

Piotr Ignaciuk\*, Leszek Gil\*, Mariusz Walczak\*

## IDENTYFIKACJA MECHANIZMU POWSTAWANIA USZKODZEŃ APARATURY WTRYSKOWEJ SILNIKÓW O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

**Streszczenie.** W pracy zaprezentowano rezultaty badań sekcji tłoczących pomp wtryskowych. Do badań zużycia i morfologii powierzchni sekcji tłoczących wykorzystano metodę mikroskopii skaningowej, analizę EDX i profilometr stykowy. Celem badań było określenie wpływu biopaliw i oleju napędowego na zużycie sekcji tłoczących. Przedstawiono wyniki badań zużycia sekcji tłoczących pompy wtryskowej firmy MOTORPAL wykorzystywanej w silniku 4CT90.

**Słowa kluczowe:** uszkodzenia powierzchni, zużycie, pompa wtryskowa, biopaliwo, sekcje tłoczące

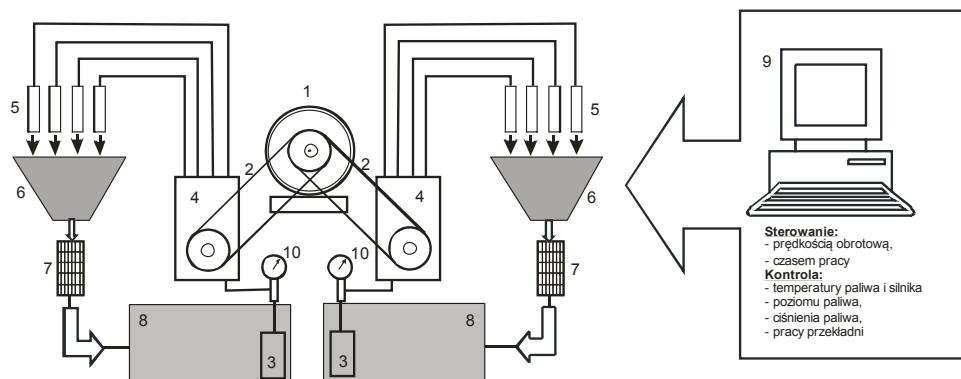
### Wstęp

Silniki z zapłonem samoczynnym dominują w układach napędowych samochodów użytkowych. Jedną z widocznych tendencji w rozwoju ich konstrukcji jest dążenie do wydłużania przebiegów międzyobsługowych. Tendencja ta wymaga by trwałość eksploatacyjna podstawowych podzespołów funkcjonalnych silnika była jak najwyższa. Jednym z niewrażliwych podzespołów silnika jest układ wtrysku paliwa. Rozpoznanie mechanizmu powstawania uszkodzeń jest zatem kluczowym zagadnieniem zarówno dla konstruktorów jak i użytkowników. Należy zaznaczyć, że bardzo dynamiczny rozwój układów wtryskowych, od klasycznych rzędowych pomp wtryskowych poprzez pompowtryskiwacze i najnowsze generacje Common Rail, nie zmienia podstawowych zasad pracy silnika. Mechanizm uzyskiwania wysokiego ciśnienia paliwa i jego rozpylania pozostaje taki sam mimo, iż same parametry wtrysku różnią się w sposób istotny. W artykule opisano mechanizm powstania uszkodzeń związanych ze zużyciem sekcji tłoczących rzędowych pomp wtryskowych. Nowoczesne układy wysokociśnieniowego wtrysku paliwa także posiadają elementy tłoczące i zaworki zwrotne. Mechanizm ich uszkodzenia w wyniku procesów zużycia będzie analogiczny jak w klasycznej pompie wtryskowej, ale wielkość dopuszczalnego zużycia i objawy uszkodzenia będą inne [1, 3, 5, 10].

