

OCENA EKWIWALENTNEGO ZUŻYCIA ROZRUCHOWEGO TULEI CYLINDROWYCH SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

Paweł Drożdziel¹, Paweł Kordos², Leszek Krzywonoś¹

¹ Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: p.drozdziel@pollub.pl

² Katedra Silników Spalinowych i Transportu, Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: p.kordos @pollub.pl

Streszczenie. Niniejszy artykuł prezentuje metodykę oraz wyniki badań zużycia tulei cylindrowych silnika o zapłonie samoczynnym. Badania były prowadzone w warunkach testów stanowiskowych oraz badań przebiegowych pojazdu. Celem wykonywanych doświadczeń było określenie wartości uzyskanych wyników pomiędzy sobą ze szczególnym uwzględnieniem zużycia występującego podczas rozruchu silnika.

Słowa kluczowe: silnik o zapłonie samoczynnym, tuleja cylindrowa zużycie.

WPROWADZENIE

W czasie rozruchu silnika spalinowego występują niekorzystne warunki tribologiczne w parach kinematycznych jego zespołu tłok-pierścienie-cylinder (TPC). Wynika to przede wszystkim z braku dostatecznej ilości oleju silnikowego będącego efektem bezwładności układu olejania oraz zbyt małej prędkości względnej pomiędzy przemieszczającymi się powierzchniami tych par [3, 4, 8, 9]. Powoduje to, że na początku rozruchu w węzłach tribologicznych zespołu TPC występuje tarcie graniczne, które w miarę dopływu oleju silnikowego do nich oraz wzrostu prędkości ruchu elementów silnika przechodzi w tarcie mieszane, a następnie w tarcie płynne [2, 7]. To przejście z tarcia granicznego (w skrajnych przypadkach z tarcia suchego) do tarcia mieszanego o małym udziale procentowym tarcia płynnego powoduje, że w zespole TPC silnika spalinowego podczas rozruchu możemy zaobserwować występowanie zużycia adhezyjnego, ściernego oraz korozyjnego [2, 5].

Podczas rozruchu silnika o ZS w niskiej temperaturze otoczenia obserwuje się wyraźnie występowanie zużycia korozyjnego zespołu TPC. Spowodowane jest to istnieniem dogodnych warunków do kondensacji pary wodnej na zimnych powierzchniach komory spalania. Tak powstała woda w połączeniu z dwutlenkiem siarki (związki siarki są zawarte w oleju napędowym), będącym wynikiem niezupełnego i niecałkowitego spalania mieszanki paliwowo-powietrznej na początku rozruchu, daje kwas siarkowy. Ułatwia to korozję elektrochemiczną powierzchni gładzi cylindrów. Dodatkowo nieodparowane w procesie tworzenia mieszaniny palnej paliwo, osiadając na ściankach cylindrów, zmywa z nich cienką warstwę olejową odsłaniając powierzchnię metalu.

Istniejące na początku rozruchu silnika w zespole TPC zużycie adhezyjne jest spowodowane zerwaniem się istniejących mikropołączeń stykowych warstw wierzchnich w chwili rozpoczęcia ruchu względnego. Zużycie to może także dodatkowo wystąpić w dalszej części rozruchu w przypadku małej prędkości względnej przemieszczających się powierzchni oraz dużych nacisków powierzchniowych przy niedostatecznym smarowaniu elementów zespołu TPC. Wywołuje to przerwanie się warstewki środka smarnego oraz ponowne szczepianie się mikronierówności powierzchni współpracujących elementów [4].

Obserwowane podczas rozruchu silnika spalinowego zużycie ściernie wywołane jest obecnością luźnych cząstek ściernych oraz bezpośrednim kontaktem współpracujących powierzchni elementów zespołu TPC. Cząstki ściernie są produktami wcześniejszego (postojowego) zużycia korozyjnego, początkowego zużycia adhezyjnego oraz zanieczyszczeniami dostającymi się do komory spalania wraz z powietrzem [4].

