

Wojciech NAPADŁEK, Adam WOŹNIAK, Wojciech CHRZANOWSKI, Paweł LEONIUK

# ANALIZA USZKODZEŃ SKOJARZENIA CZOP KORBOWODOWY-ŁOŻYSKO ŚLIZGOWE TŁOKOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

*W artykule przedstawiono problematykę uszkodzeń skojarzenia tribologicznego czop korbowodowy-łożysko ślizgowe w silniku o zapłonie iskrowym na podstawie badań makroskopowych. Artykuł stanowi studium kilku przypadków uszkodzenia silników, do których dochodziło w krótkim okresie eksploatacji po wykonanej wcześniej naprawie silnika. Główną przyczyną uszkodzeń było zatarcie łożyska ślizgowego, pracującego w skojarzeniu z czopem korbowodowym wału korbowego, a następnie jego obrót względem stopy korbowodu. Analizie poddano uszkodzone łożysko i wał korbowy w odniesieniu do tych samych nowych elementów o znanych właściwościach fizycznych i materiałowych.*

## WSTĘP

Wał korbowy i korbowody należą do zasadniczych elementów silnika spalinowego, które wraz z łożyskami ślizgowymi, tworzącymi skojarzenia ślizgowe czop-panewka, stanowią jeden z najistotniejszych układów, decydujących o trwałości i niezawodności pracy tłokowego silnika spalinowego [10].

Ilość, jakość i rodzaj materiałów konstrukcyjnych stosowanych na wały korbowe oraz technologie obróbki czopów głównych i korbowodowych, świadczą o ciągłym poszukiwaniu najlepszych rozwiązań. Poszukiwania te często sprawiają wrażenie przypadkowych ze względu na różne możliwości techniczne i technologiczne zakładów produkcyjnych. Natomiast w procesie eksploatacji często pomija się trudne, skomplikowane i nie do końca wyjaśnione zjawiska, towarzyszące współpracy części, tworzących np. skojarzenie czop-panewka [12].

Dobór metod produkcji wałów korbowych jest podporządkowany głównie uzyskaniu jak największej odporności na zużywanie czopów oraz zapewnieniu odpowiednio wysokiej wytrzymałości zmęczeniowej wału. Podstawowym wskaźnikiem do oceny przydatności warstw wierzchnich jest jej wpływ na charakter przebiegu współpracy elementów skojarzenia czop-panewka.

Jednymi z newralgicznych elementów każdego tłokowego silnika spalinowego są łożyska ślizgowe (panewki), powszechnie wykorzystywane do łożyskowania korbowodów i wałów korbowych. Nieskomplikowana budowa łożysk ślizgowych, przy prawidłowym ich wykonaniu i eksploatacji, zapewnia bezproblemową i długą pracę silnika spalinowego.

Nieprawidłowa eksploatacja silnika spalinowego może w bardzo krótkim czasie przyczynić się do jego kosztownej naprawy. Nadmierne obciążanie, czy też utrzymywanie wysokich prędkości obrotowych silnika w czasie, gdy olej nie osiągnął wymaganej temperatury eksploatacyjnej powoduje nadmierne szybkozmiennie obciążenie mechaniczne elementów układu tłokowo-korbowego, w tym łożysk ślizgowych.

Większość łożysk ślizgowych posiada wykonane otwory technologiczne, przez które pod ciśnieniem doprowadzany jest olej do skojarzenia czop-panewka. Uszkodzenie (ścięcie) występów ustalających panewki w kadłubie silnika lub w stopie korbowodu następuje głównie wskutek zacierania się skojarzenia czop-panewka. Następnym tego uszkodzenia jest niekontrolowany obrót panewek, który

powoduje, że otwory doprowadzające olej zostają całkowicie zasłonięte, co w doprowadza do: zaniku smarowania, nadmiernego zużycia łożysk ślizgowych i zwiększenia luzu pomiędzy łożyskami a czopami wału korbowego. Brak smarowania jest również przyczyną szybkiego wzrostu temperatury w skojarzeniu czop-panewka, która powoduje dodatkowo niekorzystną i trwałą zmianę właściwości oleju silnikowego oraz lokalne przegrzewanie się warstwy wierzchniej materiału czopa wału i łożyska ślizgowego.

