

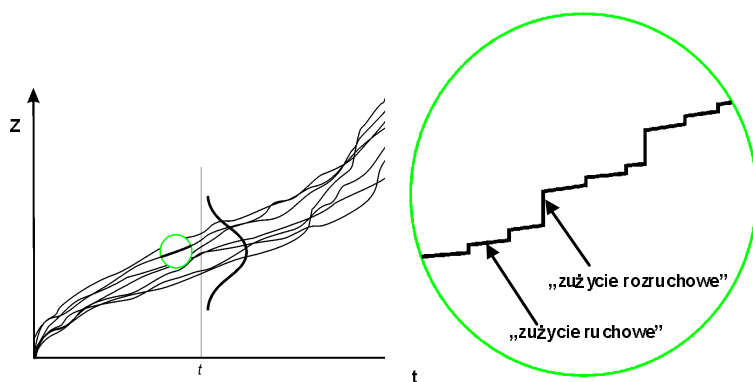
Paweł Kordos*, Piotr Ignaciuk**

ANALIZA ZUŻYCIA TULEI CYLINDROWEJ SILNIKASPALINOWEGO O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM W TRAKCIE DŁUGOTRWAŁEJ EKSPLOATACJI

WSTĘP

W eksploatacyjnym procesie zużycia elementów silnika spalinowego możemy wyróżnić dwa procesy składowe – „zużycie ruchowe” wynikające z ciągłej pracy silnika, oraz „zużycie rozruchowe” występujące w trakcie rozruchu silnika [3, 5]. Modelowy przebieg zużycia przedstawiono na rysunku 1.

Na przebieg zużycia podczas eksploatacji ma wpływ bardzo wiele czynników. Należą do nich czynniki określające warunki prowadzenia eksploatacji pojazdu (zużycie dwóch takich samych pojazdów eksploatowanych w różnych warunkach jest inne nie tylko, co do wartości, ale również, co do charakterystyki przebiegu) [4,6]. Ważne jest, więc określenie temperatur pracy silników, liczby rozruchów, temperatur rozruchów, prędkości obrotowych wału korbowego, położenia organu sterującego oraz parametrów rozruchu. Na podstawie tych danych i wyników pomiarów zużycia przeprowadza się analizę obciążeń eksploatacyjnych silnika w pojeździe. Określenie zuży-



Rys. 1. Modelowy przebieg zużycia eksploatacyjnego w czasie [5]

* Paweł KORDOS – Katedra Podstaw Techniki, Podstaw Techniki, Politechnika Lubelska.

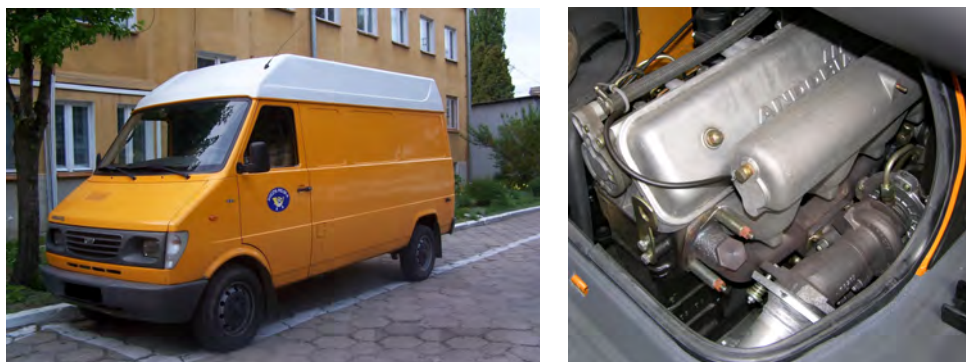
** Piotr IGNACIUK – Katedra Silników Spalinowych i Transportu, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

cia pozwala na wyznaczenie intensywność eksploatacyjnego zużycia elementów silnika [1]. Na tej podstawie można dokonać predykcji zużycia w czasie oraz chwili osiągnięcia przez obiekt granicznej wartości zużycia. Ograniczeniem tego rodzaju predykcji jest możliwość jej zastosowania tylko do danego modelu silnika eksploatowanego w podobnych warunkach.