Opisane powyżej trzy rodzaje zużycia, które występują podczas rozruchu silnika spalinowego powodują, że obserwowane zużycie zespołu TPC, nazywane zużyciem rozruchowym charakteryzuje się większą intensywnością niż zużycie występujące podczas normalnego działania silnika [3, 5].

Wartości tzw. ekwiwalentnego zużycia rozruchowego, czyli zużycia występującego podczas jednego rozruchu, elementów zespołu TPC, wg różnych autorów [3, 5], wahają się od kilku do kilkuset kilometrów przebiegu pojazdu albo kilkunastu godzin działania silnika na hamowni silnikowej. Zmienność tych wyników spowodowana jest występowaniem opisanych wcześniej złożonych procesów tribologicznych podczas rozruchu silników spalinowych. Niewielka zaś liczba publikacji naukowych prezentujących wartości zużycia rozruchowego zespołu TPC silnika ma źródło w pracochłonności badań procesów jego zużywania się.

W niniejszym artykule autorzy próbują poszerzyć wiedzę na temat wielkości oraz charakteru ekwiwalentnego zużycia rozruchowego elementów zespołu TPC silnika spalinowego, porównując własne wyniki stanowiskowych oraz eksploatacyjnych badań zużycia tulei cylindrowej silników o zapłonie samoczynnym.

BADANIA STANOWISKOWE ORAZ EKSPLOATACYJNE

Objektami badań były silniki 4CT90 o zapłonie samoczynnym będące jednostkami napędowymi samochodów serii LUBLIN. Silnik 4CT90 posiada pośredni wtrysk paliwa i charakteryzuje się pojemnością skokową $2,417 \text{ dm}^3$, rzędownym układem cylindrów o średnicy 90 mm i skoku tłoka 95 mm. Silnik 4CT90 rozwija moc maksymalną 66 kW. Maksymalny moment obrotowy silnika 4CT90 wynosi 195 Nm przy 2500 obr/min. W zespole TPC tego silnika zastosowano tłok z dwoma pierścieniami uszczelniającymi oraz jednym zgarniającym.

Ocenę wartości zużycia rozruchowego silnika 4CT90 dokonano na stanowisku badawczym Katedry Silników Spalinowych i Transportu Politechniki Lubelskiej, przeprowadzając badania „rozruchowe”. Badania te polegały na wykonaniu serii uruchomień testowanego silnika w temperaturach 18°C, 35°C, 55°C oraz 75°C [1]. Także w laboratorium KSiT przeprowadzono badania hamowniane, w których silnik 4CT90 pracował pod różnymi obciążeniami i przy zmiennych prędkościach obrotowych wału korbowego 200 godzin wg normy [10]. Badaniami eksploatacyjnymi objęto silnik 4CT90 zamontowany w samochodzie LUBLIN III użytkowanym przez Zakład Transportu Samochodowego Poczty Polskiej w Lublinie. Ocenę zużycia dokonano po przebiegu pojazdu wynoszącym 95726 km.

W przeprowadzonych badaniach miarą zużycia gładzi tulei cylindrowej silnika 4CT90 jest zmiana (przyrost) jej wewnętrznej średnicy. Pomiarów zmian średnicy dokonano w kilku pozio-

mach i kierunkach pomiarowych zgodnie z Normą Branżową BN-79/1374-04. W celu uniknięcia całkowitego demontażu badanych silników pomiary wykonano tylko po zdjęciu głowic. Do pomiaru zużycia tulei cylindrowej silnika 4CT90 w warunkach laboratoryjnych użyto metody „sztucznych baz” [1]. Do oceny zużycia eksploatacyjnego wykorzystano średnicówkę elektroniczną typu CBGDU 30 o zakresie pomiarowym 50÷150 mm.

