

BADANIA USZKODZEŃ WAŁÓW KORBOWYCH W TRAKCYJNYCH SILNIKACH O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

Jacek CABAN*, **Leszek GARDYŃSKI****, **Rafał WRONA*****

* Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska
e-mail: j.caban@pollub.pl

** Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska
e-mail: l.gardynski@pollub.pl

***Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska
e-mail: r.wrona@pollub.pl

Artykuł wpłynął do redakcji 09.12.2012 r. Zweryfikowaną i poprawioną wersję po recenzjach i korekcie otrzymano w maju 2013 r.

Szczególnym rodzajem zużycia elementów pojazdów są różnego rodzaju uszkodzenia, w tym pęknięcia. W artykule przedstawiono problematykę zjawiska uszkodzeń wałów korbowych w silnikach o zapłonie samoczynnym na podstawie badań makroskopowych. Artykuł stanowi studium trzech przypadków uszkodzeń wałów korbowych silników lekkich samochodów użytkowych. Analizie poddano wały o różnym stadium propagacji uszkodzenia w odniesieniu do wału nowego o znanych własnościach fizycznych i materiałowych.

Słowa kluczowe: wał korbowy, silnik z zapłonem samoczynnym, eksploatacja maszyn, uszkodzenia

WSTĘP

Maszyny, w związku z wykonywaną pracą, podlegają różnym obciążeniom zewnętrznym. Zjawiska te mają różnorodny i zmienny charakter. Objawia się to w postaci drgań mechanicznych. Ma to duży i ważny wpływ na człowieka, jego bezpieczeństwo oraz ergonomię w eksploatacji maszyn [1]. Każde urządzenie techniczne posiada określoną trwałość i zdolność do wykonywania powierzonego mu zadania, w tym również silnik spalinowy. Elementy silnika podczas pracy ulegają destrukcyjnemu oddziaływaniu otoczenia, na które składają się:

- proces roboczy;
- środowisko;
- oddziaływanie elementów współpracujących [6].

Szczególnym rodzajem zużycia elementów silnika są różnego rodzaju pęknięcia powstające w wyniku złożonych stanów naprężeń i szybkozmiennych warunków ich pracy. Wał korbowy jest jednym z głównych elementów roboczych silnika spalinowe-

go. W artykule przedstawiono problematykę powstawania i prezentację wybranych przykładów zużycia awaryjnego wałów korbowych w trakcyjnych silnikach o zapłonie samoczynnym.

Obserwowany wzrost wskaźników mocy silnika uzyskiwany z 1dm³ pojemności skokowej jest realizowany w wyniku wzrostu średniego ciśnienia użytecznego oraz zwiększania znamionowych prędkości obrotowych [5]. Z tych względów wał korbowy powinien zapewniać odpowiednią sztywność, która zależna jest od wymiarów wału. Dlatego wały korbowe współczesnych samochodowych silników spalinowych są ułożyskowane pomiędzy każdym cylindrem. Stosuje się wały korbowe kute lub lane, rzadziej składane [2]. Podstawowym materiałem na wały korbowe jest stal węglowa wyższej jakości, stale stopowe oraz niekiedy żeliwo sferoidalne lub staliwo. W tabeli 1 podano własności mechaniczne materiałów używanych do produkcji wałów korbowych oraz procentowy udział składników stopowych.