OBIEKT BADAŃ

Obiektami badań eksploatacyjnych zużycia były silniki 4CT90 montowane w samochodach dostawczych Lublin. Są to turbodoładowane silniki o zapłonie samoczynnym, chłodzone cieczą, z pośrednim wtryskiem paliwa do komory wirowej umieszczonej w głowicy.

Silnik 4CT90 posiada 4 cylindry w układzie rzędowym, pionowym. Pojemność skokowa badanego silnika wynosi 2417 cm^3 , a stopień sprężania równy jest 20,6. Silnik posiada obiegowy układ smarowania ciśnieniowo-rozbryzgowy, w którym olej podawany jest pod ciśnieniem $0,1 \div 0,5 \text{ MPa}$. Silnik wyposażony jest w rzędową pompę wtryskową z wielozakresowym odśrodkowym regulatorem obrotów oraz automatycznym przestawiaczem kąta wtrysku. Silnik jest chłodzony płynem w układzie o przymusowym obiegu, wymuszonym pompą wirnikową. Znamionowa moc badanego silnika wynosi 66 kW przy znamionowej prędkości obrotowej równej 4100 obr/min. Maksymalny moment obrotowy występuje przy 2500 obr/min i wynosi 195 Nm. Minimalne jednostkowe zużycie paliwa wynosi 295 g/kWh



Rys. 2. Widok samochodów LUBLIN III wyposażonego w silnik 4CT90

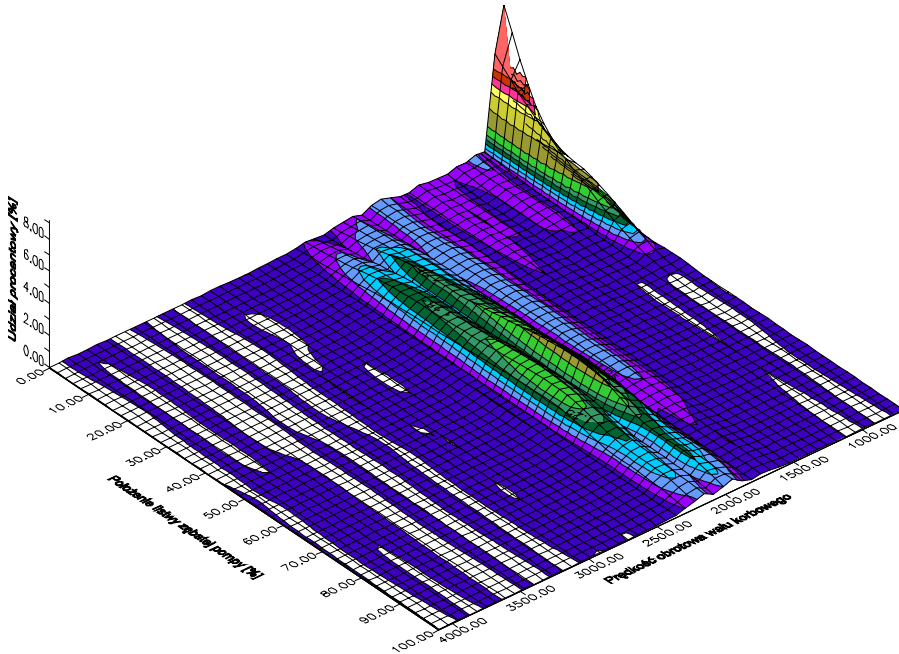
METODYKA BADAŃ

Badania identyfikacyjne

Badane pojazdy wykorzystywane były przez Zakład Transportu Samochodowego Poczty Polskiej i wykonywały przejazdy na siedmiu stałych trasach w powiecie lubelskim.

Średni dzienny przebieg pojazdów wynosił 240 km a roczny około 55000 km. W samochodach montowano specjalnie zbudowane urządzenie rejestrujące, w skład którego wchodziły: moduł centralny rejestratora oraz czujniki temperatury cieczy chłodzącej i oleju, czujnik przemieszczeń liniowych, czujnik ciśnienia oleju smarującego oraz czujniki liczby obrotów wału korbowego silnika i wału napędowego pojazdu. Mierzone parametry były zapisywane w pamięci urządzenia. Na podstawie doświadczeń zdobytych we wcześniejszych badaniach eksploatacyjnych mierzono i rejestrowano następujące parametry: czas włączenia zasilania w układzie elektrycznym pojazdu, liczbę obrotów wału korbowego silnika, liczbę obrotów wału napędowego pojazdu, ciśnienie oleju smarującego, temperaturę oleju smarującego, temperaturę płynu chłodzącego, położenia listwy zębatej pompy wtryskowej.

