku zacierania), przy czym typowe powłoki jednowarstwowe TiN oraz CrN zmniejszają tę trwałość drastycznie (o rząd) w stosunku do powłok niskotarciowych WC/C i MoS<sub>2</sub>.

## 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, układ 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 lub zmęczenia powierzchni roboczych elementów trących.

Zatarcie jest następstwem przerwania warstwy smarowej na skutek intensyfikacji wymuszeń w węźle tarcia, co prowadzi do wystąpienia szczepień adhezyjnych, których tworzenie się i niszczenie prowadzi w konsekwencji do lawinowego niszczenia powierzchni elementów trących [L. 1, 2].

Pitting jest formą zużywania warstw powierzchniowych elementów maszyn, objawiającą się wgłębieniami na powierzchniach trących bieżni łożysk i kół zębatych. Postępuje ono w sposób ciągły, niejawnie jest wynikiem akumulacji energii w warstwie powierzchniowej (determinowanego fizykochemicznymi cechami systemu tribologicznego – materiałów trących, środka smarowego i otoczenia), która po przekroczeniu pewnego poziomu zakumulowanej energii przejawia się wykruszeniami [L. 3, 4].

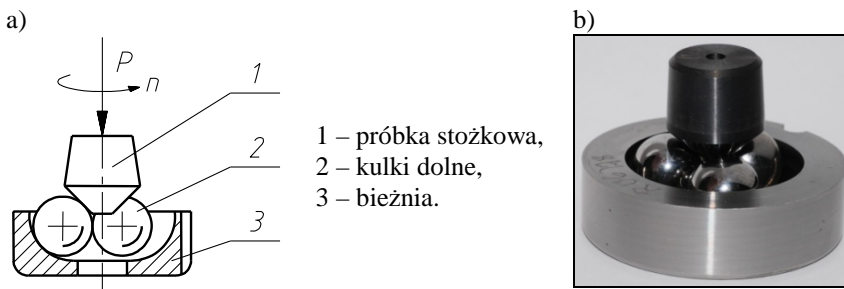
W ośrodkach zajmujących się konstrukcją i projektowaniem wysokoobciążonych węzłów tarcia panuje przekonanie, że możliwości klasycznych materiałów ze względu na trwałość i wytrzymałość zostały już wyczerpane. Przyszłościowymi sposobami zwiększenia odporności na zużycie są nowoczesne technologie konstituowania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

## METODA BADAŃ

Celem pracy było zbadanie wpływu nowych technologii konstituowania warstw powierzchniowych wysokoobciążonych elementów maszyn na powierzchniową trwałość zmęczeniową (pitting).

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].

Badanie polegało na przeprowadzeniu, przy stałym zadanim 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.



**Rys. 1. Węzeł tarcia aparatu T-03 do badania zużycia zmęczeniowego materiałów stosowanych na wysoko obciążone elementy toczne: a) schemat, b) widok**

Fig. 1. Friction pair of T-03 tester used for investigation of fatigue wear of materials intended for heavy-loaded rolling parts: a) drawing, b) view

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

Warunki, przy których przeprowadzono biegi badawcze, były następujące:

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

## OBIEKTY BADAŃ

Do badań mających na celu określenie wpływu obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej na pitting wybrano stale: łożyskową 100Cr6, do nawęglania 16MnCr5 oraz do azotowania 33H3MF. Wszystkie próbki z wymienionych stali poddane zostały ulepszeniu cieplnemu, przy czym próbki ze stali 16MnCr5 zostały wcześniej poddane nawęglaniu [L. 7, 8, 9], a ze stali 33H3MF azotowaniu próżniowemu [L. 10, 11].

Stal łożyskową 100Cr6 ze względu na to, że charakteryzuje się jednorodną strukturą w całej swojej objętości przyjęto jako materiał odniesienia i podstawowy materiał do nanoszenia powłok. Ponadto należy zaznaczyć, że stal 100Cr6 stosowana na elementy łożysk tocznych, pod względem powierzchniowej trwałości zmęczeniowej została przebadana wszechstronnie [L. 12, 13].