WYNIKI BADAŃ

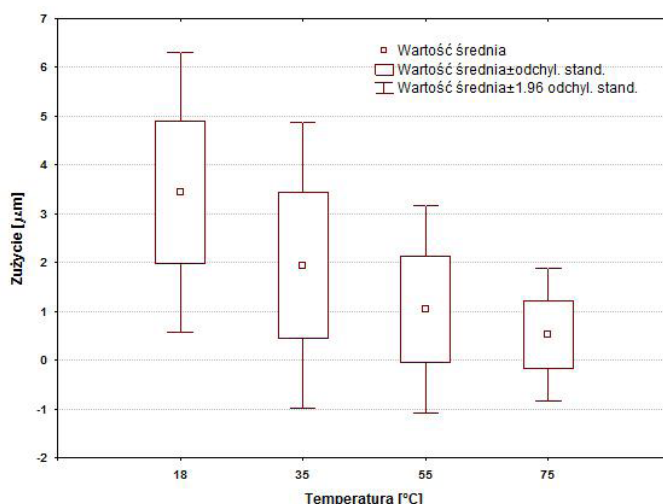
Uzyskane wyniki badań poddano analizie statystycznej przy użyciu programu statystycznego STATISTICA. Wybrane parametry statystyczne zaprezentowano w tabeli 1.

Tab. 1. Parametry statystyczne zużycia tulei cylindrowych silnika 4CT90

Tab. 1. Statistical parameters of cylinder liner wear in a 4CT90 engine

	Wartość średnia d_{sr} [μm]	Wariancja Var (d) [μm^2]	Odchylenie standardowe σ_d [μm]	Mediana m_e [μm]	Moda [μm]	Wartość max [μm]	Wartość min [μm]
Seria 1 rozruchów	3,4251	2,1512	1,4667	2,3386	2,2439	6,6750	1,8084
Seria 2 rozruchów	1,9162	2,2655	1,5051	2,1492	0,000	4,6582	0,000
Seria 3 rozruchów	1,0393	1,1826	1,0874	0,000	0,000	2,7362	0,000
Seria 4 rozruchów	0,5145	0,4825	0,6946	0,000	0,000	1,5717	0,000
Badania hamowniane	3,1266	4,5160	2,1251	2,3054	0,00	7,7046	0,000
Badania eksploata- cyjne	19,2589	5,1305	2,2650	19,00	18,00	24,00	14,000

Wyniki badań „rozruchowych” wykazały, że w miarę spadku temperatury rozruchu silnika 4CT90 obserwuje się wzrost wartości zużycia rozruchowego jego tulei cylindrowej od wartości 0,5 μm w temperaturze 75°C do 3,4 μm w 18°C [1]. Ilustruje to rysunek 1, na którym zaprezentowano skategoryzowany wykres zużycia rozruchowego po 1000 uruchomieniach badanego silnika w różnych temperaturach rozruchu.



Rys. 1. Skategoryzowany wykres zużycia tulei silnika 4CT90 po 1000 rozruchach w określonej temperaturze

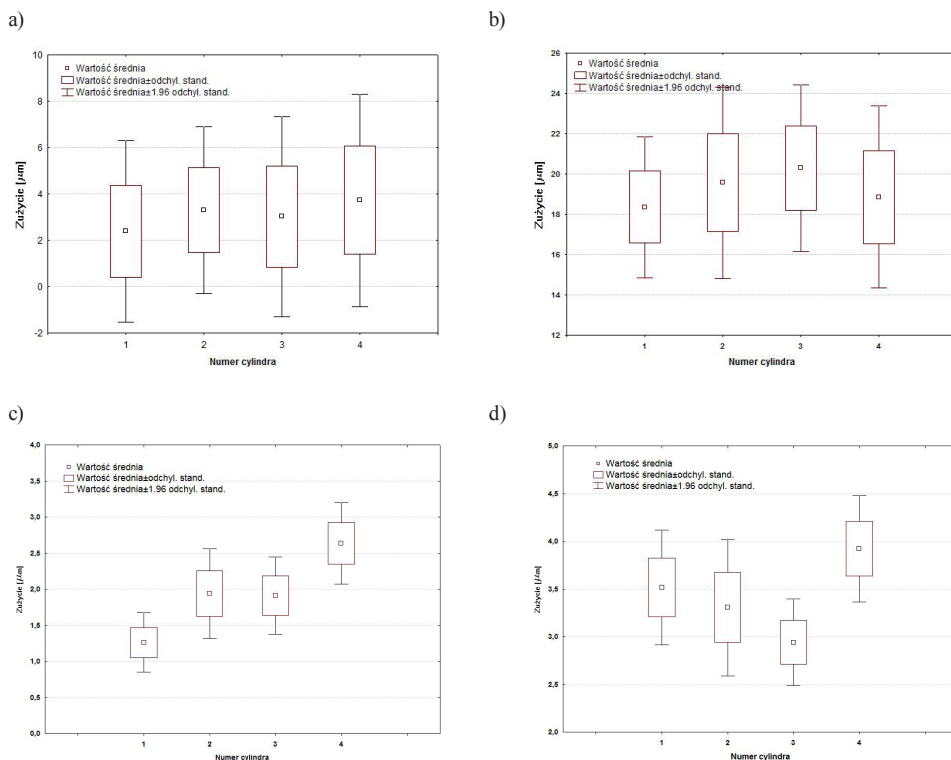
Fig. 1. A box-and-whisker diagram of the wear of a 4CT90 engine cylinder liner after 1000 start-ups at the specified temperatures

