

WPLYW WARUNKÓW PRACY SILNIKA SPALINOWEGO PODCZAS BADAŃ STANOWISKOWYCH NA ZUŻYCIE TULEI CYLINDROWEJ

THE INFLUENCE OF THE COMBUSTION ENGINE WORK CONDITIONS ON THE CYLINDER WEAR IN THE STAND TEST RESEARCHES

Występujące różnice w warunkach pracy silnika spalinowego na stanowisku badawczym i podczas rzeczywistej eksploatacji prowadzą do rozbieżności w wynikach zużycia konstrukcji całego silnika oraz jego elementów. Z tego względu ważne jest odpowiedzenie na pytania jak warunki pracy silnika spalinowego podczas badań stanowiskowych wpływają na zużycie jego tulei cylindrowej oraz czy można tak otrzymane wyniki zużycia porównywać z wynikami uzyskanymi podczas rzeczywistej jego eksploatacji w pojeździe. Artykuł próbuje odpowiedzieć na te pytania poprzez porównanie wartości zużycia tulei cylindrowych w trakcie trzech niezawodnościowych badań stanowiskowych z wynikami długotrwałej eksploatacji tego samego typu silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym w pojeździe.

Słowa kluczowe: badania stanowiskowe, silnik, tuleja cylindrowa, zużycie

The differences between the work of the engine during the test-stand researches and the real operation lead to the dissimilarity in the obtained results of the chosen elements and the whole engine wear. For that reason, it is very important to answer the questions: how the conditions of the engine work during the test-stand researches influence its cylinder wear and whether it is possible to compare the obtained results with the results occurring during the real maintenance of a vehicle. This article tries to answer these questions by comparing the values of diesel engine cylinder wear received during three reliability test-stand researches and the long-term maintenance of the same type of the combustion engine in the vehicle.

Keywords: test-stand research, engine, cylinder, wear

1. Wstęp

Stanowiskowe badania niezawodności samochodowych silników spalinowych przeprowadza się w celu określenia zużycia wybranych elementów silnika spalinowego, a tym samym oceny trwałości stosowanych elementów oraz całej konstrukcji silnika. Pomimo, że badania takie są długotrwałe oraz wymagają znacznych nakładów finansowych są one systematycznie prowadzone. Podczas testów niezawodności silnik spalinowy pracuje na stanowisku badawczym powtarzając wielokrotnie tzw. pojedynczy cykl testowy.

W pojedynczym cyklu testowym zakłada się kolejne czasy pracy silnika przy zadanych, różnych wartościach prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia. Cechą charakterystyczną pojedynczych cykli testowych jest niezmienność, w określonym czasie trwania cyklu, dwóch podstawowych parametrów pracy silnika tj.: prędkości obrotowej wału korbowego oraz obciążenia. Dodatkowo, wartość tych parametrów odpowiada „ciężkim” warunkom pracy silnika spalinowego (czy to przy mocy znamionowej, czy też przy maksymalnym momencie obrotowym). Występujące zaś okresy pracy silnika bez obciążenia podyktowane są niedopuszczeniem w trakcie przeprowadzanych badań do przegrzania i zatarcia się głównych par tribologicznych [4,5].

Dla warunków rzeczywistej eksploatacji pojazdu występuje większa zmienność wartości tych dwóch parametrów, przy jednoczesnym znacznym udziale częściowych obciążeń silnika. Kolejną różnicą pomiędzy pracą silnika spalinowego na stanowisku badawczym, a rzeczywistą eksploatacją jest częstotliwość jego rozruchów. W warunkach rzeczywistej eksploatacji w samochodzie są one dokonywane znacznie częściej [6].

Występujące różnice w warunkach pracy silnika spalinowego na stanowisku badawczym i podczas rzeczywistej eksploatacji

1. Introduction

The durability test-stand researches of the vehicle combustion engines are carried out to estimate the wear of their chosen elements and the reliability of the used elements and the construction of the whole engine. Therefore, despite of the long duration and the high price, test-stand researches are systematically realized. During these researches, the engine is run according to the multiple repeated cycle of the operation. The single test cycle assumes the following operation times with defined and different values of the crankshaft rotational speed and the load. The characteristic feature of the presented single test cycles is the invariability of the two main parameters of the engine work: the rotational speed and the load during the defined cycle duration. Moreover, their values correspond to the „heavy” conditions of the operation (i.e. the rated power of a maximum torque). The present time intervals of the idle operation are aimed to avoid overheating and seizing of the main tribological pairs [4,5].

