

Waldemar TUSZYŃSKI\*, Marek KALBARCZYK\*,  
Remigiusz MICHALCZEWSKI\*, Krzysztof STACHURA\*\*,  
Marian SZCZEREK\*, Andrzej WIECZOREK\*\*\*

## EFEKTY ZASTOSOWANIA POWŁOKI NISKOTARCIOWEJ W PRZEKŁADNI PRZENOŚNIKA ZGRZEBŁOWEGO

### EFFECTS OF THE APPLICATION OF LOW-FRICTION COATINGS IN THE GEAR OF A CHAIN CONVEYOR

#### Słowa kluczowe:

przekładnia stożkowa, cienka powłoka niskotarciowa, zużycie, tarcie, drgania, przenośnik zgrzeblowy

#### Key words:

spiral bevel gear, thin coating, wear, friction, vibrations, chain conveyor

#### Streszczenie

Istnieje wiele problemów związanych z eksploatacją kół zębatach stożkowych o zębach łukowych. Przykładowo trudne warunki smarowania prowadzą do

---

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

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

\*\*\* Politechnika Śląska, Wydział Górnictwa i Geologii, ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice, Polska.

nadmiernego wzrostu temperatury, a to z kolei wywołuje ryzyko poważnego zużycia. W związku z tym celem tej pracy było sprawdzenie, czy poprzez osadzenie cienkiej powłoki niskotarciowej na zębach koła stożkowego jest możliwe zwiększenie odporności na zużycie, redukcja tarcia i zmniejszenie drgań przekładni.

Badania tribologiczne przeprowadzono w dwóch etapach. W fazie pierwszej, laboratoryjnej, użyto urządzenia T-30 do badania kół zębatych stożkowych, opracowanego i wytworzonego w ITeE – PIB w Radomiu. Faza druga to były badania weryfikacyjne z użyciem przenośnika zgrzeblowego stosowanego w górnictwie węgla kamiennego, pracującego w warunkach podobnych do występujących w kopalniach.

Zbadano wpływ powłoki niskotarciowej o handlowym symbolu WC/C, osadzonej na zębach koła talerzowego. Dla odniesienia zbadano także przekładnie stożkowe bez powłoki. W badaniach laboratoryjnych do smarowania użyto handlowego, samochodowego oleju przekładniowego klasy jakościowej API GL-5 i lepkościowej 80W-90. W badaniach weryfikacyjnych (półprzemysłowych) do smarowania użyto oleju bazowego mineralnego klasy lepkościowej VG32.

Badania tribologiczne wykazały, że poprzez naniesienie powłoki niskotarciowej WC/C na zęby koła talerzowego można uzyskać następujące pozytywne efekty w porównaniu z kołami stożkowymi bez powłoki: zwiększenie odporności na dwie groźne formy zużycia (zacieranie i pitting) oraz spadek temperatury oleju smarującego na skutek mniejszego tarcia – w pierwszej fazie testów. Towarzyszyły temu nieco większe drgania przekładni z powłoką, które jednak zmniejszały się w czasie testu i pod jego koniec były podobne do drgań przekładni bez powłoki.

Stwierdzono zatem, że powłoka WC/C pozwala na zwiększenie odporności kół stożkowych o zębach łukowych na zużycie i redukcję temperatury oleju smarującego w przekładniach np. przenośników zgrzeblowych użytkowanych w kopalniach węgla kamiennego.

## WPROWADZENIE

Przekładnia stożkowa składa się z zębniaka i koła talerzowego, w kształcie ściętych stożków o przecinających się osiach (z „zerowym” przesunięciem), a stosowana jest w układach napędowych, w których niezbędna jest zmiana kąta przeniesienia momentu obrotowego (zazwyczaj o 90°). Przekładnie stożkowe są obecnie szeroko stosowane w technice, a jako przykład przedstawić można motoreduktory, wśród których 20–30% wykorzystuje ten typ przekładni.

Pomimo rozwoju technologii wytwarzania producenci napędów wyposażonych w przekładnie stożkowe wysuwają wiele postulatów natury eksploatacyjnej. Jednym z podnoszonych problemów jest potrzeba obniżenia oporów ruchu odpowiedzialnych za wysoką temperaturę oleju i rosnące ryzyko przedwczesnego zużycia pracującej przekładni.

Odpowiedzią na stawiany postulat może być osadzenie cienkiej powłoki niskotarciowej na powierzchnię zębów koła stożkowego, przy czym rozwiązanie takie stosowane było dotychczas głównie w przypadku przekładni walcowych [L. 1–8]. Prac eksperymentalnych dotyczących przekładni stożkowych jest niezwykle mało [L. 9].

Wiarygodne rozwiązanie powyższych problemów wymaga zastosowania stanowiska badawczego z kołami stożkowymi, dającego możliwość badania zarówno zużywania, jak i oporów ruchu. Dostępnych jest jedynie kilka urządzeń tego typu, w tym np.: stanowisko do badania przekładni hipoidalnych (również stożkowych), opracowane w Centrum Badania Kół Zębatych (FZG) na Politechnice Monachijskiej [L. 10, 11], czy też urządzenie przeznaczone dla przemysłu lotniczego, skonstruowane w NASA Glenn Research Centre (USA) [L. 12]. Stanowiska te nie są szeroko dostępne, przez co literatura przedmiotu ograniczona jest do jedynie dwóch obszarów. Pierwszy dotyczy modeli matematycznych i optymalizacji profilu i powierzchni współpracy zębów pod kątem procesu produkcji [L. 13–15]. Drugi obszar obejmuje studia przypadku, nakierowane na wyjaśnienie przyczyn awarii przekładni stożkowych [L. 16–18].