Tabela 1. Składy chemiczne oraz własności mechaniczne materiałów na wały korbowe

Materiał	Zawartość składników, %										Własności mechaniczne		
	C	Si	Mn	P _{max}	S _{max}	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Osiągalna twardość HRC	R _m MPa	R _e MPa
Stal do ulepszenia	0,42+0,5	0,15+0,35	0,4+0,8	0,035	0,035	—	—	—	—	—	59,3	980 do 660	780 do 410
	0,36+0,42	0,15+0,40	0,6+0,9	0,035	0,035	0,9+1,2	—	—	—	—	56,3		
	0,38+0,45	0,15+0,40	0,5+0,8	0,035	0,035	0,9+1,2	0,15+0,30	—	—	—	58,3		
	0,48+0,56	0,15+0,40	0,7+1,1	0,035	0,035	0,9+1,2	0,15+0,25	—	0,07+0,12	—	60,2		
Stal do nawęglania	0,14+0,19	0,15+0,40	0,4+0,6	0,035	0,35	1,5+1,8	0,25+0,35	1,4+1,7	—	—	60,2	980	830
	0,26+0,34	0,15+0,4	0,4+0,7	0,035	0,035	2,3+2,7	0,15+0,25	—	0,1+0,2	—	63,5		
Stal do azotowania	0,28+0,35	0,15+0,4	0,4+0,7	0,035	0,035	2,8+3,3	0,3+0,5	—	—	—	—	600+ +700	370+ +420
Żeliwo	2,4+2,8	2,25+2,75	0,8+1,2	0,1	0,15	—	1,0+1,2	1,0+1,3	—	—			
Staliwo	1,35+1,6	0,85+1,1	0,6+0,8	—	—	0,4+0,5	—	—	—	1,5+2			

Źródło: [7]

Problemy wytrzymałości mechanicznej są jednymi z podstawowych. W zakresie wytrzymałości statycznej za granicę zdatności najczęściej uznaje się granicę plastyczności materiału [6]. Przy wytrzymałości zmęczeniowej za zużycie graniczne uważany jest fakt pojawienia się pęknięcia w materiale, bądź też osiągnięcie przez to pęknięcie odpowiedniej wielkości (graniczna wielkość pęknięcia może być narzucana np. przez rozdzielczość aparatury defektoskopowej) [6].

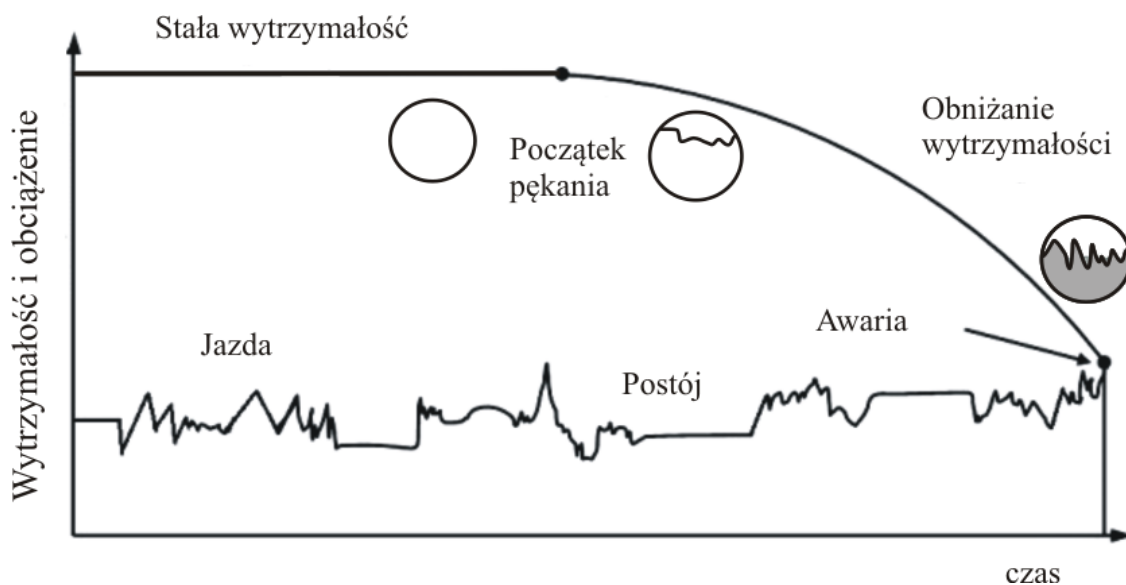
Z przelomem zmęczeniowym mamy do czynienia wtedy, gdy wartość naprężeń w elemencie jest niższa od jego wytrzymałości, lecz działają one w sposób zmienny w czasie, co w niektórych sytuacjach może doprowadzić do zainicjowania pęknięcia, które rozwijając się prowadzi do obniżenia wytrzymałości, a w konsekwencji do uszko-

dzenia. W tabeli 2 przedstawiono typowe formy przełomów zmęczeniowych w zależności od sposobu i wielkości obciążenia [3].

