

**Remigiusz MICHALCZEWSKI<sup>\*</sup>, Witold PIEKOSZEWSKI<sup>\*</sup>,  
Marian SZCZEREK<sup>\*,\*\*</sup>, Waldemar TUSZYŃSKI<sup>\*</sup>**

## **ODPORNOŚĆ NA POWIERZCHNIOWE ZUŻYCIĘ ZMĘCZENIOWE KÓŁ ZĘBATYCH POKRYTYCH POWŁOKĄ WC/C**

### **THE ROLLING CONTACT FATIGUE OF WC/C COATED GEARS**

#### **Słowa kluczowe:**

powłoka niskotarciowa, pitting, stanowisko przekładniowe

#### **Key words:**

low-friction coating, pitting, gear testing rig

#### **Streszczenie**

Celem pracy było zbadanie odporności na powierzchniowe zużycie zmęczeniowe kół zębatach, pokrytych powłoką niskotarciową WC/C (a-C:H:W). Powłokę naniesiono na koła zębata metodą reaktywnego rozpylania w procesie PVD.

---

<sup>\*</sup> Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, 26-600 Radom, ul. Pułaskiego 6/10, tel. (48) 364-42-41, fax (48) 36-447-65.

<sup>\*\*</sup> Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, ul. Krasickiego 54, 26-600 Radom.

Badania powierzchniowej trwałości zmęczeniowej wykonano na stanowisku T-12U metodą PT C/10/90. Przeprowadzono badania czterech wariantów skojarzeń materiałowych kół zębatach (koło duże/koło małe): koła bez powłoki, koła pokryte powłoką, dwa skojarzenia mieszane (jedno z kół pokryte powłoką). Badania wykonano dla mineralnego oleju przekładniowego klasy GL-5 według API (80W/90).

Z przeprowadzonych badań wynika, że odporność na pitting przekładni zębatej, w której zastosowano powłokę, nie tylko zależy od rodzaju powłoki, ale również od tego, które z kół tworzących przekładnię jest pokryte. Badania wykazały, że aby zwiększyć odporność na pitting przekładni, powłokę należy nanieść na koło, dla którego praca tarcia zęba w jednostce czasu jest mniejsza.

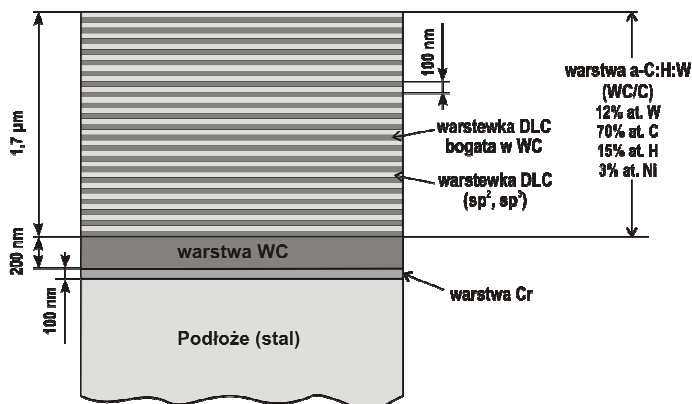
## WPROWADZENIE

Zastosowanie powłok na koła zębata nie jest pomysłem nowym. Znajduje się w centrum uwagi wielu liczących się ośrodków na świecie ze względu na ogromny potencjał aplikacyjny. Przeprowadzone badania wskazują na liczne korzyści wynikające z zastosowania powłok, m.in. wzrost odporności na zacieranie [L. 1], spadek temperatury przekładni, czy wzrost sprawności przekładni [L. 2]. W warunkach tarcia wysokoobciążonych elementów maszyn możliwe jest zastąpienie tribologicznych funkcji środków smarowych przez odpowiednio dobraną cienką powłokę PVD o grubości mieszczącej się w zakresie tolerancji wymiarowej tych elementów, a tym samym ograniczenie ilości stosowanych dotychczas aktywnych dodatków smarnościowych, które na ogół są niekorzystne z ekologicznego punktu widzenia [L. 3]. Standardowe powłoki stosowane na narzędzia nie nadają się jednak do zwiększania trwałości kinematycznych węzłów tarcia, między innymi dlatego, że elementy nimi pokryte nie mają wystarczającej odporności na zużycie zmęczeniowe (pitting). Najnowsze wyniki badań modelowych (skojarzenie stożek–trzy kule) dowodzą, że jedynie w przypadku powłok niskotarciowych (np. WC/C) trwałość zmęczeniowa węzłów tarcia może być zbliżona do trwałości węzłów bez powłoki [L. 4]. Jednak dotychczas wyniki wstępnych badań skojarzenia dwóch kół pokrytych powłoką WC/C nie potwierdzały wyników badań modelowych uzyskanych na prostych próbkach [L. 5]. Równocześnie zaobserwowano, że w przypadku stosowania powłok nie zawsze korzystne jest naniesienie powłoki na oba współpracujące elementy [L. 6].