Potwierdzeniem wpływu temperatury rozruchu na wartość zużycia tulei cylindrowej podczas rozruchu silnika 4CT90 są wyniki analizy wariacji zaprezentowane w tabeli 2. Ze względu na niespełnienie założeń klasycznej analizy wariacji dla obserwowanych zużyć średnic tulei cylindrowych silników 4CT90 zastosowano nieparametryczną metodę analizy wariacji przy użyciu testu Kruskala-Wallisa (K-W).

Analizując wyniki zawarte w tabeli 2 należy także stwierdzić, że zaobserwowane zużycie gładzi tulei podczas badań eksploatacyjnych zależy od numeru cylindra. Przeciwnieństwem tego są wyniki badań hamownianych, w których stwierdzono brak zależności zużycia w zależności od cylindra. Dla zużycia „rozruchowego” silnika 4CT90 obserwuje się wpływ numeru cylindra tylko dla serii rozruchów w temperaturze 18°C i 35°C. Ilustracją tego są wykresy skategoryzowane z rysunku 2. Znacząca wartość zużycia tulei nr 4 podczas rozruchów badanego silnika spalinowego wynika z najdłuższej drogi w układzie olejenia, jaką ma do przebycia olej smarujący podczas rozruchu.

Tab. 2. Wyniki testu Kruskala-Wallis dla zużycia silników 4CT90; (różne czynniki grupujące)
 Tab. 2. Results of the Kruskal-Wallis test for the wear of 4CT90 engines; (various grouping factors)

Czynnik grupujący	Badania „rozzruchowe”			Badania hamowniane			Badania eksploatacyjne		
	K-W	Wartość p	Wpływ czynnika	K-W	Wartość p	Wpływ czynnika	K-W	Wartość p	Wpływ czynnika
Temperatura	196.504	0.000	Znaczący	–	–	–	–	–	–
Cylinder	14.034	0.0029	Znaczący	6.118	0.1060	nieznaczący	12.345	0.0063	Znaczący
Cylinder (seria 1)	14.751	0.0021	Znaczący	–	–	–	–	–	–
Cylinder (seria 2)	12.036	0.0073	Znaczący	–	–	–	–	–	–
Cylinder (seria 3)	5.249	0.1545	nieznaczący	–	–	–	–	–	–
Cylinder (seria 4)	2.019	0.5683	nieznaczący	–	–	–	–	–	–
Poziom	6.069	0.4155	nieznaczący	3.247	0.7772	nieznaczący	28.272	0.0001	Znaczący
Poziom (seria 1)	14.141	0.0281	Znaczący	–	–	–	–	–	–
Poziom (seria 2)	3.017	0.8066	nieznaczący	–	–	–	–	–	–
Poziom (seria 3)	7.912	0.2446	nieznaczący	–	–	–	–	–	–
Poziom (seria 4)	3.866	0.6947	nieznaczący	–	–	–	–	–	–
Kierunek	1.616	0.6556	nieznaczący	11.587	0.0089	Znaczący	27.941	0.0000	Znaczący
Kierunek (seria 1)	2.695	0.4410	nieznaczący	–	–	–	–	–	–
Kierunek (seria 2)	2.525	0.4707	nieznaczący	–	–	–	–	–	–
Kierunek (seria 3)	0.787	0.8524	nieznaczący	–	–	–	–	–	–
Kierunek (seria 4)	1.280	0.7337	nieznaczący	–	–	–	–	–	–



