

Piotr Ignaciuk<sup>1)</sup>, Leszek Gil<sup>1)</sup>, Mariusz Walczak<sup>1)</sup>

## ZASTOSOWANIE POMIARÓW CHROPOWATOŚCI W OCENIE ZUŻYCIA SEKCJI TŁOCZĄCYCH POMP WTRYSKOWYCH ZASILANYCH BIOPALIWAMI

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono ocenę zużycia tribologicznego sekcji tłoczących pomp wtryskowych. Określono zbiór parametrów chropowatości które mogą być wskaźnikami zużycia sekcji. Badania zużycia były oceniane z profili chropowatości tłoczków pomp sekcji tłoczących przy pomocy profilometru stykowego Dektak 150 (Veeco). Przedstawiono wyniki badań zużycia sekcji tłoczących pompy wtryskowej firmy MOTORPAL wykorzystywanej w silniku 4CT90.

**Słowa kluczowe:** biopaliwo, pomiar chropowatości, zużycie, pompa wtryskowa.

### WPROWADZENIE

Ciągły proces rozwoju techniki prowadzi do systematycznego zwiększania obciążeń maszyn i urządzeń, przy czym powoduje to wzrost wymagań stawianych materiałom konstrukcyjnym i paliwom stosowanym do ich zasilania [1, 8, 9, 11]. Tematykę artykułu przyjęto z uwagi na fakt, coraz szerszego stosowania paliw alternatywnych. Paliwa te, np. estry metylowe oleju lnianki, w przypadku silników wysoko prężnych mogą być stosowane jako czyste biopaliwo lub jako dodatek do paliw konwencjonalnych [4, 10]. Biopaliwa mogą wpływać na obciążenia mechaniczne i cieplne silnika oraz jego trwałość [2, 4, 6]. Największych zmian w trwałości węzłów tarcia, smarowanych nowymi rodzajami paliw, należy spodziewać się w obrębie aparatury paliwowej, a w zwłaszcza w jej części pracującej w podwyższonych temperaturach, tj. wtryskiwaczy. Określenie wpływu zastosowanego paliwa na ew. obniżenie trwałości konkretnych węzłów trących w silniku umożliwi dokonanie odpowiednich zmian konstrukcyjnych lub materiałowych, bądź przeprowadzenie odpowiednich modyfikacji właściwości paliwa w celu zapobieżenia temu zjawisku [4].

Obecnie główne trendy rozwojowe silników spalinowych o zapłonie samoczynnym wyznaczają ciągle zaostrzane wymagania w zakresie ochrony środowiska. W przypadku obecnie wprowadzonej normy Euro 6 konieczne jest jednoczesne stosowanie systemów zasilania sprzyjających zmniejszonemu tworzeniu związków toksycznych podczas spalania oraz układów oczyszczania spalin na drodze reduk-

---

<sup>1)</sup> Wydział Transportu i Informatyki, Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie, e-mail: p.ignaciuk@pollub.pl

cji katalitycznej i filtrowania cząstek stałych. Stosowane w silnikach spełniających Euro 6 sposoby redukcji emisji związków toksycznych wymagają używania odpowiednich olejów silnikowych (klasy Low SAPS) oraz paliw o znacznie obniżonej zawartości siarki. Dalszy rozwój ograniczeń emisji związków toksycznych oraz dwutlenku węgla będzie już wymagał nie tylko działań konstrukcyjnych ale i kompozycji nowych paliw. Wprowadzanie nowego paliwa wiąże się z szeregiem kompleksowych działań obejmujących między innymi badania nad wpływem paliwa na zmiany stanu technicznego silnika i ewentualne dostosowanie jego konstrukcji. Przykładem był proces wprowadzania benzyn bezołowiowych. Nowe paliwa z uwagi na ograniczenia emisji dwutlenku węgla zawierającego węgiel kopalny będą posiadały w swoim składzie biokomponenty. Poniżej przedstawiono problemy związane z porównawczą oceną wielkości zużycia precyzyjnych par aparatury wtryskowej silników wysokoprężnych zasilanych klasycznym olejem napędowym i biopaliwem opartym na estrach oleju lnianki siewnej.