### 1. Stanowisko i obiekt badań

Badania zużycia elementów tłoczących rzędowych pomp wtryskowych wykonano na specjalnie do tego celu zbudowanym stanowisku badawczym. Dwie równoległe pracujące

\* Wydział Transportu i Informatyki, Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie, p.ignaciuk@pollub.pl



**Rys. 1.** Schemat stanowiska badawczego: 1 – silnik, 2 – przekładnia, 3 – pompa paliwowa, 4 – pompa wtryskowa, 5 – wtryskiwacze, 6 – zbiornik ociekowy, 7 – chłodnica paliwa, 8 – zbiornik paliwa, 9 – układ kontrolno – sterujący, 10 – układ kontroli ciśnienia paliwa

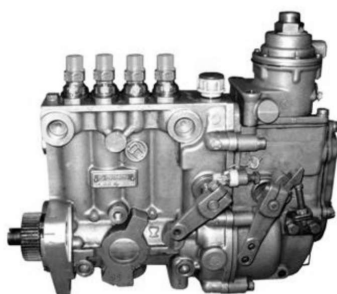
niezależnie pompy rządowe MOTORPAL znajdujące się na stanowisku badawczym zasilane były dwoma różnymi rodzajami. Tłoczone przez nie paliwo było wtryskiwane wtryskiwaczami czopikowymi do zbiorników ociekowych, z których kierowano je do zbiorników zasilających. Badane pompy napędzane jednym silnikiem zapewniało to im jednakowe warunki i jednakową liczbę cykli pracy. Schemat stanowiska przedstawiono na rys. 1.

Układ kontrolno-pomiarowy weryfikował wartości ciśnień w obwodzie niskiego ciśnienia zabezpieczając tym samym sekcje przed pracą bez dostatecznej ilości paliwa będącego jednocześnie czynnikiem smarującym. Dodatkowo zamontowano manometry do pomiaru ciśnienia na króćcach dolotowych pomp wtryskowych. Umożliwiło to na kontrolę poprawności działania układu zasilającego pompy wtryskowe. Stanowisko wyposażone było w układ stabilizacji temperatury paliwa znajdującego się w obiegu chroniąc go przed przegrzaniem i podnosząc jednocześnie bezpieczeństwo przeciwpożarowe. Parametry takie jak prędkość obrotowa i czas pracy poddanych badaniom pomp wtryskowych były na bieżąco monitorowane i zapisywane w układzie rejestrującym. Układ umożliwiał też zadawanie dowolnych sekwencji cykli pracy badanych pomp. Po wykonaniu określonej liczby obrotów (cykli pracy) przeprowadzono pomiary kontrolne zużycia elementów pomp. W badaniach wykorzystano dwa rodzaje paliwa: olej napędowy i estry metylowe oleju lnianki siewnej.

Obiektem badań była czterosekcyjna rządowa pompa wtryskowa MOTORPAL mająca zastosowanie w silniku 4TC90, której elementem wykonawczym są sekcje tłoczące (pary precyzyjne tłoczek i cylinderek). Materiałem badanych par precyzyjnych była stal łożyskowa LH15 o twardości 61-64 HRC. Badana pompa charakteryzowała się stałym skokiem tłoka (rys. 2).

## 2. Ocena zużycia sekcji tłoczących

Podczas pracy silnika spalinowego, elementy układu paliwowego podlegają kompleksowemu działaniu obciążeń mechanicznych, chemicznych i cieplnych, powodujących zmiany funkcjonalne poszczególnych elementów składowych tego układu. W przypadku pomp wtry-



Rys. 2. Pompa wtryskowa firmy MOTOPAL stosowana w silniku 4CT90

skowych szczególnie intensywnie zużywają się powierzchnie robocze cylinderka i tłoczka sekcji tłoczącej oraz powierzchnie stożka odcinającego zaworka tłoczącego pompy [1, 5]. Ścierne działanie zanieczyszczeń znajdujących się w paliwie i aktywnych związków chemicznych intensyfikują proces zużycia [9].

Ocena zużycia pary precyzyjnej tłoczek – cylinderek jest przedsięwzięciem trudnym, wymagającym dobrej znajomości budowy i działania aparatury paliwowej oraz dużego doświadczenia technologicznego w zakresie obróbki precyzyjnych części. Problemem badawczym jest wykonanie zbyt częstych pomiarów zwłaszcza tych, które wymagają demontażu, gdyż zakłócają współpracę dopasowanych par precyzyjnych i ograniczają możliwości dokładnej prognozy sekcji tłoczących. Pary precyzyjne wyróżniają się spośród innych podzespołów aparatury paliwowej bardzo dokładnym wykonaniem i małymi luzami między współpracującymi częściami. Ma to na celu zachowanie dostatecznej szczelności podzespołu przy wysokich ciśnieniach paliwa, jakie występują podczas pracy układu wtryskowego silnika [7].