Poza stanowiskami badawczymi czynnikiem niezbędnym do prowadzenia badań jest odpowiednia metodyka. Niestety brak jest znormalizowanych metod badawczych, a procedury autorskie publikowane są niezwykle rzadko [L. 10, 11].

W ITeE – PIB w Radomiu opracowane zostało urządzenie przeznaczone do badań przekładni stożkowych, wraz z autorską metodyką badawczą [L. 19]. W niniejszej pracy wykorzystano je do badań wpływu zastosowania powłoki niskotarciowej na odporność na zużywanie przekładni stożkowej, poziom hałasu podczas pracy oraz temperaturę oleju smarującego. Uzyskane wyniki zweryfikowano podczas badań półprzemysłowych prowadzonych na przekładni stożkowej przenośnika zgrzeblowego wykorzystywanego w przemyśle wydobywczym.

## METODYKA BADAŃ

Do badań laboratoryjnych zastosowano specjalnie zaprojektowaną przekładnię stożkową o zębach łukowych (**Rys. 1**), której elementy, tj. koło talerzowe oraz zębnik, wykonane zostały w wysokiej 5 klasie dokładności (zgodnie z DIN 3965), ze stali 18CrNi8, nawęglanej do głębokości ok. 0,6–0,9 mm, poddanej hartowaniu do 56–60 HRC. Obydwa koła przekładni wykonane zostały metodą Klingelnberga.

Testy tribologiczne przeprowadzono za pomocą opracowanego w ITeE – PIB urządzenia T-30 przeznaczonego do badania przekładni stożkowych w układzie mocy krążącej (**Rys. 2**).

Podczas biegu badawczego przekładnię testową poddawano stopniowo zwiększającemu się obciążeniu: od 1 do 12 stopnia (od 3,3 do 535 Nm): skutku-

jącemu zwiększaniem się przenoszonej mocy od 1 do 168 kW. Po 15 minutach testu pod zadaniem obciążeniem sprawdzano powierzchnię zębów zębnika pod kątem występowania zużycia, takiego jak bruzdy i strefy zacierania. Test prowadzono do momentu, kiedy całkowita powierzchnia zniszczeń przekroczyła powierzchnię jednego zęba zębnika. Obciążenie, przy którym powyższe kryterium zostaje osiągnięte, nazywane jest stopniem obciążenia niszczonego (ang. FLS – *Failure Load Stage*) i wyraża odporność przekładni zębatej na zacieranie. Podczas testu, pod kolejnymi stopniami obciążenia, mierzono moment tarcia.



**Rys. 1. Para testowych stożkowych kół zębatych o zębach lukowych**

Fig. 1. Test spiral bevel gears



**Rys. 2. Urządzenie T-30 do badania kół zębatych stożkowych**

Fig. 2. T-30 Back-to-back bevel gear test rig

Badania prowadzono przy następujących parametrach: prędkości obrotowej zębnika wynoszącej 3000 obr./min, czasie biegu 15 min pod danym stopniem obciążenia, temperaturze początkowej wynoszącej 90°C (bez stabilizacji w trakcie biegu), w warunkach smarowania zanurzeniowego, przy poziomie oleju sięgającym do połowy osi kół stożkowych.

Podczas badań mierzono również temperaturę oleju w komorze badawczej (za pomocą zanurzonej termopary), a także poziom drgań (w postaci amplitudy przyspieszenia). Ostatnie 10 pomiarów temperatury dla każdego ze stopni obciążenia było uśrednianych.

Testy prowadzono w warunkach smarowania mineralnym olejem przekładniowym SAE 80W-90, klasy jakościowej API GL-5, przeznaczonym do smarowania przekładni stożkowych lub hipoidalnych, w napędach pojazdów mechanicznych.

Do testów weryfikacyjnych (półprzemysłowych) zastosowano przekładnię stożkową o zębach łukowych, wykonaną w 9 klasie dokładności (zgodnie z DIN 3965), ze stali 18CrNiMo7, nawęglanej i hartowanej. Zębniak i koło tarczowe wykonano metodą Gleasona. Zarówno materiał, rodzaj obróbki cieplnej, jak i metoda wykonania są charakterystyczne dla przekładni stożkowych stosowanych w przenośnikach zgrzeblowych.

Wybrane parametry geometryczne przekładni testowej przedstawiono w **Tabeli 1**.

**Tabela 1. Porównanie przekładni stożkowych poddanych testom**

Table 1. Comparison of the bevel gears used in the experiment

Cecha	Testy laboratoryjne	Testy półprzemysłowe
Liczba zębów zębniaka	7	13
Liczba zębów koła tarczowego	18	43
Moduł czółowy	8,70	3,02
Nominalny kąt zarysu	20°	20°
Średni kąt pochYLENIA linii zęba	35°	30°
Kąt między osiami	90°	90°

Testy weryfikacyjne zostały przeprowadzone z wykorzystaniem przenośnika zgrzeblowego PAT-PPL-14/22 (**Rys. 3**), wyposażonego w silnik o mocy 22 kW, w warunkach zgodnych z panującymi w kopalni węgla.