Elementy aparatury wtryskowej klasycznej i współczesnej (pompowtryskiwacze i układy Common Rail) zawierają szereg elementów o wysokiej dokładności wykonania pasowanych w sposób indywidualny. Luzy w niektórych parach kinematycznych są rzędu jednego mikrometra i mniejsze. Zatem nawet niewielkie uszkodzenia związane z zużyciem mogą być przyczyną utraty ich zdolności. W badaniach aparatury wtryskowej często stosowano wagowe miary zużycia. Wadą tych pomiarów było obarczenie wyników błędem wynikającym z powstawania osadów paliwowych na badanych elementach. W kilku przypadkach osady takie powodowały uzyskiwanie „ujemnych” przyrostów zużycia [3, 5, 7]. Problem dokładności pomiarów pojawia się już w trakcie przygotowywania elementu- zbyt dokładne oczyszczenie z osadów generuje bowiem dodatkowe zużycie. Trudności związane z pomiarami zużycia są przyczyną niechętnego podejmowania prac badawczych z tego zakresu. Jednak wprowadzanie nowych kompozycji paliw będzie wymagało prac badawczych obejmujących również problematykę zużycia elementów aparatury wtryskowej.

## METODYKA BADAŃ

Obiektem badań były sekcje tłoczące pompy wtryskowej MOTORPAL wykorzystywanej w silniku 4CT90 samochodu dostawczego LUBLIN III. Badania zużycia przeprowadzono na stanowisku badawczym, w którym dwie równoległe pracujące pompy wtryskowe z wtryskiwaczami zasilane były różnymi paliwami. Jena klasycznym olejem napędowym bez biododatków (ON Verva), druga biopaliwem – estrami metylowymi oleju lnianki siewnej. Obie pompy wykonały jednakowa liczbę obrotów (60 mln cykli pracy). W trakcie badań jednym z pomiarów do kontroli przebiegu procesu zużycia były pomiary wybranych parametrów chropowatości ele-

mentów tłoczących badanych sekcji (rys. 1). Pomiary parametrów chropowatości wykonano na profilometrze stykowym Dektak 150 firmy Veeco przy zastosowaniu igły pomiarowej o promieniu zaokrąglenia 2  $\mu\text{m}$ .



Rys. 1. Sekcja tłocząca pompy wtryskowej MOTORPAL

Mechanika przebiegu zużycia ciernego wskazuje, że w pierwszym etapie powinno nastąpić wygładzenie najwyższych nierówności współpracujących powierzchni. Zużycie najwyższych nierówności profilu prowadzi do ustalenia się odpowiedniej dla danych warunków współpracy (nacisków i rodzaju smarowania) udziału części nośnej powierzchni. Udział części nośnej powierzchni w miarę postępowania zużycia powinien stopniowo wzrastać. Opisane zmiany powinny posiadać swoje odzwierciedlenie w wartościach wybranych parametrów chropowatości powierzchni badanego elementu.

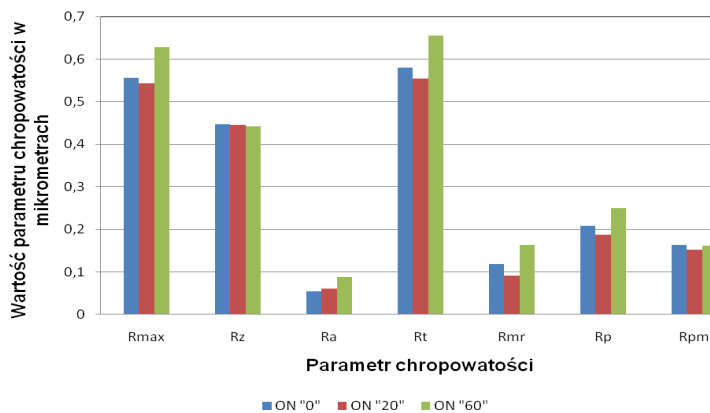
Kierując się wyżej opisanymi przesłankami do kontroli procesów zużycia elementów tłoczących wybrano następujące parametry chropowatości:

- $R_{\max}$  – największą wysokość chropowatości,
- $R_z$  – średnią wysokość chropowatości wzdłuż odcinka pomiarowego,
- $R_a$  – średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości od linii średniej,
- $R_t$  – całkowita wysokość profilu,
- $R_{mr}$  (10%) – krzywa udziału nośnego profilu,
- $R_p$  – wysokość największego wzniesienia profilu,
- $R_{pm}$  – średnia wysokość wzniesień profilu na odcinku pomiarowym.

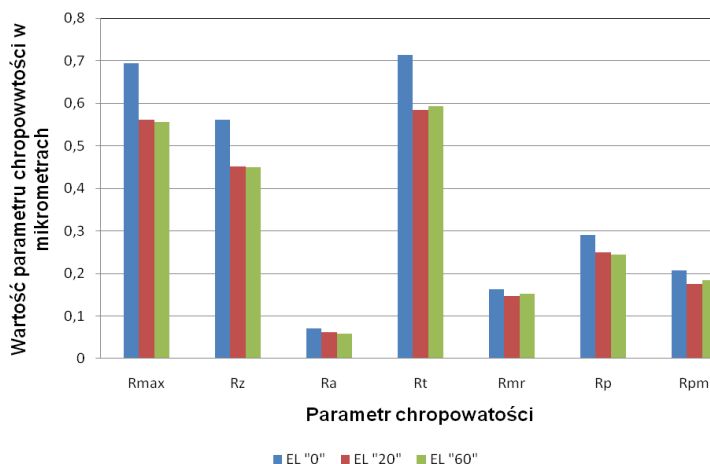
Wymienione parametry z wyjątkiem udziału nośnego profilu powinny wykazywać spadek mierzonych wartości. Jest to związane z systematycznym ciernym usuwaniem materiału z najwyższych wzniesień powierzchni profilu podczas pracy elementu.

## REZULTATY BADAŃ

Pomiary wymienionych parametrów przeprowadzono dla sekcji nowych oraz po przepracowaniu 20 i 60 mln cykli pracy. Wyniki pomiarów uśrednione dla sekcji zasilanych olejem napędowym (ON) i biopaliwem (EL) przedstawiono na rysunkach 2 i 3.



Rys. 2. Zaobserwowane średnie wartości zmian wybranych parametrów chropowatości sekcji tłoczących zasilanych olejem napędowym



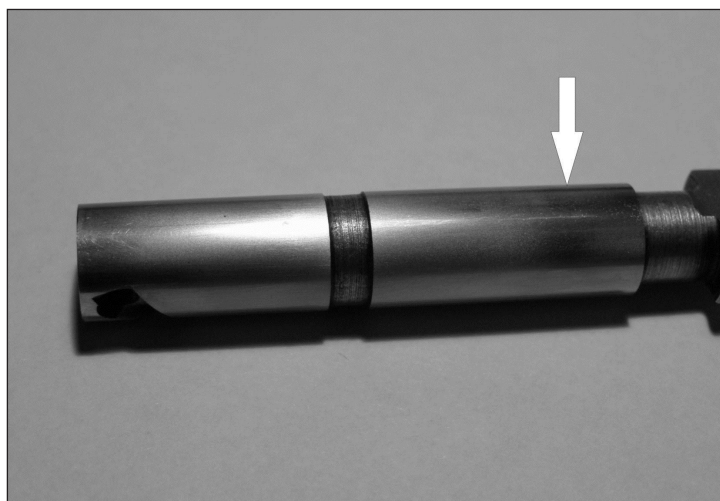
Rys. 3. Zaobserwowane średnie wartości zmian wybranych parametrów chropowatości sekcji tłoczących zasilanych biopaliwem – estrami metylowymi oleju lnianki