In the conditions of the real operation, the values of these two parameters are much more diversified (the city driving) with a high share of partial loads (the inter-city driving). Another significant difference between the test-stand reliability evaluation and the real operation is the frequency of the engine start-ups. In the real conditions the engine start-ups are far more frequent [6]. The differences between the work of the engine during the test-stand researches and the real operation lead to the dissimilarity in the obtained results of the chosen elements and the whole engine wear. For that reason, it is very important to answer the questions: how the conditions of the engine work during the test-stand researches influence its cylinder wear and whether it is possible to compare the obtained results with the results occurring during the real maintenance of a vehicle [1,3].

prowadzą do rozbieżności w wynikach zużycia konstrukcji całego silnika oraz jego elementów. Z tego względu ważne jest odpowiedzenie na pytania jak warunki pracy silnika spalinowego podczas badań stanowiskowych wpływają na zużycie jego tulei cylindrowej oraz czy można tak otrzymane wyniki zużycia porównywać z wynikami uzyskanymi podczas rzeczywistej jego eksploatacji w pojeździe [1,3]. Artykuł próbuje odpowiedzieć na te pytania poprzez porównanie wartości zużycia tulei cylindrowych w trakcie trzech niezawodnościowych badań stanowiskowych z wynikami długotrwałej eksploatacji tego samego typu silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym w pojeździe.

2. Badania doświadczalne

Obiektem badań, w których oceniano zużycie tulei cylindrowej był silnik spalinowy 4CT90. Ten 4-cylindrowy silnik o zapłonie samoczynnym produkowanym przez WSK „Andoria” w Andrychowie jest jednostką napędową samochodu dostawczego LUBLIN. Silnik ten, o wtrysku pośrednim, posiada objętość skokową 2,417 litra, skok tłoka wynosi 95 mm, średnica cylindra – 90 mm, maksymalna moc wynosi 63,5 kW przy 4100 obr/min, moment maksymalny – 195 Nm przy 2500 obr/min.

W celu odpowiedzi na postawione pytania przeprowadzono następujące badania zużycia tulei cylindrowych silnika spalinowego 4CT90 o zapłonie samoczynnym [4]:

1. badania podczas długotrwałej eksploatacji (5 silników),
2. badania na stanowisku badawczym wg „próby standardowej” opisanej w normie BN-79/1374-04,
3. badania na stanowisku laboratoryjnym wg „próby dużych obciążeń”,
4. badania na stanowisku laboratoryjnym wg „próby rozruchowej”.

W tabeli 1 zaprezentowano warunki pracy silnika oraz czas trwania prób podczas ww. badań stanowiskowych.

Tab. 1. Warunki pracy silnika podczas badań stanowiskowych
Tab. 1. The conditions of the engine work during laboratory test

Warunki pracy The work conditions	„Próba rozruchowa” The „start-up test”	„Próba dużych obciążeń” The „large load test”	„Próba standardowa” The „standard test”
Czas trwania próby [godz] The time of duration of the test [hours]	100	250	300
Liczba rozruchów [-] The number of the engine start-ups [-]	1000	1	100
Udział procentowy czasu trwania serii rozruchów w trakcie próby [%] The percentage fraction of the time of the engine start-up series during the test [%]	91	nie dotyczy	nie dotyczy
Udział procentowy biegu jałowego podczas próby [%] The percentage fraction of the time of the engine idle operation during the test [%]	9	0	11.0
Udział procentowy pracy silnika przy maksymalnym momencie obrotowym [%] The percentage fraction of the engine work time with the max power during the test [%]	0	0	33.5
Udział procentowy pracy silnika przy maksymalnej mocy [%] The percentage fraction of the engine standstill time during the test [%]	0	100	44.5
Udział procentowy postoju silnika [%] The percentage fraction of the engine standstill time during the test [%]	0	0	5.5
Udział procentowy pracy silnika przy prędkości maksymalnej [%] The percentage fraction of the engine work time with the max rpm during the test [%]	0	0	5.5

This article tries to answer these questions by comparing the values of diesel engine cylinder wear received during three reliability test-stand researches and the long-term maintenance of the same type of the combustion engine in the vehicle.

