

**Waldemar TUSZYŃSKI\***, **Marek KALBARCZYK\***,  
**Ernesto HOYOS de la GARZA\*\***, **Jerzy MYDLARZ\*\*\***,  
**Bartosz KISER\*\*\***, **Piotr HANDZLIK\*\*\***

## **METODY I URZĄDZENIE DO BADANIA TARCIA I ZUŻYWANIA KÓŁ ZĘBATYCH WALCOWYCH W UKŁADZIE MOCY KRAŻĄCEJ**

### **METHODS AND TEST RIG FOR THE BACK-TO-BACK TESTING OF FRICTION AND WEAR OF SPUR GEARS**

#### **Słowa kluczowe:**

koła zębate walcowe, wzorcowanie, olej referencyjny, zacieranie

#### **Key words:**

spur gear, validation, reference oil, scuffing, scoring

#### **Streszczenie**

Określenie wpływu nowego rodzaju oleju smarowego (np. ekologicznego) czy nowego sposobu modyfikacji powierzchni zęba (np. poprzez naniesienie cien-

---

\* Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy (ITeE – PIB), Zakład Tribologii, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, Polska, tel. 48 3644241 w. 209, e-mail: waldemar.tuszynski@itee.radom.pl

\*\* Uniwersytet w Monterrey, Av. Ignacio Morones Prieto 4500 Pte., 66238 San Pedro Garza Garcia, N.L., Meksyk.

\*\*\* INVENIO Sp. z o.o., ul. Montażowa 3B, 43-300 Bielsko-Biała, Polska.

kiej, twardej powłoki niskotarciowej) na trwałość kół zębatych jest możliwe jedynie poprzez zastosowanie badań eksperymentalnych. W tym celu w Zakładzie Tribologii ITeE – PIB w Radomiu opracowano urządzenie T-12UF do badania tarcia i zużycia kół zębatych walcowych w układzie mocy krążącej. Urządzenie pozwala na badanie trzech form zużywania: zacierania, pittingu i mikropittingu.

W artykule przedstawiono urządzenie T-12UM będące zmodyfikowaną wersją urządzenia T-12UF. Dla celów wdrożenia urządzenia w jednej z krajowych uczelni wyższych niezbędne było jego wzorcowanie z użyciem olejów referencyjnych o skrajnie różnych właściwościach przeciwzatarciowych – tzw. olejów „Low” i „High”. Wzorcowania dokonano dla dwóch metod badawczych procesu zacierania. W badaniu użyto czterech olejów referencyjnych – po dwa („Low” i „High”) dla obu metod. W czasie wzorcowania dokonano próby identyfikacji zacierania, stosując metodę pomiaru momentu sił tarcia.

Stwierdzono, że uzyskane wyniki wzorcowania są poprawne, co wskazuje na właściwe wykonywanie badań oraz prawidłowość pracy urządzenia.

## WPROWADZENIE

Weryfikacja jakości nowo opracowywanych olejów przekładniowych oraz nowych metod modyfikacji powierzchni roboczej zębów kół zębatych wymaga wykonywania badań z użyciem testowej przekładni zębatej. Najczęściej stosuje się kompleks metod badawczych opracowany w Centrum Badań Przekładniowych (FZG) Politechniki Monachijskiej. Szacuje się, że na świecie pracuje obecnie ok. 500 urządzeń do badań przekładniowych wg standardu FZG [L. 1].

W Zakładzie Tribologii ITeE – PIB w Radomiu opracowano urządzenie T-12UF do badania tarcia i zużywania kół zębatych walcowych w układzie mocy krążącej. Na potrzeby wdrożenia w jednej z krajowych uczelni wyższych opracowano zmodyfikowaną wersję oznaczoną symbolem T-12UM. Pozwala ona na realizację wielu metod badawczych, znormalizowanych i własnych – **Tab. 1**.

Autorzy przedstawili opis metod badawczych z **Tab. 1** w wielu wcześniejszych publikacjach np. [L. 2–5].

Stwierdzenie poprawności działania urządzenia badawczego wymaga jego wzorcowania. Używa się do tego olejów referencyjnych o skrajnie różnych właściwościach przeciwzatarciowych – tzw. olejów „Low” i „High”. Na potrzeby wzorcowania urządzeń do badań przekładniowych, spełniających standardy FZG, na świecie opracowano dotychczas cztery oleje referencyjne – po dwa („Low” i „High”) dla dwóch metod badawczych zacierania: metody realizowanej w warunkach „zwykłych” i metody w warunkach „zaostrzonych”. W artykule przedstawiono wyniki wzorcowania, które odniesiono do wartości oczekiwanych/certyfikowanych dla każdego oleju referencyjnego.