**Rys. 3. Przenośnik zgrzeblowy PAT-PPL-14/22**

Fig. 3. PAT-PPL-14/22 industrial gear stand (chain conveyor)

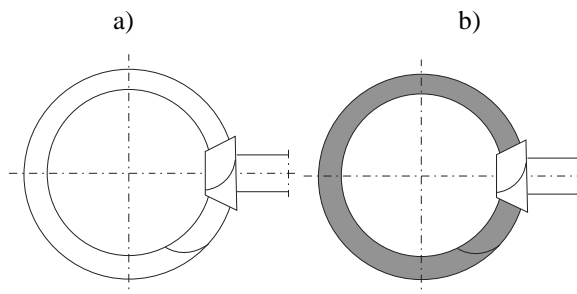
Wytwarzany przez silnik elektryczny moment obrotowy przenoszony był przez sprzęgło i przekładnię stożkową na wał z zespołem specjalnych kół napędzających łańcuchy przenośnika zgrzeblowego. Obciążenie zębniaka momentem o wartości 49 Nm realizowane było przez zastosowanie hydraulicznego siłownika napinającego zespół łańcuchów, tak że przekładnia stożkowa przenosiła stałą moc 7 kW. Zębniak przekładni testowej obracał się z prędkością 1470 obr./min. Podczas testów, co 25 godzin dokonywano pomiaru temperatury obudowy pracującej przekładni, nakierowując kamerę termowizyjną IR na obszar jak najbliższy zazębiającym się zębom. Co 25 godzin wykonywano również pomiar drgań przekładni (amplituda prędkości). Po 200-godzinnym teście przeprowadzono inspekcję kół zębatych pod kątem obecności śladów zużycia.

Podczas testów półprzemysłowych do smarowania przekładni zastosowano olej niskiej klasy lepkościowej VG32 w celu uzyskania warunków pracy znacznie trudniejszych niż te zazwyczaj panujące w przenośnikach zgrzeblowych.

Różnice między parametrami testów laboratoryjnych i półprzemysłowych wiążą się z realizacją postulatu użytkowników przenośników zgrzeblowych – jak najwierniejszego odwzorowania rzeczywistych warunków pracy (obciążeń przekładni stożkowej). Zastosowanie pomiaru prędkości drgań (przyspieszenia drgań w testach laboratoryjnych) wynika z wymagań zawartych w normach branżowych, np.: ISO 10816.

Zęby kół talerzowych badanych przekładni pokryte zostały niskotarciową powłoką a-C:H:W (nazwa handlowa: WC/C), z grupy powłok DLC, nakładanych metodą PVD (*Physical Vapour Deposition*). Grubość osadzonej powłoki wynosiła 2  $\mu\text{m}$ .

Dla odniesienia zastosowano przekładnie bez powłoki. Obydwie kombinacje pokazane są na **Rys. 4**.



**Rys. 4. Dwie badane kombinacje materiałowe: a) stal–stal (koła niepokryte), b) stal–WC/C (koło talerzowe z powłoką)**

Fig. 4. Two tested material combinations: a) steel–steel (both bevel gears uncoated), b) steel–WC/C (pinion uncoated, wheel coated)

Po testach tribologicznych powierzchnię zębów zębniaków poddano analizie przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) z mikroanali-

zaturem rentgenowskim typu EDS. Zastosowano również mikroskop sił atomowych (AFM). Do oceny chropowatości powierzchni, definiowanej parametrami chropowatości  $S_a$  i  $S_z$ , wykorzystano interferometr.

## WYNIKI BADAŃ

Podczas badań tribologicznych przeprowadzonych na stanowisku T-30 wyznaczona została odporność na zacieranie badanych przekładni, wyrażona parametrem FLS – **Tabela 2**.

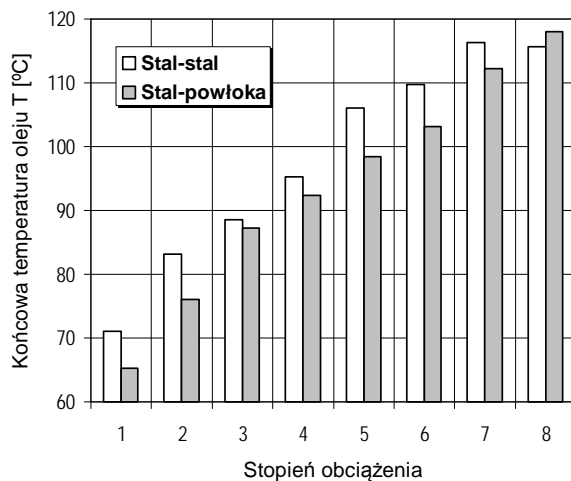
**Tabela 2. Odporność na zacieranie charakteryzowana parametrem FLS**

Table 2. The resistance to scuffing characterised by FLS

	Stal–stal	Stal–WC/C
Stopień obciążenia niszczącego (FLS)	8	10

Zaobserwowano, że nałożenie powłoki na koło talerzowe spowodowało znaczne podwyższenie odporności na zacieranie (FLS = 10) względem przekładni z elementami niepokrytymi (FLS = 8).

Na **Rys. 5** przedstawiono wyniki pomiarów temperatury dla 2 badanych kombinacji materiałowych, zarejestrowane przy obciążeniach do 8 stopnia.



