

## DAMAGE ANALYSE OF THE COMMON RAIL SYSTEM FUEL PUMP

Artur Król, Leszek Szczęch

Military University of Technology  
Kaliskiego 2, 00-908 Warsaw, Poland  
tel.: +48 22 6839546, fax: +48 22 6839546  
e-mail: a.krol@wme.wat.edu.pl, l.szczech@wme.wat.edu.pl

### Abstract

Damage analyse of the Common rail system in Citroen Xsara 2.0 HDi is the aim of the paper. As a result of damage two from three pumping section were destructed. Analysis concerns mechanical reasons as well as fuel quality. Internal elements of the fuel pump were checked. There was looked for mechanical defect or assembly faults. Because of incombability of fuel quality to norm PN-EN 590 of may 1999 it was detailed checked on possibility of demagae cause. In effect of analysis it was found that damage was caused by assembly fault. One of internal elements was in colission with another rotating part. This element was broken and small produkts of colission stopped fuel outflow from the pump. Internal pressure increased and cause destruction of the fuel pump. The influence of the fuel propriety on affectability fuel pump was an object of the detailed analysis. Research by means of the spectrophotometer in the infra-red radiation was carried out. Research consisted in the exposing of the fuel sample of the with infra-red rays of the definite wavelength. Spectrum emissive of compared fuels in the infra-red radiation. is a result of the researches. Test results showed that a reason of the damage of the pump. had not been proprieties of the fuel.

**Keywords:** combustion engines, Common rail systems

## ANALIZA PRZYCZYŃ AWARII POMPY PALIWOWEJ UKŁADU COMMON-RAIL

### Streszczenie

Referat zawiera analizę przyczyn awarii pompy wysokiego ciśnienia z układu zasilania samochodu Citroen Xsara. W efekcie awarii zniszczone zostały dwie z trzech sekcji tłoczących wywołując rozszczelnienie pompy i wyciek paliwa. W referacie przeanalizowano możliwości powstania awarii zarówno ze względu na własności mechaniczne pompy jak i własności paliwa. Elementy wewnętrzne pompy zostały poddane drobiazgowym oględzinom w poszukiwaniu wad materiałowych lub błędów montażowych. Ponieważ niektóre własności paliwa były niezgodne z normą PN-EN 590 z maja 1999 szczegółowo sprawdzono wpływ tych niezgodności na możliwość wystąpienia awarii. W wyniku analizy stwierdzono, że własności paliwa nie mogły wpłynąć na możliwość wystąpienia awarii a jej najbardziej prawdopodobną przyczyną były błędy, które wystąpiły podczas montażu. One spowodowały przemieszczenie elementów wewnątrz obudowy i ich kolizję z wirującymi częściami pompy. Jeden z elementów został rozkruszony a produkty uniemożliwiły odpływ paliwa z przestrzeni wysokiego ciśnienia i w efekcie nadmierny wzrost ciśnienia, który spowodował urwanie śrub mocujących cylinderki dwóch sekcji tłoczących. Wpływ właściwości paliwa na możliwość uszkodzenia pompy paliwa był przedmiotem szczegółowej analizy. Badania przy pomocy spektrofotometru w podczerwieni zwały przeprowadzone. Badania polegały na prześwietlaniu próbki paliwa przez promienie podczerwone o określonej długości fali. Widmo emisyjne porównywanych paliw w podczerwieni jest rezultatem tych badań. Wyniki badań wykazały, że przyczyną uszkodzenia pompy. nie były właściwości stosowanego paliwa.

**Słowa kluczowe:** silniki spalinowe, układ common rail

### 1. Wstęp

Elementy układu zasilania paliwem silników o zapłonie samoczynnym podlegają dość dużym obciążeniom zarówno cieplnym jak i mechanicznym. Obciążenia mechaniczne wynikają przede wszystkim z dużych wartości ciśnienia paliwa podczas wtrysku. W rotacyjnych pompach

wtryskowych ciśnienie to może dochodzić do 30-40 MPa, w rzędowych 50-70 MPa, w układach z pompowtryskiwaczami nawet do 200 MPa. Szczególnie obciążonymi mechanicznie układami wytwarzania wysokiego ciśnienia są pompy układów stałociśnieniowego wtrysku paliwa, tzw. układy Common Rail (CR). Ciśnienie paliwa w tych układach jest ustalone na wartość 135-205 MPa) w zależności od generacji urządzenia. Wysokie ciśnienie paliwa powoduje występowanie dużych naprężeń w elementach układu tłoczącego. Nawet niewielkie zakłócenia w odpływie paliwa z pompy mogą spowodować nadmierny wzrost ciśnienia i uszkodzenie najsłabszych elementów układu tłoczącego. Tego typu uszkodzenie wystąpiło w badanej pompie paliwa. Zerwane zostały po trzy śruby mocujące pokrywy nad dwiema (z trzech) sekcjami tłoczącymi. W efekcie awarii pompa została rozszczelniona i utraciła zdolność do przetłaczania. Paliwo w dużej ilości rozlało się pod samochodem.