Zbyt duży luz w skojarzeniu, a dodatkowo obrót i/lub przesunięcie panewek względem kadłuba silnika lub względem stopy korbowodu, może również spowodować niekorzystny efekt wypływania oleju pomiędzy panewką a korbowód, zamiast do skojarzenia czop-panewka.

Uszkodzenie panewki w efekcie końcowym może również spowodować następujące po sobie kolejno procesy, takie jak: skrzęcenie lub wygięcie wału korbowego, czy też w ekstremalnych przypadkach uszkodzenie całego silnika [13].

## 1. MATERIAŁY STOSOWANE NA WAŁY KORBOWE I ŁOŻYSKA ŚLIZGOWE

Wały korbowe silników spalinowych wykonywane są jako kute bądź jako odlewane. Najczęściej stosowanym materiałem na wały kute jest stal konstrukcyjna węglowa wyższej jakości lub stal konstrukcyjna stopowa do ulepszenia cieplnego (np. 41CrAlMo7, 41Cr4). Gatunek stali na wał korbowy (a tym samym rodzaj materiału czopa) uwarunkowany jest wytrzymałością mechaniczną wału (przede wszystkim sztywnością), a więc względami nie związanymi z właściwościami ślizgowymi czopa. Sztywność wału (jako elementu konstrukcyjnego) zależy przede wszystkim od jego wymiarów, a nie od gatunku stali, gdyż współczynnik sprężystości (decydujący o wytrzymałości mechanicznej) dla większości stali konstrukcyjnych jest praktycznie jednakowy [2,4]. Składniki stopowe znacznie poprawiające własności mechaniczne i uszlachetniające materiał wału, dodawane są głównie w celu uzyskania bardziej równomiernej i drobnoziarnistej struktury po obróbce cieplnej.

Wały korbowe odlewane wykonywane są zazwyczaj z żeliwa sferoidalnego perlitycznego. Przykładowym materiałem jest żeliwo sferoidalne perlityczne, którego skład chemiczny jest następujący: 3,0-3,8%C; 1,8-2,0%Si; 0,1-0,2%Mn. Dodatki stopowe w wałach żeliwnych mają na celu polepszenie własności mechanicznych, a zwłaszcza właściwości wytrzymałościowych [10].

Duża różnorodność rodzajów stopów łożyskowych wynika m.in. z faktu, iż nie ma materiału, który spełniałby zadawalająco wszystkie, często przeciwstawne wymagania. Stopy o małym współczynniku tarcia i wysokiej odporności na zacieranie wykazują niższą twardość, a w związku z tym zmniejszoną nośność. Materiały o dobrej odkształcalności i łatwości docierania mają niską wytrzymałość zmęczeniową i małą zdolność do przenoszenia wysokich obciążeń. We współczesnych silnikach spalinowych na łożyska ślizgowe stosuje się najczęściej stopy na osnowie aluminium. Są to stopy wieloskładnikowe zawierające takie dodatki, jak: miedź, krzem, magnez, nikiel, cyna, ołów, żelazo oraz antymon [6-9].

## 2. STAN POWIERZCHNI I WŁAŚCIWOŚCI EKSPLOATACYJNE CZOPÓW WAŁÓW KORBOWYCH I ŁOŻYSK ŚLIZGOWYCH

W celu zwiększenia odporności na zużywanie, czopy stalowych wałów korbowych poddawane są utwardzaniu powierzchniowemu poprzez obróbkę cieplną (hartowanie indukcyjne) lub ciepłochemiczną (azotowanie).

Twardość powierzchni czopów hartowanych indukcyjnie zawiera się w granicach 50-55 HRC i winna sięgać na głębokość 2-5 mm od powierzchni, a czopów azotowanych 68-72 HRC na głębokość do 0,8 mm.

Utwardzanie czopów poprzez azotowanie stosuje się w przypadku wałów korbowych wykonanych przede wszystkim ze stali stopowej do azotowania 41CrAlMo7, zawierającej aluminium. Zastosowanie znalazły również stale nie zawierające dodatku aluminium jak np.: stal stopowa 42CrMo4, 20MnCr5, 25CrMo4.

