

Waldemar Tuszyński, Elżbieta Rogoś
Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom

Nowoczesne metody badania właściwości tribologicznych olejów smarowych

Wprowadzenie

Weryfikacja jakości nowo opracowywanych olejów przekładniowych wymaga wykonywania badań z użyciem testowej przekładni zębatej. Obecnie najpopularniejszym systemem badań przekładniowych jest system opracowany w *Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau* (FZG) Politechniki Monachijskiej. Szacuje się, że na świecie pracuje obecnie ok. 500 aparatów typu FZG.

Dotychczas najpopularniejszą metodą badań FZG była metoda oznaczona symbolem A/8,3/90. Oznaczanie tą metodą polega na zastosowaniu badanego oleju do smarowania testowych kół zębatach – przy stałej prędkości obrotowej, wzrastającym stopniowo obciążeniu oraz przy temperaturze początkowej badania jednakowej na początku każdego biegu badawczego – aż do uzyskania stopnia obciążenia niszczącego, ocenianego przez pomiar pola powierzchni śladów zużycia na poszczególnych zębach małego koła. Metodę tę opisują następujące normy: PN-C-04169:1978, ISO 14635-1, CEC L-07-A-95, DIN 51 354, IP 334 oraz ASTM D 5182. Do badań wykorzystywane są popularne koła testowe typu A (szerokość zęba 20 mm).

Badania wykonywane metodą A/8,3/90 nie pozwalają jednak różnicować olejów smarowych o średnich i wysokich właściwościach przeciwzatarciowych, np. współczesnych samochodowych olejów przekładniowych wysokich klas jakościowych API – GL-3 do GL-5 – dla których stopień obciążenia niszczącego (będący miarą właściwości przeciwzatarciowych) przekracza stopień najwyższy (12). Dlatego obecnie zastosowanie metody A/8,3/90 w przemyśle naftowym ogranicza się do sprawdzania jakości wyprodukowanych olejów, tzn. sprawdzenia czy stopień obciążenia niszczącego nie jest niższy niż określona wartość (np. 11).

Z tych powodów FZG zaproponowało nowszą metodę, nazywaną metodą „zacierania szokowego”, posiadającą oznaczenie S-A10/16,6R/120. Nie została ona dotychczas znormalizowana. Metodę tę opisano w arkuszu roboczym FVA No. 243 Status June 2000 [3] oraz w publikacjach w literaturze przedmiotowej [5, 10, 11]. Do jej realizacji wykorzystuje się nową generację kół testowych typu A10 (szerokość zęba małego koła wynosi 10 mm).

Ponieważ od wielu lat [13] wiadomo było, że – oprócz zacierania – drugą najbardziej szkodliwą formą niszczenia kół zębatach jest powierzchniowe zużycie zmęczeniowe (pitting), zaistniała konieczność opracowania metody badania wpływu olejów smarowych na tę formę zużycia zębów. Prace podjęto w FZG, czego efektem była metoda badania pittingu realizowana na specjalnie do tego celu opracowanych kołach testowych typu C-PT. Metodę badania pittingu opisano w arkuszu roboczym FVA No. 2/IV Status July 1997 [2] oraz w publikacjach w literaturze przedmiotowej [6–8, 11]. Na razie brak jest norm dotyczących omawianej metody badawczej.

Całkiem niedawno zidentyfikowano jeszcze jedną groźną formę zużycia roboczej powierzchni zębów nawęglanych kół zębatach pracujących w warunkach smarowania mieszanego lub granicznego – jest nią mikropitting [6]. Związany jest on z powierzchniowym zmęczeniem materiału, w wyniku czego powstają liczne mikropęknięcia, rozchodzące się tuż pod powierzchnią. W efekcie tego procesu powstają liczne, płytkie (do 10 μm) mikrowykruszenia.

Wiadomo, że na mikropitting znaczący wpływ mają m.in. właściwości fizykochemiczne środka smarowego oraz współczynnik tarcia, i że może on prowadzić do pittingu w skali makro, co eliminuje przekładnię zębatą z dalszej

eksploatacji. Mikropitting jest w dalszym ciągu mało poznaną formą zużycia. W ogólnodostępnej literaturze brak jest danych na temat badań nad mikropittingiem w Polsce, choć w wiodących ośrodkach badawczo-rozwojowych za granicą mają one istotne znaczenie. Metodę badania wpływu olejów smarowych na mikropitting, podobnie

jak poprzednio opisane, opracowano w FZG. Do badań mikropittingu konieczne są koła testowe typu C/GF. Metodę badania mikropittingu opisano w następujących dokumentach: arkuszu roboczym FVA No. 54/7 Status July 1993 [4] oraz w publikacjach w literaturze przedmiotowej [6, 7, 9, 11]. Na razie brak jest norm w tym zakresie.

Metodyka badań

Metoda badania „zacierania szokowego” S-A10/16,6R/120

Metoda badawcza opisana jest w arkuszu roboczym FVA No. 243 Status June 2000 [3].