## 2. Wpływ własności paliwa na możliwość uszkodzenia pompy paliwa

Przedmiotem rozważań była pompa paliwowa wysokiego ciśnienia firmy Siemens typ FIP6186-10F nr seryjny V06/0040\_A pochodząca z samochodu Citroen Xsara 2.0 HDi. Pompa ta uległa uszkodzeniu w okresie gwarancyjnym i była głównym dowodem w postępowaniu sądowym, z powodu nieuwzględnienia przez gwaranta zasadności wymiany uszkodzonej pompy na nową w ramach gwarancji. Przyczyną odmówienia naprawy gwarancyjnej była niezgodność paliwa z normą PN-EN 590 z maja 1999, stwierdzona w badaniach laboratoryjnych zleconych przez gwaranta.

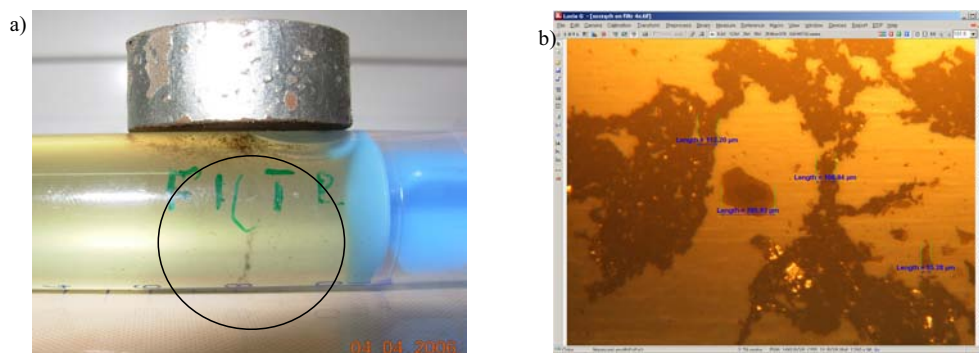
Przeprowadzono dwukrotne badania paliwa. Pierwsze orzeczenia laboratoryjne z dnia 14.05.2003 wydane przez laboratorium „PETROGEO” w Pile jednoznacznie stwierdza, że przedstawione do analizy paliwo jest niezgodne z normą przy czym niezgodność dotyczyła obniżonej temperatury zapłonu do ok. 40°C oraz nadmiernej zawartości wody. W powtórzonym badaniu z dnia 19.05.2003r nie stwierdzono obecności wody, która mogła pochodzić z naczynia, do którego pobrano pierwszą próbkę. Zatem jedyną niezgodnością dyskwalifikującą paliwo pochodzące ze zbiornika badanego samochodu była temperatura zapłonu obniżona w stosunku do normy o ok. 15°C.

Zgodność z normą PN-EN 590 z maja 1999 jest uwarunkowana koniecznością zmieszczenia się całego szeregu własności fizycznych paliwa w dość wąskich granicach, które ta norma narzuca. Każda z własności fizycznych paliwa wpływa na inne zjawiska zachodzące podczas pracy silnika. Jedne własności mają znaczenie w procesie przetwarzania paliwa przez elementy układu zasilania, które podnoszą ciśnienie paliwa do wartości rzędu 135 MPa, wykorzystując w tym celu bardzo dokładnie dopasowane elementy tłoczące, wrażliwe na przekroczoną zawartość zanieczyszczeń stałych, niską lepkość, która wpływa na pogorszenie funkcji smarujących spełnianych przez paliwo, niską gęstość, która także może wpływać zmniejszenie lepkości i smarności. Pogorszenie własności smarnych może wpłynąć na trwałość pompy a nawet przyczynić się do powstania awarii elementów przetwarzających paliwo. Ponieważ badane paliwo pod względem lepkości kinematycznej i gęstości było zgodne z normą, a na elementach tłoczących i elementach łożyskujących pompy paliwowej brak jest jakichkolwiek śladów zużycia ściernego, zatarć czy innych śladów wskazujących na niewłaściwe cechy paliwa w tym zakresie to należy stwierdzić, że to nie zmienione własności paliwa były przyczyną zaistniałej awarii.