2. Researches

The research object used to estimate the cylinder wear was the 4CT90 engine. The 4CT90 is a combustion self-ignition diesel engine. It is produced by a Diesel Engines Factory „ANDORIA S.A.” in Andrychów. The 4CT90 is installed in LUBLIN III delivery truck. This engine is characterized by the following general dates: the cubic capacity: 2.417 dm³, the max. power 63.5 kW at 4100 rpm and it develops the maximum moment 195 Nm at 2500 rpm.

The following researches of the cylinder wear were carried out to answer these questions [4]:

1. the researches during a long-term operation of five engines in vehicles;
2. the researches done in the laboratory conditions with the use of the „standard test” described in BN-79/1374-04 norm;
3. the researches done in the laboratory conditions with the use of the „large load test”;
4. the researches done in laboratory conditions with the use of the „start-up test”.

The conditions of the engine work and the time of these laboratory researches duration are presented in the table 1.

Zużycia tulei cylindrowych na stanowisku badawczym oceniano przy pomocy metody „sztucznych baz”, podczas badań eksploatacyjnych zastosowano zaś średnicówkę dwupunktową. Pomiarów dokonywano na wysokościach i kierunkach wymaganych w normie BN-79/1374-04.

3. Wyniki badań

W celu porównania uzyskanych wyników zużycia w wykonanych badaniach stanowiskowych ze zużyciem zaobserwowanym podczas eksploatacji pojazdu (przebieg rzędu 100 tys. km) dokonano ich przeliczenia. Przyjęto przy tym, że 1 godzina pracy silnika na hamowni podczas „próby dużych obciążeń” i „próby standardowej” odpowiada przebiegowi pojazdu wynoszącemu 60 km, zaś rozruchy odbywają się średnio co 7 km [4].

Wyniki otrzymanych zużyć poddano analizie statystycznej przy wykorzystaniu programu STATISTICA. W pierwszym kroku tej analizy opracowano statystyki opisowe dla uzyskanych wartości zużycia, co zaprezentowano w tabeli 2. Na rysunku 1 zaprezentowano zaś histogramy rozkładu zużycia tulei cylindrowych otrzymanych w trakcie przeprowadzonych badań. Przeprowadzona ocena normalności rozkładów empirycznych wykazała, że zużycie tulei cylindrowej podczas eksploatacji (statystyka χ^2 ma wartość 15,38 i poziom prawdopodobieństwa $p = 0,05205$) oraz po „próbie rozruchowej” można aproksymować rozkładem normalnym (statystyka $\chi^2 = 13,64$ i $p = 0,135$). Natomiast rozkładów zużycia uzyskanych podczas „próby standardowej” ($\chi^2 = 80,08$ i $p = 0,00$) oraz podczas „próby dużych obciążeń” ($\chi^2 = 197,28$ i $p = 0,00$) nie można aproksymować tego typu rozkładem [2].

Na podstawie wyników badań stwierdzono, że średnie zużycie tulei cylindrowych silnika na stanowisku badawczym po „próbie rozruchowej” stanowi 85,5% całkowitego średniego zużycia podczas eksploatacji silnika w pojeździe, który wykonał taką samą liczbę rozruchów jak w trakcie próby rozruchowej. Dla „próby standardowej” i „próby dużych obciążeń” średnie zużycie jest większe i stanowi odpowiedni 103,4% i 107,5% średniego zużycia podczas eksploatacji silnika w pojeździe.

W celu odpowiedzi na pytanie, czy uzyskane wartości średnie zużycia w poszczególnych badaniach różnią się istotnie od siebie, wykonano analizę wariancji. Ze względu na nie spełnienie warunku normalności rozkładów wartości uzyskanych zużyć dokonano tego przy wykorzystaniu nieparametrycznego testu Kruskala-Willisa [2]. W obliczeniach stwierdzono, że

The estimation of the cylinder wear during three laboratory tests was carried out with the use of the „artificial bases” method. An inside micrometer was applied to investigate the engine cylinder wear during the vehicle maintenance. The locations of the wear measurement points are described in the branch standard BN-79/1374-04.