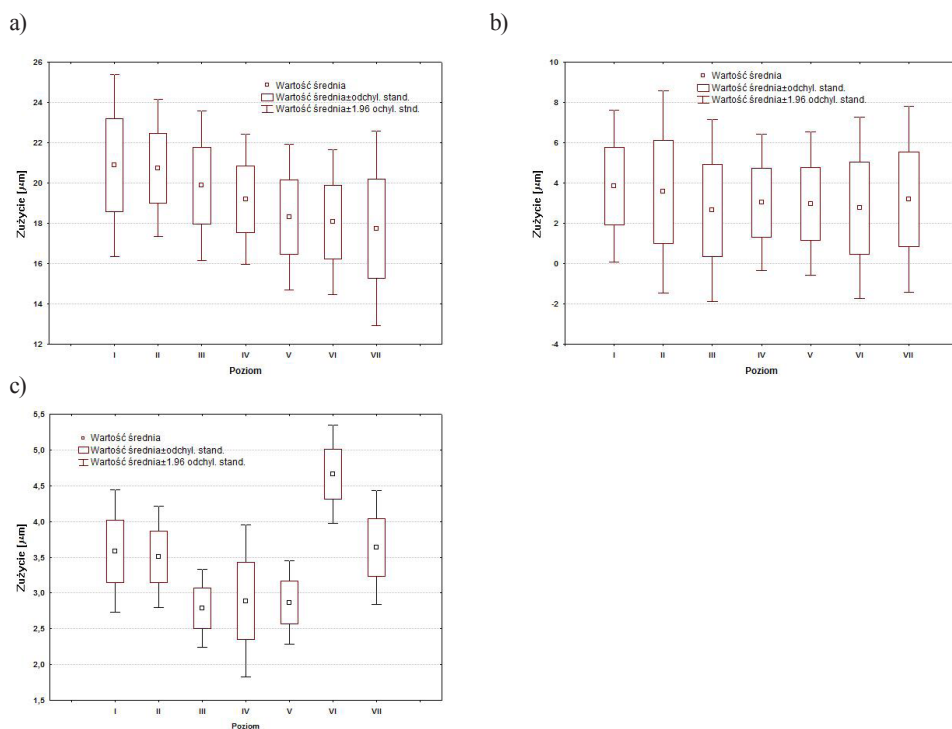
Rys. 2. Skategoryzowany wykresy zużycia tulei silnika 4CT90 w zależności od numeru cylindra; a) badania hamowniane, b) badania eksploatacyjne, c) badania rozruchów w temperaturze 18°C, d) badania rozruchów w temperaturze 35°C

Fig. 2. Box-and-whisker diagrams of the wear of the 4CT90 engine's liner as a function of cylinder number; a) bench tests, b) operational tests, c) start-up tests at 18°C, d) start-up tests at 35°C

Wyniki z tabeli 2 wskazują także na fakt, że zużycie tulei cylindrowych podczas badań eksploatacyjnych zależy od poziomu pomiarowego. W miarę jego obniżania się względem głowicy silnika mierzona wartość zużycia tulei zmniejsza się. Nie zaobserwowano takiej zależności w wynikach badań hamownianych. Można zatem przypuszczać, że ta rozbieżność wynika z różnic w charakterze pracy silnika podczas badań hamownianych i eksploatacyjnych. W badaniach „rozruchowych” obserwuje się tylko wpływ poziomu oceny zużycia dla serii rozruchów w temperaturze 18°C. Największe wartości zużycia występują w pobliżu dolnego zwrotnego położenia górnego pierścienia cylindrowego, co przedstawiają wykresy skategoryzowane z rysunku 3.