Badanie polega na zastosowaniu danego oleju do smarowania testowych kół zębatych pracujących w warunkach podanych poniżej, przy stałej prędkości obrotowej oraz przy temperaturze początkowej badania jednakowej na początku każdego biegu, aż do oznaczenia tzw. *stopnia obciążenia niszczącego* (FLS), ocenianego poprzez pomiar pola powierzchni śladów zużycia na poszczególnych zębach małego koła. W przeciwieństwie do innych metod przekładniowych badań zacierania opracowanych w FZG, w metodzie zacierania szokowego obciążenia nie zwiększa się stopniowo od wartości najmniejszej, ale obciąża się testowe koła zębate od razu takim obciążeniem („szokowym” – stąd w symbolu litera „S”), pod którym spodziewane jest zatarcie. Unika się w ten sposób dotarcia kół, a przez to zwiększa ich podatność na zacieranie.

Należy w tym miejscu wyjaśnić, że procedura FVA No. 243, Status June 2000 [3] dotyczy metod zacierania szokowego S-A10/16,6R/90 i S-A10/16,6R/110. W badaniach własnych zdecydowano się na przyjęcie wyższej wartości początkowej temperatury oleju (120°C), stąd symbol metody S-A10/16,6R/120.

Warunki przeprowadzenia badań metodą S-A10/16,6R/120:

- typ kół testowych: FZG, typ A10 (szerokość zębów małego koła: 10 mm),
- prędkość obrotowa silnika: 3000 obr./min,
- prędkość obwodowa toczna: 16,6 m/s,
- kierunek obrotów silnika: „odwrócony”,
- czas biegu: 7 min 30 s,
- maks. stopień obciążenia: 12,
- maks. moment obciążający: 535 Nm,
- maks. naciski Hertza: 2,6 GPa,
- temp. początkowa w komorze badawczej: 120°C (niekontrolowana),
- rodzaj smarowania: zanurzeniowe (ilość oleju ok. 1,3÷1,5 l),

- zalecana liczba badań: min. 2 (dla danego stopnia obciążenia).

Badania prowadzi się do momentu oznaczenia stopnia obciążenia niszczącego (FLS). Uważa się go za osiągnięty, jeżeli powoduje on powstanie uszkodzeń zębów małego koła testowego zajmujących obszar o powierzchni większej niż 100 mm² i jednocześnie dla stopnia obciążenia niższego o 1, kryterium zatarcia nie zostaje osiągnięte. W razie stwierdzenia dostrzegalnego zużycia także dużego koła (w postaci „wyżłobienia”), należy je zdemontować i zważyć. Jeżeli ubytek masy jest większy niż 20 mg, bieg uznaje się za nieważny. Także w przypadku osiągnięcia maksymalnego, dwunastego stopnia obciążenia, bez osiągnięcia kryterium zatarcia, duże koło należy zważyć. Wynik przyjmuje się za ważny, jeśli ubytek masy dużego koła nie przekroczy 20 mg. Jeśli osiągnięte kryterium zatarcia (pole zużycia > 100 mm²), to wynik jest ważny bez względu na zużycie dużego koła.

Pomimo że zalecana liczba powtórzeń dla danego stopnia obciążenia wynosi minimum 2, ze względu na bardzo wysokie koszty badań ograniczono się do jednego powtórzenia.

Na fotografii 1 przedstawiono koła testowe A10 stosowane w metodzie S-A10/16,6R/120.

Koła testowe A10 są nawęglane, hartowane i odpuszczane. Powierzchnia robocza zębów jest szlifowana krzyżowo metodą Maaga. Szerokość zębów mniejszego koła (zębnika) wynosi 10 mm, a dużego koła – 20 mm.



Fot. 1. Para kół testowych typu A10 do badania „zacierania szokowego”

Metoda badania pittingu PT C/10/90

Metodę badawczą opisano w arkuszu roboczym FVA No. 2/IV Status July 1997 [2]. Badanie polega na zastosowaniu danego oleju do smarowania testowych kół zębatach pracujących w warunkach podanych poniżej – przy stałej prędkości obrotowej, stałym obciążeniu oraz przy stałej, kontrolowanej temperaturze badanego oleju – aż do stwierdzenia pittingu, ocenianego wizualnie poprzez pomiar pola powierzchni wykruszenia na najbardziej uszkodzonym zębie małego koła. Oblicza się sumaryczną liczbę cykli zmęczeniowych we wszystkich biegach badawczych: od początku badania do momentu stwierdzenia wystąpienia wykruszenia o określonym polu powierzchni. Na podstawie sumarycznej liczby cykli zmęczeniowych, z przynajmniej 3 cykli badawczych wyznacza się powierzchniową trwałość zmęczeniową 50-procentową, oznaczoną symbolem LC_{50} . Przed badaniem właściwym wykonuje się bieg docierający.

Warunki przeprowadzenia badań metodą PT C/10/90:

- typ kół testowych: FZG, typ C-PT (szerokość zębów obu kół – 14 mm).
- prędkość obrotowa silnika: 1500 obr./min,
- prędkość obwodowa toczna: 8,3 m/s,
- czas biegu: 7 lub 14 h,
- stopień obciążenia: 10,
- moment obciążający: 373 Nm,
- maks. naciski Hertza: 1,8 GPa,
- temp. w komorze. badawczej: 90°C – stabilizowana,
- rodzaj smarowania: zanurzeniowe (ilość oleju ok. 1,3÷1,5 l),
- liczba cykli badawczych: minimum 3.

Badania prowadzi się do momentu osiągnięcia pittingu, tzn. gdy powierzchnia uszkodzeń najbardziej zniszczonego zęba małego koła osiągnie 4% jego powierzchni roboczej, czyli 5 mm². Badania należy przerwać w przypadku osiągnięcia 300 h czasu pracy stanowiska (ok. 40×10^6 cykli zmęczeniowych) lub nadmiernego uszkodzenia kół przez mikropitting.