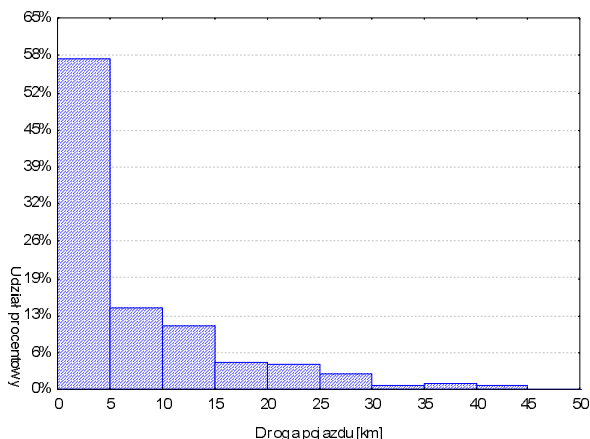
Uwzględniając zarejestrowane podczas badań eksploatacyjnych położenie listwy zębatej opracowano tzw. gęstości czasowe pracy silnika. Na rysunku 3 przedstawiono wykres gęstości czasowej pracy silników w całym okresie badań.



Rys. 3. Warunki pracy badanych silników 4CT90 w trakcie eksploatacji

Na wykresie można zauważyć, że najczęściej występującą prędkością obrotową wału korbowego silnika jest prędkość odpowiadająca maksymalnemu momentowi obrotowemu silnika (1950–2250 obr/min). Pomimo, że pojazdy eksploatowano na trasach pozamiejskich (90% przejazdów), to udział pracy silnika na biegu jałowym (około 800 obr/min) stanowi ponad 21%.

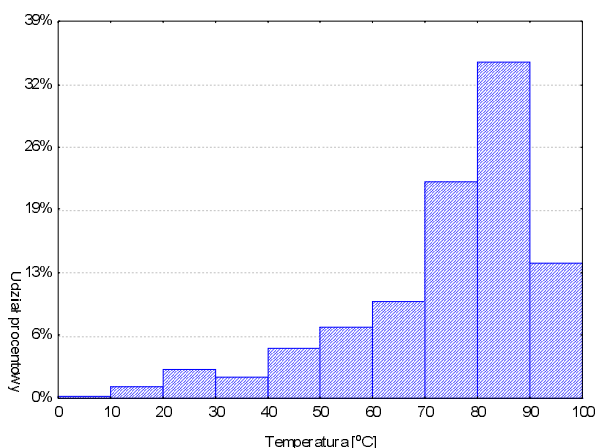
W trakcie badań eksploatacyjnych rejestrowano także chwile rozruchów silnika i parametry określające stan silnika w trakcie rozruchu. Na rysunku 4 przedstawiono wykres gęstości rozkładu drogi przejechanej po uruchomieniu silnika 4CT90 dla badanych samochodów LUBLIN.



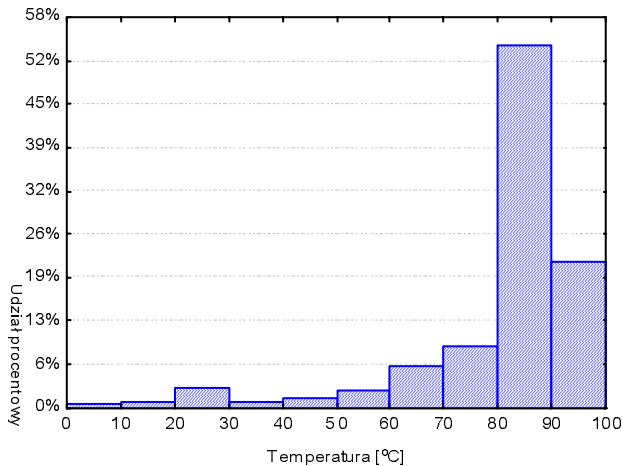
Rys. 4. Gęstość rozkładu drogi przejechanej przez samochód po uruchomieniu silnika 4CT90

Na wykresie (rys. 4) można zauważyć, że średni przebieg między kolejnymi rozruchami wynosił 6,2 km.