Utwardzone czopy są obrabiane szlifowaniem i polerowaniem w celu uzyskania odpowiedniej chropowatości powierzchni współpracującej z łożyskiem ślizgowym. Chropowatość powierzchni czopów większości wałów korbowych wynosi zazwyczaj  $R_a = 0,16 \mu\text{m}$  [12].

Stan powierzchni roboczej łożyska uzależniony jest od metody nałożenia stopu i grubości uzyskanej warstwy ślizgowej. Powierzchnie ślizgowe łożysk ze stopów lanych, spiekanych czy nawalcowywanych są obrabiane mechanicznie wytaczaniem lub przeciąganiem. Chropowatość powierzchni  $R_a = 0,08-0,16 \mu\text{m}$ . Warstwy ślizgowe uzyskane powlekaniami galwanicznymi pozostają w stanie nieobrobionym. Orientacyjna chropowatość ich powierzchni ślizgowych wynosi  $R_a = 0,65 \mu\text{m}$  [9].

## 3. PROCESY ZUŻYCIOWE ZACHODZĄCE W SKOJARZENIU

Skojarzenie czop wału korbowego - panewka jest układem tribologicznym, pracującym zasadniczo w warunkach tarcia płynnego. Jednakże okresowo może występować tarcie mieszane i graniczne. Tego rodzaju tarcie ma miejsce w okresie współpracy w warunkach niestabilnych tj. docierania, podczas każdego rozruchu i zatrzymania silnika oraz w trakcie nagłych zmian parametrów wymuszenia (wielkości obciążenia i prędkości ruchu względnego) [13].

Pomimo braku jednolitej klasyfikacji, przyjmuje się powszechnie następujące rodzaje zużywania występujące w smarowanych skojarzeniach ślizgowych: ściernie, adhezyjne, przez utlenianie, kawitacyjne, erozyjne, zmęczeniowe.

W zależności od aktualnie występującego rodzaju tarcia oraz wymuszeń zewnętrznych, jedno z wymienionych rodzajów zużywania ma charakter dominujący i decyduje o wielkości zużycia skojarzenia.

Skojarzenie czop-panewka, w zależności od warunków, może znajdować się w stanie współpracy ustabilizowanej bądź niestabilizowanej [1, 2, 5].

W stanie współpracy niestabilizowanej (przy docieraniu i zmianach parametrów wymuszenia), dominującymi rodzajami zużywania są: ściernie i adhezyjne. Pozostałe rodzaje zużywania (przez utlenianie, kawitacyjne, erozyjne) można zaobserwować dopiero po dłuższym okresie współpracy skojarzenia. Zużycie zmęczeniowe panewek dominuje w czasie długotrwałej współpracy w warunkach tarcia granicznego.

Poza zużywaniem ściernym, które zachodzi zarówno na czopach, jak i na panewkach, pozostałe rodzaje zużywania obserwuje się przede wszystkim na powierzchniach ślizgowych panewek. Wynika to niewątpliwie ze znacznej różnicy własności materiałów tworzących skojarzenie.

Stan bezpośrednio poobróbkowy warstwy wierzchniej elementów nie zapewnia prawidłowej współpracy skojarzenia, tj. powierzchnie tarcia nie są przygotowane do przenoszenia maksymalnych obciążeń eksploatacyjnych, nie są stworzone warunki do szybkiego tworzenia się klina smarnego i tym samym skojarzenie nie wykazuje odpowiedniej, wymaganej trwałości. Dopiero po pewnym ustalonym okresie współpracy powierzchnie części przyjmują stan typowy (optymalny), dla przyjętych warunków współpracy. Okres przejścia od stanu poobróbkowego do stanu zapewniającego optymalną współpracę określaną jest mianem „okresu docierania” [11].

Procesy zachodzące w węzle tarcia, w trakcie współpracy wywołują odpowiednie zmiany w warstwie wierzchniej elementów tworzących skojarzenie. Zmiany o podobnym charakterze zachodzą w warstwie wierzchniej również podczas procesu technologicznego wytwarzania elementów.