## OBIEKTY I METODY BADAŃ

Powłokę WC/C (a-C:H:W) osadzono metodą reaktywnego rozpylania w procesie PVD w firmie Oerlikon Balzers Coating Poland Sp. z o.o. Szczegóły procesu osadzania opisane są w [L. 7].

Powłoka WC/C jest produktem o złożonej strukturze stref. Schematycznie jej budowę przedstawiono na **Rys. 1**.



**Rys. 1. Budowa powłoki WC/C**

Fig. 1. Design of the WC/C coating

Powłoka WC/C składa się z trzech warstw. Na stalowym podłożu osadzona jest warstwa Cr o grubości rzędu 100 nm. Stanowi ona międzywarstwę poprawiającą adhezję WC do podłoża stalowego [L. 8]. Twardy węgiel wolframu WC (o grubości ok. 200 nm) odpowiada za przeniesienie wysokich nacisków oraz w przypadku przetarcia zewnętrznej warstwy, chroni podłoże przed ścieraniem. Za interakcję ze współpracującym elementem odpowiada zewnątrz warstwa. Jej skład atomowy mierzony za pomocą spektrometrii mas jonów wtórnych (SIMS) wynosi: 12% W, 70% C, 15% H, 3% Ni [L. 9, 10]. Jest to wielowarstwowa, powtarzana cyklicznie, (co ok. 100 nm) struktura (potocznie zwana WC/C), w skład której wchodzi warstwa DLC bogata w WC i warstwa DLC. WC występuje w postaci nanokryształów o średnicy ok. 2 nm, rozmieszczonych losowo w warstwie DLC [L. 11]. Obecność niklu wynika z procesu technologicznego. Zewnętrzna warstwa powłoki WC/C w procesie tarcia z elementem stalowym wykazuje niski współczynnik tarcia. Dobre właściwości przeciwcierne wynikają ze znacznej zawartości

amorficznego węgla ( $sp^2$ ). Naprężenia własne powłoki są ściskające i wynoszą 900 MPa [L. 10].

Badania powierzchniowej trwałości zmęczeniowej przeprowadzono na stanowisku T-12U [L. 12] wg metody o symbolu PT C/10/90. Szczegółowo metoda PT C/10/90 opisana jest w arkuszu roboczym FVA No. 2/IV Status July 1997 [L. 13] i w publikacjach w literaturze przedmiotowej [L. 14–16].

Warunki przeprowadzenia badań metodą PT C/10/90 zestawiono w **Tab. 1**.

**Tabela 1. Warunki przeprowadzenia badań metodą PT C/10/90**

Table 1. Test conditions in PT C/10/90 method

Parametr	Wartość
uzębienie kół	C-PT (szerokość zębów kół 14 mm)
prędkość obrotowa silnika	1450 obr/min $\pm$ 3%
kierunek obrotów silnika	zgodny z ruchem wskazówek zegara
smarowanie	zanurzeniowe
wymagana liczba cykli badawczych	min. 3
Warunki w czasie biegu docierającego	
czas biegu	2 h
stopień obciążenia	6
wartość momentu obciążającego	135,5 Nm
temperatura pocz. bad. oleju	60°C (niekontrolowana)
Warunki w czasie biegu właściwego	
czas biegu	7 h
stopień obciążenia	10
wartość momentu obciążającego	372,6 Nm (10 st. obc.)
max. nacisk Hertza	1,8 GPa
temperatura badanego oleju	90 $\pm$ 3°C (kontrolowana)
maks. liczba cykli zmęczeniowych	40*10 <sup>6</sup> (odpowiada 300 h pracy)

Koła zębate o zębach prostych są wykonane ze stali konstrukcyjnej stopowej do nawęglania 20MnCr5 (polski odpowiednik 20HG), o twardości 60÷62 HRC. Powierzchnia robocza zębów kół C-PT jest szlifowana wzdłużnie ( $R_a = 0,2 \div 0,4 \mu\text{m}$ ).

