

Andrzej NIEWCZAS

Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa

Piotr IGNACIUK, Leszek GIL

Katedra Silników Spalinowych i Transportu Politechniki Lubelskiej, Lublin

METODA OCENY ZUŻYCIA TRIBOLOGICZNEGO SEKЦИИ TŁOCZĄCYCH POMP WTRYSKOWYCH SILNIKÓW O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM ZASILANYCH BIOPALIWAMI

Słowa kluczowe

Zużycie tribologiczne, pompa wtryskowa, silnik ZS, biopaliwo.

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę oceny zużycia tribologicznego sekcji tłoczących pomp wtryskowych. Przeanalizowano typowe uszkodzenia eksploatacyjne oraz ich wpływ na zdatność eksploatacyjną sekcji. Określono zbiór parametrów, które mogą być wskaźnikami zużycia sekcji. Przedstawiono wyniki doświadczalnej weryfikacji metody oceny zużycia na przykładzie pompy wtryskowej firmy MOTORPAL wykorzystywanej w silniku 4CT90.

Wprowadzenie

Stosowanie nowych paliw zawsze związane jest z ryzykiem uszkodzenia silnika. Klasycznym przykładem jest recesja gniazd zaworowych w silnikach ZI niedostosowanych do paliwa bezołowiowego. Obecnie podobne problemy mogą się pojawić przy stosowaniu biopaliw typu estry olejów roślinnych do zasilania silników ZS. Elementami o dużym ryzyku uszkodzenia w tym przypadku są: aparatura wtryskowa oraz układy oczyszczania spalin (filtry DPF).

W odniesieniu do aparatury wtryskowej paliwo stanowi nie tylko medium zasilające silnik, ale jest też substancją smarującą, zapobiegającą zużyciu tribologicznemu. Produkty powstałe z niecałkowitego spalania paliwa stanowią przyczynę tworzenia się laków i szlamów zwłaszcza na powierzchniach elementów układu TPC oraz są przyczyną blokowania filtrów sadzy.

Podstawowe problemy badawcze przy analizie przebiegu zużycia tribologicznego złożonych obiektów mechanicznych oraz przy ocenie ich stanu niezawodnościowego to:

- Wybór reprezentatywnego parametru, którego zmiany będą miarodajne dla stanu technicznego elementu,
- Określenie granicznej wartości parametru reprezentatywnego, tj. takiej, której przekroczenie jest równoznaczne z uszkodzeniem elementu.

W odniesieniu do aparatury wtryskowej elementami reprezentatywnymi mogą być: wtryskiwacze i sekcje tłoczące. Wymienione elementy cechuje bowiem wysoka dokładność geometryczna, stąd nawet relatywnie niewielkie uszkodzenia zużyciowe powodują ich niesprawność. Wysoka dokładność wykonania oraz indywidualne pasowanie elementów w połączeniu z niewielkimi i złożonymi wymiarami sprawiają, że klasyczne metody pomiaru zużycia nie zawsze mogą być tu stosowane.

Większość badaczy stosowała dotąd wagową miarę zużycia. Wyniki tego typu pomiarów obarczone są błędem wynikającym z powstawania osadów (laków) z paliwa często o masie porównywalnej lub większej od masy ubytku materiału, stąd możliwe jest uzyskiwanie w trakcie badań „ujemnych” przyrostów zużycia [3]. Inne zespoły badawcze [6, 7, 8] nie opisują w sposób wyczerpujący stosowanej metody pomiarów zużycia – informując tylko, że jest to pomiar wagowy. Należy jednak powtórzyć, że zarówno niedokładne oraz „zbyt dokładne” oczyszczenie elementu z laków paliwowych jest tu źródłem poważnych błędów pomiarowych. Utrudniony pomiar zużycia elementów precyzyjnych aparatury wtryskowej jest przyczyną niechętnego podejmowania prac badawczych z tego zakresu. Większość publikacji traktujących o biopaliwach do silników o zapłonie samoczynnym opisuje wpływ paliwa na pracę silnika lub emisję związków toksycznych.

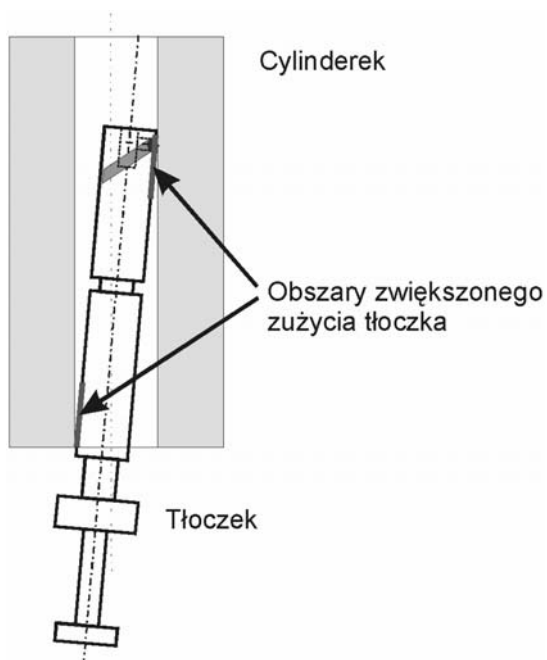
1. Uszkodzenia eksploatacyjne sekcji tłoczących

Analiza uszkodzeń eksploatacyjnych różnego typu sekcji tłoczących pomp wtryskowych wykazała, że przyczyną utraty zdatności jest zużycie powierzchni bocznej elementu tłoczącego położonej bezpośrednio nad rowkiem sterującym dawką paliwa (rys. 1).