W badaniach zużycia aparatury wtryskowej silnika przyjmowano, że największe zużycie sekcji tłoczących występuje w czasie pierwszych godzin pracy pompy wtryskowej [2, 6, 8].

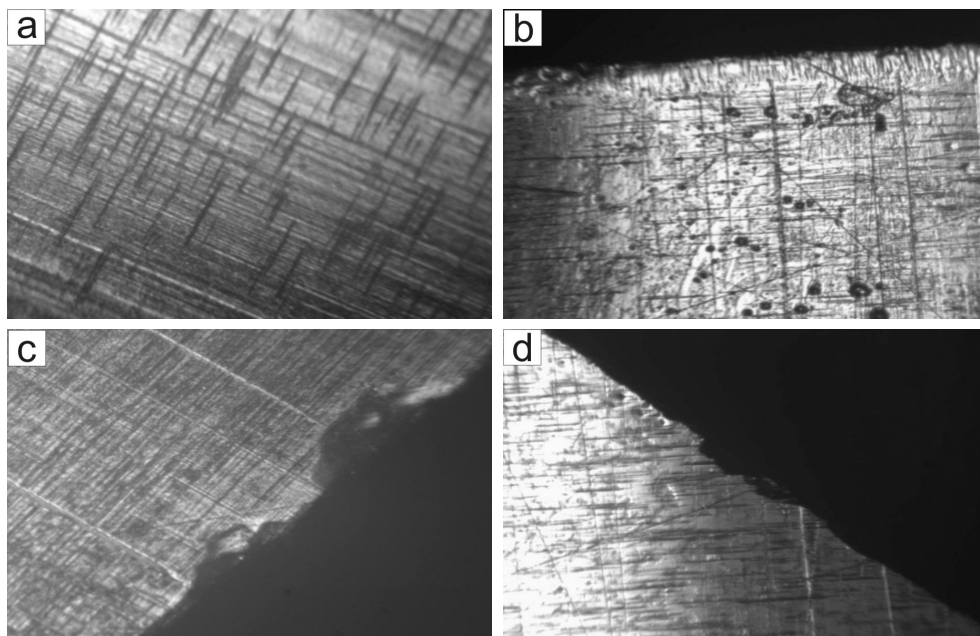
W odniesieniu do badanych sekcji wykonano następujące pomiary:

- pomiar średnicy zewnętrznej elementu tłoczącego na części prowadzącej przeprowadzonej metodą optyczną z dokładnością do 0,0002 mm,
- pomiary chropowatości elementu tłoczącego na części prowadzącej,
- pomiary błędów okrągłości na części prowadzącej i nad krawędzią sterującą elementu tłoczącego,
- charakterystyki szczelności,
- analizę zmian zużycia na powierzchni elementu tłoczącego.

Wynikiem badań zużycia elementów tłoczących sekcji pomp wtryskowych było stwierdzenie ujemnych przyrostów zużycia tłoczka sekcji oraz towarzyszącego mu spadku szczelności pary precyzyjnej tłoczek – cylinderek, a obszerniejsze wyniki przedstawiono w pozycji [4]. W celu weryfikacji miejsc powstawania uszkodzeń związanych z zużyciem badanych sekcji, przeprowadzono dodatkowe badania mikroskopowe powierzchni tłoczka. Ich głównym celem była identyfikacja miejsc powstawania uszkodzeń oraz mechanizmu ich powstawania.