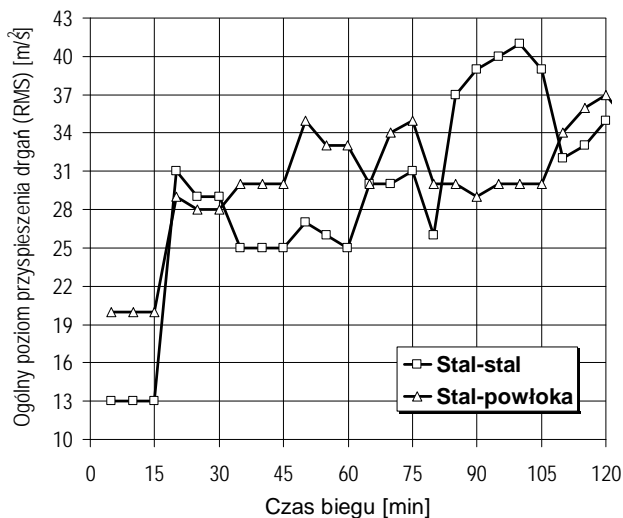
**Rys. 5. Porównanie temperatury końcowej oleju dla badanych kombinacji materiałowych pod kolejnymi stopniami obciążenia**

Fig. 5. Comparison of the final oil temperatures for the two material combinations at particular load stages

Uzyskane wyniki (**Rys. 5**) wskazują, że pokrycie powłoką WC/C koła talerzowego powoduje znaczne obniżenie temperatury oleju dla wszystkich stopni obciążenia z wyjątkiem ósmego.

Na **Rys. 6** przedstawiono wyniki pomiarów przyspieszenia drgań dla badanych kombinacji materiałowych. Dla każdego stopnia obciążenia pomiar wykonywano co 5 minut.

Uzyskane wyniki wskazują, że dla umiarkowanych obciążeń (do 5 stopnia) poziom drgań przekładni z pokrytym powłoką kołem talerzowym jest wyższy niż w przypadku przekładni bez powłoki. Przy 6 i 7 stopniu obciążenia drgania przekładni z powłoką znacząco spadają, podczas gdy drgania przekładni bez powłoki rosną. Dla 8 stopnia obciążenia poziom drgań jest zbliżony dla obydwu badanych skojarzeń.



**Fig. 6. Porównanie poziomu ogólnego drgań badanych kombinacji materiałowych dla 15 min testów pod poszczególnymi stopniami obciążenia**

Fig. 6. Comparison of the overall level of vibrations for the two material combinations at particular load stages; run duration at one load stage – 15 mins

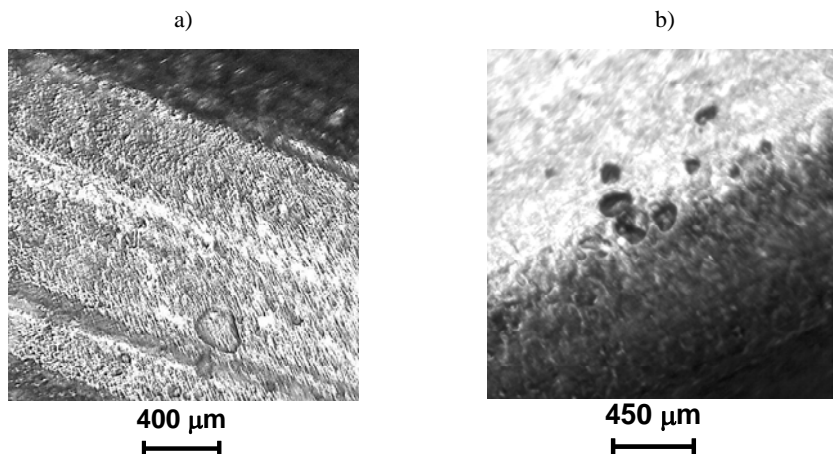
Drugi etap badań obejmował testy w warunkach półprzemysłowych.

Na **Rys. 7 i 8** przedstawiono fotografie powierzchni zębów badanych kół stożkowych, dla dwóch badanych kombinacji materiałowych: stal–stal, stal–WC/C.

W przypadku przekładni stożkowej z elementami bez powłoki, po testach w warunkach półprzemysłowych, na powierzchni zarówno zębownika, jak również koła talerzowego, widoczne są wykruszenia będące efektem zużycia zmęczeniowego (**Rys. 7**). Przekładnia z pokrytym powłoką kołem talerzowym niewykazuje podobnych śladów zużycia (**Rys. 8**).

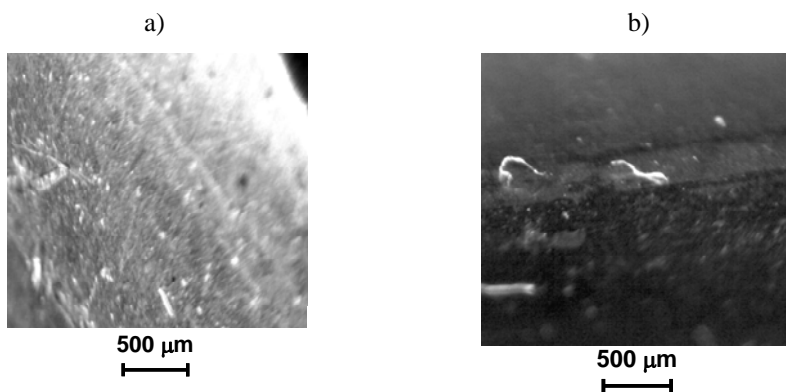
Na **Rys. 9** przedstawiono porównanie wyników pomiaru temperatury obudowy przekładni stożkowej dla obydwu testowanych kombinacji materiałowych.