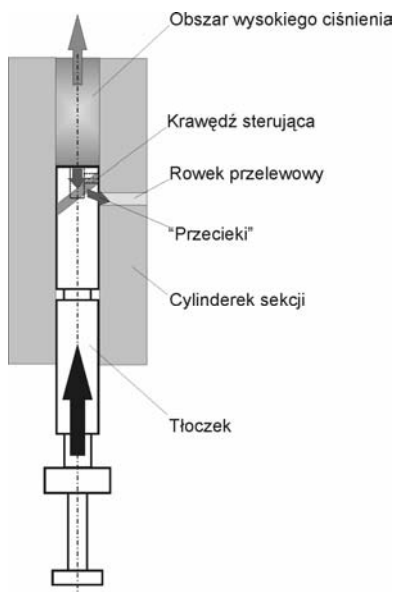


Rys. 1. Przykłady uszkodzonych powierzchni elementu tłoczącego (strzałkami zaznaczono miejsca widocznych uszkodzeń zużyciowych)

Zaobserwowano, że zużyciu górnej części tłoczka towarzyszy zużycie przeciwległej powierzchni na części prowadzącej. Zużycie to jest wynikiem niewspółosiowego ustawienia osi tłoczka względem osi cylinderka (rys. 2).



Rys. 2. Niewspółosiowe ustawienie osi tłoczka względem osi cylinderka sekcji tłoczącej jako przyczyna wiążąca zużycie przeciwległych powierzchni tłoczka



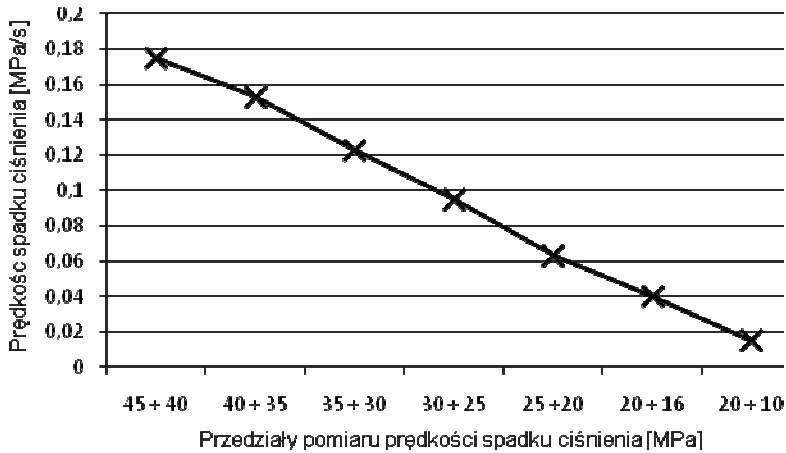
Rys. 3. Schemat powstawania nieszczelności i „przecieków” paliwa podczas tłoczenia na skutek zużycia powierzchni tłoczka nad rowkiem (krawędzią) sterującym

Parametrem funkcjonalnym sekcji tłoczących jest ich szczelność. Uszkodzenia zużyciowe powierzchni nad rowkiem sterującym dawką paliwa jest bezpośrednią przyczyną nierównomierności dawkowania sekcji przy jednoczesnej utracie szczelności. Drogę ewentualnych przecieków przedstawiono na rys. 3.

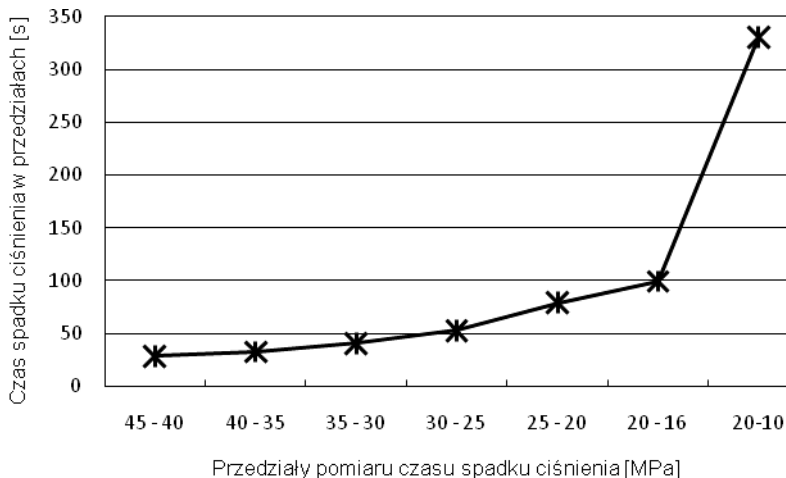
2. Wybór parametrów do oceny zużycia sekcji tłoczących