Inne własności fizyczne paliwa wpływają na proces przygotowania mieszanki paliwowo-powietrznej oraz proces spalania i wytwarzania energii w komorze spalania silnika. Do nich możemy zaliczyć temperaturę zapłonu. Ponieważ jednak w silniku o zapłonie samoczynnym paliwo wtryskiwane jest do komory spalania silnika, w której temperatura przekracza 600°C, różnica temperatury zapłonu będzie wpływała jedynie na skrócenie zwłoki zapłonu i zwiększenie prędkości spalania. Tym samym ciśnienie w komorze spalania silnika będzie narastało szybciej, wzrosną obciążenia w układzie korbowo-tłokowym silnika, raczej bez związku z układem zasilania, w którym znajduje się uszkodzona pompa wysokiego ciśnienia.

Ponieważ główną kwestią sporną były własności paliwa, w dniu 23.03.2006 pobrano z uszkodzonego samochodu kolejną próbkę paliwa do badań. Ponieważ w samochodzie poza zdemontowaną pompą paliwową nie było widocznych innych uszkodzeń wymontowano jedynie filtr paliwa, z którego pobrano trzy próbki paliwa po ok. 10 cm<sup>3</sup>. Dwie ze środkowej warstwy paliwa i jedną z dna filtra. Pobrano także czwartą próbkę paliwa o objętości ok. 5 cm<sup>3</sup> z szyny wysokiego ciśnienia układu CR.

Paliwo pobrane z filtra paliwa zawierało bardzo dużą ilość zanieczyszczeń, zwłaszcza próbka pobrana z dna. Z próbek pobranych ze środkowej warstwy paliwa także wytrącił się osad, ale zanieczyszczenia były w nich dużo drobniejsze. Po poddaniu próbek działaniu pola magnetycznego okazało się, że osad złożony jest z cząstek metalu o właściwościach ferromagnetycznych (rys. 1a). Próbkę poddano badaniu mikroskopowemu (rys. 1b), które pokazuje skupiska namagnesowanych zanieczyszczeń o rozmiarach od 0.01 do 0.2 mm. Utrwalenie się właściwości magnetycznych w tych zanieczyszczeniach po krótkiej ekspozycji na działanie silnego pola magnetycznego wskazuje, że zanieczyszczenia powstały ze stali wysokowęglowej lub stopowej o znacznej twardości. Zanieczyszczenia te znajdowały się w filtrze paliwa przed wkładem filtrującym, a więc nie mogły przedostawać się dalej do pompy wysokiego ciśnienia. Ale ponieważ paliwo krąży w układzie zasilania pomiędzy zbiornikiem a pompą wysokiego ciśnienia a nadmiar paliwa jest ponownie odprowadzany z pompy do zbiornika zanieczyszczenia powstałe po uszkodzeniu elementów sekcji tłoczącej pompy wysokiego ciśnienia mogły przedostać się do filtra paliwa. Świadczy to o tym, że znaczna ilość drobnych zanieczyszczeń mogła znajdować się w pompie wysokiego ciśnienia i to one mogły zablokować odpływ paliwa z wysokociśnieniowej części pompy i przyczynić się do jej uszkodzenia.

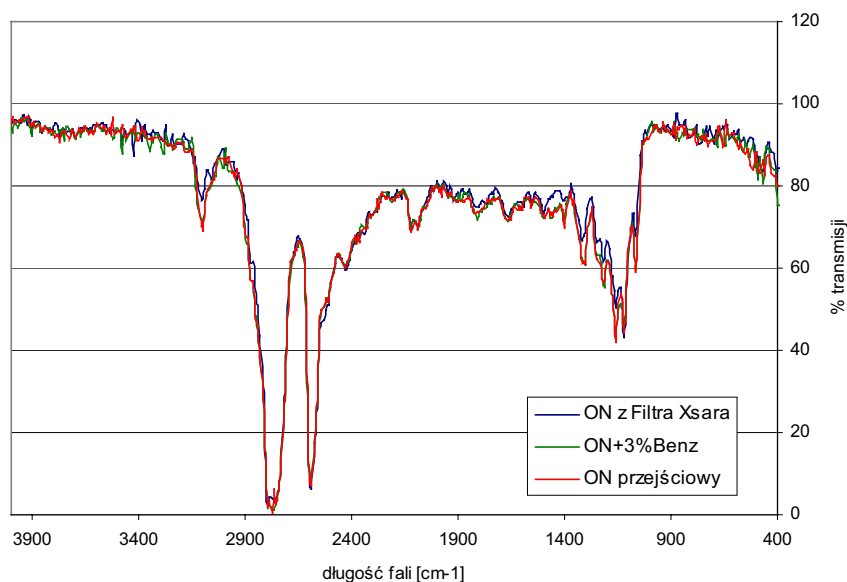


Rys. 1. Zanieczyszczenia znalezione w paliwie: a) poddane działaniu pola magnetycznego, b) w obrazie mikroskopowym (rozmiary od 10 do 200  $\mu\text{m}$ )