Dobre właściwości tribologiczne powłok PVD (mała przewodność cieplna, odporność temperaturowa oraz brak skłonności do tworzenia szepień adhezyjnych) były czynnikami, które spowodowały ich zastosowanie jako powłok przeciwwzyciowych nanoszonych na narzędzia skrawające (noże, wiertła, frezy, wkładki węglkowe [L. 14, 15, 16], ale również na narzędzia do obróbki plastycznej na zimno (wykrojniki, matryce, stemple [L. 17] i formy odlewnicze [L. 18,19]). W związku z tym dane ilościowe na temat charakterystyk tarcia i zużycia elementów z twardymi powłokami przeciwwzyciowymi dotyczą w głównej mierze styku obróbkowego. Brak jest natomiast danych tarciovych i zużyciowych dotyczących smarowanego styku skoncentrowanego, występującego w wysoko obciążonych wężłach tarcia. W praktyce nie ma dostępu do opracowań ujmujących kompleksowo zarówno odporność na zacieranie

jak i pitting elementów z naniesionymi powłokami przeciwzużyciowymi. Aby ten problem po części wyjaśnić, przeprowadzono badania wpływu rodzaju powłoki na powierzchniową trwałość zmęczeniową.

Do badań elementów z powłokami wytypowano będące reprezentantami powłok prostych jednowarstwowych (TiN, CrN) oraz niskotarcio- wych o złożonej strukturze (WC/C, MoS<sub>2</sub>). We wszystkich przypadkach badania skojarzeń z powłokami, powłoka naniesiona była tylko na jeden z elementów testowych. Powłoki jednowarstwowe (TiN oraz CrN) osadzono na stalowych elementach testowych w procesie PVD metodą łukowo-próżniową, powłokę WC/C osadzono metodą reaktywnego rozpylania w procesie PVD, powłokę MoS<sub>2</sub> osadzono w procesie PVD metodą rozpylania magnetronowego. Wszystkie procesy osadzania zostały przeprowadzone poniżej temperatury wystąpienia przemian w materiale podłoża (poniżej 200°C).

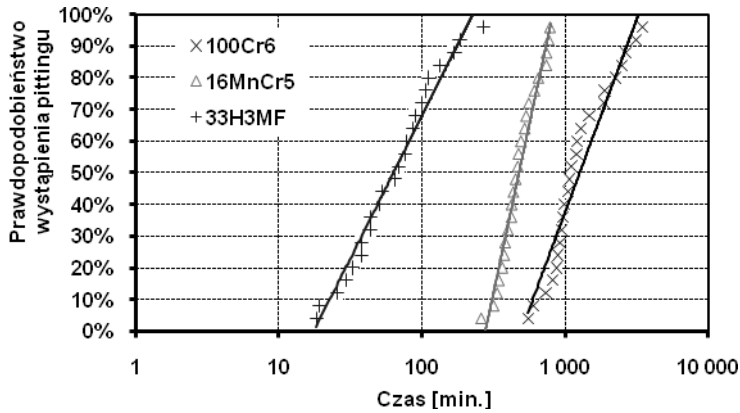
Aby uniknąć wpływu środka smarowego na rezultaty badań, przyjęto do smarowania badanych skojarzeń materiałowych mineralny olej wzorcowy RL 144 bez dodatków o lepkości 49,31 mm<sup>2</sup>/s w temperaturze 40°C.

## WYNIKI BADAŃ

### Wpływ materiału na trwałość

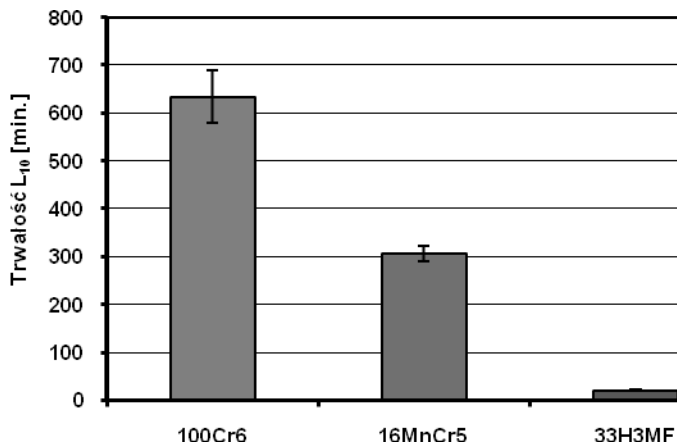
Wyniki badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej próbek wykonanych ze stali łożyskowej 100Cr6, 16MnCr5 nawęglanej próżniowo i hartowanej oraz 33H3MF azotowanej próżniowo, współpracujących w obecności oleju mineralnego RL 144 przedstawiono na **Rys. 2**, natomiast wartości trwałości L<sub>10</sub>, wyrażonej w minutach obrazują wykresy słupkowe na **Rys. 3**.