**Rys. 7. Fotografie powierzchni zębów przekładni bez powłoki po testach półprzemysłowych: a) ząb zębniaka, b) ząb koła talerzowego**

Fig. 7. Macro-scale photographs of the teeth after the test with the steel-steel material combination (both bevel gears uncoated): a) pinion, b) wheel



**Rys. 8. Fotografie powierzchni zębów przekładni z powłoką po testach półprzemysłowych: a) ząb zębniaka, b) ząb koła talerzowego z powłoką WC/C**

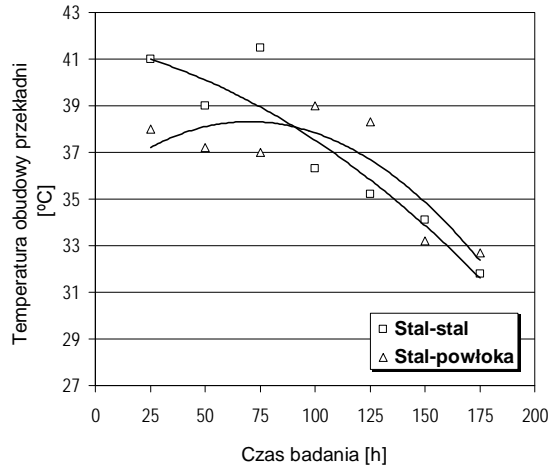
Fig. 8. Macro-scale photographs of the teeth after the test with the steel-WC/C material combination: a) pinion, b) wheel

Przebiegi zmian temperatury pokazane na **Rys. 9** wskazują, że podczas pracy, przez większą część testu, temperatura przekładni z kołem talerzowym pokrytym powłoką ma niższą wartość niż przekładnia bez powłoki.

Porównanie amplitudy prędkości drgań dla dwu kombinacji materiałowych przedstawiono na **Rys. 10**.

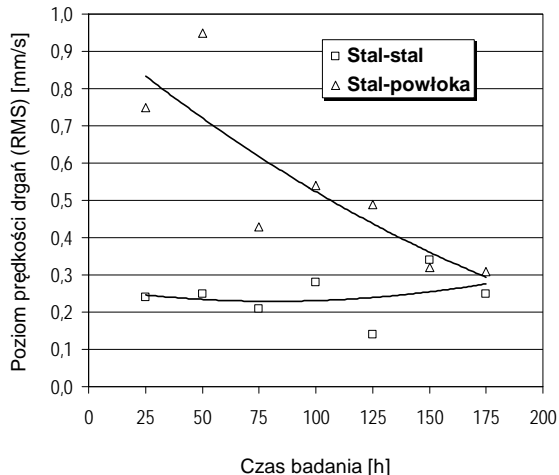
Poziom drgań przekładni z kołami bez powłoki zmienia się w trakcie testu w niewielkim stopniu. Dla przekładni z kołem pokrytym powłoką WC/C zmierzony poziom drgań jest znacznie wyższy na początku testu, a następnie spada

niemalże liniowo, dochodząc po  $\frac{3}{4}$  testu do poziomu zaobserwowanego dla przekładni bez powłoki.



**Rys. 9. Maksymalne wartości temperatury obudowy przekładni uzyskane dla badanych skojarzeń materiałowych, przy pomiarach wykonywanych co 25 h**

Fig. 9. Comparison of the maximum temperatures of the transmission housing, measured every 25 hrs for the two material combinations



**Rys. 10. Zestawienie wyników pomiaru drgań dla badanych kombinacji materiałowych; drgania charakteryzowane amplitudą prędkości przy częstotliwości podstawowej (zazębienia)**

Fig. 10. Comparison of the level of vibrations for the two material combinations; vibrations characterised by the velocity amplitude at the meshing (base) frequency

## DYSKUSJA WYNIKÓW

Osadzenie powłoki WC/C na kole talerzowym skutkuje znaczącym podniesieniem odporności przekładni na zacieranie względem przekładni z kołami niepokrytymi. Zaobserwowana poprawa związana jest ze zmniejszeniem powinowactwa materiałowego. Dodatkowo, wprowadzenie materiału o znacznie wyższej twardości w stosunku do elementów niepokrytych, skutkuje ograniczeniem tendencji do tworzenia się połączeń adhezyjnych, zmniejszając tarcie oraz ryzyko wystąpienia zacierania. Podobny efekt został zaobserwowany dla kół zębatach walcowych z powłoką [L. 5].

W następstwie wprowadzenia powłoki uzyskano również obniżenie temperatury oleju w testach laboratoryjnych pod niemal wszystkimi stopniami obciążenia (dogłębne wyjaśnienie zaistniałej sytuacji wymaga dalszych badań), z wyjątkiem stopnia 8. Nie stanowi to istotnego problemu ze względu na to, że w warunkach laboratoryjnych 8. stopień obciążenia odpowiada 75 kW przenoszonyj mocy, a w przypadku pracującego przenośnika zgrzeblowego jest to jedynie 7 kW.

Podczas badań weryfikacyjnych do smarowania przekładni stożkowej zastosowano olej bazowy (pozbawiony dodatków smarnościowych). Podczas pracy napędu przenośnika zjawisko zacierania nie wystąpiło, co spowodowane jest znacznie łagodniejszymi warunkami pracy niż w przypadku testów na stanowisku T-30 – ponaddziesięciokrotnie niższa przenoszona moc. Na powierzchni zębów przekładni bez powłoki zaobserwowano natomiast wykruszenia będące efektem zużycia zmęczeniowego – **Rys. 7**. Przyczyny pojawienia się pittingu przedstawione są poniżej.