Fig. 1. Impurities found in the fuel: a) processed of the magnetic field, b) in the microscopic (sizes from 10 for 200  $\mu\text{m}$ )

Pobrane paliwo poddano także badaniu przy pomocy spektrofotometru w podczerwieni. Badanie to polega na prześwietlaniu próbki paliwa przez promienie podczerwone o określonej długości fali (w tym przypadku zakres wynosił 4000 – 400 cm<sup>-1</sup>). Ponieważ różne węglowodory w różnym stopniu pochłaniają to promieniowanie (emisja ze źródła ulega osłabieniu) to prześwietlając próbkę paliwa można ocenić czy zawartość poszczególnych węglowodorów w paliwie jest porównywalna z paliwem wzorcowym. Paliwem wzorcowym był olej napędowy tzw. przejściowy (przejściowy pomiędzy olejem zimowym a letnim, stosowany zazwyczaj wiosną, kiedy to nastąpiła awaria samochodu) o gęstości 0,835 i temperaturze zapłonu 58-59°C. Paliwo wzorcowe porównano z paliwem pochodzącym z badanego samochodu oraz z tym samym paliwem wzorcowym, do którego dodano 3% benzyny ekstrakcyjnej. Ponieważ paliwo w samochodzie z którego pochodziła uszkodzona pompa nie spełniało normy PN EN 590 w zakresie

temperatury zapłonu, postanowiono sprawdzić jaka zawartość benzyny spowoduje obniżenie temperatury zapłonu do 40°C zmierzonej podczas badań paliwa w „PETROGEO”. Do czystego oleju napędowego przejściowego o temperaturze zapłonu 59°C dodano najpierw 1% a następnie 3% benzyny ekstrakcyjnej i wykonano pomiary temperatury zapłonu (rys. 3). Jednoprocentowy dodatek benzyny spowodował obniżenie temperatury zapłonu do 52°C a trzyprocentowy do 39°C. Wynik ten jest zbliżony do otrzymanego w laboratorium „PETROGEO”. Na podstawie widma emisji (rys. 2) badanych paliw można stwierdzić że ich skład jest porównywalny i nie wskazuje na obecność znacznych ilości domieszek, które mogły by zmienić własności paliwa.



Rys. 2. Widmo emisyjne porównywanych paliw w podczerwieni  
 Fig. 2. Spectrum emissive of compared fuels in the infra-red radiation

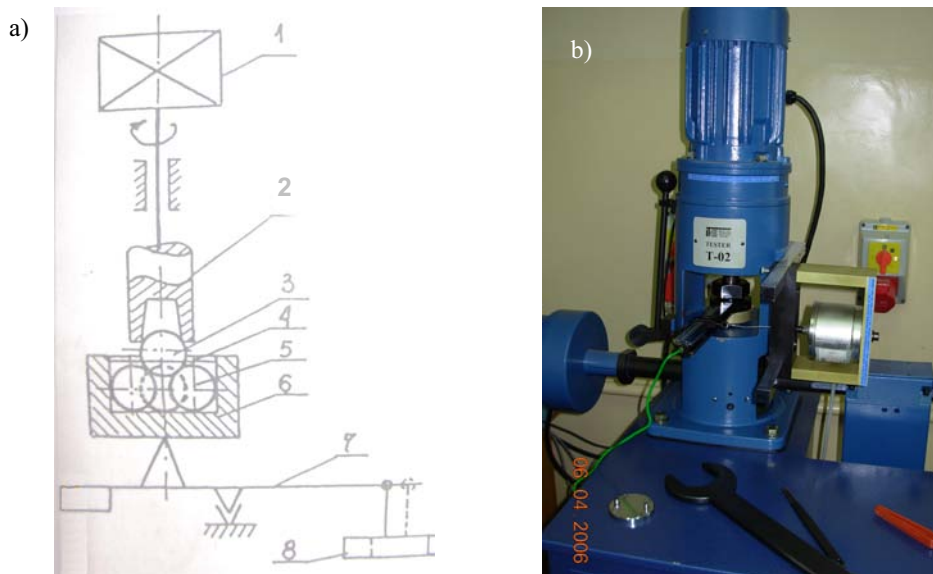
Postanowiono zatem sprawdzić jak 3% dodatek benzyny wpłynie na własności smarne paliwa, istotne dla trwałości pompy wysokiego ciśnienia i skłonności jej elementów (smarowanych paliwem) do zacierania. Sprawdzenie to wykonano na aparacie czterokulowym (rys. 4), w którym w specjalnym pojemniku 6 (rys. 4a) z czynnikiem smarującym znajdują się trzy kulki 5. Kulki te są unieruchomione w specjalnym uchwycie 6. Czwarta kulka 3 umieszczona jest w uchwycie wrzeczona 2 i obracana silnikiem elektrycznym 1 z prędkością 1450 obr/min. Trzy kulki wraz z pojemnikiem są dociskane z siłą 40 kG przez układ dźwigniowy 7 do kulki, która jest napędzana.