**Tabela 1. Metody badań realizowanych za pomocą urządzenia T-12UM**

Table 1. Test methods, performed using the T-12UM test rig

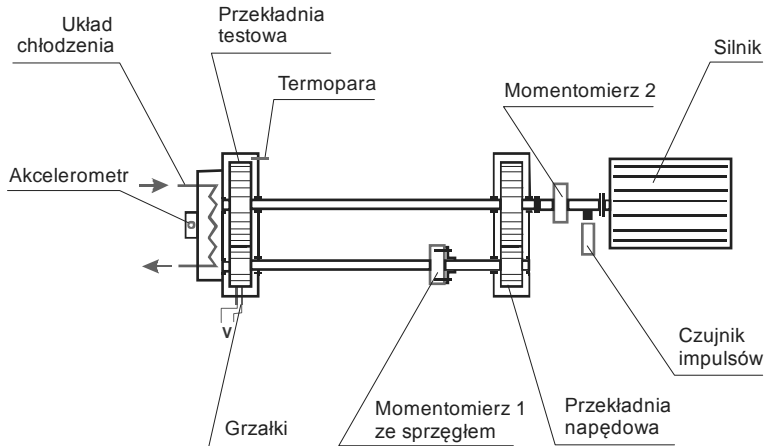
Lp.	Badana forma zużycia zęba	Robocza nazwa procedury	Dokumenty źródłowe
1	Zacieranie / zatarcie	Metoda badania zacierania kół zębatych przy zredukowanej prędkości obrotowej silnika (500 obr./min)	ISO 14635-3
2		Metoda badania zacierania w warunkach „zwykłych”	PN-78/C-04169 ISO 14635-1 CEC L-07-95 DIN 51 354 IP 334 ASTM D 5182
3		Metoda badania zacierania w warunkach „zaostrzonych”	ISO 14635-2 CEC L-84-02 Arkusz roboczy FVA No. 243
4		Metoda badania zacierania w warunkach „szokowych”	Arkusz roboczy FVA No. 243
5		Własna metoda badania zacierania w warunkach „szokowych” – dla powłok na zębach kół zębatych	
6	Mikropitting	Metoda badania mikropittingu	Arkusz roboczy FVA No. 54/7, 1993
7		Skrócona metoda badania mikropittingu	Arkusz roboczy DGMK No. 575
8	Pitting	Metoda badania pittingu w warunkach stałych wymuszeń	Arkusz roboczy FVA No. 2/IV

Drugim, oprócz wzorcowania, zagadnieniem badawczym podjętym w artykule jest próba stwierdzenia, czy istnieje możliwość identyfikacji zacierania kół zębatych walcowych metodą monitoringu, np. momentu sił tarcia. Do tej pory w badaniach kół zębatych wg standardu FZG, stosuje się wyłącznie kryterium zużyciowe identyfikacji zacierania [L. 3]. Za wprowadzeniem kryterium tarcia do identyfikacji zacierania przemawia to, że część definicji/modelów tego procesu utożsamia zacieranie/zatarcie właśnie z tarcieniem. Dotyczy to definicji podanych m.in. przez: S. Nosala [L. 6], A. Dysona [L. 7] czy G.W. Stachowiaka i A.W. Batchelora [L. 8].

## URZĄDZENIE BADAWCZE

### Część mechaniczna

Układ kinematyczny urządzenia T-12UM do badania kół zębatach walcowych, z podaniem miejsc rozmieszczenia elementów pomiarowych, przedstawiono na Rys. 1.



**Rys. 1. Układ kinematyczny urządzenia T-12UM do badania kół zębatach walcowych**  
Fig. 1. Kinematic scheme of the T-12UM spur gear test rig

Podstawowa część urządzenia składa się z dwóch przekładni – testowej i napędowej. Przekładnia testowa składa się z pary kół zębatach walcowych, zanurzonych w badanym oleju (ok. 1,5 l). Komora badawcza wyposażona jest w elementy grzejne służące do uzyskiwania żądanej temperatury oleju (do 120°C). Do utrzymania w czasie biegu stałej temperatury oleju w przekładni testowej (niezbędne w badaniu pittingu kół) służą kanały chłodzące w pokrywach komory, zasilane przez autonomicznie działający wymiennik ciepła, pracujący w zamkniętym, obiegowym układzie wody dejonizowanej.

Zamiast zanurzeniowego można zastosować obiegowy układ smarowania – do niektórych metod badania mikropittingu.

W przekładni napędowej umieszczona jest para kół zębatach o identycznej jak badane liczbie zębów, ale znacznie zwiększonej szerokości (do 40 mm) w celu uzyskania nieograniczonej trwałości. Obie przekładnie połączone są wałkami skrętnymi.

Obciążenie (skręcenie wałków) wywierane jest układem dźwigniowym z zespołem obciążników, zapewniającym uzyskanie obciążeń do ponad 720 Nm. Po skręceniu wałków i zaciśnięciu sprzęgła śrubami w układzie krąży moment

obciążający (skrętny) mierzony momentomierzem (na **Rys. 1** jest to „momentomierz 1”).