Jak widać na przedstawionych wykresach najwyższą odpornością na pitting charakteryzowały się próbki wykonane ze stali łożyskowej 100Cr6, o połowę mniejszą trwałość odnotowano dla próbek nawęglanych, natomiast azotowanie w negatywny sposób wpłynęło na trwałość badanego węzła tarcia, obniżając ją w sposób drastyczny (ok. 30-krotnie). Wydaje się, że przyczyną tak drastycznego spadku trwałości elementów azotowanych była tzw. biała warstwa, która ze względu na swą kruchość, pękając inicjowała propagację odpowierzchniowych pęknięć zmęczeniowych.



**Rys. 2. Wyniki badań zmęczeniowych stożków z różnych stali smarowanych olejem mineralnym RL 144**

Fig. 2. The results of fatigue tests for investigated materials lubricated with RL-144 oil



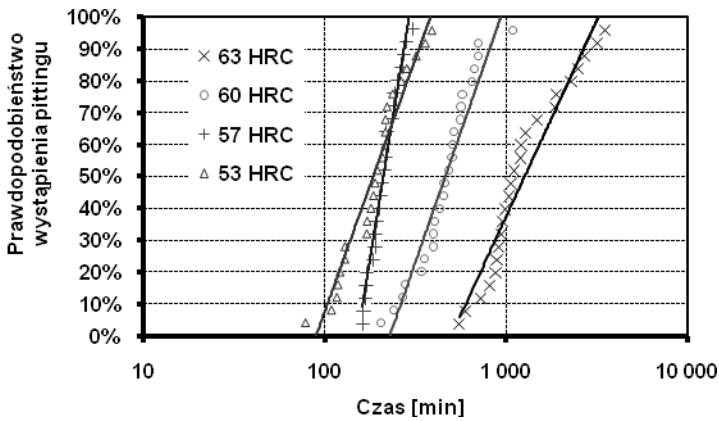
**Rys. 3 Powierzchniowa trwałość zmęczeniowa  $L_{10}$  stożków z różnych stali smarowanych olejem mineralnym RL 144**

Fig. 3. The results of rolling contact fatigue life  $L_{10}$  for investigated materials lubricated with RL-144 oil

Ze względu na fakt, że konstituowanie warstw powierzchniowych nowatorskimi metodami próżniowymi odbywa się w podwyższonych temperaturach, która przyczynia się do odpuszczenia warstw podpowierzchniowych (m.in. zmniejszając twardość), konieczne było zbadanie wpływu twardości elementów testowych na pitting.

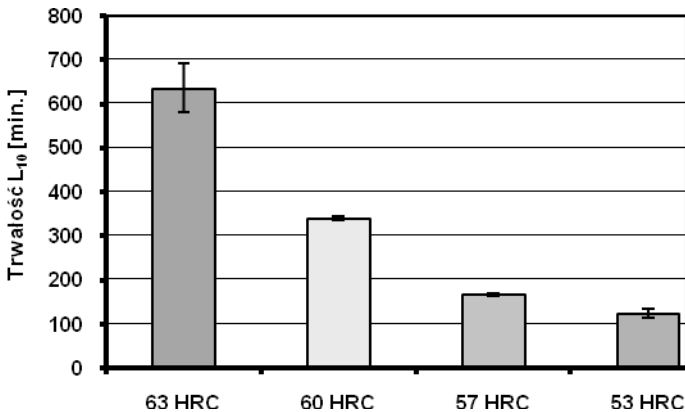
Przebadano elementy testowe wykonane ze stali 100Cr6 o twardościach 62, 60, 57 oraz 53 HRC. Twardość stożków mierzona była na specjalnie do tego celu przygotowanym twardościomierzu, a do testów wybrano stożki, których rozrzut z pomiarów w trzech miejscach wynosił nie więcej niż 1 stopień HRC.