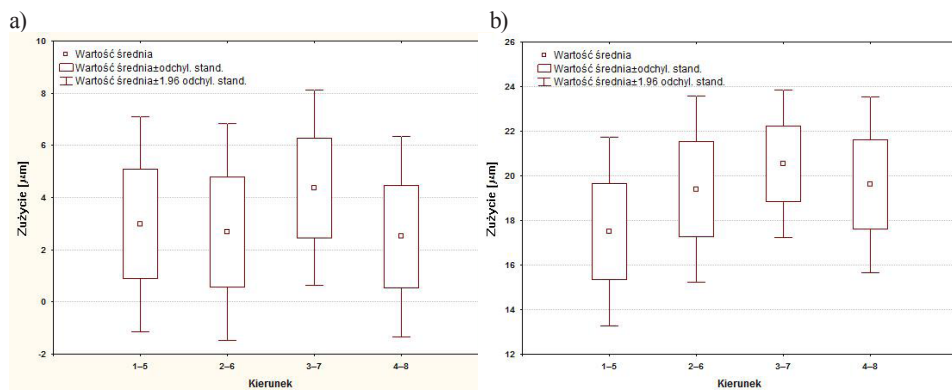
Przeprowadzona analiza wariancji pokazuje także, że zarówno w badaniach hamownianych i eksploatacyjnych istotnym czynnikiem grupującym jest kierunek pomiaru zużycia tulei cylindrowej silnika 4CT90. Na kierunku działania siły normalnej (kierunek 3-7) obserwuje się większe przyrosty jej średnicy. Ilustracją tego są wykresy skategoryzowane przedstawione na rysunku 4.

Zużycie tulei zaobserwowane w czasie badań „rozruchowych” nie zależy natomiast od kierunku pomiarowego. Wynika to z faktu, że podczas rozruchu silnika siła normalna charakteryzuje się mniejszymi wartościami niż podczas jego pracy.



Rys. 3. Skategoryzowany wykresy zużycia tulei silnika 4CT90 w zależności od poziomu pomiarowego; a) badania hamowniane, b) badania eksploatacyjne, c) badania rozruchów w temperaturze 18°C

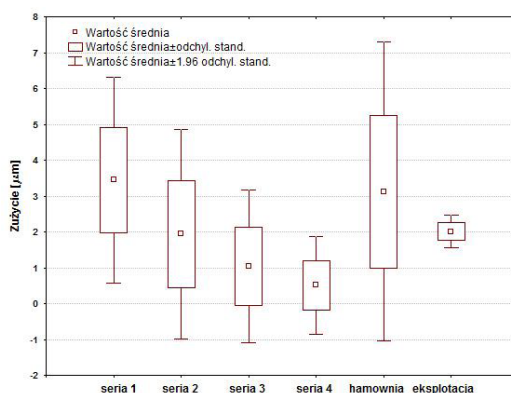
Fig. 3. Box-and-whisker diagrams of the wear of the 4CT90 engine's liner as a function of position of measurement; a) bench tests, b) operational tests, c) start-up tests at 18°C



Rys. 4. Skategoryzowany wykresy zużycia tulei silnika 4CT90 w zależności od kierunku pomiarowego; a) badania hamowniane, b) badania eksploatacyjne

Fig. 4. Box-and-whisker diagrams of the wear of the 4CT90 engine's liner as a function of direction of measurement; a) bench tests, b) operational tests

Rysunek 5 przedstawia skategoryzowany wykres zużycia tulei cylindrowych badanych silników 4CT90. Jednostką zużycie stanowi mikrometr przyrostem średnicy tulei na dystansie 10 tys. km drogi przebytej przez pojazd. Jak wynika z rysunku 5 oraz wyników przeprowadzonej analizy wariancji (wartość testu K-W: 270,70; wartość $p = 0,005$) średnie wartości mierzonych zużyć podczas różnych rodzajów badań są względem siebie istotnie różne. Ekwiwalentne średnie zużycie rozruchowe tulei cylindrowej po 1000 rozruchach w temperaturze 18°C odpowiada jej średniemu zużyciu po 200 godzinach pracy silnika na hamowni, zaś średnie zużycie rozruchowe tulei po 1000 rozruchach w temperaturze 35°C odpowiada jej średniemu zużyciu po przebiegu pojazdu rzędu 10 tys. km.