Zachowanie sprawności eksploatacyjnej jest podstawowym kryterium przy podejmowaniu decyzji o dalszej eksploatacji sekcji tłoczących. Jest ona zatem podstawowym kryterium przy ocenie stanu technicznego sekcji. Ocenę sprawności eksploatacyjnej sekcji można przeprowadzić poprzez pomiar maksymalnej wartości ciśnienia, jakie może wytworzyć sekcja. Wartość ta jest jednak silnie zależna od prędkości obrotowej pompy oraz od lepkości paliwa. Innym sposobem oceny szczelności sekcji jest pomiar czasu spadku ciśnienia nad tłoczkiem. Metoda ta jest zalecana przez BN-77/1301-11 do oceny stanu technicznego sekcji tłoczących. Wymieniona norma przewiduje pomiar czasu spadku ciśnienia w przedziale od 20 do 16 MPa. Jako kryterium sprawności eksploatacyjnej podaje się czas spadku ciśnienia dłuższy niż 6 sekund. Jednak, jak wynika z przeprowadzonych badań elementów uszkodzonych, metoda ta nie zawsze jest efektywna. Postanowiono zatem wykonać szerszą charakterystykę szczelności sekcji tłoczących poprzez pomiar czasu spadku ciśnienia w następujących przedziałach pomiarowych: 45–40 MPa, 40–35 MPa, 35–30 MPa, 30–25 MPa, 20–16 MPa,

20–10 MPa. Przedział 20–16 MPa przyjęto zgodnie z wymaganiami BN-77/1301-11. Ustalenia pozostałych przedziałów pomiarowych przeprowadzono w oparciu o kryterium czasu pomiaru dla sekcji nowych. Czasy spadków ciśnienia w zakresie wartości wyższych niż 45 MPa są bardzo krótkie, natomiast czasy spadku ciśnienia dla wartości niższych niż 10 MPa są bardzo długie (do kilkudziesięciu minut). Na rys. 4 i 5 przedstawiono przykładowe charakterystyki szczelności sekcji tłoczących wykonane przy ustawieniu tłoczka odpowiadającym maksymalnej dawce paliwa.



Rys. 4. Przykładowa charakterystyka prędkości spadku ciśnienia wybranej sekcji wtryskowej pompy MOTORPAL

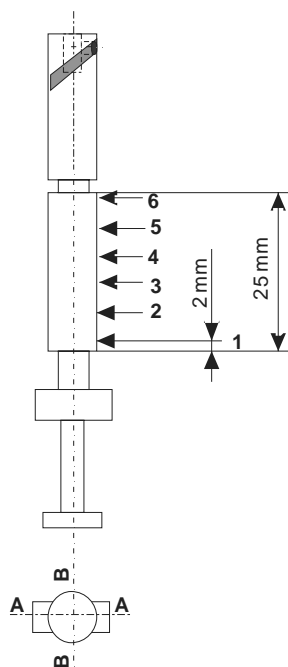


Rys. 5. Przykładowa charakterystyka szczelności sekcji jako funkcja czasu spadku ciśnienia dla wybranej sekcji wtryskowej pompy MOTORPAL

Charakterystyki sporządzono jako funkcje prędkości i czasu spadku ciśnienia we wcześniej wymienionych przedziałach pomiarowych. Obiektem badań była rzędowa pompa wtryskowa czeskiej firmy MOTORPAL stosowana w silnikach 4CT90.

Wykonanie pomiarów zużycia materiału elementów sekcji tłoczących w sposób umożliwiający ocenę zmiany luzu tłoczek–cylinderka jest zadaniem dość trudnym. Do pomiarów średnicy wewnętrznej cylinderka sekcji producenci używają metod pośrednich przyjmując spadek ciśnienia jako miarę średnicy wewnętrznej cylinderka. Zatem ocenę zużycia sekcji tłoczących najwygodniej jest oprzeć tylko na wynikach pomiarów elementu tłoczącego. Pomiarów średnic na części prowadzącej tłoczka przedstawiono na rys. 6 tłoczka. Uwzględniając charakter zużycia elementu tłoczącego sekcji opisany w punkcie 1 w odniesieniu do badanych sekcji, wykonano następujące pomiary:

- pomiar średnicy zewnętrznej elementu tłoczącego na części prowadzącej wykonany metodą optyczną z dokładnością do 0,0001 [mm],
- pomiary chropowatości elementu tłoczącego na części prowadzącej,
- pomiary błędów okrągłości na części prowadzącej elementu tłoczącego.