Tabela 2. Formy przełomów zmęczeniowych zależne od sposobu i wielkości obciążenia

L p.	Obciążenie		Pręty gładkie		Pręty z miejscowymi spiętrzeniami naprężeń			
	Nazwa	Schemat	silnie obciążone	slabo obciążone	dużymi		małymi	
			1	2	3	4	5	6
1	Rozciąganie ściskanie		a)	b)	c)	d)	e)	f)
2	Jednostronne zginanie		g)	h)	i)	j)	k)	l)
3	Dwustronne zginanie		l)	m)	n)	o)	p)	r)
4	Obrotowe zginanie		s)	t)	u)	w)	y)	z)

Źródło: [3]



Rys. 1. Uproszczony schemat historii elementu obciążonego głównie jednostronnym zginaniem

Źródło: [4]

Schemat ukazany na rysunku 1 przedstawia element poddawany głównie jednostronnemu zginaniu np. wału korbowego w sytuacji zainicjowania i rozwoju pęknięcia

zmęczeniowego. Linia „zygzakowa” przedstawia zmienne obciążenie uszkodzonego przekroju [4].

1. BADANIA ANALIZOWANYCH WAŁÓW KORBOWYCH

Badaniom makroskopowym poddano uszkodzone wały korbowe, wybudowane z silników spalinowych o zapłonie samoczynnym. Do chwili uszkodzenia wały zabudowane były w samochodach dostawczych, takich jak: Renault Traffic, Mercedes Sprinter oraz Peugeot Boxer. Uszkodzone wały korbowe zostały wcześniej zabudowane w silnikach w/w pojazdów w stanie nowym. Wały korbowe pochodzą spoza sieci Autoryzowanych Stacji Obsługi samochodów marki Renault, Mercedes-Benz czy Peugeot. Są to „nieoryginalne” części zamiennie, przy czym można je uznać za tzw. „części zamiennie o porównywalnej jakości”. Okres eksploatacji wałów w silnikach w/w samochodów był krótki i wynosił od kilkuset do kilku tysięcy kilometrów przebiegu.

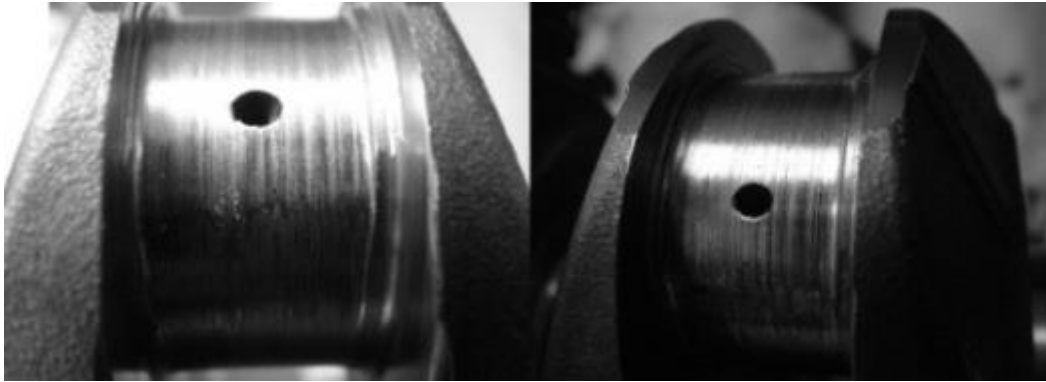
Pierwszy badany wał korbowy został wymontowany z silnika samochodu Renault Traffic po przejechaniu przez pojazd 240 km od chwili montażu. Silnik pojazdu wcześniej został poddany naprawie po przebiegu ok. 320 000 km. Badany wał posiadał uszkodzenie w postaci intensywnego zatarcia czopa korbowego łożyska ślizgowego trzeciego cylindra. Widok ogólny wału korbowego został przedstawiony na rysunku 2.