Ze względu na obszar występowania, zmiany te można podzielić na:

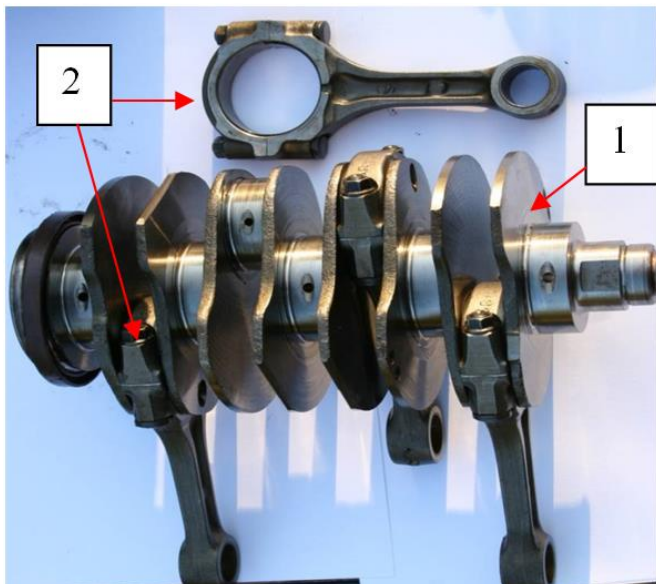
- zachodzące na powierzchni współpracy (tarcia),
- zachodzące w strefie podpowierzchniowej.

Zmiany zachodzące na powierzchni tarcia związane są przede wszystkim ze zmianami topografii powierzchni. Uzyskana w wyniku procesu technologicznego produkcji chropowatość wyjściowa powierzchni elementów tworzących skojarzenie, ulega zmianie na chropowatość odpowiadającą optymalnej współpracy. Zmiany te nie koniecznie muszą przebiegać w kierunku obniżenia chropowatości. Chropowatość zarówno czopa jak i współpracującej z nim panewki, po okresie docierania wzrasta. Natomiast wygładzaniu powierzchni towarzyszy zużywanie ściernie, a wzrostowi chropowatości - zużywanie adhezyjne. Zużywanie ściernie panewki, wynikające z jej bezpośredniego kontaktu z powierzchnią czopa, powoduje wygładzanie powierzchni poprzez mikroskrawanie, natomiast zużywanie ściernie, spowodowane bruzdowaniem przez twarde zanieczyszczenia i produkty zużycia powoduje znaczne pogorszenie gładkości powierzchni [5, 7-9, 13].

## 4. OBIEKT BADAŃ

Obiektem badań były elementy układu tłokowo-korbowego 4 cylindrowego silnika Subaru typ EJ20G o zapłonie iskrowym, przedstawione na rys. 1.

Wał korbowy posiada 5 czopów głównych i 4 czopy korbodowe. Łożyska ślizgowe czopów głównych i korbodowych zabezpieczono przed obrotem z wykorzystaniem występów ustalających, wykonanych w półpanewkach. Łożyska ślizgowe czopów głównych mają wykonane otwory technologiczne i rowki, doprowadzające olej do skojarzenia czop-panewka.



**Rys. 1.** Widok wału korbowego (1) z korbowodami (2)

## 5. BADANIA WARSTW WIERZCHNICH CZOPÓW I ŁOŻYSK ŚLIZGOWYCH

W ramach prowadzonych badań, dotyczących próby określenia przyczyn uszkodzenia silnika Subaru typ EJ20G, poprzez zatarcie skojarzenia czop korbowodowy-łożysko ślizgowe, dokonano analizy uszkodzenia i zużycia elementów układu korbowodowego z wykorzystaniem mikroskopu optycznego Keyence VHX-1000 (rys. 2).