Rys. 6. Schemat pomiarów i stanowisko pomiarowe średnicy zewnętrznej elementu tłoczącego na części prowadzącej; 1, 2 – nr pomiaru; A-A, B-B – kierunki pomiaru

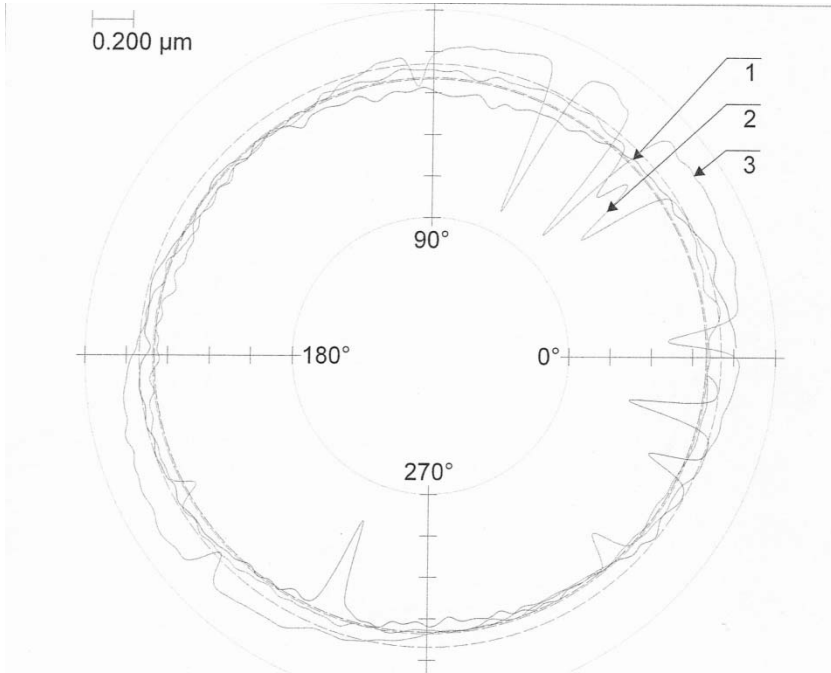
Pomiary chropowatości powierzchni przeprowadzono wykorzystując przyrząd Hommel Tester T1000 (rys. 7). Wyboru mierzonych parametrów chropowatości dokonano kierując się ich przydatnością do oceny zużycia powierzchni. Tarciove wygładzanie powierzchni powinno powodować zmiany wybranych parametrów takich jak:

- R_{\max} – największa wysokość chropowatości na odcinku pomiarowym,
- R_z – średnia wysokość chropowatości wzdłuż odcinka pomiarowego,
- R_a – średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości od linii średniej,
- R_t – całkowita wysokość profilu na odcinku pomiarowym,
- R_{mr} (10%) – udział powierzchni nośnej profilu,
- R_p – wysokość największego wzniesienia profilu na odcinku pomiarowym,
- R_{pm} – średnia wysokość wzniesień profilu na odcinku pomiarowym.

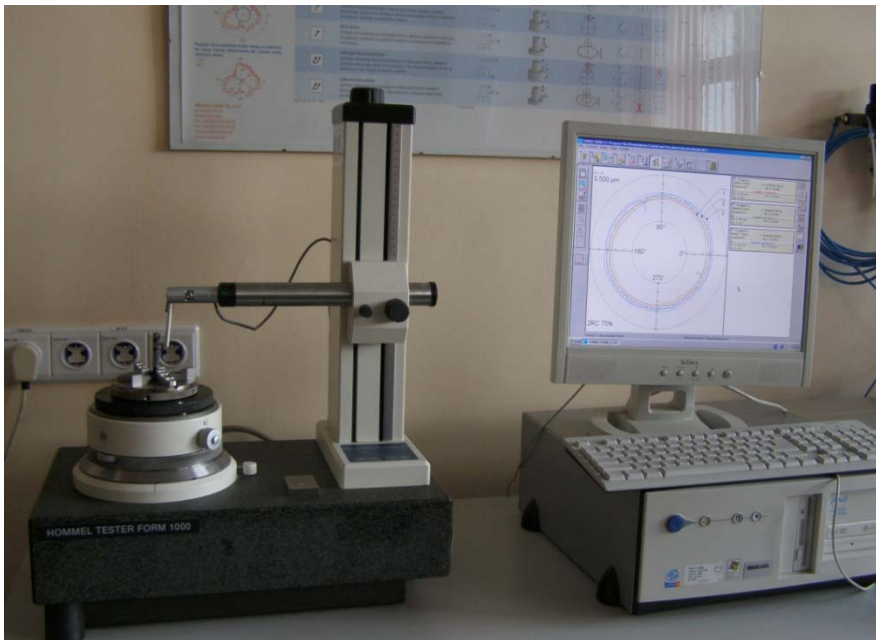


Rys. 7. Stanowisko do pomiaru chropowatości powierzchni elementu tłoczącego (przyrząd Hommel Tester T1000)

Z uwagi na obserwowany charakter zużycia części prowadzącej postanowiono dodatkowo przeprowadzić pomiary okrągłości tej części. Pomiary przeprowadzono w trzech płaszczyznach prostopadłych do osi tłoczka, w części prowadzącej na przyrządzie Hommel Tester Form 1000. Przykładowe wyniki pomiarów oraz widok stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 8 i 9.