W trakcie badań mierzono również temperatury płynu chłodzącego i oleju smarującego silnik w chwili rozruchu i w trakcie pracy silnika. Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono gęstość rozkładu temperatur płynu chłodzącego i oleju smarującego silnik w chwili rozruchu silnika.



Rys. 5. Gęstość rozkładu temperatur oleju w chwili rozruchu silnika 4CT90



Rys. 6. Gęstość rozkładu temperatur płynu chłodzącego w chwili rozruchu silnika 4CT90

Analizując wykresy z rysunków 5 i 6 należy stwierdzić, że 66% realizacji rozruchów silnika odbywa się przy temperaturze oleju 70–90°C oraz przy temperaturze płynu chłodzącego 76–88°C.

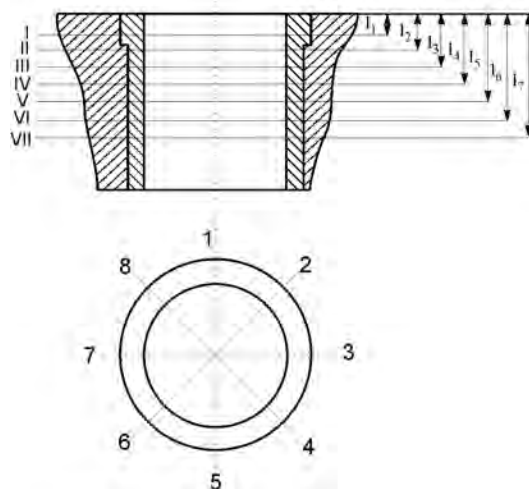
Podsumowując należy stwierdzić, że rozruch badanych silników odbywa się średnio, co 6,2 kilometrów przebiegu. Średni czas nieprzerwanej pracy silnika nie przekracza 8,5 min. Występują krótkie postoje pojazdu z wyłączonym silnikiem. Średni czas postoju wynosi 10,8 minut. Pomimo małych wartości czasu nieprzerwanej pracy i porównywalnych przerw w funkcjonowaniu silnika, obserwuje się znaczny udział rozruchów o temperaturach powyżej 70°C. Przyczyną tego faktu jest duża bezwładność cieplna silnika umożliwiająca utrzymanie mu stabilnej temperatury w sytuacji, gdy przerwy w pracy silnika nie są zbyt długie (stąd 66% realizacji rozruchu silnika odbywa się przy temperaturze oleju 70–90°C i temperaturze płynu chłodzącego 70–88°C).

Badania eksploatacyjne zużycia

Badania eksploatacyjnego zużycia zespołu TPC silnika ograniczono do oceny stanu zużycia tulei cylindrowych.

Pomiary prowadzono zgodnie z normą BN-79/1374-04. Pomiar średnicy wewnętrznej cylindra przeprowadzano w czterech kierunkach – równoległym (1-5) do osi wału korbowego, prostopadłym (3-7) oraz pod kątem 45° do osi wału korbowego (2-6, 4-8). Ponadto na każdym czterech kierunków dokonano pomiaru w ośmiu płaszczyznach, zwanych również poziomami (I–VIII). Liczność pomiarów wpływa na zmniejszenie wartości błędów oraz pozwala na określenie profilu zużycia gładzi cylindrowych. Sposób dokonywania pomiarów przedstawia rys. 7.

Do pomiaru średnic cylindrów silnika 4CT90 po długotrwałej eksploatacji samochodu Lublin zastosowano elektroniczną średnicówkę mikrometryczną typu CBGD030



Rys. 7. Położenie punktów pomiarowych na powierzchni cylindra silnika (od górnej krawędzi cylindra): poziom I – 18 mm, II – 26 mm, III – 34 mm, IV – 44 mm, V – 54 mm, VI – 64 mm, VII – 74 mm, VIII – 82 mm

o zakresie pomiarowym 50÷150 mm. Posiada ona elektroniczny wyświetlacz umożliwiający bezpośredni odczyt odchyłki pomiarowej. Dokładność pomiaru wymiaru liniowego tą średnicówką wynosi 1 μm . Jednak całkowity błąd wyznaczenia zużycia jest większy i wynika z uwzględnienia błędów obydwu pomiarów, a także ze zmienności warunków prowadzenia pomiarów (głównie temperatury). W celu uzyskania dużej dokładności ustawienia końcówek pomiarowych średnicówki w obydwu pomiarach, zastosowano odpowiedni szablon. Wykonane w nim otwory odpowiadają kolejnym płaszczynom pomiarowym (rys. 8).