Badanie polegało na przeprowadzeniu biegów przekładni badawczej w warunkach określonych w **Tab. 1**, przy stałej prędkości obrotowej, stałym obciążeniu oraz przy stałej, kontrolowanej temperaturze badanego oleju, aż do stwierdzenia wykruszenia zmęczeniowego, ocenianego wi-

zualnie poprzez pomiar pola powierzchni wykruszenia na najbardziej uszkodzonym zębie małego koła.

Badania prowadzono do chwili wystąpienia pittingu, tzn. gdy powierzchnia uszkodzeń najbardziej zniszczonego zęba małego koła osiągnie 4% jego powierzchni roboczej, czyli  $5 \text{ mm}^2$ . Badania przerwano w po: osiągnięciu 300 h czasu pracy stanowiska (ok.  $40 \cdot 10^6$  cykli zmęczeniowych), uszkodzeniu kół przez mikropitting lub wyłamaniu zęba. Na podstawie wyników z przynajmniej 3 cykli badawczych w oparciu o rozkład Weibulla obliczono powierzchniową trwałość zmęczeniową 50-procentową, oznaczoną LC50.

Skojarzenie testowe składało się z pary specjalnych kół zębatych, znanych jako koła FZG typu C-PT. Szerokość zębów obu kół wynosi 14 mm.

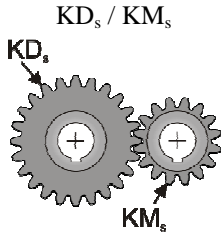
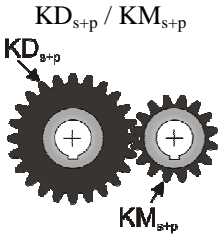
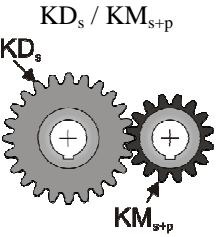
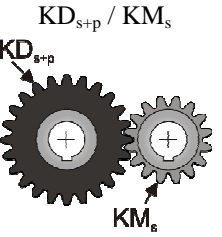
We wszystkich przypadkach badana przekładnia smarowana była mineralnym olejem przekładniowym klasy jakościowej GL-5 (klasa lepkościowa 80W/90 według klasyfikacji API – ang. *American Petroleum Institute*).

Przeprowadzono badania czterech wariantów skojarzeń materiałowych kół zębatych (koło duże/koło małe): koła bez powłoki, koła pokryte powłoką, dwa skojarzenia mieszane (tylko jedno z kół pokryte powłoką). Parametrem pozwalającym na zróżnicowanie wymuszeń panujących na dwóch kołach przekładni jest praca tarcia zęba w jednostce czasu pracy przekładni TZ. Praca tarcia zęba koła małego w jednostce czasu pracy przekładni ( $TZ_{KM}$ ) jest większa niż praca tarcia zęba koła dużego w jednostce czasu pracy przekładni ( $TZ_{KD}$ ).

Zestawienie skojarzeń materiałowych badanych w testach przekładniowych wraz z przyjętym oznaczeniami przedstawiono w **Tab. 2**.

**Tabela 2. Schematy skojarzeń kół zębatych badanych w testach przekładniowych**

Table 2. Material configurations used in gear tests

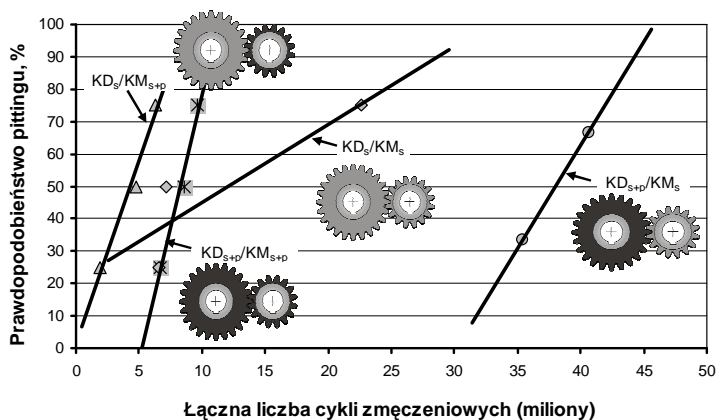
Skojarzenia materiałowe			
koła stalowe bez powłoki	koła stalowe pokryte powłoką	skojarzenie mieszane	
$KD_s / KM_s$ 	$KD_{s+p} / KM_{s+p}$ 	$KD_s / KM_{s+p}$ 	$KD_{s+p} / KM_s$ 