Rys. 8. Wyniki pomiarów błędu okrągłości na części prowadzącej tłoczka (widoczna zmiana okrągłości wywołana zużyciem eksploatacyjnym)



Rys. 9. Stanowisko do pomiaru okrągłości elementu tłoczącego

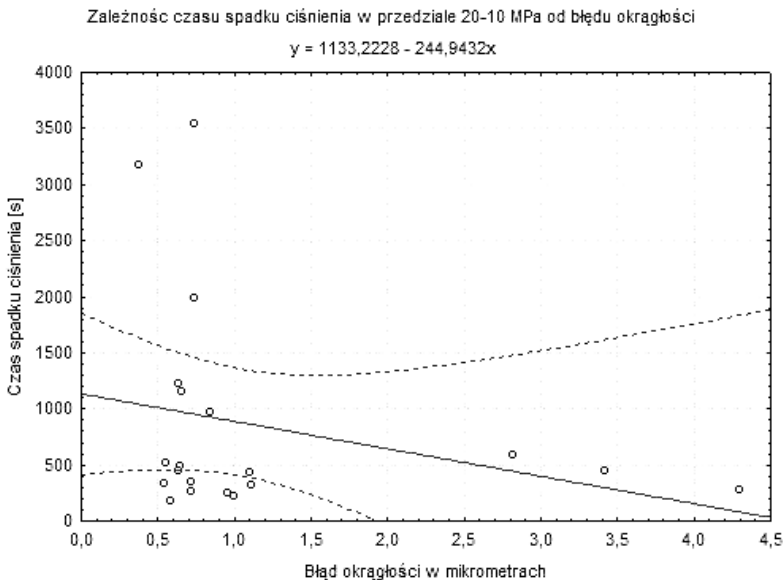
4. Wstępna ocena przydatności wybranych miar uszkodzeń zużyciowych sekcji tłoczących

W prezentowanych badaniach wybrano następujące miary zużycia tribologicznego elementu tłoczącego sekcji:

- Zmianę średnicy na części prowadzącej elementu tłoczącego.
- Zmiany wybranych parametrów chropowatości charakteryzujących wysokość wzniesień profilu. Powierzchnia nowego elementu w pierwszej fazie eksploatacji ulegnie dogładzeniu. Zatem wysokość nierówności powinna ulec zmniejszeniu przy jednoczesnym wzroście udziału powierzchni nośnej profilu.
- Zmiany okrągłości na części prowadzącej. W miarę wzrostu czasu pracy sekcji powierzchnia prowadząca powinna uzyskiwać większe odchyłki okrągłości.
- Zmiany charakterystyk szczelności sekcji tłoczących. Szczelność sekcji powinna ulegać zmniejszeniu.

W celu wstępnej weryfikacji poprawności wyboru ww. parametrów do oceny zużycia przebadano statystyczne zależności pomiędzy wybranymi parametrami geometrycznymi i eksploatacyjnymi sekcji. W analizie pominięto średnicę tłoczka na części prowadzącej – ponieważ jej zmiana jest w sposób oczywisty bezpośrednią miarą zużycia. W badaniach wykorzystano próbkę 20 egzemplarzy sekcji pompy MOTORPAL silnika 4CT90 użytkowanych, ale zdatnych do dalszej eksploatacji. Stwierdzono, że istnieje istotna zależność pomiędzy błędem okrągłości a czasem spadku ciśnienia we wszystkich przedziałach pomiarowych (rys. 10).

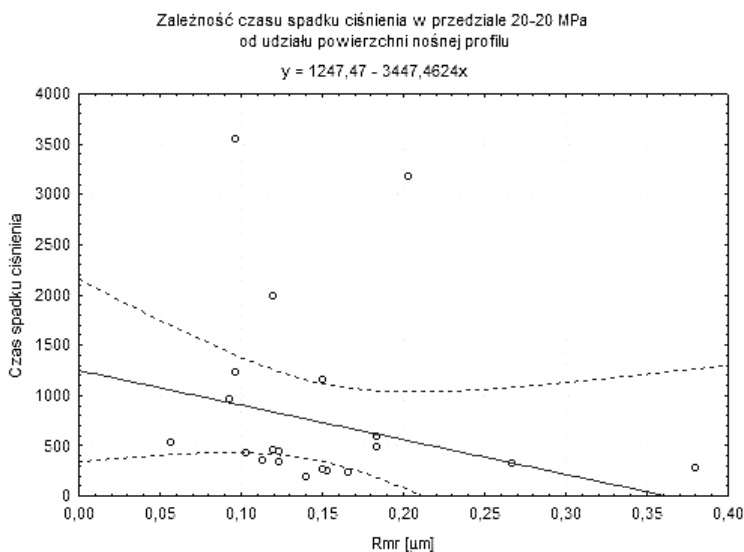
Podobne wyniki otrzymano w odniesieniu do udziału powierzchni nośnej profilu tj. R_{mr} (rys. 11).