Z analizy zaprezentowanych danych wynika, że przewidywane tendencje zmian parametrów chropowatości okazały się prawdziwe tylko w odniesieniu do pierwszego okresu pracy badanych sekcji i w odniesieniu do parametrów związanych z wysokością nierówności. W trakcie dalszej części eksperymentu badawczego ten-

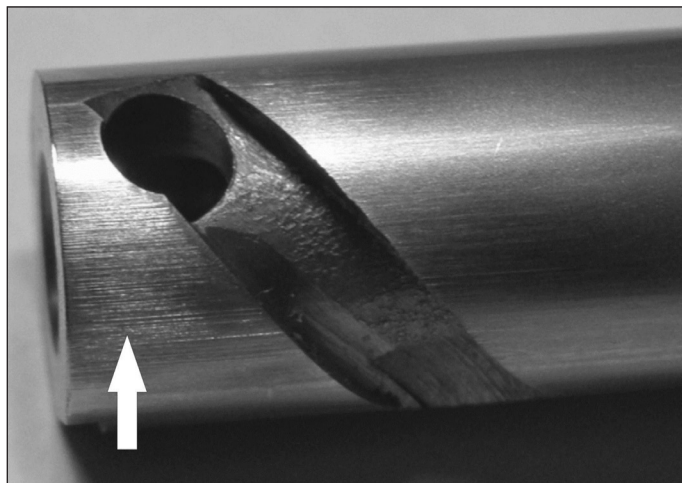
dencje te uległy odwróceniu, co jest szczególnie widoczne przypadku sekcji pracujących na oleju napędowym. Zaprezentowane pomiary wykonano na tworzącej części prowadzącej elementu tłoczącego (rys. 4). Wyboru miejsca pomiarów dokonano na podstawie analizy zużycia uszkodzonych sekcji tłoczących pomp wytryskowych MOTORPAL silnika 4CT90. Z analizy obrazu zużycia uszkodzonych sekcji wynika jeszcze jeden wniosek, że bezpośrednią przyczyną niezdatności sekcji są uszkodzenia powierzchni tłoczka położonej bezpośrednio nad krawędzią sterującą dawkowaniem paliwa (rys. 5). Jak zauważono uszkodzenia sekcji w tym obszarze to drobne rysy i bruzdy powodowane przez zanieczyszczenia zawarte w paliwie lub wygenerowane podczas pracy sekcji produkty zużycia.

Ponieważ prognozowane trendy zmian badanych parametrów wynikające bezpośrednio z procesów zużycia ciernego elementów nie pokrywają się z obserwacjami, to musi istnieć istotny punkt mechaniki uszkodzania sekcji tzw. czynnik zakłócający ten przebieg. Tym czynnikiem może być w przypadku pracującej sekcji paliwo. Paliwo w silnikach ZS jest nie tylko medium zasilającym silnik, ale i środkiem smarnym. W trakcie pracy sekcji obserwowano tzw. „sklejanie” elementów sekcji przez paliwo. Takie zjawisko było obserwowane w stopniu porównywalnym zarówno dla oleju napędowego jak i biopaliwa. Powstałe na powierzchniach elementów tłoczących laki (nieusuwalne w trakcie mycia z użyciem rozpuszczalników organicznych) mogły wpływać na uzyskiwane wyniki pomiarów.

Z uwagi na fakt, że pomiary chropowatości na powierzchni prowadzącej nie okazały się miarodajne zdecydowano się na dodatkowe pomiary chropowatości powierzchni nad krawędzią sterującą dawkowaniem paliwa (rys. 5). Wyniki pomiarów odniesiono do wyników dla nowych elementów.