Na podstawie wyników z przynajmniej 3 cykli badawczych, z rozkładu Weibulla wyznacza się trwałość zmęczeniową 50% (LC_{50}), czyli liczbę cykli zmęczeniowych odpowiadającą prawdopodobieństwu uszkodzenia 50%.

Na fotografii 2 przedstawiono koła testowe C-PT stosowane w metodzie PT C/10/90.

Koła testowe C-PT są nawęglane, hartowane i odpuszczane. Powierzchnia robocza zębów jest szlifowana wzdłużnie. Szerokość zębów obu kół wynosi 14 mm. Warto zwrócić uwagę na profil zęba kół C-PT, który jest

zbliżony do profilu zębów kół rzeczywistych przekładni zębatych – inaczej niż kół A10 (fotografia 1), stosowanych do badania zacierania, których profil został „zniekształcony” dla osiągnięcia dużych prędkości poślizgu.



Fot. 2. Para kół testowych typu C-PT do badania pittingu

Metoda badania mikropittingu GT-C/8,3/90

Metodę badawczą opisano w arkuszu roboczym FVA No. 54/7 Status July 1993 [4]. Badanie polega na zastosowaniu danego oleju do obiegowego smarowania testowych kół zębatach pracujących w warunkach podanych poniżej – przy stałej prędkości obrotowej, wzrastającym stopniowo obciążeniu oraz przy stałej temperaturze badanego oleju smarowego – aż do uzyskania stopnia obciążenia niszczącego, ocenianego poprzez pomiar procentowego pola powierzchni mikropittingu na zębach małego koła (GF) oraz zużycia masowego małego koła (W). Na tej podstawie badanemu olejowi przyporządkowuje się klasę przeciwdziałania mikropittingowi (GFT). Przed badaniem właściwym wykonuje się bieg docierający.

Warunki przeprowadzenia badań metodą GT-C/8,3/90:

- typ kół testowych: FZG, typ C/GF (szerokość zębów obu kół – 14 mm),
- prędkość obrotowa silnika: 1500 obr./min,
- prędkość obwodowa toczna: 8,3 m/s,
- czas biegu: 16 h,
- min. i maks. stopień obciążenia: 5 i 10,
- moment obciążający: 70 do 265 Nm, zmieniany stopniowo,
- maks. naciski Hertza: 0,8 do 1,5 GPa,
- rodzaj smarowania: obiegowe (ilość oleju 25 l),
- przepływ oleju: 2 l/min; olej filtrowany z dokładnością 10 μm,
- temp. oleju: 90°C – stabilizowana.

Badania prowadzi się do momentu osiągnięcia stopnia obciążenia niszczącego ocenianego według kryteriów

podanych w metodach GF-CLASS i GRAV/PLAN [4], na podstawie procentowej powierzchni uszkodzeń (GF) zębów małego koła oraz zużycia masowego małego koła (W), mierzonego od początku badania. Uzyskanemu stopniowi obciążenia niszczącego przyporządkowuje się klasę przeciwdziałania mikropittingowi – GFT. Wyróżnia się trzy klasy: GFT-low (niska), GFT-medium (średnia) i GFT-high (wysoka).

W przypadku wystąpienia zacierania kół, badania należy przerwać.

Stosowane w metodzie GT-C/8,3/90 koła testowe C/GF są podobne do kół C-PT (fotografia 2). Różnica między kołami C/GF (mikropitting) a C-PT (pitting) polega głównie na większej chropowatości powierzchni roboczej zęba dla tych pierwszych: $R_a = 0,4 \div 0,6 \mu\text{m}$, wobec $0,2 \div 0,4 \mu\text{m}$ dla kół do badania pittingu. Zwiększenie chropowatości kół C/GF ma ułatwiać pojawianie się mikropittingu.

Oznaczenie granicznego nacisku zatarcia – p_{oz}

Badania prowadzone są według metody opracowanej w Zakładzie Tribologii ITeE-PIB, prezentowanej zarówno w literaturze krajowej, jak i zagranicznej [12, 14, 15].

Badanie polega na przeprowadzeniu, w warunkach podanych poniżej, biegu zespołu czterech kulek stalowych w obecności badanego środka smarowego, pod wzrastającym w sposób ciągły obciążeniem (zaczynającym się od zera) i rejestracji zmian wartości momentu tarcia (oporów ruchu), aż do uzyskania zatarcia kulek.

Zatarciem nazywa się tu przekroczenie granicznej wartości momentu tarcia, wynoszącej 10 Nm. Wartość ta została przyjęta ze względu na trwałość uchwytu kulki górnej w aparacie czterokulowym.

Warunki badań:

- prędkość obrotowa wrzeciona: 500 obr./min,

- prędkość narastania obciążenia: 409 N/s,
- obciążenie początkowe: $\approx 0 \text{ N}$,
- obciążenie maksymalne: $\approx 7400 \text{ N}$,
- temperatura początkowa $20 \pm 5^\circ\text{C}$,
- sposób smarowania: zanurzeniowy.

Na rysunku 1 przedstawiono – uzyskiwaną według opracowanej metody – przykładową, modelową krzywą momentu tarcia M_t .