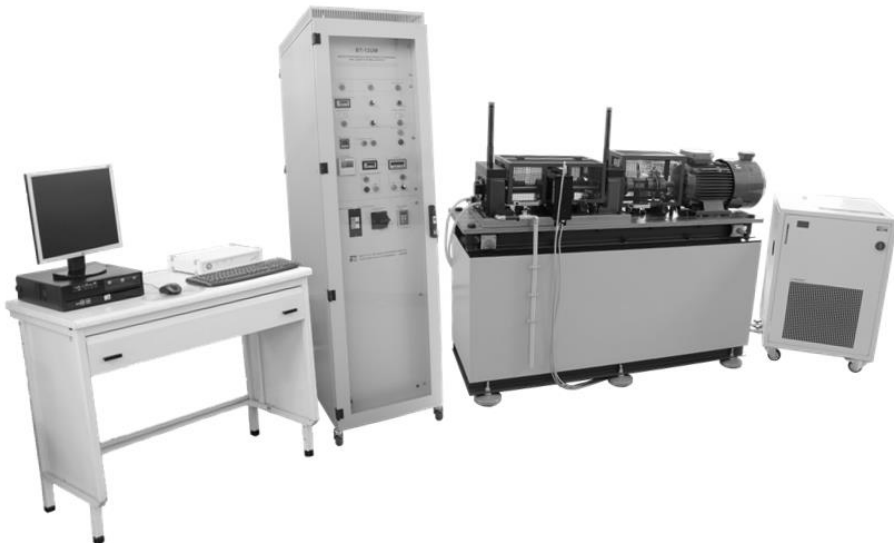
Pomiar momentu sił tarcia realizowany jest za pomocą momentomierza (na **Rys. 1** jest to „momentomierz 2”), umieszczonego pomiędzy przekładnią napędową a silnikiem. Pomiar momentu sił tarcia ma pozwolić np. na porównywanie materiałów, z których wykonane są testowe koła zębate – z punktu widzenia właściwości przeciwtarciowych, co jest istotne np. przy potencjalnym badaniu powłok niskotarciowych osadzanych na powierzchni roboczej zębów.

W urządzeniu zastosowano asynchroniczny silnik prądu zmiennego o mocy znamionowej 15 kW osiąganą przy prędkości znamionowej 3000 obr./min.

Dzięki zasilaniu silnika poprzez przemiennik częstotliwości (falownik) możliwa jest bezstopniowa regulacja prędkości silnika. Czujnik impulsów umożliwia pomiar prędkości obrotowej silnika i zliczanie obrotów.

Biegi badawcze kończą się automatycznie po osiągnięciu zadanej liczby obrotów, upływnięciu zadanego czasu badania lub w wyniku wystąpienia sytuacji awaryjnej związanej z przekroczeniem nastawionego, dopuszczalnego poziomu drgań lub przeciążeniem silnika. Poziom ogólny drgań (przyspieszenie) jest mierzony za pomocą akcelerometru.

Na **Rys. 2** pokazano zdjęcie urządzenia T-12UM do badania kół zębatach walcowych z systemem sterująco-pomiarowym oraz wymiennikiem ciepła.



**Rys. 2.** Zdjęcie urządzenia T-12UM do badania kół zębatach walcowych ze skomputeryzowanym systemem pomiarowym (po lewej stronie), szafą sterowniczą (w środku) oraz wymiennikiem ciepła (po prawej stronie)

**Fig. 2.** Photograph of the T-12UM spur gear test rig with a computer-aided measuring system (left side), control system (in the middle) and cooler (right side)

Część badawcza urządzenia T-12UM umieszczona jest na sztywnym postumencie zaopatrzonego w antywibracyjne stopki. Takie rozwiązanie zapewnia maksymalne tłumienie drgań przenoszonych na podłogę laboratorium.

Projekt części mechanicznej urządzenia T-12UM został opracowany przez zespół konstruktorów z firmy Invenio.

### **System sterująco-pomiarowy**

System sterujący pozwala m.in. na włączenie i automatyczne wyłączenie silnika po osiągnięciu zadanej liczby obrotów, ustawianie prędkości obrotowej silnika, zmianę kierunku obrotów silnika w celu zmiany warunków smarowania przekładni testowej, ustawianie i kontrolę temperatury oleju. Główne elementy systemu sterującego umieszczone są w szafie sterowniczej (pokazanej na **Rys. 2**).

System sterujący zaopatrzony jest w szereg elektrycznych (wyłączniki krańcowe) i mechanicznych zabezpieczeń uniemożliwiających przypadkowe włączenie urządzenia. Dodatkowo łatwo dostępne są specjalne wyłączniki (tzw. „grzybki”) do awaryjnego wyłączania urządzenia. Kolejne zabezpieczenie polega na automatycznym wyłączeniu urządzenia przy przekroczeniu zadanego poziomu drgań. Jest to istotne w długich biegach badawczych, nienadzorowanych bezpośrednio przez operatora.