Rys. 5. Skategoryzowany wykres zużycia tulei silnika 4CT90 w zależności od rodzaju badań

Fig. 5. A box-and whisker diagram of the 4CT90 engine's liner wear as a function of test type

WNIOSKI

Na podstawie uzyskanych wyników dla przeprowadzonych badań silników 4CT90 pojazdu LUBLIN można opracować następujące wnioski.

1. Badania „rozruchowe” pokazują, że przyrost średnicy wewnętrznej tulei cylindrowych w wyniku serii uruchomień silnika wyraźnie zależy od temperatury silnika w chwili rozruchu. Wyniki pomiarów wykazują słabą zależność od kierunku i poziomu pomiarowego.
2. Zużycie tulei cylindrowych podczas badań hamownianych i eksploatacyjnych jest zależne od kierunku pomiarowego. Największe wartości zużycia w silniku obserwujemy dla kierunku działania siły normalnej.
3. Średnie zużycie rozruchowe tulei cylindrowej po 1000 rozruchach badanego silnika w temperaturze 35°C jest równoważne zużyciu eksploatacyjnemu na odcinku 10 tys. km. Rozruchowe zużycie tulei po 1000 rozruchach silnika w temperaturze 18°C odpowiada 200 godzinom pracy w warunkach badań hamownianych.

LITERATURA

1. Drożdździ P., Kordos P.: Zużycia rozruchowe a zużycie eksploatacyjne tulei cylindrowych silnika spalinowego o ZS. Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Oficerskiej Wojsk Lądowych im gen. Tadeusza Kościuszki Wydanie specjalne: Problemy eksploatacji uzbrojenia i sprzętu wojskowego, Wyd. WSOWL we Wrocławiu. Wrocław, 2005.

2. Holmes K.: Solid Materials. Engine Tribology. C. M. Taylor (Editor). Tribology Series, 26. Elsevier. Amsterdam, 1993.
3. Koliński K., Pszczółkowski J.: Zużycie cylindrów silnika AD 4.236 w warunkach rozruchu. Eksploatacja silników spalinowych. Zeszyt nr 6. Problemy rozruchu silników spalinowych. Komisja Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa PAN O/Lublin, Politechnika Szczecińska. Szczecin, 2002.
4. Lawrowski Z: Tribologia – Tarcie, zużywanie i smarowanie. PWN. Warszawa, 1993.
5. Lewicki J.: Opory tarcia i zużycie silników z zapłonem samoczynnym przy rozruchu w niskich temperaturach. Prace Naukowe Pol. Szczecińskiej, nr 353. Szczecin, 1988.
6. Mysłowski J.: Rozruch silników samochodowych z zapłonem samoczynnym. WNT. Warszawa, 1996.
7. Taylor C. M.: Lubrication regimes and the internal combustion engine. Engine Tribology. C. M. Taylor (Editor). Tribology Series, 26. Elsevier. Amsterdam, 1993.
8. Uzdowski M., Abramek K., F., Garczyński K.: Eksploatacja techniczna i naprawa. Seria pojazdy samochodowe. WKiŁ. Warszawa, 2003.
9. Włodarski J. K.: Tłokowe silniki spalinowe – procesy tribologiczne. WKiŁ. Warszawa, 1982.
10. Norma BN-81/1374-07: Silniki samochodowe. Badania stanowiskowe. Pomiar zużycia oleju.

EVALUATION OF EQUIVALENT START-UP WEAR OF CYLINDER LINERS IN SELF-IGNITION ENGINES

Summary. The paper presents procedures and results of the investigation of the wear of cylinder liner surfaces in diesel engines. The investigations were conducted in laboratory and field tests. The aim of the studies was to evaluate the start-up of the engine wear and to compare these results with the wear observed during another investigation.

Key words: diesel engine, cylinder liner, wear.