Obciążenie P w punkcie 1, pod którym moment tarcia zaczyna nagle rosnać, nazywane jest obciążeniem zacierającym i oznaczane symbolem P_t . Nie jest ono jednak przedmiotem niniejszej publikacji.

Opracowana metoda zakłada kontynuowanie wzrostu obciążenia P (powyżej wartości P_t) oraz rejestrację wartości momentu tarcia M_t , aż do osiągnięcia punktu 2 – odpowiadającego zatarciu węzła, czyli przekroczeniu granicznej wartości momentu tarcia (10 Nm). Obciążenie w tym punkcie nazwane zostało granicznym obciążeniem zatarcia i jest oznaczone symbolem P_{oz} . Jeżeli w czasie biegu badawczego nie stwierdzi się zatarcia, to za graniczne obciążenie zatarcia przyjmuje się maksymalne uzyskane obciążenie węzła ($\approx 7400 \text{ N}$). Obciążenie P_{oz} należy wyznaczać z dokładnością nie mniejszą niż 100 N.

Do oceny środków smarowych zaproponowano tzw. graniczny nacisk zatarcia, oznaczany symbolem p_{oz} . Odpowiada on nominalnemu naciskowi na powierzchni śladu zużycia przy zatarciu węzła lub pod koniec biegu (gdz zatarcie nie wystąpi). Oblicza się go ze wzoru (1):

$$p_{oz} = 0,52 \frac{P_{oz}}{d^2} \quad (1)$$

gdzie:

d – średnia średnica śladu zużycia na kulkach nieruchomych, obliczana na podstawie pomiarów wykonywanych z dokładnością nie mniejszą niż 0,01 mm, w kierunku równoległym i prostopadłym do śladów tarcia, wyrażona w [mm],

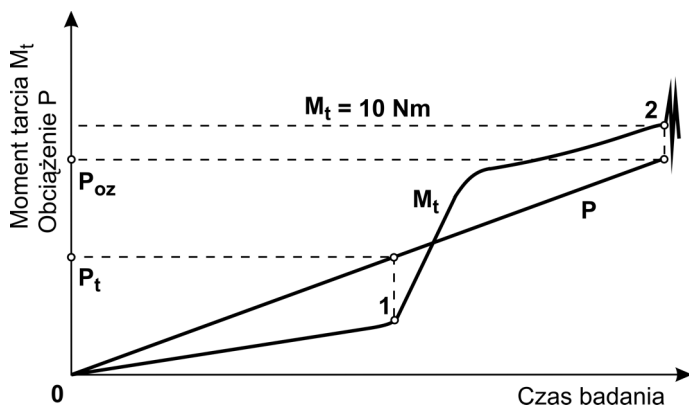
P_{oz} – graniczne obciążenie zatarcia [N].

Współczynnik 0,52 wynika z rozkładu sił w czterokulowym węźle tarcia.

Im wartość wskaźnika p_{oz} jest wyższa, tym lepsze są właściwości przeciwzatarciowe badanego środka smarowego.

Za wynik oznaczenia przyjmuje się średnią arytmetyczną wyników co najmniej trzech oznaczeń, pozytywnie zakwalifikowanych za pomocą testu Dixona oraz jednowartościowego testu Grubbsa, przy poziomie istotności 1%.

Elementami testowymi są kulki łożyskowe o średnicy



Rys. 1. Modelowa krzywa momentu tarcia M_t , uzyskana w warunkach ciągłego wzrostu obciążenia P

nominalnej 1/2", wykonane ze stali łożyskowej LH15, w klasie dokładności 16 według PN-M-86452:1983. Chro-

powatość powierzchni R_a wynosi 0,032 μm , a twardość – 60÷65 HRC.

Aparatura badawcza i uzupełniająca

Do kompleksowych badań przekładni zębatej w Zakładzie Tribologii ITeE-PIB opracowano stanowisko przekładniowe pracujące w układzie mocy krążącej, o symbolu T-12U. Zdjęcie tego stanowiska przedstawiono na fotografii 3.



Fot. 3. Stanowisko przekładniowe T-12U

Stanowisko T-12U wyposażone jest w system pomiarowo-sterujący, w skład którego wchodzi zestaw przetworników pomiarowych oraz sterownik.

W czasie biegu badawczego mierzone są: prędkość obrotowa, temperatura badanego oleju, pobór prądu, czas i liczba obrotów silnika. Mierzone wartości są na bieżąco wyświetlane na wyświetlaczach sterownika. Silnik urządzenia jest automatycznie zatrzymywany po upływie zadanego czasu. Istnieje możliwość zmiany prędkości obrotowej oraz

odwrócenia kierunku obrotów silnika stanowiska T-12U (do realizacji badań „zacierania szokowego”).

Aparaturę uzupełniającą stanowią:

- system chłodzenia badanego oleju (w badaniach pittingu wymagane jest utrzymanie stałej temperatury),
- układ smarowania obiegowego badanym olejem (wymagany w badaniach mikropittingu),
- urządzenie do wyznaczania zużycia kół zębatych (w badaniach zacierania i mikropittingu); ze względu na wymaganą bardzo wysoką dokładność ważenia wykorzystano tzw. komparator masy,
- motoreduktor, montowany w miejsce silnika, pozwalający na osiągnięcie niskiej prędkości obrotowej (100 obr./min), niezbędnej do wykonywania badań zużyciowych według normy ASTM D 4998 (metoda nieopisana w niniejszej pracy).