3. The results of the researches

The authors counted over the value of the engine cylinder wear to compare the results of the laboratory tests and its maintenance. It has been assumed that one-hour work in the laboratory conditions during the „large load test” and the „standard test” is adequate to 60 km of the vehicle ride. The frequency of the engine start-ups is every 7 km. This comparison was carried out during 100 thou. km vehicle ride [4].

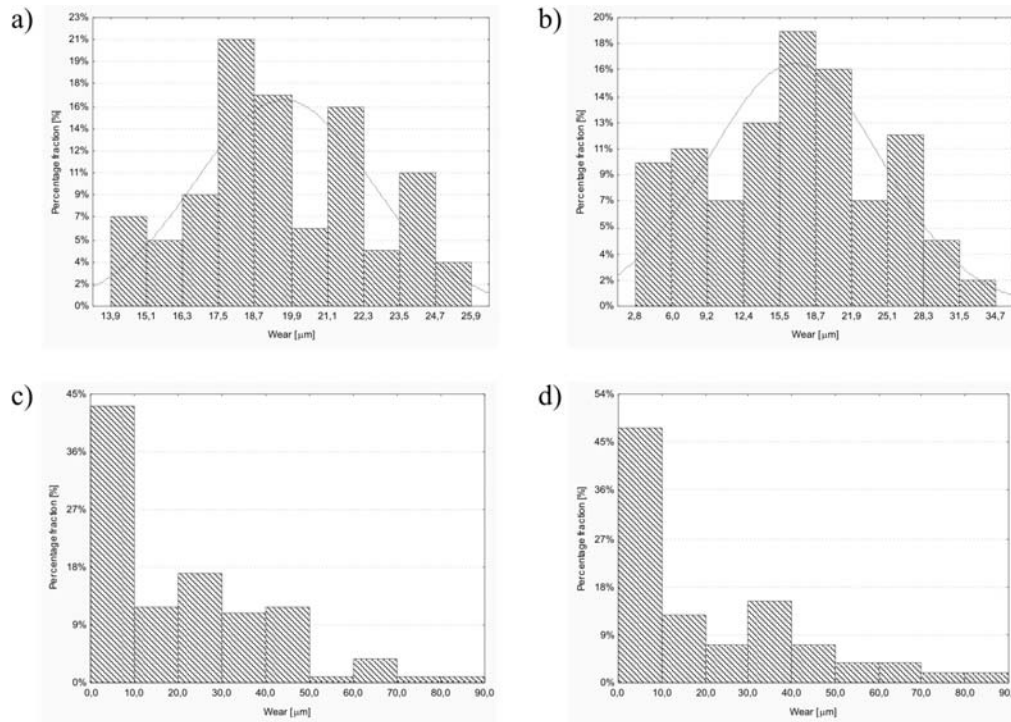
The results of the obtained cylinder wear were statistically analyzed with the use of STATISTICA program. Firstly the chosen statistic parameters were prepared, which is presented in the table 2. The figure 1 shows the histogram of the statistical distribution of the cylinder wear obtained during the researches. The conducted estimation shows that the obtained results of the cylinder wear during the maintenance (the $\chi^2 = 15.38$ with $p = 0.05205$) and the „start-up test” (the $\chi^2 = 13.64$ with $p = 0.135$) are possible to approximate with the use of the normal distribution. On the other hand the cylinder wear distribution gained in the „large load test” (the $\chi^2 = 80.08$ $p = 0.00$) and the „standard test” (the $\chi^2 = 197.00$ with $p = 0.00$) can't be approximated using the normal distribution [2].

Basing on the obtained results, of the researches it was stated that the mean value of the cylinder wear measured after the „start-up test” is equal 85.5% of the whole mean cylinder wear during the engine maintenance in the vehicle. The engine carried out the same number of start-ups as during the start-up test. The mean wear is equal 103.4% for the „standard test” and 107.5% for the „large load test”.