Zużycie obliczono jako różnicę pomiędzy zmierzonym wymiarem wewnętrznej średnicy tulei, a jej wymiarem nominalnym na podstawie wzoru:

$$d_i = d_{xp} - d_{x0} \quad (1.1)$$



Rys. 8. Średnicówka elektroniczna wraz z szablonem użytym do pomiarów średnic cylindra

gdzie: d_i – wartość i -tego pomiaru zużycia tulei cylindrowej (przyrost wewnętrznej średnicy) [mm]

$i = 1, 2, 3 \dots n$ – n oznacza numer pomiaru w wybranym punkcie powierzchni gładzi cylindra

d_{x0} – wartość wymiaru nominalnego wewnętrznej średnicy tulei 90,052 na poziomie pomiarowym $x = I, II, \dots, VII$ [mm],

d_{xp} – wartość wymiaru średnicy wewnętrznej tulei na poziomie x po określonym przebiegu eksploatacyjnym samochodu [mm].

Wartość średnią zużycia obliczono ze wzoru:

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n d_i \quad (1.2)$$

Odchylenie standardowe przyrostu wewnętrznej średnicy tulei obliczono ze wzoru:

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (d_i^2 - \bar{d}^2)} \quad (1.3)$$

Błąd standardowy obliczono ze wzoru:

$$\delta_d = \sqrt{\frac{\sigma_d^2}{n}} \quad (1.4)$$

Medianę zużycia tulei cylindrowych obliczono ze wzoru:

$$m_e = \frac{1}{2} \cdot (d_{(n/2)} + d_{((n/2)+1)}) \quad (1.5)$$

Współczynnik zmienności obliczono ze wzoru:

$$v = \frac{\sigma_d}{\bar{d}} \cdot 100\% \quad (1.6)$$

WYNIKI BADAŃ

Oceny zużycia dokonano dla pięciu silników 4CT90 po długotrwałej eksploatacji w pojazdach. Silniki badano przy przebiegach eksploatacyjnych wynoszących odpowiednio: 215852, 311578 oraz 362520 km- dla pierwszego silnika, 247123 km – dla drugiego silnika, 367523 km dla trzeciego silnika, 179593 km – dla czwartego silnika oraz 312620 km dla silnika piątego.

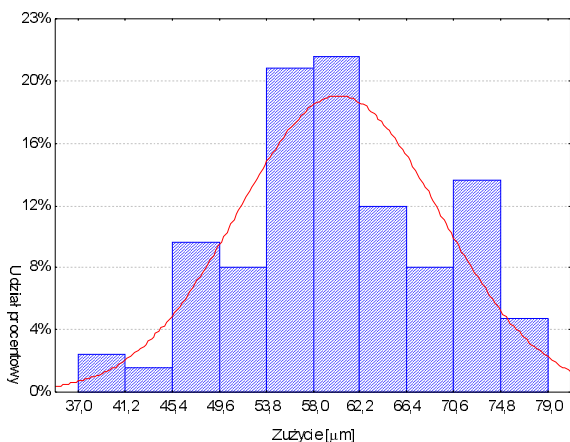
W tabeli 1 przedstawiono parametry statystycznego rozkładu zużycia eksploatacyjnego, dla wszystkich tulei badanych silników, obliczone według wzorów (1.1) – (1.6). W tabeli 2 przedstawiono średnią intensywność zużywania tulei cylindrowych badanych silników 4CT90 przeliczoną na przebieg pojazdu 10000 km. Na rysunku 9 przed-

Tabela 1. Parametry statystycznego rozkładu zużycia eksploatacyjnego tulei cylindrowych silnika 4CT90