Skojarzenie mieszane, w którym powłokę naniesiono na koło duże, oznaczono w tekście jako  $KD_{s+p}/KM_s$ , natomiast skojarzenie mieszane, w którym powłokę naniesiono na koło małe, oznaczono jako  $KD_s/KM_{s+p}$ .

Dodatkowo w trakcie badań zmęczeniowych wykonano pomiar poziomu ogólnego przyspieszeń (wartość skuteczna – RMS). Drgania mierzono po dotarciu testowych kół zębatach.

## WYNIKI BADAŃ

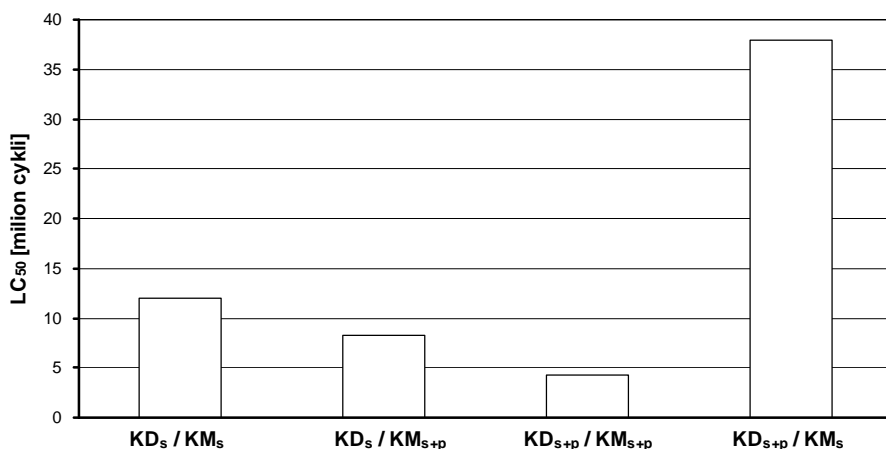
Wyniki badań kół zębatach dla zastosowanych konfiguracji materiałowych kół z powłoką WC/C zestawiono na **Rys. 2**.



**Rys. 2. Zestawienie prawdopodobieństwa wystąpienia pitingu dla badanych skojarzeń materiałowych kół zębatach z powłoką WC/C**

Fig. 2. The probability of pitting failure for investigated gears with WC/C coating

Największą trwałość uzyskano dla skojarzenia koła dużego pokrytego powłoką WC/C współpracującego z kołem stalowym bez powłoki ( $KD_{s+p}/KM_s$ ). Powszechnie przyjętym parametrem charakteryzującym odporność na powierzchniowe zużycie zmęczeniowe jest tzw. powierzchniowa trwałość zmęczeniowa 50%, oznaczona LC50. Trwałość LC50 wyliczono na podstawie sumarycznej liczby cykli zmęczeniowych 3 cykli badawczych z rozkładu Weibulla. Wyniki obliczeń zestawiono na **Rys. 3**.