Do realizacji metody oznaczania granicznego nacisku zatarcia p_{oz} wykorzystuje się aparat czterokulowy oznaczony symbolem T-02 lub T-02U, opracowany i wytwarzany w ITeE-PIB. Dzięki modyfikacji układu obciążającego, pozwala on na liniowy wzrost obciążenia w czasie biegu badawczego. Sterowanie urządzeniem i pomiary odbywają się za pomocą sterownika silników asynchronicznych, wzmacniacza cyfrowego oraz komputera, na którym zainstalowany jest program pomiarowo-sterujący. Sterownik silników asynchronicznych pozwala na zadawanie charakterystyki tak, aby po osiągnięciu żądanego momentu tarcia silnik zatrzymał się automatycznie. Pozwala to na zatrzymanie wrzeciona z chwilą osiągnięcia poziomu oporów ruchu odpowiadających zatarciu (10 Nm).

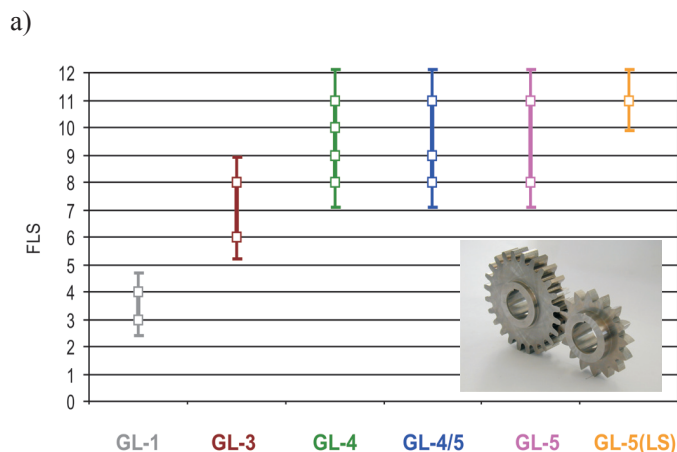
Wyniki badań weryfikacyjnych i ich dyskusja

Badanie „zacierania szokowego” – metoda S-A10/16,6R/120

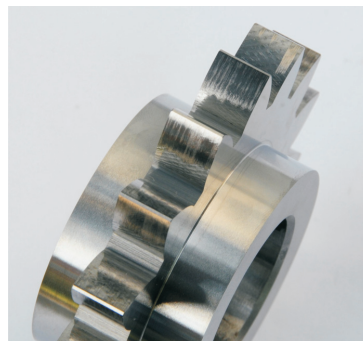
Zbadano wybrane, samochodowe oleje przekładniowe klasy jakościowej API: GL-1, GL-3, GL-4, GL-4/GL-5, GL-5 i GL-5(LS). Na rysunku 2 przedstawiono wartości uzyskanego stopnia obciążenia niszczącego (FLS) dla poszczególnych klas jakościowych API badanych olejów. Na rysunku tym zaznaczono punkty odpowiadające uzyskanym wartościom, a także słupki błędów odpowiadające rozszerzonej niepewności pomiaru, osza-

cowanej przy poziomie ufności 95% i współczynniku rozszerzenia $k = 2$.

Z rysunku 2 widać, że metoda zacierania szokowego pozwala bez problemu rozróżnić olej klasy API GL-1 od olejów klas wyższych. Jeśli chodzi o olej klasy API GL-3, to granice niepewności pomiarów dla tego oleju oraz olejów klasy GL-4, GL-4/GL-5 i GL-5 nachodzą na siebie, co budzi statystyczne wątpliwości co do rozróżnialności tych olejów. Brak jest natomiast możliwości różnicowania olejów należących do klas najwyższych



b)



Rys. 2. Badanie zacierania metodą S-10/16,6R/120

a) stopień obciążenia niszczącego (FLS), b) przykład zębów małego koła, zużytego przez zacieranie

– GL-4, GL-4/GL-5, GL-5 i GL-5(LS). Jednakże, co bardzo istotne, istnieje możliwość różnicowania olejów wewnątrz danej klasy. Tak więc oleje klasy API GL-1 charakteryzują się stopniami obciążenia niszczącego w granicach 3÷4, oleje GL-3 – 6÷8, a oleje GL-4, GL-4/GL-5 i GL-5 – w granicach 8÷11. Zbadane oleje GL-5(LS) dają wyłącznie 11 stopień obciążenia niszczącego. Oleje klasy GL-5(LS) przeznaczone są do smarowania przekładni hipoidalnych (napęd główny) oraz mechanizmów różnicowych z blokadą o ograniczonym poślizgu; posiadają one specjalne dodatki (modyfikatory tarcia, przeciwdziałające występowaniu w takich mechanizmach zjawiska *stick-slip*), które w badaniach przekładniowych ujawniają swoją skuteczność.

Oleje klas najwyższych dają stopień obciążenia niszczącego wyższy niż oleje API GL-1 i GL-3; decyduje o tym pakiet dodatków przeciwwzrostowych stosowany w olejach GL-4, GL-4/GL-5, GL-5 i GL-5(LS). Oleje klasy API GL-3, posiadające pakiet mniej skutecznych w warunkach zacierania dodatków przeciwwzrostowych, dają wyniki pośrednie. Oleje klasy API GL-1 – wobec braku dodatków smarnościowych – dają wyniki najniższe.