W aparacie czterokulowym ocenie podlega, między innymi, średnica śladu współpracy powstającego na kulkach umieszczonych w uchwycie przez wirującą kulkę. Im średnica ta jest mniejsza tym własności smarne badanego czynnika są lepsze (rys. 5).

Na aparacie czterokulowym porównano paliwo wzorcowe (olej napędowy przejściowy), paliwo z badanego samochodu oraz paliwo wzorcowe z 3% dodatkiem benzyny. Pomierzone z dokładnością do 0.05 mm średnice śladów współpracy wskazują, że dodatek 3% benzyny nie wpłynął na zmianę własności smarnych paliwa wzorcowego (różnica wynosi 1% i mieści się w zakresie błędu pomiarowego). Własności smarne spornego paliwa są natomiast o 14% lepsze od paliwa wzorcowego. Tym samym można stwierdzić, że niezgodność z normą paliwa w badanym samochodzie nie mogła włączyć na zmianę własności paliwa przyczyniającą się do wystąpienia awarii pompy paliwowej wysokiego ciśnienia.



Rys. 3. Urządzenie HFP 360 do pomiaru temperatury zapłonu  
Fig. 3. The HFP 360 device for the measurement of the ignition temperature



Rys. 4. Schemat budowy(a)(opis w tekście) i widok (b) aparatu czterokulowego do badania własności smarnych olejów i paliw  
Fig. 4. The schema construction (a)(the description in the text) and the view (b) of four-ball device for research of the lubrication property of oils and fuels



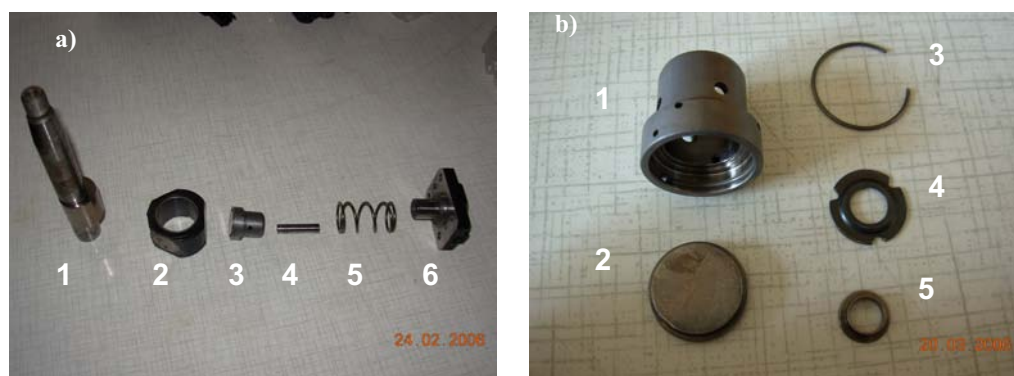
Rys. 5. Kulka z aparatu czterokulowego z widocznym śladem współpracy (zatarcia)  
 Fig. 5. The ball from four-ball device with the visible trace interaction (seizing)

### 3. Przyczyny uszkodzenia pompy

Ślady zniszczeń w badanej pompie są dość znaczne. Obejmują one urwane po trzy śruby mocujące pokrywy nad dwiema (z trzech) sekcjami tłoczącymi pompy wysokiego ciśnienia. Trzecia pokrywa nie została podniesiona, śruby są nienaruszone. Natomiast w tej sekcji tłoczącej doszło do zniszczenia elementów układu tłoczącego. Działanie pojedynczej sekcji tłoczącej (rys. 6a) polega na tym, że napęd tłoczka sekcji tłoczącej pobierany jest od mimośrodowej krzywki znajdującej się na wałku napędowym 1 pompy wysokiego ciśnienia. Przeniesienie napędu z mimośrodowca na tłoczek odbywa się za pośrednictwem trójkątnego popychacza 2 (z zaokrąglonymi wierzchołkami) ułożyskowanego na mimośrodku. O każdy z boków trójkąta oparty jest talerzyk połączony z prowadnicą 3 i z tłoczkiem 4. Tłoczek zamocowany jest wciskowo w gniazdo znajdujące się na górnej powierzchni talerzyka. Na zewnętrznej powierzchni prowadnicy wykonane jest podtoczenie do zamocowania sprężyny powrotnej 5. Tulejka prowadząca łożyskuje talerzyk względem cylinderka, w którym pracuje tłoczek. Tłoczek 4 jest wykonany w postaci wałka o stałej średnicy bardzo dokładnie dopasowanego do cylinderka 6. Talerzyk 2 (rys. 6b) jest połączony z tulejką prowadzącą 1 za pomocą sprężystego pierścienia 3. Cylinderk 1 (rys. 7) jest zamocowany do pokrywy sekcji tłoczącej 2 pompy. W pokrywie wykonane są dwa zaworki ssące 3 i tłoczny 4. Działanie tej sekcji tłoczącej polega na tym, że mimośrodowa krzywka przekazując ruch poprzez trójkątny popychacz i talerzyk napędza tłoczek wywołując ruch tłoczący w cylinderku. Tłoczek w tej fazie ruchu przesuwany jest w cylinderku w kierunku pokrywy, zmniejsza objętość przestrzeni nad tłoczkiem i wypycha paliwo przez zaworek tłoczny w kierunku przewodu wysokiego ciśnienia. Ruch powrotny tłoczka zapewnia sprężyna 5 (rys. 6a).