Konfiguracja materiałowa współpracujących kół zębatach

**Rys. 3.** Liczba cykli zmęczeniowych odpowiadająca prawdopodobieństwu uszkodzenia 50%

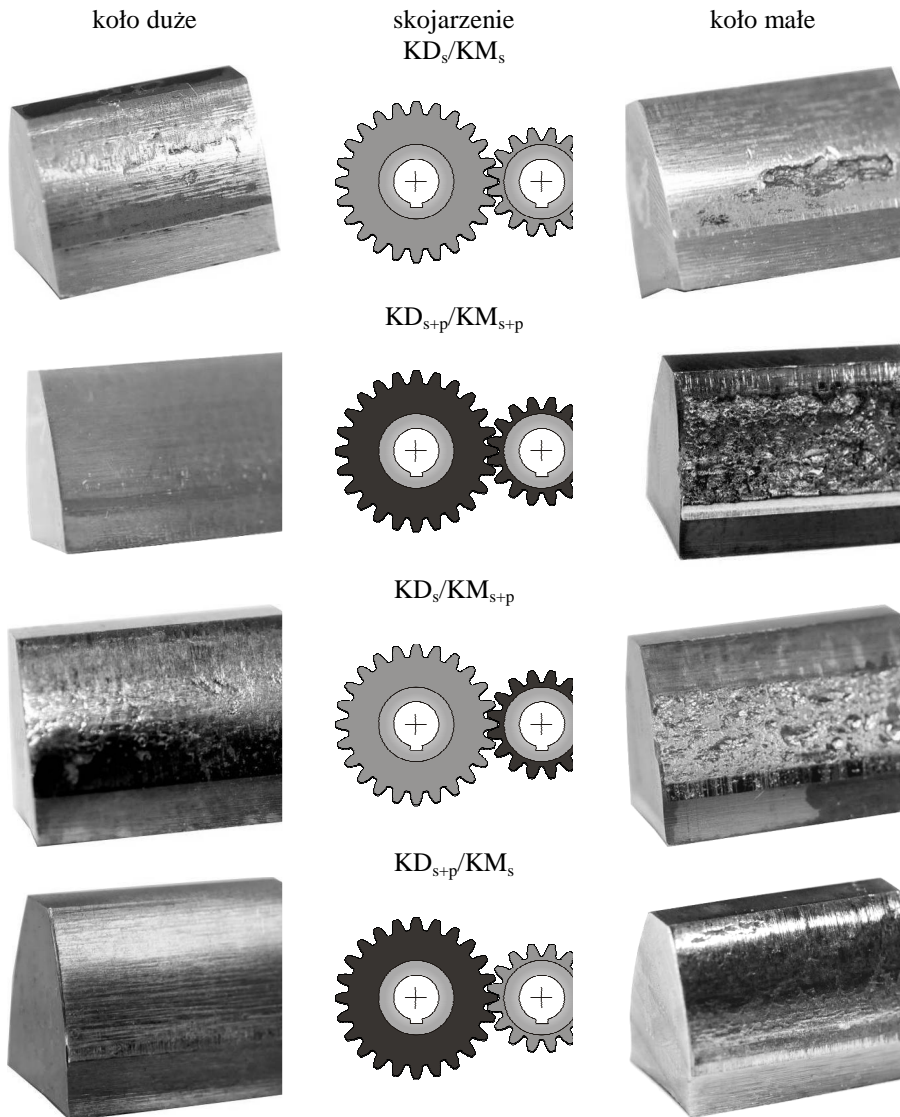
Fig. 3. The number of fatigue cycles for the 50% failure probability

Trwałość LC50 uzyskana dla skojarzenia  $KD_{s+p}/KM_s$  jest przynajmniej trzykrotnie większa niż dla pozostałych skojarzeń. We wszystkich pozostałych skojarzeniach z powłokami uzyskiwano znaczne pogorszenie trwałości LC50 w stosunku do kół stalowych bez powłoki.

Obraz powierzchni roboczej zębów kół zębatach dla wszystkich badanych skojarzeń przedstawiono na **Rys. 4**.

Analizując pole wykruszenia kół stalowych bez powłoki zauważyć można, że przyrost uszkodzeń jest stosunkowo niewielki. Widoczna jest, co prawda, znacznej wielkości wyrwa pittingowa, przekraczająca kryterium pittingu ( $5 \text{ mm}^2$ ), ale jest zdecydowanie mniejsza niż wyrwy zaobserwowane na powierzchni skojarzenia obu kół roboczych pokrytych powłoką WC/C ( $KD_{s+p}/KM_{s+p}$ ), czy skojarzenia mieszanego ( $KD_s/KM_{s+p}$ ). Propagacja zużycia pittingowego w przypadku elementu pokrytego powłoką jest znacznie bardziej dynamiczna niż w przypadku skojarzenia elementów bez powłoki.

Powierzchnie robocze zębów skojarzenia koła pokrytego powłoką z kołem stalowym  $KD_{s+p}/KM_s$  o najwyższej odporności na powierzchniowe zużycie zmęczeniowe, nie nosiły znamion zużycia pittingowego.