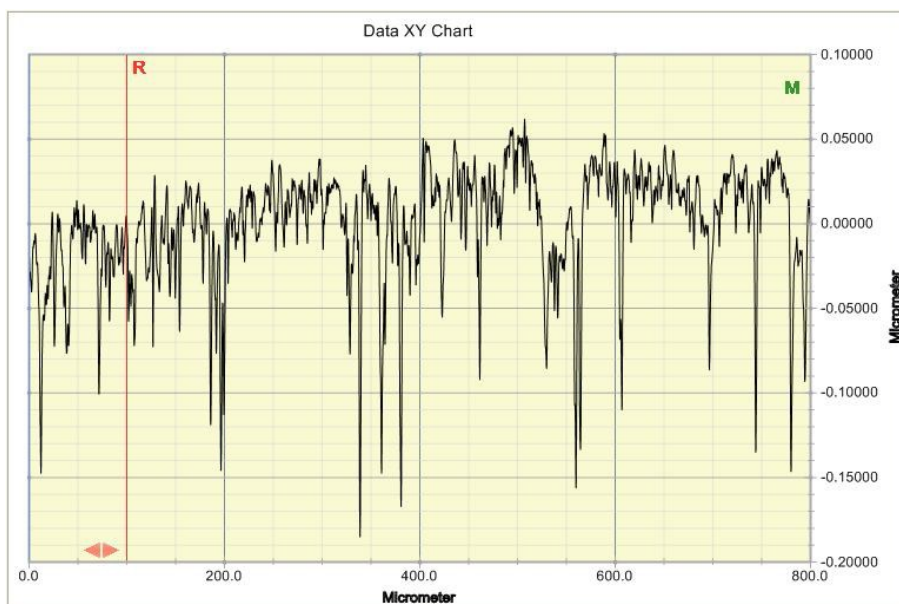


**Rys. 4.** Część prowadząca elementu tłoczącego i miejsce przeprowadzenia pomiarów wybranych parametrów chropowatości elementów tłoczących badanych sekcji

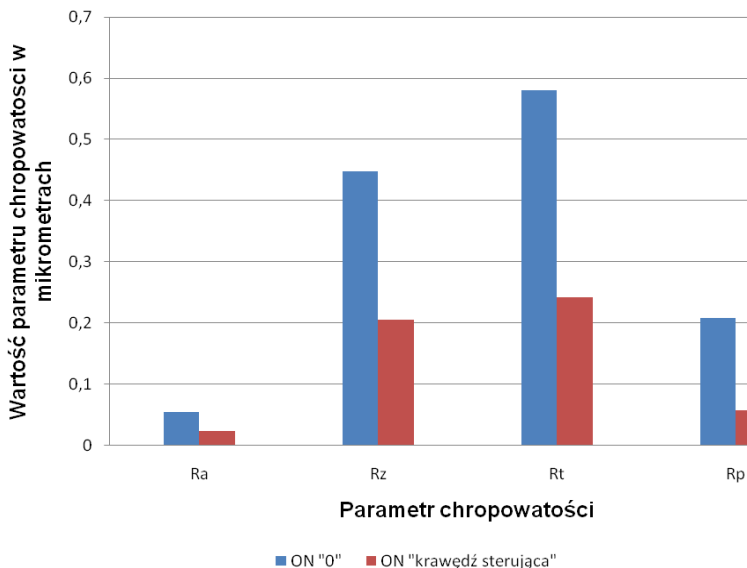


Rys. 5. Powierzchnia nad krawędzią sterującą – miejsce powstawania uszkodzeń elementu tłoczącego sekcji (sekcja uszkodzona)