Ciśnienie wewnątrz sekcji tłoczącej przy maksymalnym ciśnieniu 135 MPa działając na powierzchnię tłoczka i cylinderka wytwarza siłę hydrauliczną równą 5.2 kN. Siła ta rozkłada się

na cztery śruby mocujące pokrywę do kadłuba pompy wysokiego ciśnienia. Ciśnienie w sekcji tłoczącej jest regulowane przez zawór redukcyjny odprowadzający nadmiar paliwa z powrotem do zbiornika. W przypadku uszkodzenia lub zatkania otworu wlotowego do tego zaworu może dojść do niekontrolowanego wzrostu ciśnienia i wzrostu siły wywieranej zarówno na elementy układu napędowego tłoczków, same tłoczki oraz śruby mocujące pokrywy. Przy przekroczeniu dopuszczalnych naprężeń na rozciąganie śruby mocujące pokrywę sekcji tłoczącej zostaną urwane. Ponieważ w pompie przekazanej do oceny takie procesy nastąpiły należy ocenić, że przyczyną był niekontrolowany wzrost ciśnienia w sekcjach tłoczących. Śruby mocujące pokrywę sekcji tłoczącej nie zostały zerwane jedynie w sekcji, w której elementy napędowe uległy zniszczeniu, a więc siła od krzywki mimośrodowej na pokrywę sekcji tłoczącej nie była przekazywana. Paliwo (ciekłe, a więc nieściśliwe) znajdujące się pomiędzy tłoczkiem i cylinderkiem nie mogąc odpłynąć i zmniejszyć ciśnienia zadziałało jak sztywny element przekazując siłę na śruby mocujące pokrywę.



Rys. 6. Elementy napędowe i tłoczące sekcji pompy wysokiego ciśnienia  
 Fig. 6. Driving components and pressing up of the pump section of high pressure

Na rys.6 oznaczają: a) 1 – mimośrodowy wałek napędowy, 2 – trójkątny popychacz, 3 – talerzyk tłoczka z prowadnicą, 4 – tłoczek, 5 – sprężyna powrotna, 6 – cylinderk z pokrywą, b) 1 – prowadnica, 2 – talerzyk, 3 – pierścień sprężysty, 4 – podkładka centrująca, 5 – pierścień mocujący tłoczek

Awaria pompy wysokiego ciśnienia została spowodowana uszkodzeniem lub wręcz brakiem pierścienia sprężystego łączącego popychacz z talerzykiem. Ponieważ wśród zniszczonych elementów pompy przedstawionych na rys. 8. nie ma pozostałości po tym pierścieniu prawdopodobnie doszło do błędów w montażu i pierścień ten nie został zamontowany. Ponieważ prowadnica (1 na rys. 6b) z talerzykiem 2 są połączone z niewielkim wciskiem przez pewien czas obydwa elementy mogły współpracować prawidłowo. Pierścień sprężysty służy do połączenia tych dwóch elementów. Talerzyk wsunięty jest w wytoczenie znajdujące się w dolnej części prowadnicy. Poniżej krawędzi talerzyka w prowadnicy znajduje się podtoczenie, w które wprowadzony jest pierścień sprężysty nie pozwalający na rozłączenie tych elementów.

W czasie pracy pompy prowadnica wraz z talerzykiem są dociskane do trójkątnego popychacza za pomocą sprężyny 5 (na rys. 6a). Talerzyk znajduje się pomiędzy dwoma elementami i może pracować bezawaryjnie przez długi czas. Ponieważ jednak w czasie pracy pompy mogą zdarzać się momenty, w których siła bezwładności powoduje odrywanie prowadnicy z talerzykiem od powierzchni popychacza nie zabezpieczony pierścieniem sprężystym talerzyk wysunął się z prowadnicy. Świadczą o tym ślady uderzenia znajdujące się zarówno na zaokrąglonej części wierzchołkowej trójkątnego popychacza (rys. 9) i wewnątrz kadłuba pompy wysokiego ciśnienia (rys. 10a i b).