Żaden z badanych olejów nie pozwolił na osiągnięcie stopnia obciążenia niszczącego wyższego niż 11. Ponieważ maksymalny przewidziany w metodzie stopień obciążenia wynosi 12, oznacza to, że wymuszenia w czasie realizacji metody zacierania szokowego S-A10/16,6R/120 – w odróżnieniu od innych przekładniowych metod badania zacierania – są wystarczające dla różnicowania współczesnych samochodowych olejów przekładniowych wszystkich klas jakościowych API.

Należy tu dodać, że oprócz metody zacierania szokowego istnieje także metoda badania zacierania w warunkach

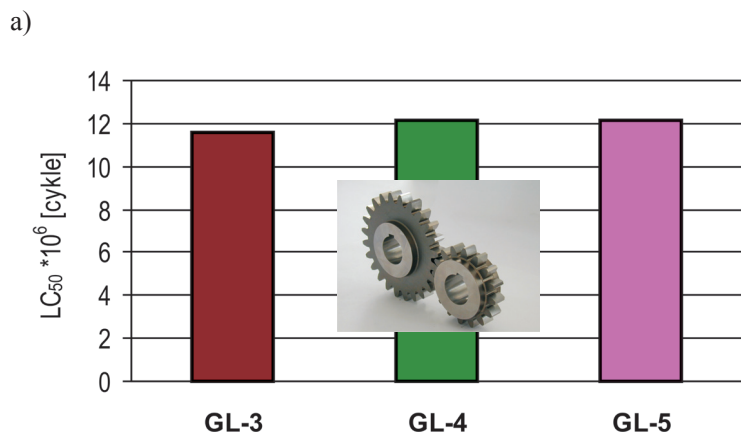
„zaostrzonych”, znana pod symbolem A10/16,6R/120, znormalizowana (ISO 14635-2, CEC L-84-02). Wyniki badań weryfikacyjnych przedstawiono w pracy [16]. Metoda ta jednak nie pozwala na osiąganie tak wysokich wymuszeń jak metoda „szokowa”, a więc i rozróżnialność olejów smarowych jest gorsza.

Badanie pittingu – metoda PT C/10/90

Wyniki badania trzech samochodowych olejów przekładniowych klasy jakościowej API GL-3, GL-4 oraz GL-5 pokazano na rysunku 3.

Na podstawie rysunku 3 można stwierdzić, że odporność na pitting praktycznie nie zależy od klasy jakościowej samochodowego oleju przekładniowego, pomimo że oleje te różnią się rodzajem i stężeniem dodatków smarnościowych. Może to wynikać z wpływu mikropittingu stwierdzonego w znacznej obecności dla olejów GL-4 i GL-5, a także z faktu, że wierzchołek zęba kół C-PT nie podlega modyfikacji, co wywołuje znaczne naciski, przyczyniające się do powstawania wgłębienia inicjującego pitting. Jest to zjawisko bardzo niekorzystne, ponieważ powoduje *stricte* mechaniczną inicjację pittingu – potencjalnie redukując wpływ środków smarowych i obniżając w ten sposób rozdzielczość metody. Dlatego FZG zaproponowało nowszą metodę badania pittingu z wykorzystaniem kół testowych PTX-C – z modyfikacją wierzchołka i stopy zęba oraz znacznie obniżoną chropowatością, dla unikania mikropittingu [6].

Bez względu na powyższe zastrzeżenia stwierdzono, że metoda PT C/10/90 pozwala uzyskać – pomimo niepokazanych na rysunku 3 dużych rozrzutów wyników (nieodłącznych w badaniach zmęczeniowych) – „oczeki-



Rys. 3. Badanie pittingu samochodowych olejów przekładniowych metodą PT C/10/90

a) odporność na pitting charakteryzowana trwałością 50% (LC_{50}), b) przykład zęba małego koła, zużytego przez pitting

waną” formę zużycia, czyli wykruszenie zmęczeniowe, a inne formy zużycia (np. zacieranie) mają znaczenie drugorzędne, bądź nie występują wcale.

Badanie mikropittingu – metoda GT-C/8,3/90

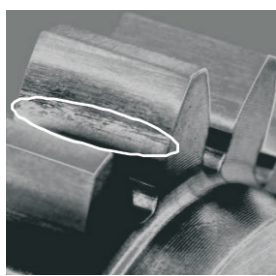
Zbadano dwa oleje do przekładni samochodowych, klasy jakościowej API GL-3 i GL-5. Jeśli wziąć pod uwagę progresję wartości pola uszkodzeń (GF) i zużycia masowego (W), uzyskanych pod stopniem obciążenia od 5 do 10, a także określone na ich podstawie wartości stopnia obciążenia niszczącego (FLS), to olej GL-5 kwalifikuje się do klasy GFT-*medium* (średniej), a olej GL-3 do klasy GFT-*high* (tablica 1).

Stwierdzono, że metoda GT-C/8,3/90 pozwala uzyskać „oczekiwaną” formę zużycia, jaką jest mikropitting. Dodatkowo pozwala rozróżnić wpływ samochodowych olejów przekładniowych klasy API GL-3 i GL-5 na mikropitting.

W tym miejscu należy dodać, że istnieje także skrócona metoda badania mikropittingu, znana jako GFKT -C/8,3/90 [6].