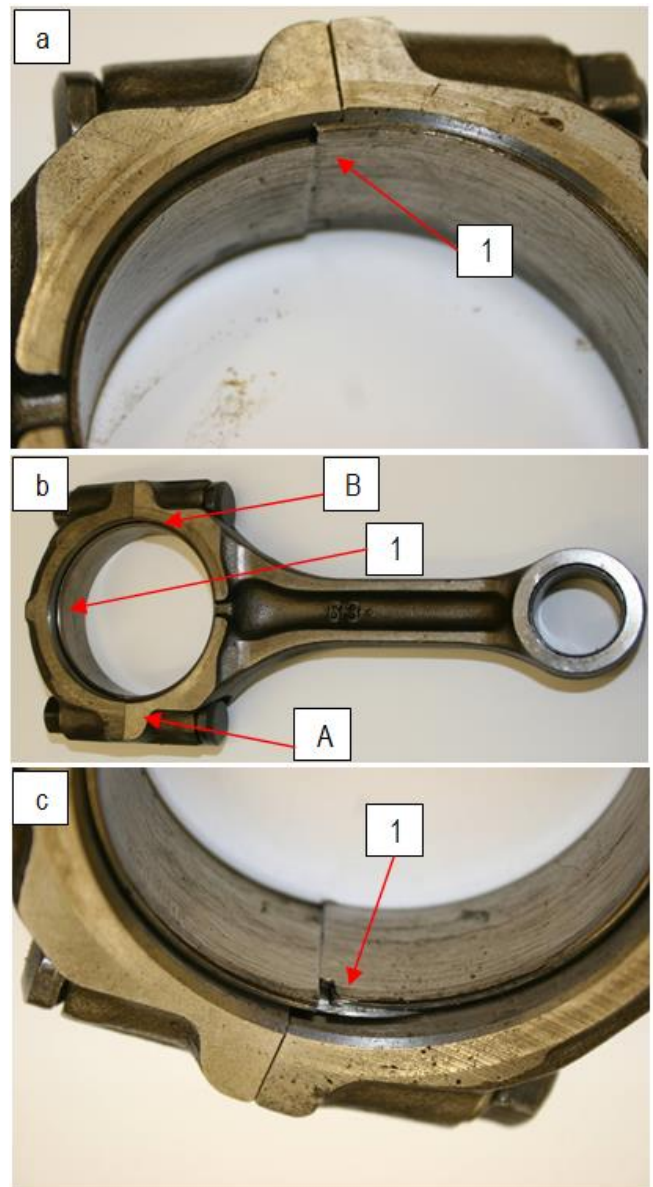
**Rys. 2.** Mikroskop optyczny Keyence VHX-1000 ze światłowodową transmisją obrazu

Na rys. 3b przedstawiono widok korbowodu z zamontowanym w stopie uszkodzonym łożyskiem ślizgowym.

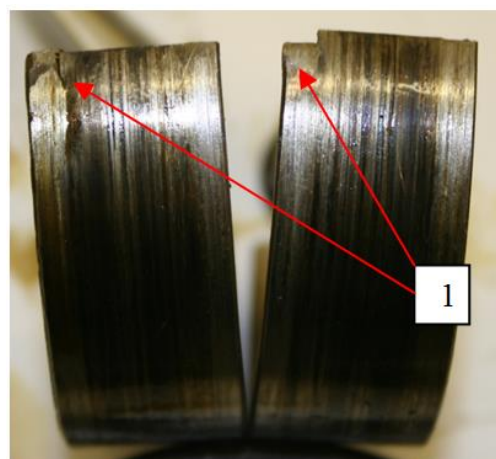
Rys. 3c przedstawia łożysko ślizgowe z widocznym uszkodzeniem występów ustalających wskutek obrócenia się panewki w stopie korbowodu, spowodowanej prawdopodobnie brakiem smarowania skojarzenia czop korbowodowy-łożysko ślizgowe. Stwierdzono, że obrócenie i wysunięcie panewek korbowodowych (rys. 3a) mogło spowodować zmianę układu geometrycznego elementów skojarzenia, a dodatkowo niekorzystną zmianę wartości luzu i ewentualny wzrost tarcia w skojarzeniu.

W wyniku uszkodzenia występów ustalających nastąpił obrót i przesunięcie poosiowe panewek w korbowodzie, co ujawniają ślady zacierania zewnętrznej powierzchni panewek w stopie korbowodu (rys. 4).

Siła tarcia pomiędzy czopem korbowodowym a łożyskiem ślizgowym była tak duża, że spowodowało to obrót panewek względem stopy korbowodu. Zatem, łożysko ślizgowe nie przylegało na całym obwodzie do powierzchni stopy korbowodu. Dlatego pomiędzy stopą korbowodu, a łuską łożyska ślizgowego pojawił się olej, który w znacznym przyczynił się do obrócenia łożyska względem stopy korbowodu.