Rys. 2. Widok ogólny uszkodzonego wału korbowego silnika samochodu marki Renault Traffic

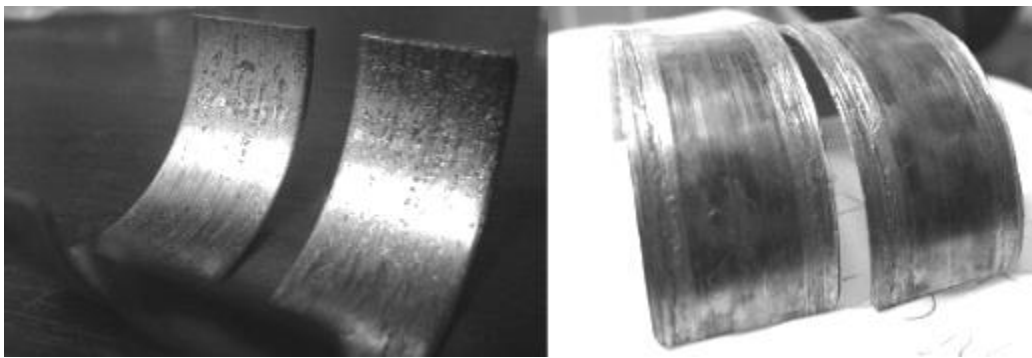
Źródło: Opracowanie własne

Rysunek 3 przedstawia zatarty czop wału korbowego silnika samochodu dostawczego Renault Traffic. Według producenta wału (informacje zawarte w karcie informacyjnej producenta) twardość w skali Brinella wynosi od 265 do 304 HB. Odnosząc skalę twardości Brinella do skali twardości Rockwella jego twardość powinna zawierać się w przedziale od 28 do 34 HRC. Badania twardości przeprowadzone na czopach wskazują na twardość czopów wynoszącą około 35 HRC. Na tym etapie badań zasadny jest wniosek, że twardość czopów badanego wału korbowego nie pozostaje w związku przyczynowym z uszkodzeniem badanego wału korbowego wybudowanego z silnika samochodu Renault Traffic. Z dostępnych autorom informacji wynika, że uszkodzenie w/w wału korbowego silnika nastąpiło prawdopodobnie w wyniku nieprawidłowości popełnionych podczas montażu silnika.



Rys. 3. Zatarcie czopa korbowego na trzecim cylindrze wału silnika samochodu Renault Traffic

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 4. Półpanewki korbowodowe trzeciego cylindra z silnika samochodu Renault Traffic

Źródło: Opracowanie własne

Na rysunku 4 przedstawiono półpanewki korbowodowe znajdujące się na trzecim czopie wału silnika Renault Traffic. Na kolejnych rysunkach (rys. 5 ÷ 7), przedstawiono uszkodzony wał korbowy wybudowany z silnika samochodu marki Mercedes Sprinter. Na rysunku 5 przedstawiono ogólny widok pękniętego wału przy końcówce odbioru mocy.



Rys. 5. Widok ogólny uszkodzonego wału korbowego silnika z samochodu Mercedes Sprinter

Źródło: Opracowanie własne

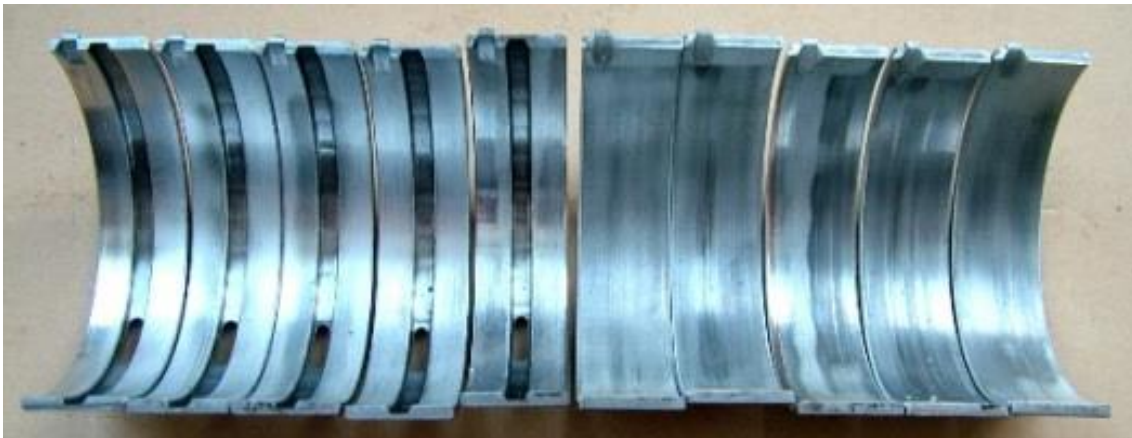
Uszkodzenie badanego wału polegało na pęknięciu rozdzielczym przy przejściu powierzchni czopa korbowego pierwszego cylindra w ramię wykorbienia od strony przedniej wału, tj. od strony tłumika drgań skrętnych (rys. 5). W okolicy ogniska przełomu nie stwierdzono występowania rys, chropowatości bądź innych symptomów mogących zainicjować powstałe uszkodzenie.