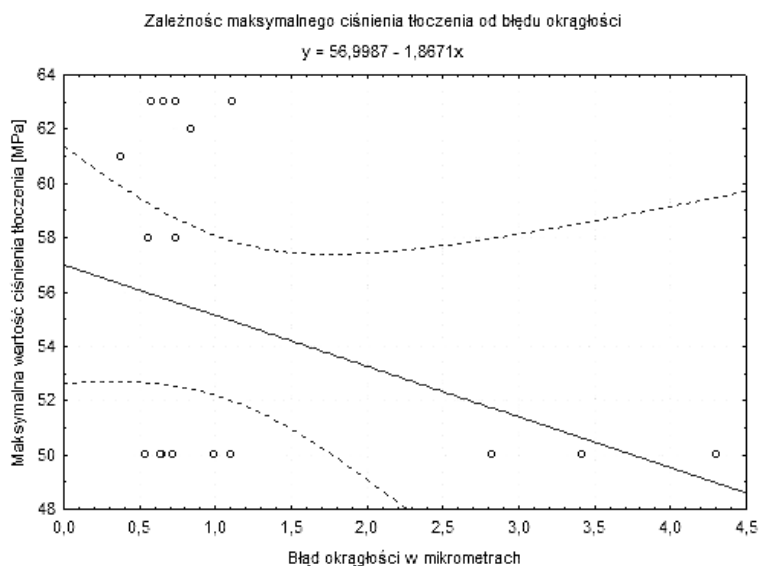
Rys. 10. Zależność czasu spadku ciśnienia w przedziale 20–10 MPa od błędu okrągłości

W obu przypadkach wzrostowi wartości parametru R_{mr} i błędowi okrągłości towarzyszy spadek szczelności sekcji. W odniesieniu do pozostałych parametrów chropowatości powyższa reguła nie zawsze była zachowana.

Wykonano też pomiary maksymalnego – możliwego do uzyskania ciśnienia tłoczenia. Podobnie jak w przypadku poprzednim ciśnienie to maleje wraz ze wzrostem błędowi okrągłości na części prowadzącej (rys. 12).



Rys. 11. Zależność czasu spadku ciśnienia w przedziale 20–10 MPa od parametru R_{mr}



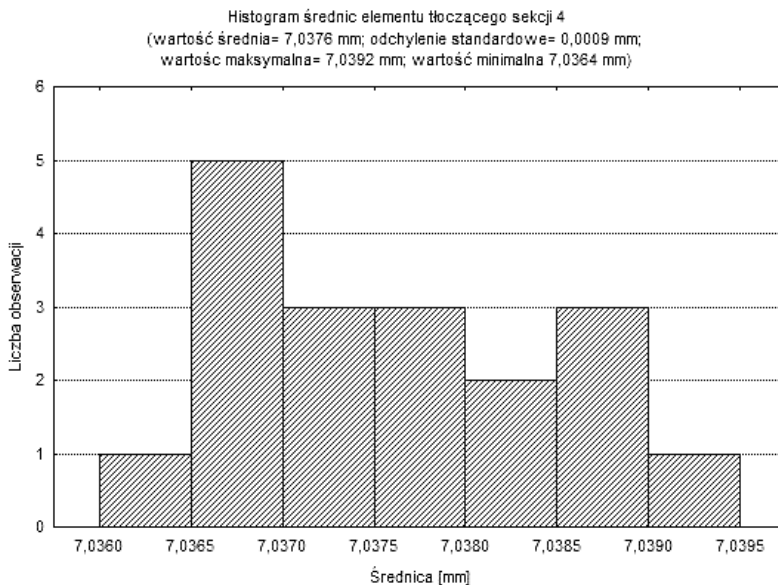
Rys. 12. Zależność maksymalnego ciśnienia tłoczenia od błędowi okrągłości

Podsumowując przeprowadzone rozważania, należy stwierdzić, że parametry geometryczne: błąd okrągłości oraz udział nośny profilu na części prowadzącej elementu tłoczącego sekcji mogą być parametrami wykorzystywanymi do monitorowania zmian szczelności oraz oceny zużycia eksploatacyjnego sekcji. Zagadnienie określenia wartości granicznych ww. parametrów wymaga jednak przeprowadzenia szerszych badań na znacznie większej próbie obejmującej również egzemplarze uszkodzone.