### 3. Mikroskopowa analiza stanu powierzchni tłoczka

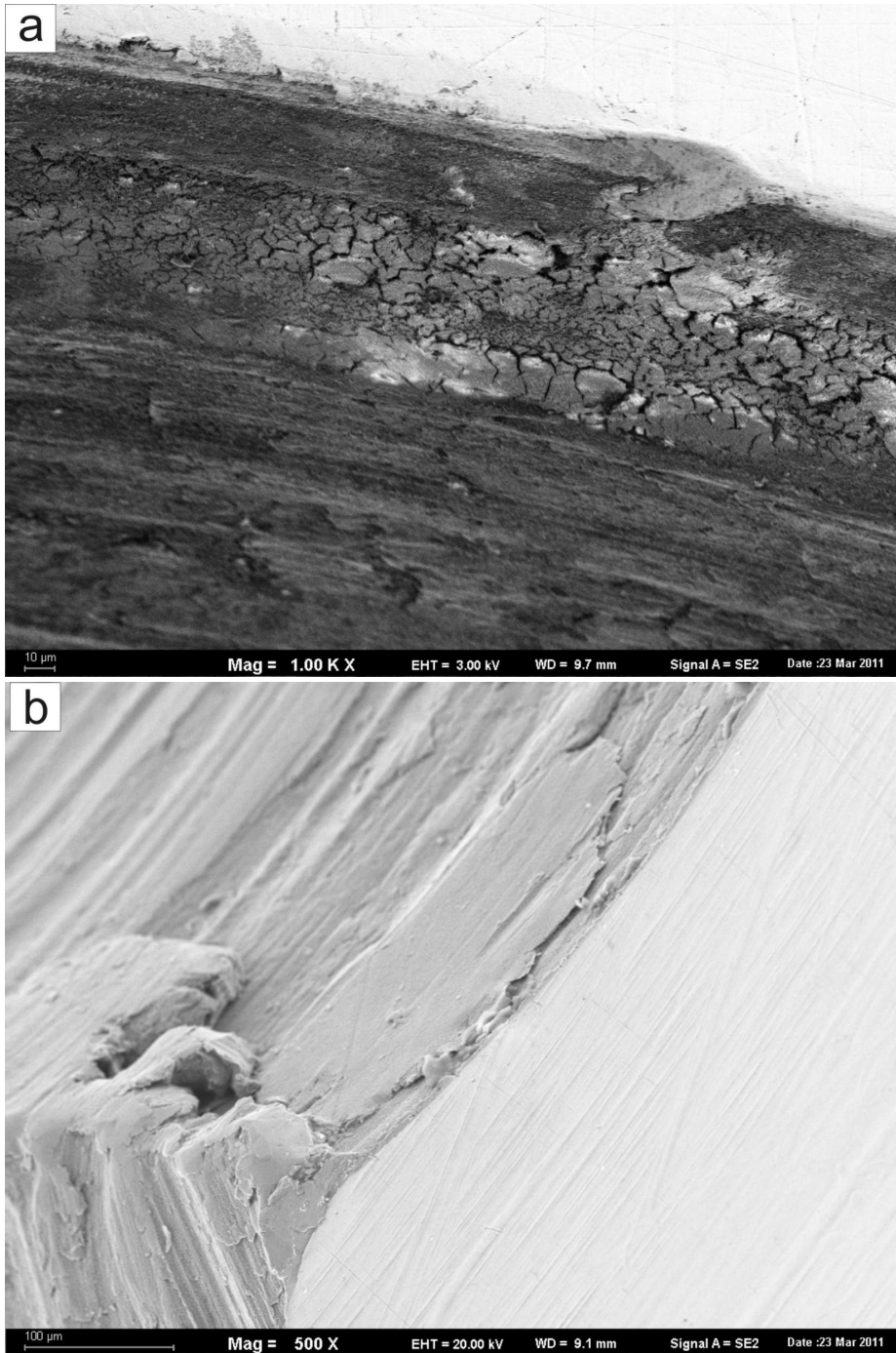
Przeprowadzone na mikroskopie metalograficznym obserwacje nowej i eksploатовanej powierzchni tłoczka sekcji przedstawiono na rys. 3. Stwierdzono, że procesy zużycia zachodzą głównie w części położonej nad rowkiem sterującym dawką paliwa. Na rys. 3a pokazano nowy nieuszkodzony fragment powierzchni tłoczka, gdzie wyraźnie dominują ślady po szlifowaniu elementu. Ponadto analiza mikroskopowa wykazała, że dominujące mechanizmy zużycia to odkształcenia plastyczne, bruzdowanie oraz mikroskrawanie powierzchni wywoływane twardymi zanieczyszczeniami zawartymi w paliwie (rys. 3b-c).