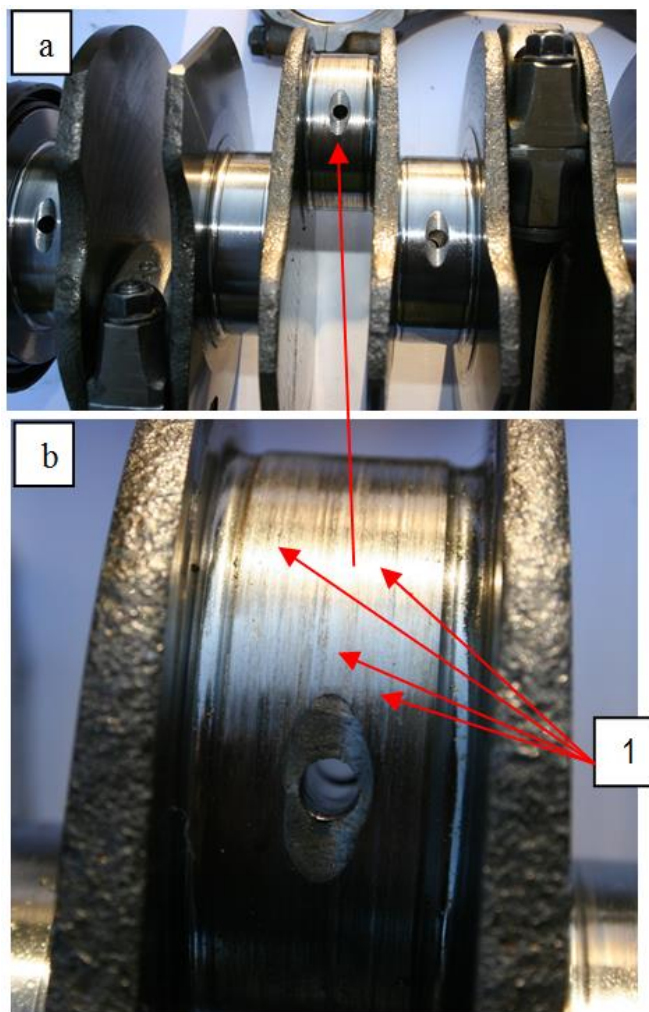


**Rys. 3.** Widok korbowodu wraz z uszkodzonym łożyskiem ślizgowym zamontowanym w stopie korbowodu (rys. 3b): a) panewki przesunięte wzdłuż osi czopa korbowodowego; c) 1 - uszkodzone (ścięte) występy ustalające panewkę; 1 – łożysko ślizgowe; A - lewa strona korbowodu, B - prawa strona korbowodu



**Rys. 4.** Widok zewnętrznej powierzchni (łuski) łożyska ślizgowego: 1 - zniszczone występy ustalające panewki w stopie korbowodu

Czop korbowodowy wału korbowego z widocznymi zarysowaniami i uszkodzeniami warstwy wierzchniej przedstawiony jest na rys. 5. Uszkodzenie to również zostało spowodowane pojawieniem się znacznej siły tarcia pomiędzy współpracującymi elementami skojarzenia czop korbowodowy-łożysko ślizgowe.



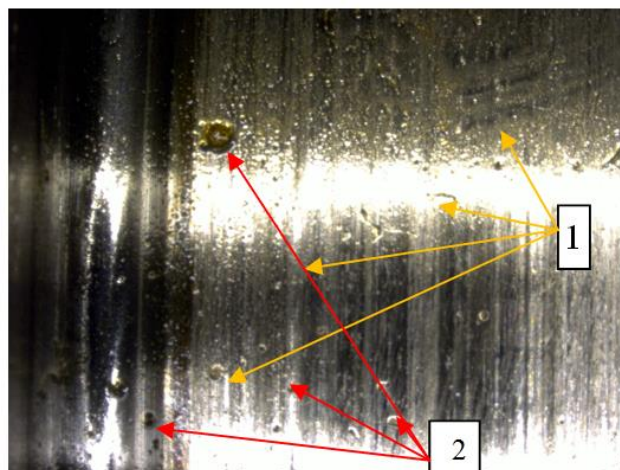
**Rys. 5.** Widok fragmentu czopa korbowodowego wału silnika o ZI typ EJ20G z charakterystycznymi uszkodzeniami warstwy wierzchniej wskutek tarcia - 1

Na rys. 6 przedstawiono uszkodzoną warstwę wierzchnią zatartego czopa korbowodowego. Widać na niej wyraźne zarysowania, powstałe na skutek intensywnego procesu tarcia (zacierania). Procesy tarcia przy niedostatecznym smarowaniu spowodowały powstanie lokalnych stref z mikro-zgrzebinami. W skojarzeniu wystąpiły znaczne siły tarcia, które spowodowały ścięcie występów ustalających, przesunięcie panewek wzdłuż osi czopa korbowego i obrót półpanewek względem stopy korbowodu.