W skład systemu pomiarowego (**Rys. 2**) wchodzi wzmacniacz cyfrowy, zestaw przetworników pomiarowych oraz komputer ze specjalnym programem. W skład zestawu przetworników pomiarowych wchodzi dwa momentomierze i termopara. Wielkościami mierzonymi są: moment obciążający koła zębate (skretny), moment sił tarcia, prędkość obrotowa silnika, liczba obrotów silnika, temperatura badanego oleju i czas badania.

Po wzmocnieniu we wzmacniaczu cyfrowym sygnały z przetworników pomiarowych przekazywane są do komputera. Specjalny program komputerowy wyświetla przebiegi mierzonych wielkości w funkcji czasu i dokonuje ich zapisu na dysku komputera.

Po zakończeniu biegu badawczego program komputerowy generuje raport z przebiegami zmierzonych wielkości, który można wydrukować.

Zaprezentowane urządzenie, podobnie jak inne opracowane w ITeE – PIB w Radomiu urządzenia do badań tribologicznych, zostało wprowadzone do tzw. Systemu Badań Tribologicznych [**L. 9**].

## **METODYKA BADAWCZA**

### **Metoda badania zacierania w warunkach „normalnych” A/8,3/90**

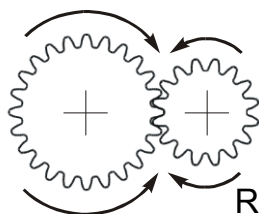
Metoda A/8,3/90 opisana jest w normach wymienionych w **Tab. 1**.

Badanie polega na zastosowaniu danego oleju do smarowania testowych kół zębatach pracujących w warunkach podanych poniżej, przy stałej prędkości

obrotowej, wzrastającym stopniowo obciążeniu oraz przy temperaturze początkowej badania jednakowej na początku każdego biegu badawczego, aż do uzyskania stopnia obciążenia niszczącego (ang. *Failure Load Stage – FLS*).

Warunki badań:

- |   |   |
|---|---|
| – typ kół testowych                     | FZG A   |
| – sposób mycia kół                      | w benzynie ekstrakcyjnej  |
| – prędkość obrotowa silnika             | 1500 obr./min   |
| – prędkość obwodowa na średnicy tocznej | 8,3 m/s   |
| – czas biegu badawczego                 | 15 min  |
| – kierunek obrotów                      | „normalny” ( <b>Rys. 3</b> )  |
| – min. i maks. stopień obciążenia       | od 1 do 12  |
| – moment obciążający                    | od 3 do 535 Nm,<br>zmieniany stopniowo                                  |
| – maks. nacisk Hertza                   | od 0,15 do 1,8 GPa  |
| – początkowa temp. badanego oleju       | 90°C  |
| – rodzaj smarowania                     | niestabilizowana w czasie badań<br>zanurzeniowe (ilość oleju ok. 1,5 l) |
| – poziom oleju                          | do osi kół  |



**Rys. 3.** Kierunki obrotów silnika stanowiska T-12UM; kierunek „normalny” wskazują górne strzałki, natomiast kierunek „odwrócony” (R – reverse) wskazują dolne strzałki – duże koło obraca się wówczas w stronę przeciwną do ruchu wskazówek zegara

**Fig. 3.** Direction of rotations of the motor; upper arrows indicate “normal” rotation, lower arrows indicate “reverse” rotation – wheel rotates in the counter-clockwise direction

Badania (metoda „wizualna”) prowadzi się do momentu spełnienia kryterium zatarcia, tj. osiągnięcia stopnia obciążenia niszczącego (FLS) powodującego powstanie uszkodzeń zębów małego koła o łącznej szerokości równej szerokości jednego lub więcej zębów lub do osiągnięcia maksymalnego, 12. stopnia obciążenia. Istnieje także metoda „wagowa” oceny zużycia, której w niniejszym artykule nie opisano.

W zależności od potrzeb oprócz kryterium podstawowego, tj. stopnia obciążenia niszczącego (FLS), do oceny właściwości przeciwzatarciowych można

wykorzystać także kryterium dodatkowe, tj. progresję (rozwój) uszkodzeń roboczej powierzchni zęba małego koła.

### Metoda badania zacierania w warunkach „zaostrzonych” A10/16,6R/120

Metoda A10/16,6R/120 opisana jest w normach podanych w **Tab. 1**.

Badanie polega na zastosowaniu danego oleju do smarowania testowych kół zębatych pracujących w warunkach podanych poniżej, przy stałej prędkości obrotowej, wzrastającym stopniowo obciążeniu oraz przy temperaturze początkowej badania jednakowej na początku każdego biegu badawczego, aż do uzyskania stopnia obciążenia niszczącego (FLS).