Rys. 3. Makrostruktura powierzchni tłoczka sekcji wtryskowej: (a) nowy element, (b,c,d) elementy po eksploatacji (powiększenie 125x)

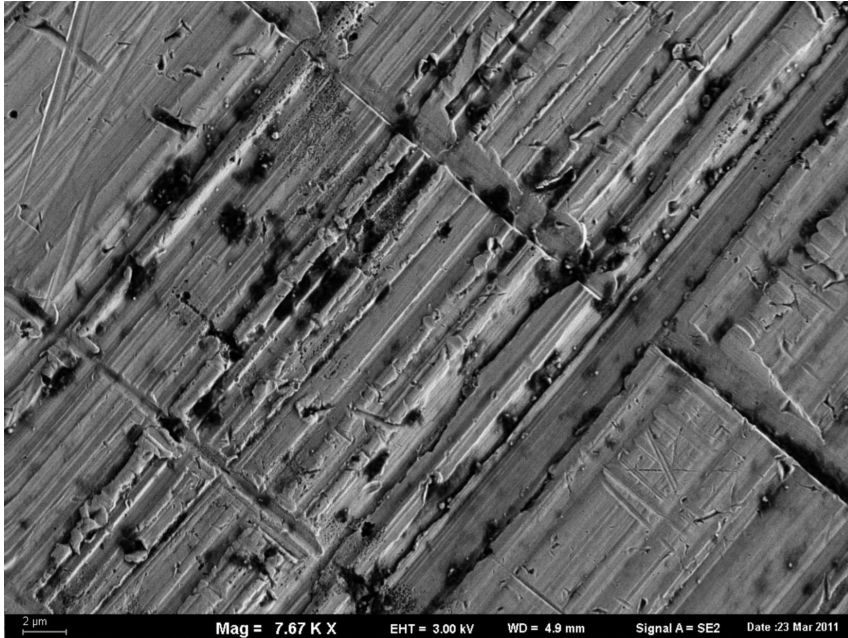
Dodatkowo do analizy mikrostrukturalnej powierzchni eksploатовanych tłoczków sekcji wykorzystano mikroskop skaningowy firmy Zeiss z analizatorem EDX firmy Bruker (rys. 4 a i b). Widoczne są wyraźnie osady powstałe na niewspółpracującej z cylinderkiem powierzchni tłoczka. Osady mogą być potencjalnym źródłem zanieczyszczeń intensyfikujących zużycie sekcji. W przypadku elementów sekcji pracujących w środowisku biopaliwa osady mają postać laków i tlenków.

Widoczne na rys. 5 szerokie bruzdy wpływają na stan chropowatości powierzchni tłoczków sekcji wtryskowych.. Występowanie głębokich bruzd potwierdzają skany 3-D pomiarów chropowatości (rys. 6) wykonane profilometrem stykowym Dektak 150 (firmy Veeco). Ilość kierunek i wielkość bruzd może posiadać decydujący wpływ na pojawianie się „przecieków” paliwa i utratę szczelności sekcji.

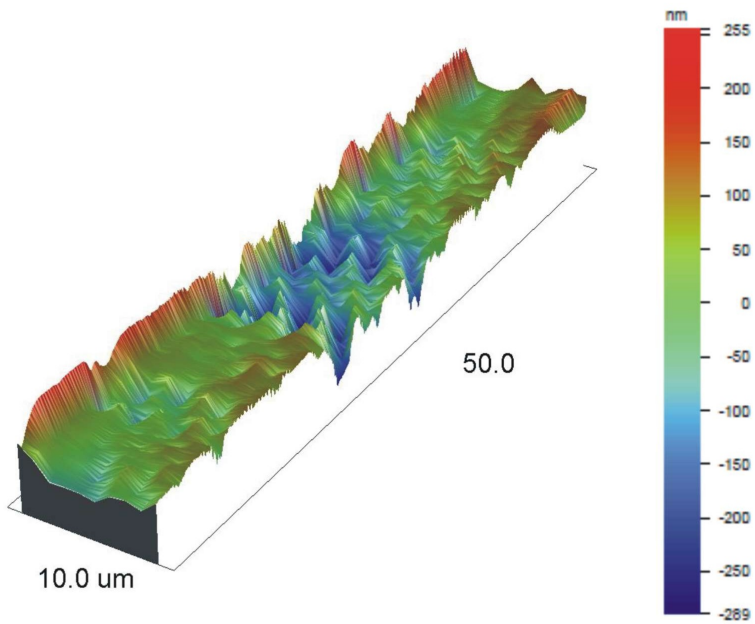


Rys. 4. Osady utworzone na krawędzi sterującej elementu tłoczącego zasilanego olejem napędowym (a) i estrami metylowymi oleju lnianki (b) – obrazy SEM