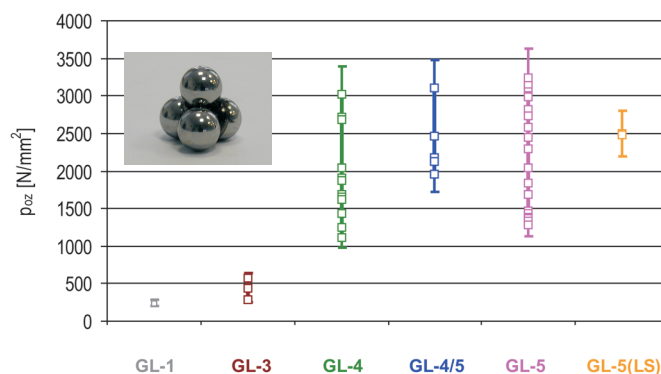
Tablica 1. Badanie mikropittingu metodą GT-C/8,3/90 – stopień obciążenia niszczącego (FLS), klasa przeciwdziałania mikropittingowi (GFT) oraz przykład zęba małego koła, zużytego przez mikropitting (zaznaczony elipsą)

Klasa oleju	FLS	Klasa GFT
GL-3	> 10	GFT- <i>high</i> (wysoka)
GL-5	10	GFT- <i>medium</i> (średnia)



Badanie zacierania – oznaczanie granicznego nacisku zatarcia p_{oz} metodą własną (czterokulową)

Zbadano wybrane, samochodowe oleje przekładniowe klasy jakościowej API: GL-1, GL-3, GL-4, GL-4/GL-5, GL-5 i GL-5(LS). Na rysunku 4 pokazano wartości uzyskanego granicznego nacisku zatarcia (p_{oz}) dla poszczególnych klas jakościowych API badanych olejów.



Rys. 4. Badanie zacierania metodą własną (czterokulową) – wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz}

Na rysunku tym zaznaczono punkty odpowiadające uzyskanym wartościom, a także słupki błędów odpowiadające rozszerzonej niepewności pomiaru, oszacowanej przy poziomie ufności 95% i współczynniku rozszerzenia $k = 2$.

Na rysunku 4 widać, że metoda oznaczania granicznego nacisku zatarcia (p_{oz}) pozwala rozróżnić samochodowe oleje przekładniowe różnych klas jakościowych w sposób nie gorszy niż

przekładniowa metoda zacierania szokowego (rysunek 2). Podobnie jak tam, oleje klas najwyższych dają wyniki p_{oz} znacznie wyższe niż oleje API GL-1 i GL-3; decyduje o tym pakiet dodatków przeciwzatarciowych. Oleje klasy

API GL-3, z pakietem mniej skutecznych w warunkach zacierania dodatków przeciwzużyciowych, dają wyniki pośrednie. Oleje klasy API GL-1 – z powodu braku dodatków smarowościowych – dają wyniki najniższe.

Porównanie czasochłonności i kosztów badań



Ostatnim krokiem oceny zastosowanych metod badawczych jest analiza czasochłonności i kosztów badań. Informacje te zebrano w tablicy 2. Oszacowana czasochłonność badań uwzględnia okres: od przyjęcia zlecenia od klienta – do przekazania klientowi sprawozdania z badań.

Uwagę zwracają ekstremalnie wysokie koszty realizacji metod przekładniowych badań pittingu i zacierania

szokowego. Wynikają one głównie z bardzo wysokich kosztów materiałów do badań, tj. testowych kół zębatych.

Metoda własna oznaczania granicznego nacisku zatarcia (p_{oz}), wykorzystująca modelowy, czterokulowy węzeł tarcia, jest – zgodnie z oczekiwaniami – metodą nieporównywalnie tańszą, a jej czasochłonność jest najmniejsza.

Tablica 2. Podsumowanie czasochłonności badań jednego oleju poszczególnymi metodami oraz ich kosztów, na podstawie kalkulacji obowiązujących w Zakładzie Tribologii ITeE-PIB

	Metoda badawcza – oznaczany wskaźnik	Czasochłonność	Koszt materiałów*	Cena netto badania
	Zacieranie „normalne” (A/8,3/90) – FLS	16 h	2 000 zł	3 300 zł
	Zacieranie „szokowe” (S-A10/16,6R/120) – FLS	40 h	9 200 zł	13 200 zł
	Pitting (PT C/10/90) – LC_{50}	400 h	9 600 zł	16 900 zł
	Mikropitting (GT-C/8,3/90) – klasa GFT	112 h	2 500 zł	5 990 zł
	Zacieranie – graniczny nacisk zatarcia (p_{oz})	8 h	pomijalny	290 zł

* podano ceny materiałów z maja 2010 r.

Podsumowanie

Oprócz badania środków smarowych, zaprezentowane metody pozwalają badać także wpływ technologii modyfikacji powierzchni roboczej zęba (np. poprzez nakładanie cienkich, twardych powłok) na trwałość zębów. W obu tych obszarach, od kilku lat metody te są z powodzeniem wykorzystywane w Zakładzie Tribologii ITeE-PIB.

Do wykonywania badań według zaprezentowanych metod można wykorzystać stanowisko przekładniowe T-12U, opracowane i wytwarzane w ITeE-PIB. Zostało ono z powodzeniem zweryfikowane w ramach realizacji wielu projektów badawczo-rozwojowych.