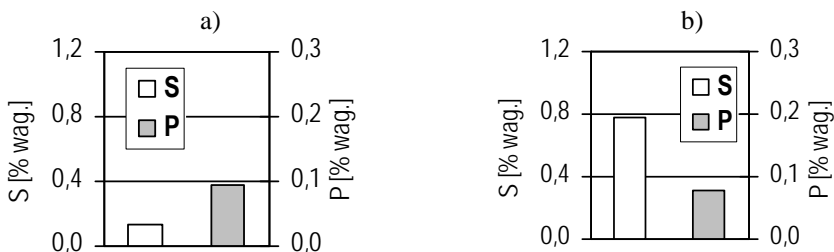
W przypadku obecności w oleju dodatków smarnościowych, podczas pracy tworzone są nieorganiczne związki z siarką, fosforem, cynkiem i tlenem. Dla przykładu w warunkach ruchu ślizgowego, bądź ślizgowo-tocznego, dodatki przeciwzatarciowe EP (na bazie organicznych związków siarki i fosforu – olej API GL-5 zastosowany do badań laboratoryjnych), powodują powstawanie siarczku żelaza FeS [L. 20–23]. Zostało to zobrazowane na **Rys. 11** przedstawiającym analizy EDS koncentracji siarki i fosforu na powierzchni zęba zębniaka zarówno w strefie tarcia, jak i poza nią.

Wyniki przedstawione na **Rys. 11** wskazują, że w efekcie tribochemicznego oddziaływania oleju z powierzchnią powstają związki siarki z żelazem (np. FeS). Siarka pochodzi z dodatków EP obecnych w oleju przekładniowym API GL-5.

Siarczek żelaza, poza ograniczeniem możliwości powstawania połączeń adhezyjnych, dzięki 5-krotnie niższej wytrzymałości na ścinanie oraz 4-krotnie niższej twardości w porównaniu ze stalą, ułatwia ścinanie wierzchołków chemicznie zmodyfikowanych nierówności, zmniejszając tarcie.

W przypadku testów półprzemysłowych prowadzonych na przekładni bez powłoki, tarcie na skutek braku obecności FeS było wyższe, powodując znaczny

wzrost ścinających naprężeń podpowierzchniowych i w efekcie wystąpienie powierzchniowych pęknięć zmęczeniowych (**Rys. 7**). W przypadku półprzemysłowych testów przekładni z powłoką WC/C opory ruchu były niższe (spadek temperatury obudowy przekładni – **Rys. 9**), a wykruszenia zmęczeniowe nie wystąpiły (**Rys. 8**).



**Rys. 11.** Uzyskane techniką EDS wyniki ilościowej analizy koncentracji siarki i fosforu na powierzchni zęba zębnika przekładni stożkowej bez powłoki, po testach laboratoryjnych: a) strefa poza śladem współpracy, b) strefa tarcia

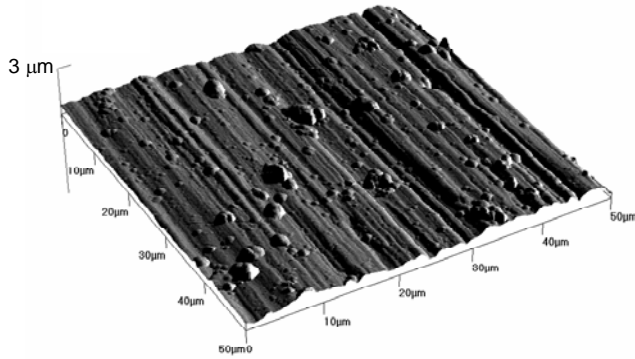
Fig. 11. EDS quantitative analyses of the concentration of S and P in the surface of the spiral bevel gear tooth: a) off the meshing zone, b) in the meshing zone; laboratory testing using T-30 test rig and steel-steel material combination

W przypadku testów laboratoryjnych pod niskimi stopniami obciążenia (**Rys. 6**) oraz w trakcie testów półprzemysłowych (**Rys. 10**), poziom drgań, jaki zarejestrowano dla przekładni z kołem talerzowym pokrytym powłoką WC/C, był znacznie wyższy niż w przypadku pary kół stożkowych niepokrytych. Jest to spowodowane wysoką twardością powłoki WC/C (1081 HV), powodującą wydłużenie czasu docierania; którego przebieg odzwierciedla niemal liniowo opadający wykres poziomu drgań dla przekładni z powłoką (**Rys. 10**).