Rys. 5. Zużyta powierzchnia tłoczka sekcji tłoczącej pompy wtryskowej po testach zużycia w oleju napędowym



Rys. 6. Powierzchnia 3D profilu chropowatości tłoczka pompy wtryskowej – ”bruzdy” na powierzchni tłoczka

#### 4. Wnioski

Analizując wyniki badań geometrycznych i metalograficznych wnioskować można, że główną przyczyną uszkodzeń sekcji tłoczących są uszkodzenia spowodowane mikroskrąwaniem i bębnowaniem powierzchni pary precyzyjnej. Polegają one na zużywaniu powierzchni pojedynczymi ziarnami zanieczyszczeń zakleszczonymi w luzach promieniowych par tłoczek-cylinderek. W miarę upływu czasu eksploatacji zwiększa się możliwość wnikania ziaren zanieczyszczeń w szczelinę pomiędzy elementami sekcji. Wynika to ze wzrostu luzu tłoczek – cylinderek.

Charakterystyka zmian zużycia na powierzchni elementu tłoczącego sekcji pompy wtryskowej zasilanej olejem napędowym, jak i estrami metylowymi oleju lnianki jest bardzo podobna. Dodatkowo w przypadku elementów pracujących w środowisku estrów metylowych lnianki na powierzchni krawędzi sterującej tłoczków pojawiają osady w postaci laków i tlenków. Pojawiające się laki z paliwa mogą ułatwiać transport zanieczyszczeń w obrębie luzu tłoczek cylinderek. Lak działa wtedy jak substancja, do której przykleja się zanieczyszczenie.

#### Literatura

1. Cieślowski B.: Kształtowanie cech fizycznych i chemicznych biopaliw RME w aspekcie doboru odmian rzepaku i eksploatacji pojazdów rolniczych. *Acta Agrophysica*, 2010, 15, s. 33-43.
2. Czechłowski M., Krzysztofiak A., Adamski M., Antczak W.: Wpływ stosowania oleju rzepakowego jako paliwa na trwałość aparatury wtryskowej silników ZS. *Inżynieria Rolnicza*, 2006, 12, s. 85-92.
3. Gardyński L.: Założenia stanowiska do badań odporności materiałów elementów aparatury paliwowej na zużycie w warunkach smarowania. *Journal of KONES Internal Combustion Engines*, 2004, 11, s. 165-170.
4. Gil L.: Badania zużycia tribologicznego elementów układu wtryskowego silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego olejami roślinnymi. *Rozprawa doktorska Politechnika Lubelska, Lublin 2011.*
5. Gil L., Ignaciuk P., Niewczas A.: Metoda badania przebiegu zużycia sekcji tłoczących pomp wtryskowych silników ZS. *Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, 2010.
6. Falkowski H., Janiszewski T., Łojek A.: Aparatura paliwowa silników wysokoprężnych, część I, Budowa i sprawdzanie. WKiŁ, Warszawa 1984.
7. Falkowski H., Janiszewski T., Łojek A., Michalski A.: Aparatura paliwowa silników wysokoprężnych, część II, naprawa, WKiŁ, Warszawa 1985.
8. Falkowski H., Krępeć T.: Obsługa i naprawa aparatury paliwowej silników wysokoprężnych. WKiŁ, Warszawa 1979.
9. Paluch R.: Wpływ ekologicznego oleju napędowego na niektóre parametry pracy silnika o zapłonie samoczynnym oraz zużycie elementów aparatury paliwowej. *Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 2001.*

10. Torres-Jimenez E., Dorado M.P, Kegl B.: Experimental investigation on injection characteristics of bioethanol-diesel fuel and bioethanol-biodiesel blends. Fuel, 2011, 90, pp.1968-1979.

### **IDENTIFICATION OF THE MECHANISM OF FAILURES FORMATION OF INJECTION SYSTEM COMPRESSION-IGNITION ENGINE**

**Summary.** The results of a study of the pumping sections of injection pumps are presented. The wear and surface morphology of pumping sections were studied by using scanning electron microscopy with electron diffraction spectroscopy and profile measurement gauge. The aim of the study was to evaluate the influence of biofuel and diesel fuel on wear of pumping sections. Verification was done using injection pump MOTORPAL used in a 4CT90 Diesel engine.

**Key words:** surface failure, wear, injection pump, biofuel, pumping section, surface morphology