Rys. 7. Cylinderek i pokrywa sekcji tłoczącej, 1 – cylinderek, 2 – pokrywa, 3 – zawór ssący, 4 – zawór tłoczny  
Fig. 7. Cylinder and cover of pressing section 1 - the cylinder, 2 - covers, 3 - the suction valve, 4 - the forcing valve



Rys. 8. Elementy prowadnicy zniszczone i ni zniszczone  
Fig. 8. Components of the guide worn out and not worn out

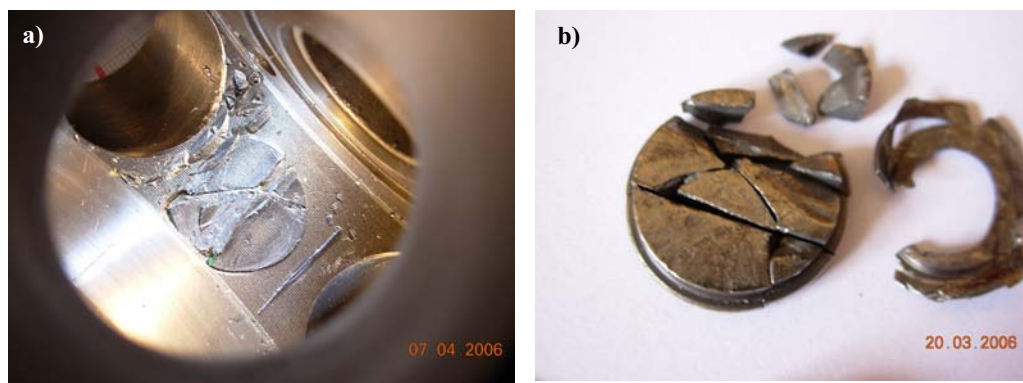




Rys. 9. Trójkątny popychacz ze śladami po uderzeniu o okrągły talerzyk  
Fig. 9. The triangular pusher with train after the shock for the round stick disk

Na rys. 9 oznaczono: 1 – ślady normalnej współpracy popychacza i talerzyka, 2 – ślady po uderzeniu, 3 – pęknięty popychacz.

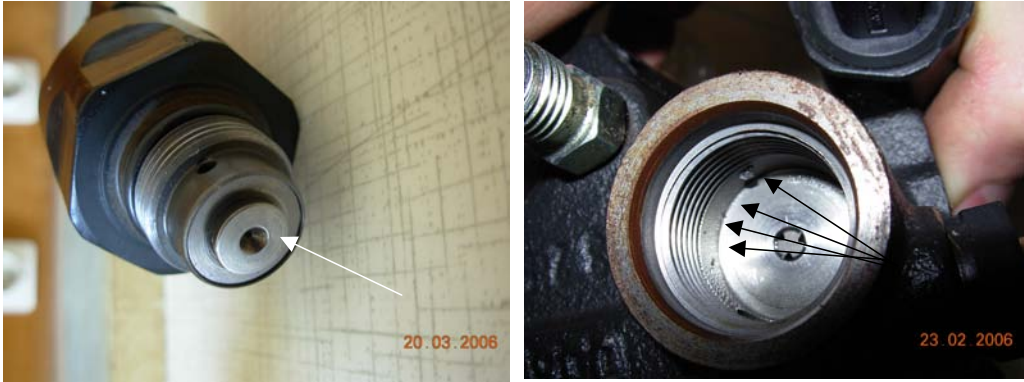
Siła uderzenia była tak duża, że talerzyk rozpadł się na wiele bardzo drobnych części (rys. 8, 10b) a popychacz uległ pęknięciu (szczegół 3 na rys. 9).



Rys. 10. Wnętrze kadłuba pompy wysokiego ciśnienia ze śladami po uderzeniu (a) oraz talerzyk sekcji, która uległa zniszczeniu (b)

Fig. 10. The interior of the body of a pump of the high pressure with train after the shock (a) and the stick disk of the section which spoiled (b)

Najdrobniejsze pozostałości po zniszczonym talerzyku przedostały się do przestrzeni zaworu redukującego ciśnienie i spowodowały zatkanie otworka, przez który odpływa paliwo (zawór ten utrzymuje stałe ciśnienie 135 MPa). Ponieważ otworek ten ma bardzo niewielką średnicę (rys. 12a) zanieczyszczenia szybko uniemożliwiły odpływ (redukcję ciśnienia) paliwa. Ciśnienie wzrosło do wartości przekraczającej wytrzymałość śrub mocujących pokrywy dwóch pozostałych sekcji tłoczących w wyniku czego zostały one zerwane. Pokrywy uchyliły się, kanały paliwowe uległy rozszczelnieniu i ciśnienie paliwa spadło. Pompa wysokiego ciśnienia utraciła możliwość przetłaczania paliwa i silnik musiał zostać zatrzymany.