Secondly the variance analysis was carried out to answer the question whether the obtained mean values of the cylinder wear were essentially different in each research. The authors used the non-parametric Kruskal-Willis test because the condition for the normal distribution of the cylinder wear wasn't fulfilled. The calculations showed that the value of H statistic was equal 7.4955 when probability p was equal 0.0577. This result allows us to state that the mean cylinder wear obtained during the „large load test” and the „standard test” are different than those gained during

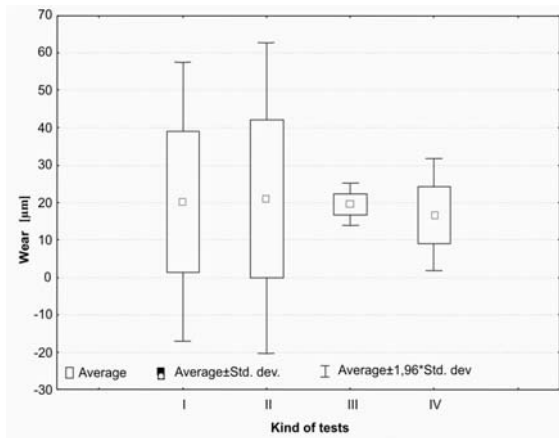
Tab. 2. Parametry położenia i rozrzutu zużycia rozruchowego tulei dla silnika 4C90
 Tab. 2. Location and scatter parameters of the start up wear for the 4C90 engine cylinder

	Wartość średnia Mean value \bar{d} [μm]	Wariancja Variance $\text{Var}(d)$ [μm^2]	Odchylenie standardowe Standard deviation σ_d [μm]	Błąd standardowy Standard error δ_d [μm]	Mediana Median m_e [μm]	Współ. zmienności Coefficient of variation v [%]	Wartość max Max value [μm]	Wartość min Min value [μm]
Eksploatacja Maintenance	19,66	8,53	2,92	0,275	19,45	14,85	25,94	13,89
BN 79/1374-04 The „standard test”	20,33	361,66	19,01	1,796	16,32	93,07	85,71	0,04
Próba dużych obciążeń The „large load test”	21,14	448,19	21,17	2,000	13,15	100,14	83,33	0,04
Próba rozruchowa The „start-up test”	16,81	59,58	7,71	0,729	17,25	45,86	34,71	2,77



Rys. 1. Histogram rozkładu wartości zużycia tulei cylindrowych; a) po długotrwałej eksploatacji, b) po „próbie rozruchowej”, c) po „próbie dużych obciążeń” d) po „próbie standardowej”

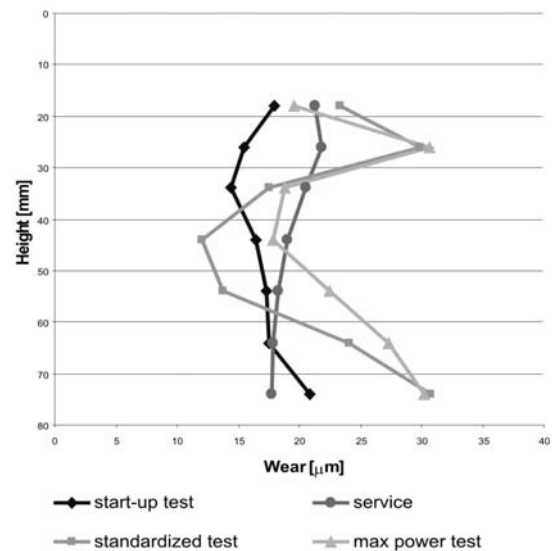
Fig. 1. Histogram of the cylinder wear value distribution; a) after long maintenance, b) after the „start-up test”, c) after the „large loads test”, d) after the „standard test”



Rys. 2. Skategoryzowany wykres ramkowy średnich wartości zużycia tulei cylindrowej; I) po „próbie dużych obciążeń”, II) po „próbie standardowej”, III) po długotrwałej eksploatacji, IV) po „próbie rozruchowej”

Fig. 2. Scatter diagram for the mean value of cylinder wear; I) after the „large loads test”, II) after the „standard test”, III) after long maintenance, IV) after the „start-up test”

wartość statystyki wynosi $H = 7,4955$ dla $p = 0,0577$. Pozwala to na stwierdzenie, że uzyskane wartości średnie zużycia w „próbie dużych obciążeń” i w „próbie standardowej” statystycznie różnią się od wartości zużycia uzyskanych podczas eksploatacji i „próby rozruchowej”. Ilustracją tego jest skategoryzowany wykres ramkowy przedstawiony na rysunku 2 na którym pokazano wartość



Rys. 3. Profile zużycia tulei cylindrowych silników
Fig. 3. Wear profile of the engines cylinder liners

the „start-up test” and the maintenance. It is shown on the figure 2 with the scatter diagram for the 4CT90 engine cylinder wear in the function of the type of the researches.