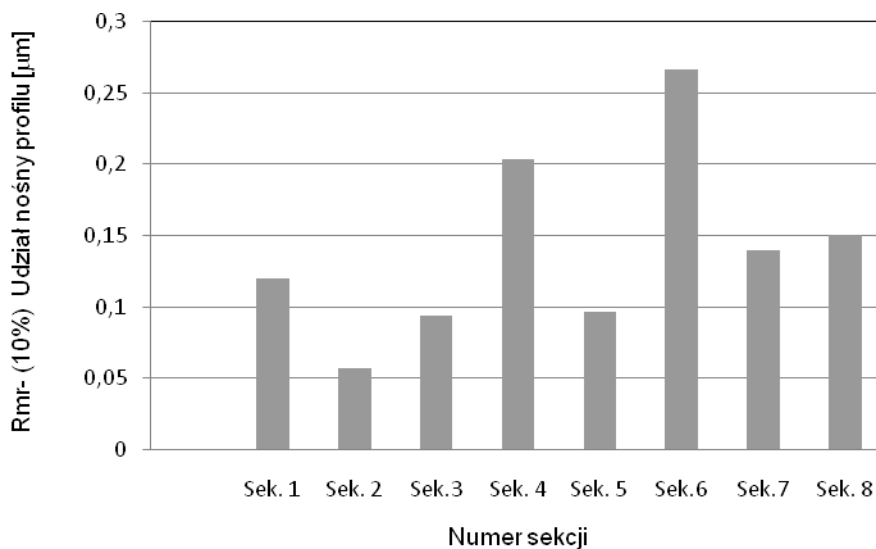
5. Charakterystyka stanu technicznego nowych sekcji przygotowanych do badań zużycia

Badanie zużycia eksploatacyjnego wymaga precyzyjnego określenia stanu początkowego sekcji tłoczących. Poniżej przedstawiono charakterystyki stanu początkowego wybranych elementów sekcji tłoczącej przygotowanej do stanowiskowych badań trwałościowych.

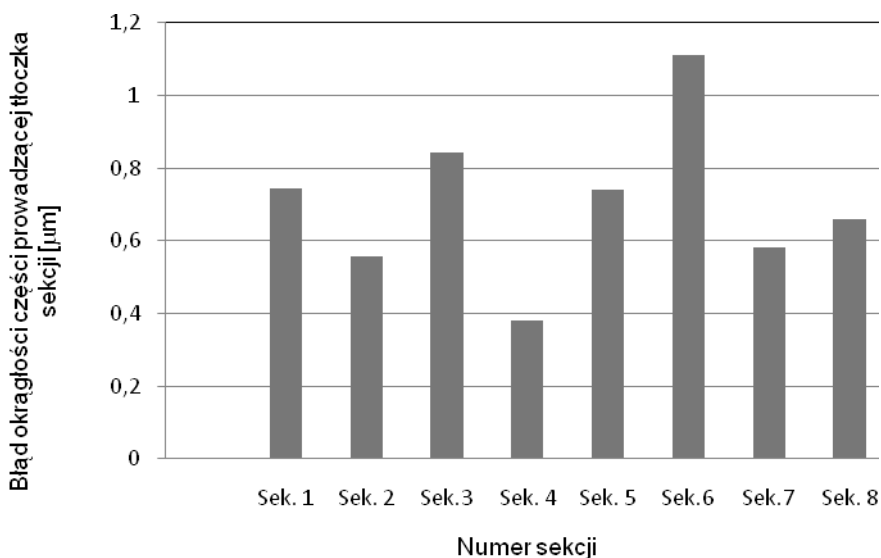
Na rys. 13 przedstawiono wybrany histogram szeregu rozdzielczego średnicy elementu tłoczącego sekcji nr 4 (średnica części prowadzącej). Na rys. 14 przedstawiono zestawienie wyników pomiaru chropowatości powierzchni elementu tłoczącego R_{nr} (udział nośny powierzchni profilu). Rys. 15 przedstawia średnie wartości błędów okrągłości tłoczków badanych sekcji. Parametry chropowatości badanych sekcji wyznaczono jako wartość średnią z czterech pomiarów. Rysunek 16 przedstawia wykresy szczelności badanych sekcji.



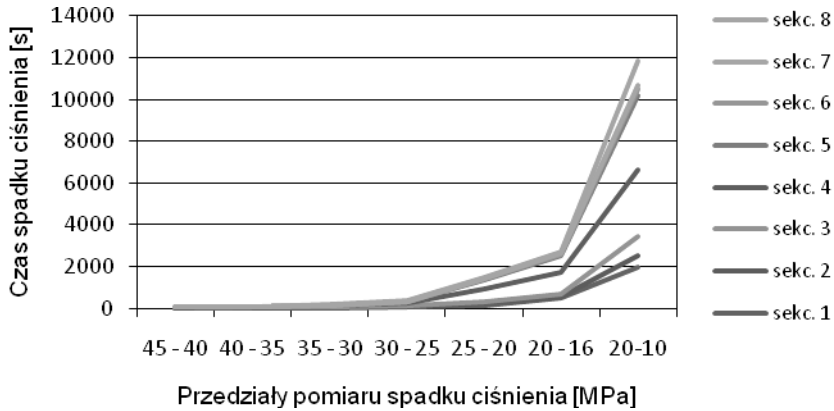
Rys. 13. Histogram średnic na części prowadzącej elementu tłoczącego sekcji nr 4



Rys. 14. Średnie wartości R_{mr} udziału nośnego powierzchni profilu na odcinku pomiarowym dla przygotowanych do badań sekcji