Rys. 11. a) Zawór utrzymujący ciśnienie, wskazany jest otwór o średnicy ok. 0.5 mm (wewnątrz zagłębienia), przez który odpływa nadmiar paliwa, b) gniazdo zaworu redukcyjnego z obecnymi zanieczyszczeniami metalicznymi

Fig. 11. a) Valve keeping the pressure, indicated the hole of the diameter approx. 0.5 millimeters (inside caving) across which the excess-fuel flows away, b) the seat of reductive valve with appear metallic impurities

Należy dodać, że na zaworze po jego demontażu nie stwierdzono nagromadzenia żadnych zanieczyszczeń, ale nie było też śladów paliwa. Nie wiadomo czy zawór nie był wcześniej demontowany a drobne ślady zanieczyszczeń mogły zostać przypadkowo usunięte (średnica otworka wynosi ok. 0,5 mm więc nawet bardzo drobne zanieczyszczenia mogły spowodować jego zatkanie). Stwierdzono jedynie obecność drobnych zanieczyszczeń metalicznych w gnieździe zaworu redukcyjnego (rys. 11b). Sam zawór został sprawdzony na próbniku ciśnienia po wykonaniu specjalnej tulejki redukującej (rys. 12). Działanie zaworu było prawidłowe, otwierał się on przy ciśnieniu ok. 2MPa. W czasie pracy pompy zawór ten jest sterowany elektromagnesem i jest dociskany do otworka (blokuje odpływ) przy ciśnieniu mniejszym niż 135 MPa.



Rys. 12. Zawór redukcyjny z króćcem umożliwiającym sprawdzenie poprawności działania zaworu  
Fig. 12. The reducing valve with handle to making possible the validation of the valve acting



Rys. 13. Porównanie tłoczków uszkodzonej (z lewej) i nieuszkodzonej sekcji tłoczącej  
Fig. 13. The comparison of pistons of the damaged (from left) and free from damage pressing section

Pozostałe elementy zniszczonej sekcji tłoczącej uległy mniejszym uszkodzeniom. Tłoczek ma lekko ukruszone krawędzie w dolnej części (rys. 13) a prowadnica jest lekko zdeformowana i ma nieliczne pęknięcia powierzchni. Sprężyna pozostała nie uszkodzona.

Podsumowując analizę przyczyn wystąpienia uszkodzenia pompy należy zwrócić uwagę na fakty:

1. śruby mocujące pokrywy dwóch sekcji tłoczących zostały zerwane a mogło to nastąpić tylko w wyniku nadmiernego wzrostu ciśnienia wewnątrz sekcji tłoczących,
2. talerzyk oddzielił się od prowadnicy i po otrzymaniu uderzenia przez trójkątny popychacz rozpadł się na wiele bardzo drobnych części, których obecność stwierdzono także w gnieździe zaworu redukcyjnego,
3. śruby nie zostały zerwane w sekcji, w której brakowało elementów w układzie napędu tłoczka i w tej sekcji nie mogło dojść do nadmiernego wzrostu ciśnienia.

#### 4. Wnioski

1. Uszkodzenie pompy nie zostało spowodowane przez złą jakość paliwa, gdyż własność paliwa, która spowodowała niezgodność z normą PN EN 590 nie miała wpływu na pracę pompy wysokiego ciśnienia.
2. Własności smarne badanego paliwa były lepsze od własności paliwa wzorcowego jednak należy pamiętać, że pomiędzy pobraniem drugiej próbki i trzeciej minęły trzy lata, a samochód, z którego zdemontowano pompę nie był garażowany.
3. Własności smarne paliwa wzorcowego z 3% dodatkiem benzyny obniżającym temperaturę zapłonu do 39° były pogorszone o ok. 1% a więc w sposób nieistotny z punktu widzenia poprawności smarowania wewnętrznych elementów pompy wysokiego ciśnienia.
4. Awarię spowodował niewłaściwy montaż prowadnicy sekcji tłoczącej, w wyniku którego doszło do oddzielenia talerzyka od prowadnicy, uszkodzenie talerzyka, zatkanie zaworu redukcyjnego drobinami rozkruszonego talerzyka, niekontrolowany wzrost ciśnienia paliwa, urwanie śrub mocujących pokrywy pozostałych dwóch (sprawnych) sekcji, i w ostateczności rozszczelnienie układu paliwowego.