Warunki badań:

– typ kół testowych	FZG A10
– sposób mycia kół	w benzynie ekstrakcyjnej
– prędkość obrotowa silnika	3000 obr./min
– prędkość obwodowa na średnicy tocznej	16,6 m/s
– czas biegu badawczego	7 min 30 s
– kierunek obrotów	„odwrócony” ( <b>Rys. 3</b> )
– min. i maks. stopień obciążenia	od 1 do 10 (dopuszcza się 11 i 12)
– moment obciążający	od 3 do 373 Nm zmieniany stopniowo
– maks. nacisk Hertza	od 0,2 do 2,2 GPa
– początkowa temp. badanego oleju	120°C niestabilizowana w czasie badań
– rodzaj smarowania	zanurzeniowe (ilość oleju ok. 1,5 l)
– poziom oleju	do osi kół

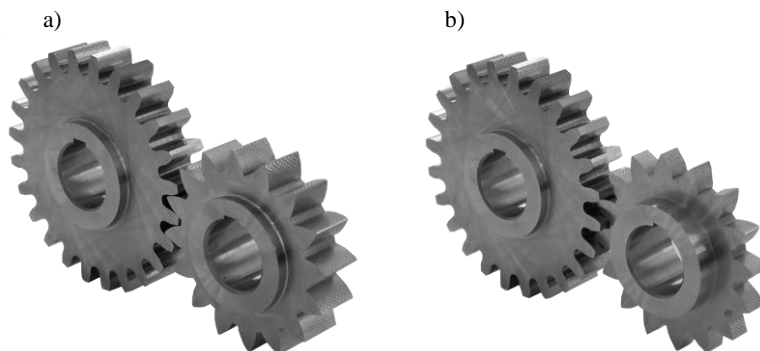
Badania prowadzi się do spełnienia kryterium zatarcia, tj. osiągnięcia stopnia obciążenia niszczącego (FLS) powodującego powstanie uszkodzeń zębów małego koła zajmujących obszar o powierzchni większej niż 100 mm<sup>2</sup> lub do osiągnięcia maksymalnego, 10. stopnia obciążenia.

Podobnie jak w poprzednio opisanej metodzie, w zależności od potrzeb, oprócz kryterium podstawowego, tj. stopnia obciążenia niszczącego (FLS), do oceny właściwości przeciwwzartarciowych można wykorzystać także kryterium dodatkowe, tj. progresję (rozwój) uszkodzeń roboczej powierzchni zęba małego koła.

### Testowe koła zębate

Fotografie kół testowych stosowanych do badania zacierania w warunkach „normalnych” i „zaostrzonych” przedstawiono na **Rys. 4**.





**Rys. 4. Zdjęcia kół testowych typu A (a) i typu A10 (b)**  
 Fig. 4. Photographs of the A-type (a) and A10-type (b) test gears

Do badania zacierania w warunkach „normalnych” stosuje się specjalne koła zębate, znane jako koła FZG typu A (**Rys. 4a**). Koła te są nawęglane, hartowane i odpuszczane. Powierzchnia robocza zębów jest szlifowana krzyżowo metodą Maaga. Szerokość zębów obu kół wynosi 20 mm. Koła wykonane są w wysokiej klasie dokładności – 5 według DIN 3962. Liczba zębów dużego koła wynosi 24, zaś małego 16. Moduł wynosi 4,5 mm, kąt zarysu  $20^\circ$ , a współczynniki korekcji 0,8532 i -0,5 odpowiednio dla małego i dużego koła.

Do badania zacierania w warunkach „zaostrzonych” stosuje się specjalne koła zębate, znane jako koła FZG typu A10 (**Rys. 4b**). Różnica polega na tym, że szerokość zębów mniejszego koła (zębniaka) wynosi tu 10 mm, co pozwala znacząco podnieść naciski jednostkowe w czasie badań.

### Oleje referencyjne

W badaniach zastosowano cztery oleje referencyjne, po dwa dla każdej z obu wyżej opisanych metod badania zacierania. Krótką charakterystykę olejów referencyjnych przedstawiono w **Tab. 2**. Przykładowo, symbol „RL 219/6”, oznacza, że olej ten pochodzi z szóstej partii produkcyjnej. Symbol „AW” oznacza dodatki przeciwzużyciowe (ang. *antiwear*), zaś „EP” – przeciwzatarciowe (ang. *extreme-pressure*).

**Tabela 2. Charakterystyka olejów referencyjnych**

Table 2. Characteristics of the reference oils

Symbol	Metoda badawcza	Typ	Dodatki smarnościowe?	Zakres oczekiwanych wartości FLS
RL 219/6	FZG A/8,3/90	„Low”	Brak	4,33 – 7,63
RL 237/1		„High”	Mała ilość dodatków AW	9,86 – 12,54
RL 215/2	A10/16,6R/120	„Low”	Mała ilość dodatków AW lub EP	4,97 – 6,83
RL 214/3		„High”	Duża ilość dodatków AW	9,03 – 10,75

Z **Tab. 2** wynika, że właściwości przeciwzatarciowe poszczególnych olejów referencyjnych „regulowane” są odpowiednią ilością dodatków smarnościowych, tak aby uzyskać właściwości „high” i „low”. Użycie dodatków smarnościowych jest jedną z metod kształtowania właściwości przeciwzatarciowych olejów smarowych [L. 10].

## WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

Wyniki wzorcowania przedstawiono w **Tab. 3**. Odniesiono je do zakresu wartości oczekiwanych/certyfikowanych podanych w **Tab. 2**.

**Tabela 3. Wyniki wzorcowania urządzenia T-12UM**

Table 3. Results of the T-12UM test rig validation





Olej referencyjny	Metoda badawcza	Wynik (FLS)	Werdykt
RL 219/6	FZG A/8,3/90	6	Wynik poprawny
RL 237/1		10	Wynik poprawny
RL 215/2	A10/16,6R/120	5	Wynik poprawny
RL 214/3		10	Wynik poprawny
















Z **Tab. 3** wynika, że wszystkie uzyskane wyniki są poprawne. Świadczy to o prawidłowym działaniu urządzenia T-12UM i prawidłowym wykonywaniu badań zacierania obydwoma metodami.

W **Tab. 4** zebrano wyniki dotyczące rozwoju (progresji) uszkodzeń zębów małego koła i towarzyszącego im momentu sił tarcia dla czterech badanych olejów referencyjnych oraz poszczególnych stopni obciążenia.

**Tabela 4. Najgroźniejsze uszkodzenia roboczej powierzchni zęba małego koła dla poszczególnych stopni obciążenia i badanych olejów referencyjnych wraz z sumaryczną szerokością uszkodzeń zębów  $L_p$  [mm] lub sumarycznym polem powierzchni uszkodzeń zębów  $A_p$  [mm<sup>2</sup>] i wartością średnią momentu sił tarcia  $M_t$  [Nm]**

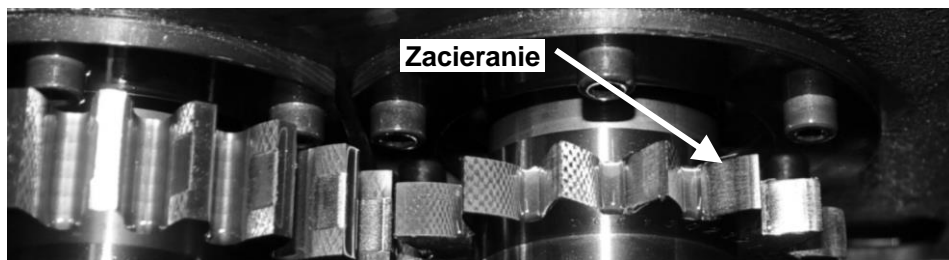
Table 4. Most dangerous form of wear of the pinion tooth flanks for particular load stages and reference oils, together with the sum of the failures widths on the pinion teeth  $L_p$  [mm] or sum of the failures areas on the pinion teeth  $A_p$  [mm<sup>2</sup>] and the average friction torque  $M_t$  [Nm]

Stopień obciążenia	Moment obc. małego koła [Nm]	RL 219/6	RL 237/1	RL 215/2	RL 214/3
4	60,8	<p><i>Rysy</i></p>  <p><math>L_p \approx 0</math> <math>M_t = 5,0</math></p>	<p><i>Rysy</i></p>  <p><math>L_p \approx 0</math> <math>M_t = 5,0</math></p>	<p><i>Zacieranie</i></p>  <p><math>A_p = 80</math> <math>M_t = 5,5</math></p>	<p><i>Rysy</i></p>  <p><math>A_p \approx 0</math> <math>M_t = 5,9</math></p>

Stopień obciążenia	Moment obc. małego koła [Nm]	RL 219/6	RL 237/1	RL 215/2	RL 214/3
5	94,1	<i>Bruzdy</i>  $L_p = 15$ $M_t = 6,0$	<i>Rysy</i>  $L_p \approx 0$ $M_t = 6,1$	<i>Zacieranie</i>  $A_p = 382$ $M_t = 6,7$	<i>Rysy</i>  $A_p \approx 0$ $M_t = 6,8$
6	135,5	<i>Zacieranie</i>  $L_p = 130$ $M_t = 7,5$	<i>Rysy</i>  $L_p \approx 0$ $M_t = 7,6$		<i>Rysy</i>  $A_p = 8$ $M_t = 8,1$
7	183,4		<i>Rysy</i>  $L_p \approx 0$ $M_t = 9,3$		<i>Rysy</i>  $A_p = 8$ $M_t = 9,7$
8	239,3		<i>Rysy</i>  $L_p \approx 0$ $M_t = 11,5$		<i>Rysy</i>  $A_p = 24$ $M_t = 11,4$
9	302,0		<i>Bruzdy</i>  $L_p = 1,5$ $M_t = 14,9$		<i>Bruzdy</i>  $A_p = 68$ $M_t = 12,9$
10	372,6		<i>Zacieranie</i>  $L_p = 63,8$ $M_t = 17,5$		<i>Zacieranie</i>  $A_p = 1600$ $M_t = 18,6$