W tym miejscu należy dodać, że w latach 2010–2012, w ramach realizowanego w ITeE-PIB Programu Strategicznego, opracowywana jest nowa wersja stanowiska przekładniowego. Nowe urządzenie, w stosunku do istniejącego, będzie posiadać szereg dodatkowych cech.

Pierwsza to umożliwienie badań zużyciowych także w warunkach ultra-niskiej prędkości obrotowej – metody badawcze C/0.05/90/12 i C/0.05/120/12 [1]. Druga to możliwość badań pittingu w warunkach automatycznej, cyklicznej zmiany wymuszeń – metody PT C/LLS/90 i PT C/HLS/90 [2]. Trzecią cechą będzie pomiar momentu tarcia i momentu obciążającego, czwartą – znaczne zwiększenie maksymalnego stopnia obciążenia kół zębatych (do 14 stopnia), a piątą cechą – komputerowa rejestracja wybranych parametrów badawczych. Nowo opracowywane urządzenie znacznie rozszerzy możliwości badań.

Zaprezentowane metody badań różnych form zużycia testowej przekładni zębatej są coraz częściej stosowane przez laboratoria zagranicznych wytwórców olejów smarowych. Wskazane jest upowszechnienie tych metod w krajowych laboratoriach przemysłu petrochemicznego

oraz w laboratoriach ośrodków zajmujących się pracami rozwojowymi z dziedziny inżynierii powierzchni i inży-

nierii materiałów konstrukcyjnych do wytwarzania kół zębatach.

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

Artykuł nadesłano do Redakcji 17.06.2010 r. Przyjęto do druku 29.09.2010 r.

Recenzent: doc. dr Michał Krasodowski

Literatura

- [1] DGMK Information Sheet No. 377, 1996. *Method to assess the wear characteristics of lubricants in the FZG gear test rig.*
- [2] FVA Information Sheet No. 2/IV Status July 1997. *Influence of lubricant of the pitting capacity of casecarburized gears in load-spectra and single-stage investigations.*
- [3] FVA Information Sheet No. 243 Status June 2000. *Method to assess the scuffing load capacity of lubricants with high EP performance using an FZG gear test rig.*
- [4] FVA Information Sheet No. 54/7 Status July 1993. *Test procedure for the investigation of the micro-pitting capacity of gear lubricants.*
- [5] Hoehn B.-R. i in.: *A scuffing load capacity test with the FZG gear test rig for gear lubricants with high EP performance.* Tribotest Journal, t. 5, nr 4, s. 383–390, 1999.
- [6] Hoehn B.-R. i in.: *Improvement of standardized test methods for evaluating the lubricant influence on micropitting and pitting resistance of case carburized gears.* AGMA Technical Paper, No. 06FTM07.
- [7] Hoehn B.-R., Michaelis K.: *Influence of oil temperature on gear failures.* Tribology International, t. 37, s. 103–109, 2004.
- [8] 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, t. 5, nr 4, s. 417–430, 1999.
- [9] Jao T.C. i in.: *Influence of surface roughness on gear pitting behavior.* Gear Technology, s. 31–38, May/June 2006.
- [10] Michaelis K., Hoehn B.-R., Graswald C.: *Scuffing tests for API GL-1 to GL-5 gear lubricants.* Materiały 13 Międzynarodowego Kolokwium Tribologicznego w Ostfildern/Nellingen (Niemcy), t. II, s. 1133–1137, 2002.
- [11] Michaelis K., Hoehn B.-R., Oster P.: *Influence of lubricant on gear failures – test methods and application to gear-boxes in practice.* Tribotest Journal, t. 11, nr 1, s. 43–56, 2004.
- [12] Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszyński W.: *The action of lubricants under extreme pressure conditions in a modified four-ball tester.* Wear, t. 249, s. 188–193, 2001.
- [13] Pytko S., Środa P.: *Podział i ocena maszyn do badania materiałów na kola zębata.* Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, z. 1, s. 39–58, 1975.
- [14] Szczerek M., Tuszyński W.: *A method for testing lubricants under conditions of scuffing. Part I. Presentation of the method.* Tribotest Journal, t. 8, nr 4, s. 273–284, 2002.
- [15] Szczerek M., Tuszyński W.: *Badania tribologiczne. Zacieranie.* Wyd. ITeE, Radom 2000.
- [16] Tuszyński W., Wulczyński J.: *Nowe metody badania wpływu olejów smarowych na zacieranie, pitting i mikropitting kół zębatach.* Tribologia, nr 3, s. 303–317, 2007.



Dr inż. Waldemar TUSZYŃSKI – absolwent Politechniki Warszawskiej. Pracownik naukowy ITeE-PIB w Radomiu. Zajmuje się opracowywaniem metod i urządzeń do badań środków smarowych w ekstremalnych warunkach tarcia. Współautor licznych publikacji naukowych wydanych w kraju i za granicą, w tym 9 książek i ponad 70 artykułów. Członek PTT i SPWiR.



Dr inż. Elżbieta ROGOŚ – absolwentka Politechniki Łódzkiej. Pracownik naukowy ITeE-PIB w Radomiu. Zajmuje się opracowywaniem proekologicznych technologii eksploatacji środków smarowych i cieczy technologicznych. Współautorka licznych publikacji naukowych wydanych w kraju i za granicą, w tym 2 książek i 70 artykułów. Członek PTT i SPWiR.