Rys. 15. Średnie wartości błędów okrągłości dla badanych sekcji



Rys. 16. Charakterystyki szczelności sekcji tłoczących

Wnioski

1. Na podstawie przeprowadzonych badań stanowiskowych stwierdzono, że istnieje możliwość miarodajnej oceny stanu technicznego sekcji tłoczących pomp wtryskowych przez sporządzenie charakterystyki szczelności rozumianej jako zależność czasu spadku w ciśnienia (lub prędkości spadku ciśnienia) od wartości początkowej ciśnienia w rozpatrywanym przedziale.
2. Stwierdzono, że podstawową przyczyną niesprawności sekcji tłoczących jest zużycie powierzchni nad krawędzią sterującą. Zużycie to powoduje powstawanie przecieków tłoczonego paliwa do kanału przelewowego, co skutkuje nierównomiernym dawkowaniem paliwa przez sekcję. Zużycie powierzchni elementu tłoczącego nad krawędzią sterującą wymusza niewspółosiowe ustawienie tłoczka i cylinderka sekcji, co skutkuje zużyciem części prowadzącej.
3. Miarą zużycia części prowadzącej sekcji może być przyrost błędów okrągłości lub parametrów chropowatości, w szczególności udziału powierzchni nośnej profilu na wybranym odcinku pomiarowym.
4. Zaobserwowano istnienie statystycznych zależności na losowo wybranej próbie egzemplarzy sekcji tłoczących o zróżnicowanym stanie technicznym (po różnym przebiegu eksploatacyjnym) pomiędzy szczelnością a wartością błędu okrągłości i udziałem powierzchni nośnej profilu zmierzonych na części prowadzącej badanych sekcji.
5. Stwierdzono, że wzrostowi odchyłki okrągłości na części prowadzącej tłoczka sekcji towarzyszy spadek szczelności charakteryzowany zmniejszeniem się czasu spadku ciśnienia we wszystkich zakresach pomiarowych. Podobną zależność zaobserwowano w stosunku do udziału powierzchni

nośnej profilu. Wzrostowi zużycia towarzyszy wzrost udziału powierzchni nośnej profilu oraz spadek szczelności sekcji.

6. Stan początkowy sekcji tłoczących pomp wtryskowych może być określony poprzez wyznaczenie:
 - średnic na części prowadzącej elementu tłoczącego,
 - wartości wybranych parametrów chropowatości na części prowadzącej elementu tłoczącego w szczególności udziału nośnego powierzchni profilu na odcinku pomiarowym,
 - błędów okrągłości na części prowadzącej elementu tłoczącego,
 - charakterystyki szczelności sekcji.

Bibliografia

1. Adamczak S.: Pomiary geometryczne powierzchni. WNT, Warszawa 2008.
2. Bernhart M.: Badania trakcyjnych silników spalinowych. WKiŁ, Warszawa 1970.
3. Czechłowski M., Krzysztofiak A., Adamski M., Antczak W.: Wpływ stosowania oleju rzepakowego jako paliwa na trwałość aparatury wtryskowej silników ZS. Inżynieria Rolnicza nr 12/2006, s. 85–92.
4. Kasedorf J.: Zasilanie wtryskowe olejem napędowym. WKiŁ, Warszawa 1990.
5. Kneba Z., Makorski S.: Zasilanie i sterowanie silników. WKiŁ, Warszawa 2004.
6. Kowalski K., Sitnik L., Struś M.: Trwałość wybranych elementów aparatury paliwowej silnika zasilanych estrami metylowymi oleju rzepakowego. Journal of KONES, Warszawa – Nałęczów 2000.
7. Krzyżak A., Gardyński L.: Ocena wpływu oleju napędowego oraz paliwa roślinnego na zużycie tribologiczne wybranych tworzyw polimerowych. MOTROL. Motoryzacja i energetyka rolnictwa. Tom 11C. Lublin 2009.
8. Gardyński L., Gorgol K.: Badania porównawcze własności smarnych oleju napędowego i biopaliw rzepakowych. EKSPLOLOG 2008.
9. Pągowski Z.: Badania i eksploatacja biopaliw rzepakowych. Instytut Lotnictwa, Warszawa 2006.
10. Wieczorowski M., Cellary A., Chajda J.: Charakterystyka chropowatości powierzchni. Poradnik. Wydawnictwa Politechniki Poznańskiej. Poznań 1996.

Recenzent:
Antoni ISKRA

Methodology of tribological wear assessment in pumping sections of injection pumps used in diesel engines fuelled with biofuels**Key words**

Tribological wear, injection pump, diesel engine, biofuel.

Summary

The paper presents a method to assess wear of pumping sections of injection pumps. Typical operational defects were analysed as well as their influence on the operational usability of the pumping section. A set of parameters was defined, which can be used as indicators of the section's wear. Some results of experimental verification of the assessment method were presented. Verification was done using injection pump MOTORPAL used in a 4CT90 Diesel engine.