Kolejny rysunek (rys. 6) przedstawia fotografię przełomu o charakterze zmęczeniowym z wyraźnymi liniami spoczynkowymi wynikającymi z kolejnych etapów rozwoju przełomu. Na rysunku 7 zaprezentowano widok wewnętrznych powierzchni półpanewek korbowodowych współpracujących z czopami badanego wału wybudowanego z samochodu marki Mercedes Sprinter.



Rys. 6. Przełom zmęczeniowy wału korbowego silnika z samochodu Mercedes Sprinter

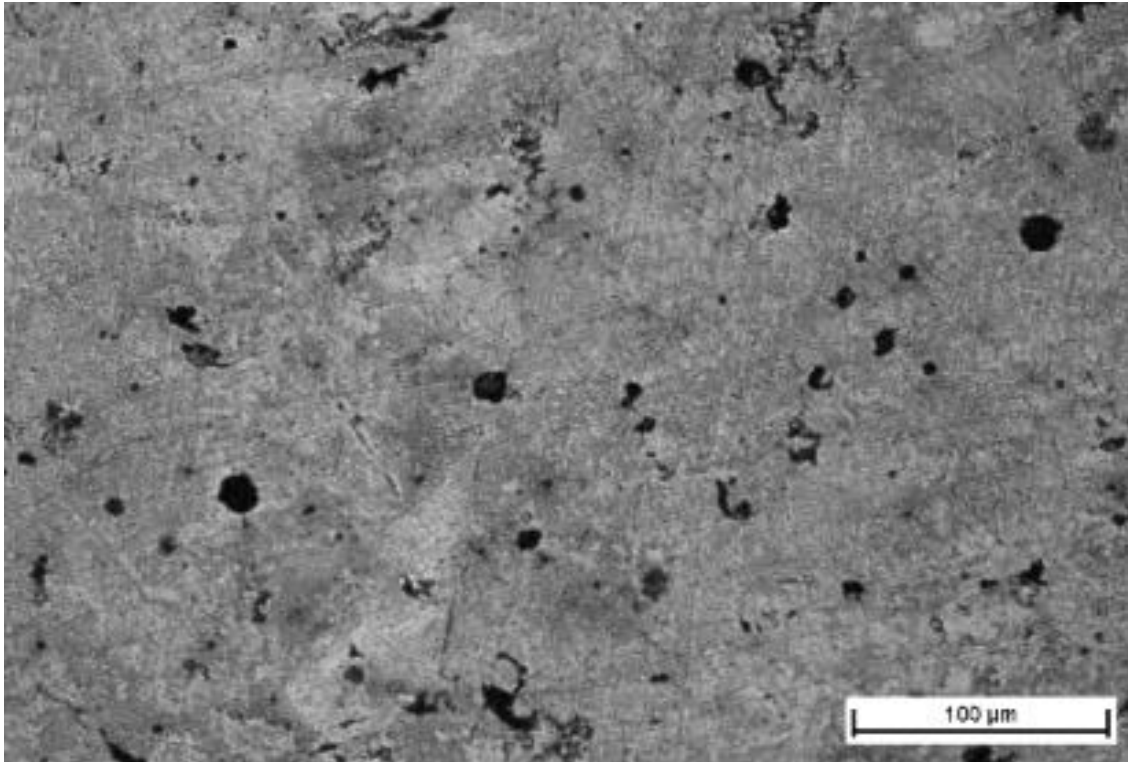
Źródło: Opracowanie własne



Rys. 7. Widok ogólny półpanewek wału korbowego silnika z samochodu Mercedes Sprinter

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie obserwacji zglądu metalograficznego, wytrawionego nitalem określono, że materiał wału korbowego to żeliwo sferoidalne. Rysunek 8 przedstawia trawiony zgląd żeliwa sferoidalnego perlitycznego z niepełną sferoidyzacją. Żeliwo sferoidalne perlityczne z niepełną sferoidyzacją ma gorsze własności od żeliwa sferoidalnego, co mogło przyczynić się do zaistniałego uszkodzenia wału korbowego silnika w omawianym pojeździe Mercedes Sprinter.