Przyczyną tego stanu rzeczy mógł być obniżający się poziom oleju silnikowego w misce olejowej, błędy popełnione w procesie montażu panewek w stopie korbowodu i pogarszające się właściwości oleju silnikowego.

Eksploatacja silnika z poziomem oleju poniżej wymaganej wartości skutkowało prawdopodobnie skutkowało chwilowymi zanikami ciśnienia oleju w układzie smarowania. Zbyt niskie ciśnienie, a w konsekwencji zbyt mały wydatek czynnika smarnego spowodowały niestabilność filmu olejowego, rozdzielającego powierzchnię łożyska ślizgowego z powierzchnią czopa korbowodowego wału korbowego. Na skutek zwiększonego tarcia wystąpił lokalny wzrost temperatury w mikroobszarach skojarzenia czop-panewka, powodu-

jący degradację właściwości smarnych oleju, a także wzrost oporów i sił tarcia, charakterystycznych dla tarcia granicznego. Lokalnie występowały szczeni adhezyjne I i II stopnia, powodujące wyrwanie (degradację) warstwy wierzchniej zarówno łożyska ślizgowego jak i czopa wału korbowego. Duża intensywność procesu tarcia w konsekwencji doprowadziła do dalszego niszczenia warstwy wierzchniej oraz wzajemnego zacierania się ww. elementów węzła tribologicznego.



**Rys. 6.** Widok warstwy wierzchniej czopa korbowodowego: 1 - mikro- i makro rysy, 2 - wykuszenia powierzchniowe materiału warstwy wierzchniej

Osad powstały na denkach tłoków (rys. 7) potwierdza fakt, że w silniku występował proces intensywnego spalania oleju silnikowego. Był on wynikiem niewłaściwego przylegania pierścieni tłokowych do powierzchni gładzi tulei cylindrowych, co spowodowało nieszczelności w komorze spalania, a także występowanie przedmuchów spalin do skrzyni korbowej. Świadczy o tym również wygląd pierścieni tłokowych zamontowanych w rowkach tłoków. Nadmierna ilość nagaru była przyczyną unieruchomienia pierścieni w rowkach tłoka, które w ten sposób przestały spełniać swoje najważniejsze funkcje: uszczelnianie komory spalania, zgarnianie nadmiaru oleju silnikowego i odprowadzenie ciepła z tłoka do tulei cylindrowej.



**Rys. 8.** Widok kompletu tłoków z pierścieniami tłokowymi z silnika dostarczonego do badań

Badania wstępne podstawowych właściwości oleju z zatartego silnika wykazały, że w momencie wystąpienia uszkodzenia, czyli po przebiegu ok. 8000 km od naprawy nastąpiło prawie całkowite zużycie dodatku antyutleniającego i smarnościowego.

Stwierdzono nieprawidłową (obniżoną o około 33°C) temperaturę zapłonu oleju silnikowego. Badania temperatury zapłonu próbki

oleju z silnika zatartego w porównaniu do próbki oleju wymienionego po prawidłowej eksploatacji wskazują, że olej po prawidłowej eksploatacji nie cechował tak dużym spadkiem wartości temperatury zapłonu.

Pomiary lepkości również potwierdziły fakt, że olej pobrany z zatartego silnika charakteryzował się bardzo dużym wzrostem lepkości i spadkiem wskaźnika lepkości.