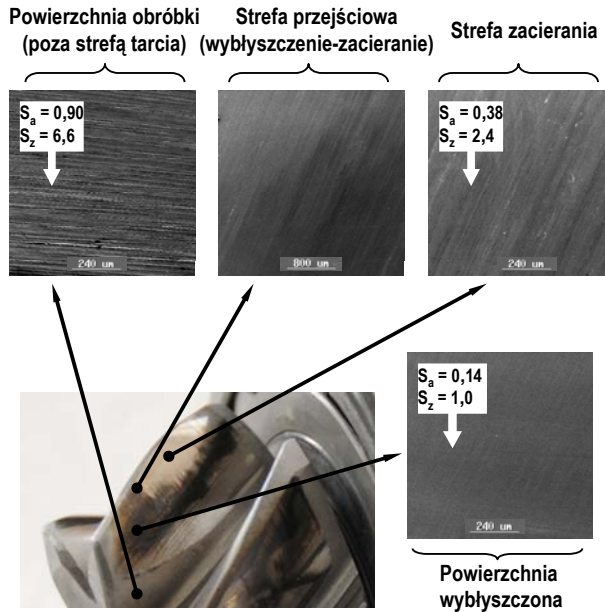
Redukcja drgań przekładni z kołem talerzowym pokrytym powłoką, wyrażna zwłaszcza podczas testów półprzemysłowych, związana jest z procesem docierania oraz ściernym działaniem powłoki powodującym polerowanie powierzchni stalowego zębnika. Na **Rys. 12** przedstawiony jest obraz, wykonany techniką AFM, powierzchni powłoki z wyraźną fazą kropelkową, odpowiedzialną za oddziaływanie ściernie względem współpracującej powierzchni stalowej (powodujące wybliszczenia).

Na **Rys. 13** przedstawiono analizę powierzchni zęba zębnika współpracującego podczas testów laboratoryjnych z zębami koła talerzowego pokrytego WC/C.

Występowanie wspomnianych wybliszczeń potwierdzają uzyskane niskie wartości parametrów  $S_a$  i  $S_z$ . Podobnie wypolerowaną (wybliszczoną) powierzchnię zaobserwowano na zębach zębnika podczas testów półprzemysłowych – **Rys. 14**.



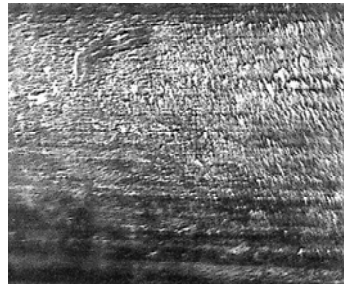
**Fig. 12. Mikrotopografia powłoki WC/C-obraz AFM**  
Fig. 12. Micro-topography of the WC/C coating–AFM image



**Rys. 13. Obrazy SEM stref zacierania i wybłyszczeń na powierzchni zęba zębnika współpracującego z pokrytym WC/C kołem talerzowym ( $S_a, S_z$  – parametry chropowości powierzchni wyrażone w mikrometrach)**

Fig. 13. SEM images of scuffed and polished areas of the pinion tooth; steel–WC/C material combination ( $S_a, S_z$  – roughness parameters expressed in microns)

Potencjalny pozytywny wpływ polerowania (wybłyszczania) zębnika niepokrytego przez koło pokryte powłoką WC/C będzie przedmiotem dalszych badań.



150  $\mu\text{m}$

**Rys. 14. Fotografia zęba zębника współpracującego podczas testów półprzemysłowych z pokrytym powłoką WC/C kołem talerzowym**

Fig. 14. Macro-scale photograph of the pinion tooth after the industrial test with the steel-WC/C material combination

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Po przeprowadzeniu badań laboratoryjnych i półprzemysłowych zaobserwowano, że pokrycie niskotarciową powłoką WC/C koła talerzowego przekładni stożkowej o zębach łukowych pozwala na uzyskanie szeregu pozytywnych efektów w porównaniu z przekładnią bez powłoki (dotychczas zostało to stwierdzone jedynie dla przekładni walcowych):

- wzrost odporności na dwie niszczące formy zużywania: zacieranie (testy laboratoryjne) oraz pitting (testy półprzemysłowe);
- spadek temperatury oleju (w obydwu rodzajach testów), a zwłaszcza w pierwszej fazie testów półprzemysłowych oraz niemal pod wszystkimi stopniami obciążenia (w testach laboratoryjnych), z wyjątkiem stopnia 8.

Powyższym efektom towarzyszy – w początkowej fazie testów laboratoryjnych oraz półprzemysłowych – niepożądane wysokie poziomy drgań dla przekładni z kołem pokrytym powłoką WC/C. Natomiast w dalszej części testów poziomy drgań obydwu badanych skojarzeń zrównują się.

Zaproponowane rozwiązanie może zostać zastosowane dla zwiększenia odporności przekładni na zużycie oraz obniżenia temperatury oleju w przekładni stożkowej o zębach łukowych.

Wyniki badań laboratoryjnych, potwierdzone pozytywnymi wynikami uzyskanymi podczas testów weryfikacyjnych (półprzemysłowych), pozwalają stwierdzić, że nałożenie powłoki WC/C na koło stożkowe może poprawić zarówno trwałość, jak i niezawodność napędu przenośnika zgrzeblowego stosowanego w kopalniach węgla kamiennego.