Rys. 8. Mikrostruktura wału korbowego silnika z samochodu Mercedes Sprinter

Źródło: Opracowanie własne

Widok ogólny uszkodzonego wału korbowego pochodzącego z silnika samochodu Peugeot Boxer przedstawiono na rysunku 9. Uszkodzenie wału polegało na jego dwumiejscowym pęknięciu rozdzielczym. Przypuszczalnie badany wał również został wykonany w postaci odlewu z żeliwa sferoidalnego.

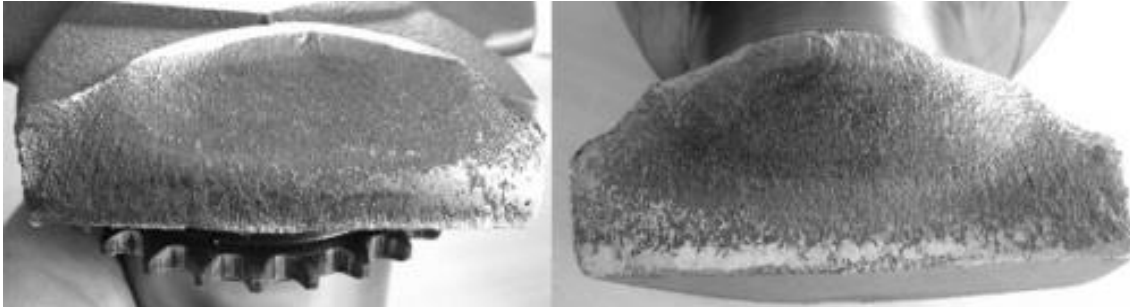


Rys. 9. Przykład uszkodzenia wału korbowego w silniku samochodu Peugeot Boxer

Źródło: Opracowanie własne

Na rysunku 10 przedstawiono pierwsze pęknięcie, przy przejściu powierzchni czopa korbowego pierwszego cylindra w ramię wykorbienia od strony przedniej wału. Ma ono charakter zmęczeniowy, z wyraźnymi śladami linii spoczynkowych będących

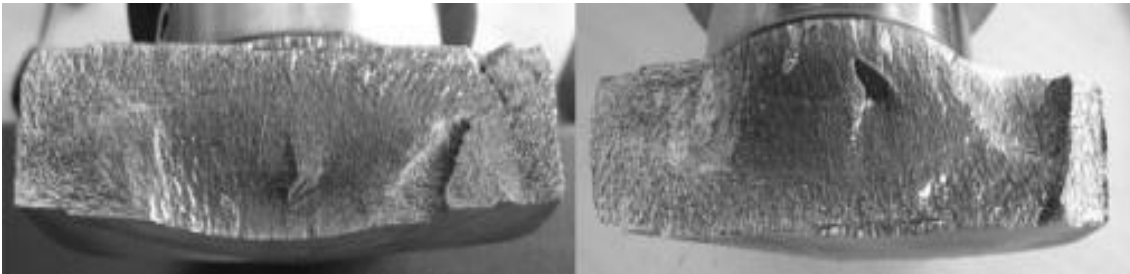
następstwem kolejnych faz rozwoju przełomu. Ponadto na powierzchni przełomu na znacznej powierzchni widoczne są ślady wybłyszczenia (zawalcowania) mogące wskazywać, iż są to uszkodzenia wtórne, powstałe w wyniku współpracy rozdzielonych w następstwie pęknięcia elementów wału.



Rys. 10. Przełom zmęczeniowy pierwszego pęknięcia rozdzielczego wału korbowego silnika z samochodu Peugeot Boxer

Źródło: Opracowanie własne

Drugie pęknięcie rozdzielcze wału nastąpiło przy przejściu powierzchni czopa korbowego drugiego cylindra w ramię wykorbienia od strony przedniej wału. Powierzchnia przełomu (rys. 11) również posiada wyraźne ślady potwierdzające zmęczeniowy charakter uszkodzenia.