## WNIOSKI

Przeprowadzone badania laboratoryjne uszkodzonego silnika o ZI Subaru typ EJ20G pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Intensywne procesy zużycia ściernego zachodzące w warstwie wierzchniej łożyska ślizgowego i czopa korbowodowego spowodowały zatarcie skojarzenia, które doprowadziło do zniszczenia występów ustalających panewki w korbowodzie.
2. W oleju silnikowym stwierdzono występowanie licznych produktów zużycia, zarówno ze stopów żelaza jak i ze stopu aluminium.
3. Badania wstępne wykazały niekorzystne zmiany właściwości oleju silnikowego po krótkim okresie eksploatacji silnika po naprawie.
4. Badania i pomiary warstw wierzchnich pozostałych czopów wału korbowego i łożysk ślizgowych nie wykazały anomalii, wynikających z nieprawidłowego procesu eksploatacji silnika. Stwierdzono prawidłowe, liczne mikro- i makro rysy na powierzchni czopów i łożysk ślizgowych.

## BIBLIOGRAFIA

1. Caban J., Gardyński L., *Determination Of The Influence Of The Stiffness Of The Diesel Engine Suspension Cushions In The Terrain Car*, Journal of Polish CIMAC, vol. 7, no 2/2012, Gdańsk 2012.
2. Cypko E., *Analiza przydatności warstwy regeneracyjnej czopa do współpracy z panewką wielowarstwową*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa 1993.
3. De Sas Stupnicka H., Gardyński L., *Badania metalograficzne zniszczonych wałów korbowych*, materiały konferencyjne KONES 2000, Lublin 2000.
4. Gardyński L., *Uszkodzenia elementów pojazdów. Nowoczesne materiały inżynierskie*, studia podyplomowe - materiały dydaktyczne, Politechnika Lubelska, Lublin 2010.
5. Hebda M., Wachal A., *Trybologia*. WNT, Warszawa 1980.
6. Kłopotcki J., Olszewski O., *Doświadczalne wyznaczanie charakterystyk łożysk ślizgowych*, Trybologia nr 6/1985.

7. Kostrzewa S., *Analiza zmian zachodzących w strukturze stopów łożysk eksploatowanych*, Biuletyn WAT nr 1/1985.
8. Kowalczyk S., *Badania zmian zachodzących w strukturze materiału łożysk wielowarstwowych*, XII Międzynarodowa konferencja naukowa „Achievements in Mechanical and Materials Engineering”, 2003.
9. Kozłowiecki H., *Łożyska tłokowych silników spalinowych*, WKiŁ, Warszawa 1974.
10. Luft S., *Podstawy budowy silników*, wydanie 2, WKiŁ, Warszawa 2006.
11. Niewczas A., Koszałka G., *Niezawodność silników spalinowych - wybrane zagadnienia*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2003.
12. Wajand J. A., Wajand J. T., *Tłokowe silniki spalinowe średnio- i szybkoobrotowe*, WNT, Warszawa 2005.
13. Włodarski J. K., *Tłokowe silniki spalinowe – procesy tribologiczne*, WKiŁ, Warszawa 1982.

### The analysis of the damage the association connecting-rod spigot - sliding bearing of the piston engine

*The article presents issues of damages tribological association of connecting-rod spigot - sliding bearing in the engine with spark ignition based on macroscopic studies. The article presents a study of several cases of engine damages that occurred in a short period of operation after previously done repair the engine. The main cause of damages was blurring of slide bearing working in association with connecting -rod spigot of the crankshaft. Damaged bearing and crankshaft in relation to the same new elements of known physical and material properties was analyzed.*

Autorzy:

dr inż. **Wojciech Napadlek** - Wojskowa Akademia Techniczna; Wydział Mechaniczny; 00-908 Warszawa; ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, tel.: 261 837 357, wojciech.napadlek@wat.edu.pl.

dr inż. **Adam Woźniak** - Wojskowa Akademia Techniczna; Wydział Mechaniczny; 00-908 Warszawa; ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, tel.: 261 837 097, adam.wozniak@wat.edu.pl.

mgr inż. **Wojciech Chrzanowski** - Wojskowa Akademia Techniczna; Wydział Mechaniczny; 00-908 Warszawa; ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, tel.: 261 837 087, wojciech.chrzanowski@wat.edu.pl.

inż. **Paweł Leoniuk** - Wojskowa Akademia Techniczna; Wydział Mechaniczny; 00-908 Warszawa; ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, tel.: 261 837 087, pawel.leoniuk@wat.edu.pl.