Silnik nr	Liczność próby m_z	Wartość średnia \bar{z} [μm]	Wariancja $\text{Var}(z)$ [μm^2]	Odchylenie standardowe σ_d [μm]	Błąd standardowy δ_d [μm]	Mediana m_e [μm]	Moda [μm]	Wsp. zmienności v [%]	Wart. min. [μm]	Wart. max. [μm]
1a	128	41,93	38,78	6,23	0,55	41,00	wielokr.	14,85	30	56
1b	128	18,25	16,02	4,00	0,35	18,50	18,00	21,93	2	26
1c	128	9,77	30,68	5,54	0,49	9,00	9,00	56,67	0	31
2	128	48,88	62,87	7,93	0,70	49,00	wielokr.	16,22	28	64
3	128	68,93	38,78	6,23	0,55	68,00	wielokr.	9,03	57	83
4	128	34,93	38,78	6,23	0,55	34,00	wielokr.	17,83	23	49
5	128	60,18	81,30	9,02	0,80	59,50	59,00	14,98	37	79

Tabela 2. Średnia intensywność zużywania tulei cylindrowych silnika 4CT90 na 10000 km

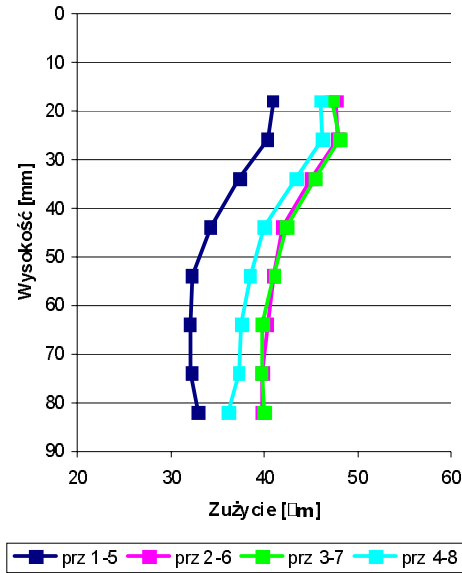
Silnik nr	Wartość średnia \bar{I}_v [$\mu\text{m}/10^4 \text{ km}$]	Odchylenie standardowe σ_{Iv} [$\mu\text{m}/10^4 \text{ km}$]
1a	1,94	0,16
1b	1,97	0,23
1c	1,92	0,28
2	1,98	0,16
3	1,97	0,16
4	1,94	0,16
5	1,92	0,34



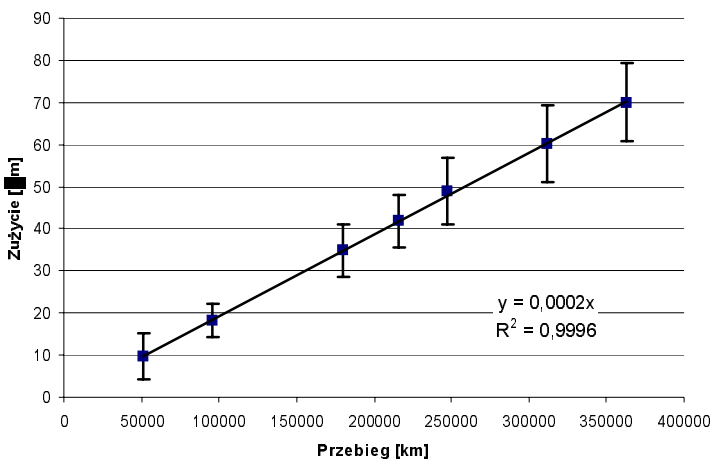
Rys. 9. Histogram rozkładu wartości zużycia tulei cylindrowych po długotrwałej eksploatacji

stawiono histogram rozkładu średniego zużycia tulei cylindrowych badanych silników po długotrwałej eksploatacji.

Na rysunku 10 przedstawiono profil średniego zużycia tulei cylindrowej wybranego silnika po przebiegu eksploatacyjnym rzędu 400000 km. Na wykresie 11 przedstawiono przebieg zużycia tulei cylindrowych badanych silników w funkcji przebiegu eksploatacyjnego pojazdu.



Rys. 10. Średnie zużycie czterech tulei cylindrowych dla pięciu badanych silników na poszczególnych wysokościach pomiarowych i kierunkach po długiej eksploatacji



Rys. 11. Przebieg zużycia tulei cylindrowych badanych silników w funkcji przebiegu eksploatacyjnego pojazdu.