The differences in the obtained results of the cylinder wear are also apparent along the height of the cylinder liner (see fig. 3). Basing on the comparison of the wear profile of the cylinder

zużycia tulei cylindrowych silnika 4CT90 w funkcji czynnika grupującego, jakim jest rodzaj badań.

Różnice pomiędzy otrzymanymi wynikami zużycia są także widoczne na różnych wysokościach wzdłuż tulei cylindrowej, co zaprezentowano na rysunku 3. Na podstawie porównania profili zużycia tulei cylindrowej (zob. rys. 3) stwierdzono, że zarówno dla „próby standardowej”, jak i „próby dużych obciążeń” największe wartości zużycia wystąpiły w pobliżu górnego i dolnego zwrotnego położenia pierścieni tłokowych. Natomiast w nowej „próbie rozruchowej” i podczas eksploatacji uzyskano bardziej równomierny profil zużycia tulei. Ze wszystkich trzech porównanych prób stanowiskowych najbardziej zbliżony do eksploatacyjnego profil zużycia uzyskano podczas „próby rozruchowej”.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stanowiskowych i eksploatacyjnych stwierdzono, że:

1. Warunki pracy silnika spalinowego podczas badań stanowiskowych mają istotny wpływ na wartość zużycia jego tulei cylindrowej. Wpływają one nie tylko na wartość tego zużycia ale przede wszystkim na jego charakter.
2. Dokonywanie porównania wartości zużycia uzyskiwanego podczas badań stanowiskowych z wartościami obserwowanymi podczas rzeczywistej eksploatacji silnika spalinowego jest możliwe. Wymaga to jednak od badacza znacznej wiedzy o procesach tribologicznych zachodzących w silniku spalinowym.

Dodatkowo należy powiedzieć, że profil zużycia tulei cylindrowej w „próbie rozruchowej”, w przeciwieństwie do „próby standardowej” i „próby dużych obciążeń”, jest zgodny z profilem zużycia eksploatacyjnego. Świadczy to o podobieństwie warunków tarcia w „próbie rozruchowej” i podczas rzeczywistej eksploatacji silnika.

5. References

- [1] Becker E. P.: *Trends in tribological materials and engine technology*. Tribology International. No 37. Elsevier Science Ltd, 2004, str. 569–575.
- [2] Dobosz M.: *Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2001.
- [3] Jensen M. F., Bottiger J., Reitz H. H., Benzon M. E.: *Simulation of wear characteristics of engine cylinder*. Wear. No 253. Elsevier, 2002, str. 1044-1056.
- [4] Kordos P.: *Stanowiskowa metoda badań niezawodności samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym*. Praca Doktorska, Politechnika Lubelska, 2005.
- [5] 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, str. 107-112.
- [6] Niewczas A., Droždziel P.: *Zagadnienie prognozowania trwałości samochodowego silnika spalinowego*. Problemy Eksploatacji. Nr 3/2005. Wyd. ITEE, Radom, 2005, str. 203-211.

liner the authors affirmed that the maximum values of the cylinder wears were observed at the top turning positions of the rings for both the „large load test” and the „standard test”. However more equable wear profile of the cylinder liner was obtained during the „start-up test” and the maintenance.

4. Summary

Taking into account the laboratory and field researches we can state that:

1. The engine work conditions during the laboratory test have significant influence on the cylinder wear. These conditions affect not only the value but also the character of the wear.
2. The comparison between the engine cylinder wear obtained during the stand-test researches and maintenance test is possible. It demands investigator’s wide knowledge of the tribological processes.

Additionally we should state that the wear profile of the cylinder liner obtained in the „start-up test” is more similar to the profile obtained during the real maintenance engine service, than the profiles obtained in the „standard test” and the „large load test”. It confirms the similarity of the friction conditions in the „start-up test” and in the real operation.

Dr inż. Paweł KORDOS

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