Zgodnie z przewidywaniami oleje referencyjne „low” dały najniższy stopień obciążenia niszczącego, zaś oleje „high” – najwyższy. Ponieważ uzyskany wynik jest pochodną tribochemicznego oddziaływania dodatków smarowościowych (AW lub EP) z powierzchnią tarcia [L. 3, 10–12], różne oleje referencyjne, jak wynika z **Tab. 2**, muszą mieć różny skład chemiczny. Największą ilość dodatków smarowościowych posiada olej RL 214/3, który dał podobny wynik jak olej RL 237/1, ale inną metodą badawczą, w warunkach „zaostrzonych”.

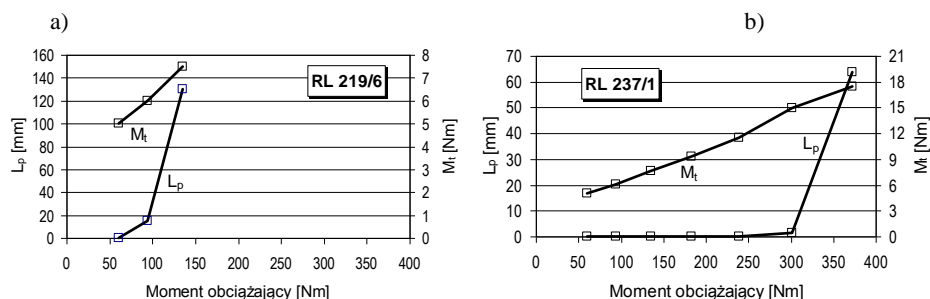
Największe zniszczenie zaobserwowano po badaniach oleju RL 214/3 pod 10. stopniem obciążenia – zniszczenie przez zacieranie objęło wszystkie zęby małego koła, tj.  $A_p = 16$  zębów  $\times 100 \text{ mm}^2 = 1600 \text{ mm}^2$ . Pokazano to na **Rys. 5**.



**Rys. 5.** Zacieranie na wszystkich zębach małego koła; olej RL 214/3, dziesiąty stopień obciążenia

Fig. 5. Scuffing on all the pinion teeth; oil RL 214/3, 10<sup>th</sup> load stage

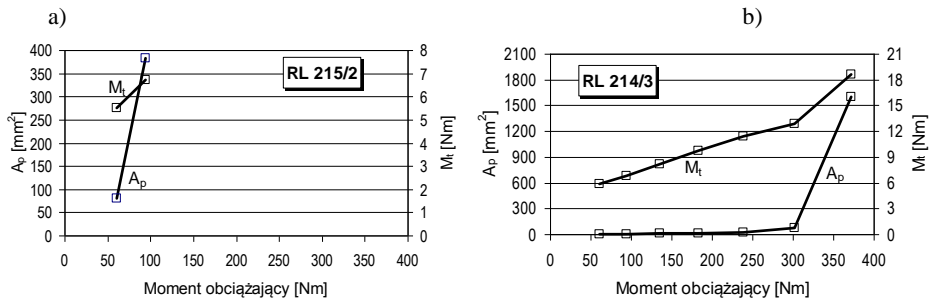
Na **Rys. 6** przedstawiono sumaryczną szerokość uszkodzeń zębów  $L_p$  oraz wartości średnie momentu sił tarcia  $M_t$  w funkcji momentu obciążającego – otrzymane w badaniach metodą FZG A/8,3/90. Natomiast na **Rys. 7** przedstawiono sumaryczne pole powierzchni uszkodzeń zębów  $A_p$  oraz wartości średnie momentu sił tarcia  $M_t$  w funkcji momentu obciążającego – otrzymane w badaniach metodą FZG A10/16,6R/120.



**Rys. 6.** Sumaryczna szerokość uszkodzeń zębów zębniaka  $L_p$  oraz wartości średnie momentu sił tarcia  $M_t$  w funkcji momentu obciążającego: a) dla oleju RL 219/6, b) RL 237/1; metoda FZG A/8,3/90

Fig. 6. Sum of the failures widths on the pinion teeth ( $L_p$ ) and average values of the friction torque ( $M_t$ ), versus the loading torque: a) for RL 219/6 reference oil, b) for RL 237/1; FZG A/8,3/90 scuffing test

Analizując krzywe progresji zużycia ( $L_p$  lub  $A_p$ ), można zaobserwować nieproporcjonalnie duże przyrosty zużycia w końcowej fazie biegu. Nie obserwuje się tego dla krzywych momentu sił tarcia ( $M_t$ ), który przyrasta proporcjonalnie do zwiększającej się wartości momentu obciążającego. W przekładniowych badaniach zacierania nie można zatem utworzyć nowego kryterium – kryterium tarcia – które w sposób jakościowy lub ilościowy pozwoliłoby na identyfikację zacierania.