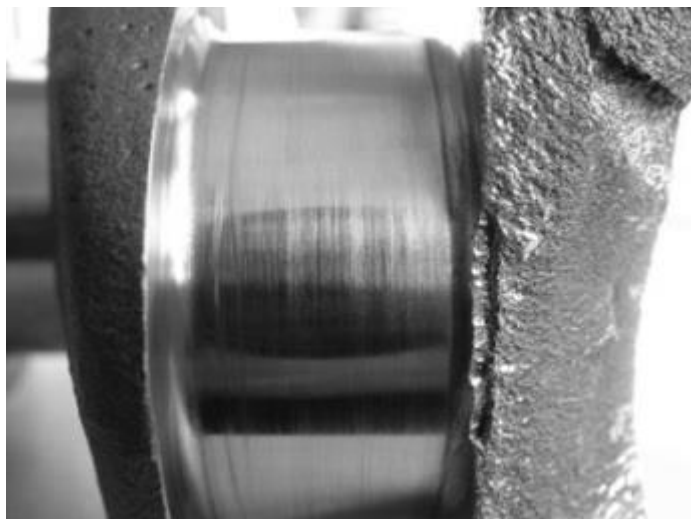


Rys. 11. Przełom drugiego pęknięcia rozdzielczego wału korbowego silnika z samochodu Peugeot Boxer

Źródło: Opracowanie własne

Brak śladów wybłyszczeń na drugim przełomie wału wskazuje, iż proces niszczenia (pęknięcia) wału rozpoczął się od pierwszego pęknięcia rozdzielczego. Natomiast drugie pęknięcie rozdzielcze jest uszkodzeniem wtórnym. Badania wału ujawniły także zarysowania czopa łożyska głównego wału pomiędzy wymienionymi wyżej przełomami – uszkodzenie czopa wykazuje charakter uszkodzeń wtórnych. Na rysunku 12 przedstawiono widok uszkodzonego (porysowanego) czopa łożyska głównego wału korbowego silnika z pojazdu Peugeot Boxer.

W przypadku wału korbowego z samochodu Peugeot Boxer na podstawie przeprowadzonych badań makroskopowych nie można wnioskować o strukturze materiału czy też nieprawidłowo przeprowadzonej obróbce cieplnej. Natomiast wszystkie poddane badaniom wały korbowe nie budzą zastrzeżeń pod względem geometrycznym, w tym przede wszystkim w kwestii promieni przejścia zakończeń czopów wału.



Rys. 12. Widok uszkodzonego (porysowanego) czopa łożyska głównego wału korbowego pomiędzy dwoma pęknięciami rozdzielczymi z silnika Peugeot Boxer

Źródło: Opracowanie własne

Badania mikroskopowe w przypadku wału korbowego z samochodu Mercedes Sprinter wykazały, że wał został wykonany z żeliwa sferoidalnego perlitycznego z niepełną sferoidyzacją, które jak wspomniano ma gorsze własności materiału od żeliwa sferoidalnego.

PODSUMOWANIE

Problematyka przedstawiona w artykule stanowi studium trzech przypadków uszkodzeń wałów korbowych silników lekkich samochodów użytkowych. Są to doładowane silniki o zapłonie samoczynnym konstrukcyjnie zbliżone do silników stosowanych w samochodach osobowych.

Przeprowadzone badania makroskopowe uszkodzonych wałów korbowych nie pozwalają na jednoznaczne określenie przyczyn ich zniszczenia. Z przeprowadzonej analizy wynika, że przełomy badanych wałów korbowych posiadają charakter zmęczeniowy. Bardziej precyzyjne wnioskowanie w kwestii przyczyn uszkodzenia wałów korbowych wymaga wcześniejszego przeprowadzenia badań mikroskopowych. Badania takie przeprowadzono dla wału silnika z samochodu Mercedes Sprinter, będącego częścią zamienną „o porównywalnej jakości”. Wynika z nich, że materiał wału to żeliwo sferoidalne perlityczne z niepełną sferoidyzacją. Materiał ten ma nieco gorsze własności od żeliwa sferoidalnego.