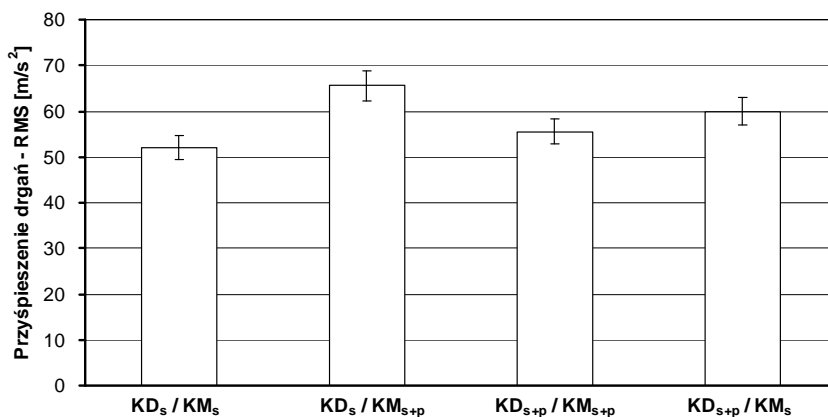


**Rys. 4. Powierzchnia robocza zębów kół zębatych dla badanych konfiguracji materiałowych kół z powłoką WC/C, po badaniach pittingu**

Fig. 4. The surface of teeth for investigated gears with WC/C coating

Wyniki pomiarów przyspieszeń drgań (wartość skuteczna – RMS) w czasie badań pittingu kół stalowych oraz kół z powłoką WC/C przedstawiono na **Rys. 5**.





Konfiguracja materiałowa współpracujących kół zębatych

**Rys. 5. Poziom ogólny przyspieszeń drgań (wartość skuteczna) stanowiska przekładniowego T-12U dla badanych skojarzeń materiałowych z powłoką WC/C**

Fig. 5. The general level of vibrations (RMS) of T-12U test rig for investigated gears with WC/C coating

Nałożone na powierzchnię roboczą zębów cienkie, twarde powłoki, chociaż znacząco zmniejszają opory ruchu (tarcie), to zwiększają wprawdzie generowane drgania, ale w niewielkim stopniu. Przyczyna zwiększenia drgań współpracujących kół z powłokami związana jest z ich większą od podłoża twardością, co wpływa na sztywność układu podłoże-powłoka, a tym samym na częstotliwość drgań własnych zębów.

## PODSUMOWANIE

Wykorzystując możliwości radykalnej zmiany właściwości warstwy wierzchniej kół zębatych, poprzez nałożenie na nie odpowiedniej powłoki o grubości mieszczącej się w granicach ich tolerancji wymiarowej (co umożliwiają technologie PVD), wykazano możliwość kilkakrotnego zwiększenia ich odporności na pitting.

Przeprowadzone badania wskazują jednoznacznie, że odporność na pitting elementów przekładni zębatej, w której zastosowano powłokę, nie tylko zależy od rodzaju powłoki, ale również od wyboru elementu pokrytego. Wiele nieudanych prób zastosowania cienkich powłok przeciwdziałających na wysokoobciążone smarowane węzły tarcia mogło skończyć się niepowodzeniem ze względu na pokrycie obu współpracujących ele-

mentów powłoką, co zdecydowanie poprawiało odporność na zacieranie, lecz było wyborem najgorszym pod względem odporności na pitting. Również pokrycie powłoką koła o większej pracy tarcia zęba w jednostce czasu (dużego koła) w odniesieniu do uzyskanych wyników jest błędne.

Uzyskane wyniki badań wskazują, że aby zwiększyć odporność na pitting kół tworzących przekładnię, powłokę należy nanieść jedynie na to koło, dla którego praca tarcia zęba w jednostce czasu pracy przekładni jest mniejsza (w rozpatrywanym przypadku jest to koło duże).

Pokonanie bariery niewystarczającej odporności na pitting skojarzeń z powłokami ma bardzo duże znaczenie praktyczne, gdyż pozwala na uzyskanie lepszych efektów technicznych niż w przypadku rozwiązań klasycznych, przy znacznym ograniczeniu negatywnego wpływu toksycznych dodatków smarowościowych na środowisko naturalne, a także uzyskanie, dzięki zwiększeniu trwałości maszyn, znaczących efektów ekonomicznych.