**Rys. 7. Sumaryczne pole powierzchni uszkodzeń zębów zębniaka  $A_p$  oraz wartości średnie momentu sił tarcia  $M_t$  w funkcji momentu obciążającego: a) dla oleju RL 215/2, b) RL 214/3; metoda A10/16,6R/120**

Fig. 7. Sum of the failures areas on the pinion teeth ( $A_p$ ) and average values of the friction torque ( $M_t$ ), versus the loading torque: a) for RL 215/2 reference oil, b) for RL 214/3; FZG A10/16,6R/120 scuffing test

## PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono urządzenie T-12UM i metodykę tribologicznego badania zacierania – jednej z form zużycia kół zębatych walcowych.

Dokonano wzorcowania urządzenia T-12UM za pomocą czterech olejów referencyjnych. Stwierdzono, że uzyskane wyniki wzorcowania są poprawne, co wskazuje na właściwe wykonywanie badań oraz prawidłowość pracy urządzenia.

W czasie wzorcowania dokonano próby identyfikacji zacierania metodą pomiaru momentu sił tarcia. Stwierdzono, że wyniki pomiaru momentu sił tarcia nie pozwalają identyfikować momentu wystąpienia zacierania, a zatem w przekładniowych badaniach zacierania nie można utworzyć nowego kryterium – kryterium tarcia.

Opracowane urządzenie i metody badawcze są adresowane do: rafinerii, producentów kół/przekładni zębatych oraz środków do ich smarowania, głównie z sektora MSP, instytutów naukowych zajmujących się inżynierią materiałów na koła zębate oraz wyższych uczelni technicznych prowadzących dydaktykę z tribologii kół zębatych i PKM.

## LITERATURA

1. Höhn 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, t. 5, nr 4, 1999, s. 417–430.
2. Tuszyński 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.
3. Tuszyński W.: Problemy tribologicznych badań właściwości przeciwzatarciowych samochodowych olejów przekładniowych. Wyd. ITeE – PIB. Radom 2012, s. 217.
  4. Tuszyński W., Wulczyński J.: Nowe metody badania wpływu olejów smarowych na zacieranie, pitting i mikropitting kół zębatych. Tribologia. 2007, nr 3, s. 303–317.
  5. Tuszyński W., Rogoś E.: Nowoczesne metody badania właściwości tribologicznych olejów smarowych. Nafta-Gaz. 2010, nr 10, s. 927–935.
  6. Nosal S.: Tribologiczne aspekty zacierania się węzłów ślizgowych. Wyd. Politechniki Poznańskiej. Poznań 1998.
  7. Dyson A.: Scuffing – a review. Tribology International. April 1975, s. 77–87.
  8. Stachowiak G.W., Batchelor A.W.: Engineering tribology. Butterworth-Heinemann. Boston – Oksford – Auckland – Johannesburg – Melbourne – New Delhi 2001.
  9. Szczerek M.: Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. Wyd. ITeE, Radom 1997.
  10. Pytko S., Pytko P., Furmanik K.: Tribologia smarowania granicznego. Tribologia. 2011, nr 5, s. 189–204.
  11. Johansson E., Hogmark S., Redelius P.: Surface analysis of lubricated sliding metal contacts. Part II. Tribologia (periodyk fiński). 1997, t. 16, s. 26–38.
  12. Kim B., Mourhatch R., Aswath P.B: Properties of tribofilms formed with ashless dithiophosphate and zinc dialkyldithiophosphate under extreme pressure conditions. Wear 2010, t. 268, s. 579–591.

*Praca naukowa dofinansowana ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego, w ramach realizacji Programu Strategicznego pn. „Innowacyjne systemy wspomagania technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki” w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka.*

## Summary

**Finding the effect of a new type of a lubricating oil (e.g. ecological one) or a new way of the tooth flank modification (e.g. by deposition of a thin, low-friction coating) on the life of gears is possible only experimentally. For that purpose, at the Tribology Department of the Institute for Sustainable Technologies in Radom (ITeE – PIB), a new test rig, denoted as T-12UF, has been developed. It is intended for the back-to-back testing of the friction and wear of spur gears. Three dangerous forms of wear can be tested: scuffing/scoring, pitting, and micro pitting.**

**In the paper, a modified version of the T-12UF test rig is presented, namely the test rig denoted as T-12UM. For the purpose of implementation**

**in a lab of one of the domestic technical universities, the new test rig needed to be validated using reference oils having extremely different extreme-pressure (EP) properties – oils called “Low” and “High.” Two gear scuffing test methods were used. Four reference oils (two of every “Low” and “High”) for each test method were employed. During the validation, the authors checked if it is possible to identify the appearance of scuffing/scoring by monitoring the friction torque.**

**The obtained results of the validation are as expected, which indicates that the new test rig runs properly and the scuffing test methods are realised correctly.**