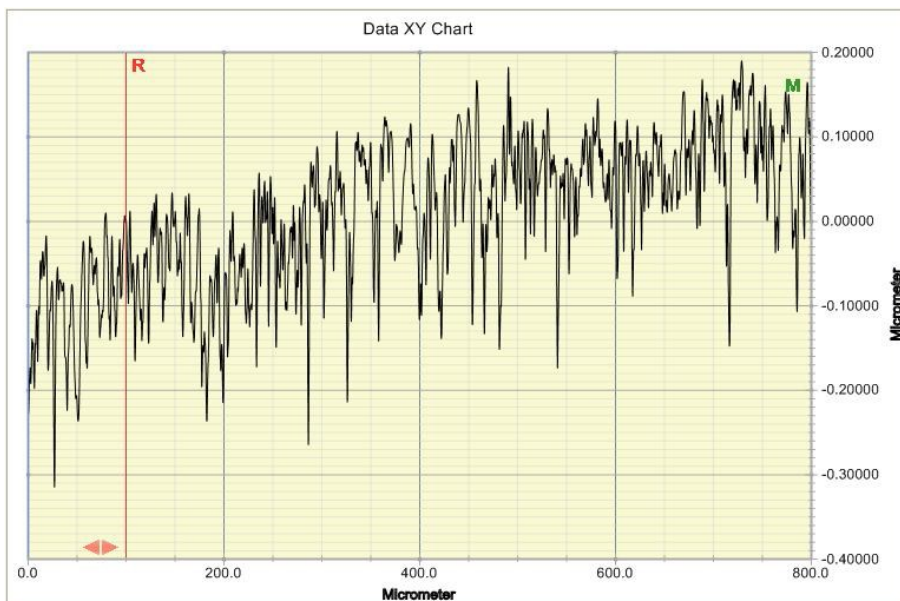
Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono wykres profilu i wyniki pomiarów chropowatości powierzchni elementu tłoczącego zasilanego olejem napędowym zmierzone na powierzchni nad krawędzią sterującą dawkowaniem paliwa. Analogiczne wyniki dla sekcji zasilanej biopaliwem – estrami metylowymi oleju lnianki przedstawiają rysunki 8 i 9.



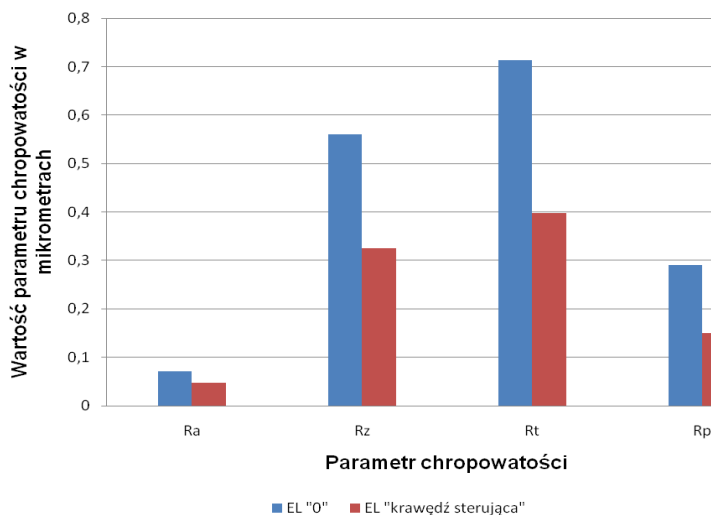
Rys. 6. Wykres profilu chropowatości powierzchni nad krawędzią sterującą elementu tłoczącego zasilanego olejem napędowym



Rys. 7. Parametry chropowości powierzchni nad krawędzią sterującą sekcji nowych (oznaczenie „0”) i sekcji po przearcowaniu 60 mln cykli na oleju napędowym (oznaczenie „krawędź sterująca”)



Rys. 8. Wykres profilu chropowości powierzchni nad krawędzią sterującą elementu tłoczącego zasilanego estrami metylowymi oleju lnianki



**Rys. 9.** Parametry chropowatości powierzchni nad krawędzią sterującą sekcji nowych (oznaczenie „0”) i sekcji po przepracowaniu 60 mln cykli na estrach lnianki (oznaczenie „krawędź sterująca”)

Uzyskane wyniki pomiarów chropowatości elementów tłoczących wykonane na powierzchni nad krawędzią sterującą dawkowaniem paliwa (patrz rys. 7, 9) wykazują, że nastąpił wyraźny spadek wartości parametrów chropowatości. Spadek ten świadczy o wygładzaniu powierzchni, co może być wynikiem nałożenia się procesów zużycia i „szpachlowania” nierówności za pomocą laków powstających w procesie polimeryzacji paliwa. Dowodem na zachodzenie procesów zużycia są otrzymane profile powierzchni (rys. 6, 8), na których wyraźnie widać asymetrię wykresów (szczególnie na rysunku 6). Asymetria ta powstała na skutek zużyciowego usunięcia najwyższych wierzchołków nierówności. Obserwowany spadek dotyczy sekcji pracujących na oleju napędowym oraz estrach oleju lnianki. Spadek ten jest relatywnie nieco większy dla sekcji zasilanych olejem napędowym.