Wyniki badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej tych skojarzeń przedstawiono na **Rys. 4 i 5**.



**Rys. 4 Wyniki badań zmęczeniowych stożków stali 100Cr6 o różnej twardości, smarowanych olejem mineralnym RL 144**

Fig. 4. The results of fatigue tests for 100Cr6 steel with various hardness lubricated with RL 144 mineral oil

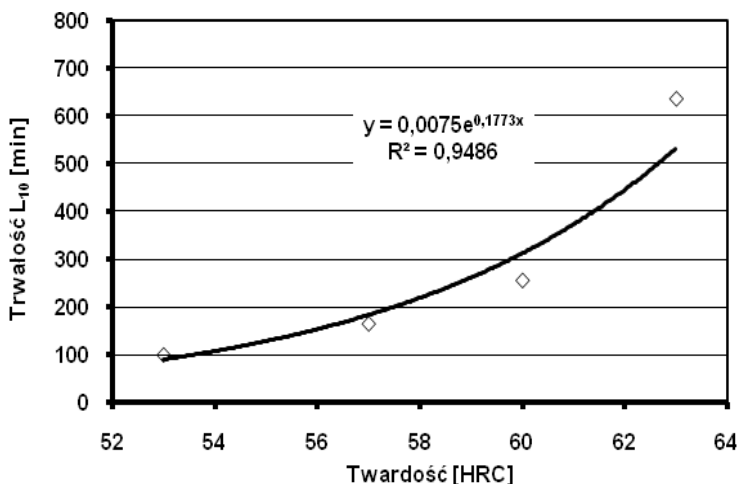


**Rys. 5. Powierzchniowa trwałość zmęczeniowa  $L_{10}$  badanych stożków ze stali 100Cr6 o różnej twardości smarowanych olejem mineralnym RL 144**

Fig. 5. The results of rolling contact fatigue life  $L_{10}$  for 100Cr6 steel with various hardness lubricated with RL-144 mineral oil

Analiza otrzymanych wyników pozwala na stwierdzenie, że niewielki spadek twardości stożków (z 63 do 60 HRC) powoduje ponaddwukrotny spadek powierzchniowej trwałości zmęczeniowej badanych skojarzeń. Dalszy spadek twardości (o kolejne 3 stopnie HRC) powoduje spadek trwałości również prawie o połowę w stosunku do poprzedniej. Dopiero w przypadku badania stożków o twardości 53 HRC spadek trwałości jest mniej gwałtowny i wynosi ok. 1/4 w stosunku do trwałości stożków o twardości 57 HRC.

Linie trendu charakteryzującą zależność powierzchniowej trwałości zmęczeniowej od twardości elementów testowych przedstawiono na **Rys. 6**. Należy podkreślić, że ma ona charakter wykładniczy, podobny do zależności przedstawianych w literaturze dotyczącej tych zagadnień [L. 12, 13].



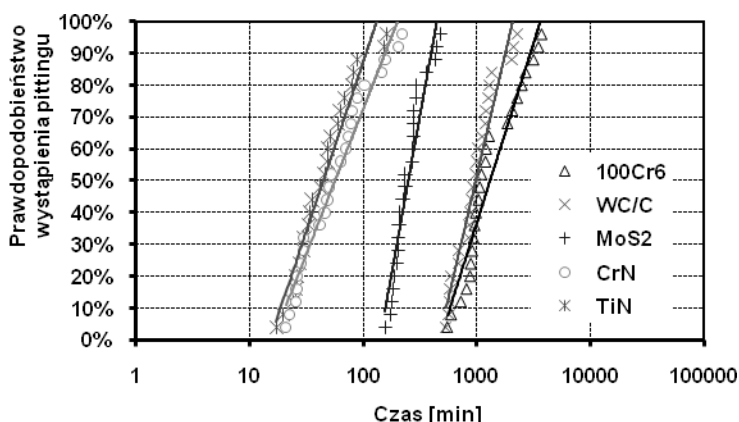
**Rys. 6** Powierzchniowa trwałość zmęczeniowa  $L_{10}$  w funkcji twardości elementów badanych (stożków) wykonanych ze stali 100Cr6

Fig. 6. The results of rolling contact fatigue life  $L_{10}$  for investigated specimens (cones) made of 100Cr6 steel with various hardness