*Praca naukowa wykonana w ramach realizacji Programu Strategicznego pn. „Innowacyjne systemy wspomagania technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki” w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka.*

## LITERATURA

1. Michalczewski R., Szczerek M., Tuszyński W., Wulczyński J.: Badanie zdolności do przenoszenia obciążeń testowej przekładni zębatej z uzębieniem pokrytym powłoką WC/C. *Problemy Eksploatacji*. 2004, nr 4, s. 247–254.
2. Michalczewski R., Tuszyński W., Szczerek M.: Zastosowanie powłok DLC do zwiększania odporności na zacieranie kół zębatych smarowanych olejem ekologicznym. *Inżynieria Powierzchni*. 2008, nr 3, s. 49–57.
3. Michalczewski R.: Badania tribologiczne elementów z powłokami przeciwdrobnocząsteczkowymi, tworzącymi smarowany styk skoncentrowany. *Rozprawa doktorska*. Politechnika Łódzka, Łódź 2002.
4. Piekoszewski W.: Wpływ powłok na zmęczenie powierzchniowe smarowanych stalowych węzłów tarcia. *Wyd. ITeE – PIB, Radom* 2011.
5. Michalczewski R., Szczerek M., Tuszyński W., Wulczyński J.: Metoda doboru cienkich, twardych powłok przeciwdrobnocząsteczkowych dla zwiększenia trwałości wysokoobciążonych kół zębatych. *Cz. II. Wyniki testów przekładniowych*. *Tribologia*. 2007, nr 6, s. 133–149.

6. Michalczewski R.: Wpływ konfiguracji materiałowej na odporność na zacieranie smarowanych skojarzeń z elementami pokrytymi powłoką niskotarciową. *Tribologia*. 2009, nr 2, s. 93–106.
7. Marcolino N. J.: Low friction and wear resistant coatings microstructure and mechanical properties. Rozprawa doktorska. Groningen University Press. Groningen (Finlandia) 2001.
8. Kalin M., Vižintin J.: The tribological performance of DLC-coated gears lubricated with biodegradable oil in various pinion/gear material combinations. *Wear*. 2005, t. 259, s. 1270–1280.
9. Mercer C., Evans A. G., Yao N., Allameh S., Cooper C. V.: Material removal on lubricated steel gears with W- DLC-coated surfaces. *Surface and Coatings Technology*. 2003, t. 173, s. 122–129.
10. Krantz T. L., Cooper C. V., Townsend D. P., Hansen B. D.: Increased Surface Fatigue Lives of Spur Gears by Application of a Coating. Raport NASA/TM-2003-212463. Springfield 2003.
11. Jiang J. C., Meng W. J., Evans A. G., Cooper C. V.: Structure and mechanics of W DLC coated spur gears. *Surface and Coatings Technology*. 2003, t. 176, s. 50–56.
12. Tuszyński W., Wulczyński J.: Nowe metody badania wpływu olejów smarowych na zacieranie, pitting i mikropitting kół zębatych. *Tribologia*. 2007, nr 3, s. 303–317
13. FVA Information Sheet. Influence of lubricant on the pitting capacity of casecarburized gear in load-spectra and single-stage-investigations. Nr. 2/IV, 1997.
14. Hoehn B.-R., Oster P., Schedl U.: Pitting load capacity test on the FZG gear test rig with load-spectra and one-stage investigations. *Tribotest Journal*. 1999, t. 5, s. 417–430.
15. Hoehn B.-R., Michaelis K.: Influence of oil temperature on gear failures. *Tribology International*. 2004, t. 37, s. 103–109.
16. Michaelis K., Hoehn B.-R., Oster P.: Influence of lubricant on gear failures – test methods and application to gearboxes in practice. *Tribotest Journal*. 2004, t. 11, s. 43–56.

**Recenzent:**  
**Józef JASIŃSKI**

## Summary

**The aim of the study was to investigate the resistance to rolling contact fatigue of WC/C coated gears. The test were done for low-friction WC/C (a-C:H:W) coating. The coating was deposited using the PVD process by reactive sputtering.**

**The investigation of rolling contact fatigue was realised by means of a T-02U using the PT C/10/90 method.**

**Four material combinations of gears were tested: wheel and pinion uncoated, wheel and pinion coated, wheel coated and pinion uncoated, and wheel uncoated and pinion coated. The test were performed for mineral gear oil of GL-5 API performance level (80W/90)**

**The test results indicate that resistance to the pitting wear of gears with coated wheels do not depend only on the coating material but also on the selection of coated wheel. To increase the fatigue life of gears, the coating should be deposited on the gear for which the unit friction work of teeth is lower.**