Wszystkie pęknięcia rozdzielcze badanych wałów korbowych posiadają charakter zmęczeniowy, a ogniska pęknięć mają miejsce w otoczeniu naturalnego karbu geometrycznego, którym jest przejście czopa w ramię wykorbienia.

Wystąpienie pęknięcia zmęczeniowego w pojeździe, zwłaszcza w przypadku elementu mającego wpływ na bezpieczeństwo, jest stanem nieprawidłowym. Świadczy to o nieprawidłowej konstrukcji, niewłaściwym wykonaniu lub wadzie materiałowej. Uszkodzenie wału może być też wynikiem niewłaściwej eksploatacji lub wcześniejszego uszkodzenia innej części. W celu zmniejszenia prawdopodobieństwa zmęczeniowego pęknięcia elementy projektuje się tak, aby uniknąć karbów geometrycznych i struktu-

ralnych w niebezpiecznych strefach, a także poddaje się dodatkowym operacjom, np. szlifowanie, kulowanie, dogniatanie, hartowanie powierzchniowe czy specjalna obróbka chemiczna [4].

Dokładne określenie miejsca pęknięcia wału jest trudne do przewidzenia ze względu na szereg czynników: geometrię powierzchni, struktury i własności materiału oraz amplitudy drgań skrętnych. W mniejszym stopniu zniszczenie wału zależy od wartości przenieszonego momentu skręcającego.

Awarii wału nie można rozpatrywać indywidualnie, często ma ona związek z innym wcześniejszym uszkodzeniem w układzie korbowo-tłokowym, np. nieznacznym odkształceniem korbowodu przy uderzeniu tłoków o grzybki zaworów po urwaniu paska napędu rozrzędu [2].

LITERATURA

1. Caban J., Gardyński L., *Determination Of The Influence Of The Stiffness Of The Diesel Engine Suspension Cushions In The Terrain Car*, [in:] „Journal of Polish CIMAC”, vol. 7, no 2/2012, Gdańsk 2012, p. 7-16.
2. De Sas Stupnicka H., Gardyński L., *Badania metalograficzne zniszczonych wałów korbowych*, [w:] Materiały konferencyjne KONES 2000, Lublin 2000, s. 294-300.
3. Drewnowski S., *Formy złomów i zniszczeń elementów konstrukcji metalowych*, Arkady, Warszawa 1969.
4. Gardyński L., *Uszkodzenia elementów pojazdów. Nowoczesne materiały inżynierskie*, Studia podyplomowe – materiały dydaktyczne, Politechnika Lubelska, Lublin 2010.
5. Luft S., *Podstawy budowy silników. Pojazdy samochodowe*, WKiŁ, Warszawa 2003.
6. Niewczas A., Koszałka G., *Niezawodność silników spalinowych – wybrane zagadnienia*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2003.
7. Wajand J.A., Wajand J.T., *Tłokowe silniki spalinowe średnio i szybkoobrotowe*, WNT, Warszawa 2005.

DAMAGE EXAMINATIONS OF TRACTION DIESEL ENGINES CRANKSHAFTS

Summary

Different types of damage, including cracks, are a special type of wear in parts of vehicles. The article presents the phenomenon of crankshaft failures in diesel engines based on macroscopic studies. The article is a study of three cases of damage to the crankshaft in light commercial vehicle engines. Shafts with a different damage propagation stage in relation to the new crankshaft with well-known physical and material properties were analyzed.

Keywords: crankshaft, diesel engine, maintenance of machinery, damage

NOTY BIOGRAFICZNE

mgr inż. Jacek CABAN – doktorant w Instytucie Transportu, Silników Spalinowych i Ekologii w Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej. Autor ponad 30 artykułów naukowych z dziedziny Eksploatacji i Budowy Maszyn.

dr inż. Leszek GARDYŃSKI – adiunkt w Katedrze Inżynierii Materiałowej w Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej. Rzeczoznawca Samochodowy PZM, Biegły Sądowy w zakresie materiałoznawstwa, mechaniki i techniki motoryzacyjnej, Ekspert PNTTE. Główne zainteresowania to materiałoznawstwo motoryzacyjne, pojazdy terenowe oraz eksploatacja i budowa maszyn.

mgr inż. Rafał WRONA – asystent w Instytucie Transportu, Silników Spalinowych i Ekologii w Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.