**LITERATURA**

1. 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.
2. Martins R.C., Moura P.S., Seabra J.O.: MoS<sub>2</sub>/Ti low-friction coating for gears. *Tribology International*. 2006, t. 39, s. 1686–1697.
3. Martins R., Amaro R., Seabra J.: Influence of low friction coatings on the scuffing load capacity and efficiency of gears. *Tribology International*. 2008, t. 41, s. 234–243.
4. Michalczewski R., Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszynski W.: The lubricant-coating interaction in rolling and sliding contacts. *Tribology International*. 2009, t. 42, s. 554–560.
5. Tuszynski W., Michalczewski R., Szczerek M., Kalbarczyk M.: A new scuffing shock test method for the determination of the resistance to scuffing of coated gears. *Archives of Civil and Mechanical Engineering (ACME)*. 2012, t. 12, s. 436–445.
6. Michalczewski R., Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszynski W., Antonov M.: The rolling contact fatigue of PVD coated spur gears. *Key Engineering Materials*. 2013, t. 527, s. 77–82.
7. Michalczewski R., Kalbarczyk M., Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszynski W.: The rolling contact fatigue of WC/C-coated spur gears. *Journal of Engineering Tribology*. 2013, t. 227 (8), s. 850–860.
8. Michalczewski R., Piekoszewski W., Tuszynski W., Szczerek M.: The problems of resistance to scuffing of heavily loaded lubricated friction joints with WC/C coated parts. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2014, t. 66 (3), s. 434–442.
9. Basiniuk U.L., Levantsevich M.A., Maksimchenko N.N., Mardasevich A.I.: Improvement of triboengineering properties and noise reduction of tooth gears by cladding functional coatings on working surfaces of interfaced teeth. *Journal of Friction and Wear*. 2013, t. 34 (6), s. 438–443.
10. Winter H., Richter M.: Scuffing load capacity of hypoid and bevel gears. *Materiały 8. Sympozjum JSME „Gearing”, Sendai (Japonia)*. 1975, s. 1–12.
11. Conrado E., Höhn B-R., Michaelis K., Klein M.: Influence of oil supply on the scuffing load-carrying capacity of hypoid gears. *J. Engineering Tribology*. 2007, t. 221, s. 851–858.
12. Hadschuh R.F.: Testing of face-milled spiral bevel gears at high-speed and load. *NASA/TM-2001-210743*, March 2001, s. 1–8.
13. Akimov V.V.: Initial contour optimization for bevel gears with circular teeth. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2008, t. 37 (4), s. 371–378.
14. Suh S-H., Jung D-H., Lee E-S., Lee S-W.: Modelling, implementation, and manufacturing of spiral bevel gears with crown. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2003, t. 21, s. 775–786.
15. Tsai Y.C., Hsu W.Y.: The study on the design of spiral bevel gear sets with circular-arc contact paths and tooth profiles. *Mech. Mach. Theory*. 2008, t. 43, s. 1158–1174.
16. Sekercioglu T., Kovan V.: Pitting failure of truck spiral bevel gear. *Engineering Failure Analysis*. 2007, t. 14, s. 614–619.

17. Fonte M., Reis L., Freitas M.: Failure analysis of a gear wheel of a marine azimuth thruster. *Engineering Failure Analysis*. 2011, t. 18, s. 1884–1888.
18. Siddiqui N.A., Deen K.M., Zubair Khan M., Ahmad R.: Investigating the failure of bevel gears in an aircraft engine. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. 2013, t. 1, s. 24–31.
19. Michalczewski R., Kalbarczyk M., Tuszyński W., Szczerek M.: The scuffing resistance of WC/C coated spiral bevel gears. *Key Engineering Materials*. 2014, t. 604, s. 36–40.
20. Praca zbiorowa (red. Ku P.M.): *Interdisciplinary approach to friction and wear*. Wyd. Southwest Research Institute. Waszyngton 1968.
21. Tuszyński W.: An effect of lubricating additives on tribochemical phenomena in a rolling steel four-ball contact. *Tribology Letters*. 2006, t. 24 (3), s. 207–215.
22. Tuszyński W., Szczerek M.: Qualitative discrimination between API GL performance levels of manual transmission fluids by comparing their EP properties determined in a new four-ball scuffing test. *Tribology International*. 2013, t. 65, s. 57–73.
23. Tuszyński W., Szczerek M., Michalczewski R., Osuch-Słomka E., Rogoś E., Urbański A.: The potential of the application of biodegradable and non-toxic base oils for the formulation of gear oils – model and component scuffing tests. *Lubrication Science*. 2014, t. 26, s. 327–346.

## Summary

**There are many problems in the operation of spiral bevel gears; for example, difficult lubrication conditions lead to excessively high oil temperature and the risk of severe wear. Thus, the aim of this work was to check whether, by the deposition of a thin, hard, low-friction coating on the teeth flanks of spiral bevel gears, it is possible to improve the resistance to wear, reduce friction, and possibly the gear vibrations.**

**The tribological experiments were carried out in two phases. In the first phase, a bevel gear test rig was used (laboratory testing). In the second phase, a verification test was performed using an industrial gear stand (chain conveyor) working under conditions typical of coal mines.**

**The low-friction WC/C coating was tested. The coating was deposited on the teeth of the wheels. For reference, the uncoated pairs of spiral bevel gears were tested. In the laboratory testing, a commercial, mineral automotive gear oil of the API GL-5 performance level and 80W-90 viscosity grade was used for lubrication. For lubrication of the industrial gears, a mineral base oil of the low, VG32 viscosity grade was chosen.**

**The results obtained show that, by the deposition of the low-friction WC/C coating on the teeth of the wheel, the following beneficial effects can be achieved in comparison with the case of the uncoated gears: a rise in the resistance to the two forms of severe wear (scuffing and pitting), and a drop in the oil temperature (lower friction) at first tests stages. The above effects**



are accompanied at the first stages of the tests by an undesired, higher level of vibrations in case of the steel–WC/C material combination. However, throughout the test, the vibrations for the two material combinations became similar.

Thus, the WC/C coating can be applied to increase the wear resistance and decrease the oil temperature in transmissions containing spiral bevel gears in, e.g., chain conveyors installed in coal mines.