WNIOSKI

1. Niewielka intensywność zużywania cylindrowych świadczy o poprawnej konstrukcji zespołu TPC, prawidłowo dobranych materiałach, a także właściwie opracowanej i przeprowadzonej technologii wykonania silnika 4CT90. Małe wartości zużycia gładzi cylindrowych wskazują również na prawidłową eksploatację badanego silnika.
2. Największa wartość średniego zużycia gładzi cylindrowych występuje na progu ogniowym (poziom I). Wraz ze zwiększaniem wysokości pomiarowej, maleje średnia intensywność procesu zużywania gładzi cylindra, co wiąże się głównie ze zmniejszaniem temperatury współpracy pary tribologicznej.
3. Największe średnie wartości zużycia występują na kierunku pomiarowym 3-7 (prostopadłym do osi wału korbowego), co spowodowane jest wzajemnym oddziaływaniem siły normalnej oraz temperatury ścianki cylindra. Natomiast kierunek 1-5, równoległy do osi wału korbowego, wykazuje najmniejsze wartości średniego zużycia. W wyniku takiego zużywania gładzi cylindrowej następuje owalizacja tulei cylindrowych.
4. Średnia wartość intensywności zużycia tulei cylindrowej dla badanych silników wynosiła $1.96 \mu\text{m}/10000 \text{ km}$.
5. Maksymalne wartości zużycia tulei cylindrowej zaobserwowano w silniku 3.
6. Maksymalną intensywność zużycia tulei cylindrowej odnotowano dla silnika 2.
7. Zużycie zmierzone podczas badań eksploatacyjnych silników można aproksymować rozkładem normalnym.

Literatura

1. Chłopek Z., Danilczyk W., Kruczyński S.: Analiza stanów pracy silnika w warunkach eksploatacji trakcyjnej. *Journal of KONES '97*, Bielsko-Biała 1997.
2. Ignaciuk P.: Metoda badania wpływu wybranych czynników technologicznych na trwałość eksploatacyjną silników spalinowych o zapłonie samoczynnym. Rozprawa Doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 1998.
3. Kordos P.: Stanowiskowa metoda badań niezawodności samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym. Praca Doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 2005.
4. Liščák Š., Droždziel P., Kordos P.: Test-stand reliability evaluation under the operational research of the vehicle. *Studies of Faculty of Operation and Economics of Transport and Communications of University of Transport and Communications in Žilina*, vol. 19, University of Žilina, Slovak Republic, 2003, s. 107–112.
5. Niewczas A., Koszałka G.: Niezawodność silników spalinowych – Wybrane zagadnienia. Wydawnictwa Politechniki Lubelskiej, Lublin 2003.
6. Niewczas A., Droždziel P., Kordos P.: Typical Operating Conditions Of the Diesel Engine in a Small Payload Truck, *Proc. 5th European Conference of Young Research and Science Workers in Transport and Telecommunications TRANSCOM 2003* (Słowacja), str. 121–124.

Streszczenie

Zużycie tulei cylindrowej stanowi główny parametr decydujący o stanie technicznym silnika i możliwości jego dalszej eksploatacji w pojeździe. Ważnym zagadnieniem jest interpretacja wyników pomiarów uzupełniona o analizę warunków pracy silnika. Uzyskane na tej drodze wyniki pozwalają na odwzorowanie eksploatacji silnika w warunkach badań laboratoryjnych i modelowych oraz są pomocne przy projektowaniu nowych konstrukcji silników [2, 3]. Poznawcze aspekty badań eksploatacyjnych uzasadniają ich prowadzenie pomimo wielkiej czasochłonności i kosztowności tych badań.

W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia związane ze zużyciem tulei cylindrowej silnika spalinowego z zapłonem samoczynnym w trakcie jego eksploatacji w pojeździe. Przedstawiono wyniki długotrwałych eksploatacyjnych badań zużycia tulei cylindrowej pojazdów użytkowanych w przedsiębiorstwie transportowym.

ANALYSIS OF CYLINDER LINER WEAR OF INTERNAL COMBUSTION DIESEL ENGINE DURING LONG-LASTING OPERATION

Summary

The cylinder liner is a representative component of the engine construction and its wear can be an indicator of boundary technical conditions of the engine and of necessity of withdrawal from operation. Some long-lasting investigations have been carried out to determine this wear of engines mounted in vehicle during supervised maintenance [2, 3]. Operational research can be carried out: in normal conditions of operation, in conventional conditions of operation, in conditions reconstructing normal operation conditions.

This article introduced the chosen problems of cylinder bore wear obtained during long operating researches, and results of investigations of cylinder bore wear.