### Wpływ rodzaju powłoki na trwałość

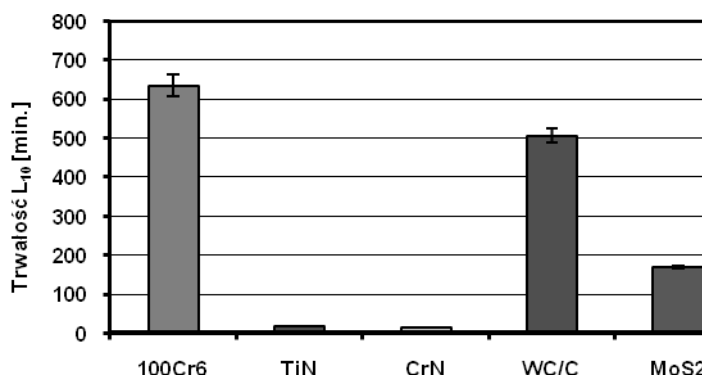
Wyniki badań powierzchniowego zużycia zmęczeniowego modelowego węzła tarcia z elementami pokrytymi wybranymi do badań powłokami przedstawiono na **Rys. 7 i 8**.





**Rys. 7 Wyniki badań zmęczeniowych stożków ze stali 100Cr6 z naniesionymi powłokami, smarowanych olejem mineralnym RL 144**

Fig. 7. The results of fatigue tests for coated 100Cr6 steel lubricated with RL 144 mineral oil



**Rys. 8 Powierzchniowa trwałość zmęczeniowa  $L_{10}$  badanych stożków ze stali 100Cr6 z naniesionymi powłokami smarowanych olejem mineralnym RL 144**

Fig. 8. The results of rolling contact fatigue life  $L_{10}$  for investigated coated cones made of 100Cr6 steel lubricated with RL 144 mineral oil

Z przedstawionych na tych rysunkach zestawień wynika, że typowe, najpopularniejsze powłoki przeciwzużyciowe stosowane na narzędzia (TiN, CrN), w drastyczny sposób zmniejszają odporność na pitting badanego węzła tarcia (ok. 30-krotnie) w stosunku do skojarzenia stal 100Cr6–stal 100Cr6.

Zdecydowanie odmienne jest zachowanie badanych skojarzeń, w których próbki pokryte są powłokami niskotarciowymi na bazie węgla wolframu (WC/C) i dwusiarczku molibdenu ( $\text{MoS}_2$ ). Dla powłoki WC/C zaobserwowano tylko ok. 15% obniżenia trwałości  $L_{10}$  w stosunku do skojarzenia 100Cr6–100Cr6. Należy zaznaczyć, że dużo mniejsze trwałości  $L_{10}$  wyznaczono dla skojarzenia z drugą powłoką niskotarciową. Dla elementu z powłoką  $\text{MoS}_2$  trwałość  $L_{10}$  w stosunku do trwałości elementów ze stali 100Cr6 zmniejszyła się prawie 4-krotnie.

## PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych badań można stwierdzić istotny wpływ na tzw. powierzchniową trwałość zmęczeniową rodzaju materiału i technologii konstituowania warstw powierzchniowych wysoko obciążonych elementów tworzących smarowany styk toczny.

Analiza wyników badań wpływu materiału i sposobów ulepszania cieplnego na tę trwałość pozwala stwierdzić, że:

- najwyższą, spośród przebadanych stali, odpornością na powierzchniowe zużycie zmęczeniowe charakteryzuje się stal łożyskowa 100Cr6 ulepszana cieplnie,
- trwałość  $L_{10}$  stali 100Cr6 w dużym stopniu zależy od twardości badanych elementów i zależność ta jest wykładnicza (**Rys. 6**),
- elementy testowe wykonane ze stali 16MnCr5 nawęglanej próżniowo i hartowanej charakteryzują się o połowę mniejszą trwałością, w stosunku do trwałości elementów ze stali 100Cr6,
- odporność na wystąpienie pittingu elementów wykonanych ze stali azotowanej próżniowo jest o rząd mniejsza od trwałości elementów ze stali łożyskowej 100Cr6.