## WNIOSKI

Podstawową przyczyną niezdatności sekcji tłoczących jest zużycie powierzchni elementu tłoczącego nad krawędzią sterującą. Zużycie to jest przyczyną nierównomiernego dawkowania paliwa przez sekcję.

Pomiary zmian chropowatości na części prowadzącej elementu tłoczącego nie są miarodajne w zakresie oceny zużycia sekcji tłoczących.

Pomiary wybranych parametrów chropowatości na powierzchni elementu tłoczącego położonej nad krawędzią sterującą dawkowaniem paliwa mogą być wykorzystane do monitorowania przebiegu zużycia sekcji tłoczących pomp wtryskowych.



## LITERATURA

1. Boehman A.L., McCormick R.L.: Biofuels for Transportation. *Fuel Processing Technology*, 2007, 88, p. 641.
2. Cieślukowski B.: Kształtowanie cech fizycznych i chemicznych biopaliw RME w aspekcie doboru odmian rzepaku i eksploatacji pojazdów rolniczych. *Acta Agrophysica*, 2010, 15: 33–43.
3. Czechłowski M., Krzysztofiak A., Adamski M., Antczak W.: Wpływ stosowania oleju rzepakowego jako paliwa na trwałość aparatury wtryskowej silników ZS. *Inżynieria Rolnicza*, 2006, 12: 85–92.
4. Gardyński L.: Założenia stanowiska do badań odporności materiałów elementów aparatury paliwowej na zużycie w warunkach smarowania. *Journal of KONES Internal Combustion Engines*, 2004, 11: 165–170.
5. Gardyński L., Gorgol K.: Badania porównawcze własności smarnych oleju napędowego i biopaliw rzepakowych. *EKSPLOLOG* 2008.
6. Gil L., Ignaciuk P., Niewczas A.: Metoda badania przebiegu zużycia sekcji tłoczących pomp wtryskowych silników ZS. *Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, 2010, 6.
7. Kowalski K., Sitnik L., Struś M.: Trwałość wybranych elementów aparatury paliwowej silnika zasilanych estrami metylowymi oleju rzepakowego. *Journal of KONES. Warszawa- Nałęczów* 2000.
8. Marchenko A.P., Semenov V.G.: Alternative biofuel from rape oil derivatives. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2001, 3.
9. Nwafor O.M.I.: Emission characteristics of diesel engine running on vegetable oil with elevated fuel inlet temperature. *Biomass and Bioenergy*, 2004, 27: 507–511.
10. Nwafor O.M.I., Rice G., Ogbonna A.I.: Effect of advanced injection timing on the performance of rapeseed oil in diesel engines. *Renewable Energy*, 2000, 21: 433–444.
11. Torres-Jimenez E., Dorado M.P, Kegl B.: Experimental investigation on injection characteristics of bioethanol-diesel fuel and bioethanol-biodiesel blends. *Fuel*, 2011, 90: 1968–1979.

## THE APPLICATION OF ROUGHNESS MEASUREMENTS IN DETERMINING THE WEAR OF PUMPING SECTION OF INJECTION PUMPS FEED BIOFUEL

### Summary

In the paper presents a evaluate wear of the pumping sections of injection pumps. A set of roughness parameters was defined, which can be used as indicators of sections wear. Some results of experimental investigation of wear in pumping sections were presented. The wear test were evaluated from profiles of plunger pumping section of injection pump measured by means of a Dektak 150 profilometer (Veeco). Verification was done using injection pump MOTORPAL used in a 4CT90 Diesel engine.

**Key words:** biofuel, roughness measurement, wear, injection pump.