Pokrycie jednego z elementów stalowego węzła tarcia typowymi powłokami PVD nie umożliwia poprawy sytuacji (co ma miejsce w przypadku zacierania), a wręcz prawie we wszystkich przypadkach ją pogarsza, i tak:

- z przebadanych skojarzeń największą trwałość, porównywalną, lecz nieco niższą od trwałości skojarzenia 100Cr6–100Cr6, posiadało skojarzenie stali 100Cr6 z elementem z naniesioną powłoką niskotarciową węgla wolframu (WC/C),
- elementy z powłokami niskotarciowymi (WC/C,  $\text{MoS}_2$ ) smarowane wzorcowym olejem mineralnym posiadały trwałość zmęczeniową o rząd wyższą od typowych powłok stosowanych na narzędzia (TiN, CrN).

**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 przeciwzużyciowymi. 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. Kula P., Rzepkowski A., Górecki M., Siniarski D.: Nawęglanie próżniowe technologią XXI wieku. Prace naukowe Wydziału Mechanicznego Politechniki Łódzkiej, z. nr 71/2002, s. 101÷50.
8. Kula P., Rzepkowski A., Siniarski D., Krasieński A., Górecki M.: Postęp w technologii nawęglania. Inżynieria Materiałowa Nr 3/2000, s.101÷105.
9. Kołodziejczyk Ł., Kula P., Olejnik J., Rzepkowski A., Rzepkowski A., Siniarski D.: Nawęglanie próżniowe-technologie i urządzenia przyszłości. Inżynieria Materiałowa Nr 5/2002, s. 202÷206.
10. Kula P.: Inżynieria warstwy wierzchniej. Monografie. Wyd. Politechniki Łódzkiej 2000.
11. Rzepkowski A.: Studium utwardzania powierzchniowego stali 17-4PH metodą azotowania próżniowego z wcześniejszą aktywacją powierzchni. Rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, 2007 r.
12. Waligóra W.: Rozrzut powierzchniowej trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 2002.
13. Libera M.: Wpływ wybranych parametrów warstwy wierzchniej na powierzchniową trwałość zmęczeniową węzłów tocznych. Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska, WMRIiT, 2001.
14. Vetter J.: Vacuum arc coating for tools: potential and application. Surface and Coating Technology. 1995, t. 76–77, s. 719÷724.
15. Smolik, J., Walkowicz J., Bujak, J., Miernik, K.: Badania eksploatacyjne powłok przeciwzużyciowych stosowanych w przemyśle maszynowym. Problemy Eksploatacji. 1995, nr 2, s. 23÷38.
16. Lewis, D.B., Bradbury, S.R., Sarwar, M.: The effect of substrate surface preparation on the wear and failure modes of TiN coated high speed steel circular saw blades. Wear. 1996, t. 197, s. 82÷88.

17. Smolik J., Mazurkiewicz A., Walkowicz J., Tacikowski J.: Kształtowanie właściwości przeciwzużyciowych matryc kuźniczych. *Problemy Eksploatacji*. 2001, nr 2, s. 215÷226.
18. Walkowicz J., Smolik J., Miernik K., Bujak J.: Duplex surface treatments of moulds for pressure casting of aluminium. *Surface and Coating Technology*. 1997, t. 97, s. 453÷464.
19. Navinsek, B., Panjan, P., Milosev, I.: Industrial applications of CrN (PVD) coatings, deposited at high and low temperatures. *Surface and Coating Technology*. 1997, t. 97, s. 182÷191.

**Recenzent:**  
**Włodzimierz WALIGÓRA**

### Summary

**In the paper, the results of the effect of material type and vacuum techniques of the surface layer on fatigue wear of heavy-loaded rolling contact are presented. Various materials, 100Cr6 bearing steel, 16MnCr5 carbonised steel and 33H3MF nitriding steel as well as TiN, CrN, WC/C and MoS<sub>2</sub> coatings have been tested. Tribosystems were lubricated with mineral reference oil without additives denoted as RL 144. Carbonising and nitriding processes show the negative effect on surface rolling contact fatigue. By the application of PVD coatings on one part (TiN, CrN, WC/C, MoS<sub>2</sub>) fatigue life was shortened. The same coatings enable the increase of scuffing resistance of coated tribosystem. Single coatings, like TiN and CrN, decrease the fatigue life tenfold, while the decrease of service life for low friction coatings was only minor.**