



MICHALSKI Jacek

BADANIA PRZYCZYN ZATARCIA CYLINDRA SILNIKA DIESLA

Представлено докладность вымiару и кшталту, топографію поверхнi, параметри хрпороватості поверхнi и характеристику металографічну циліндрів кадлуба силника високотрпного 1.6D Turbo, напідзайчого самохід Полонез FSO, по пррбегу 5762 км. Стверджено одмiенны характер и wartość зузичия циліндрів 1, 2, 3 в порівнаніи з циліндром 4. Некоррзистне зузичие адхезійне глادی циліндра 4 узасадніено звікшзоним одкшталценіем пластичным поверхнi узысканей глэдзненіем, некоррзистнэ хрпороватостію поверхнi и сказамі поверхнi. Настапіло то помімо вікшзшей його твардоці, споводованей дисперсію перліту, коррзистных выдзіеліей графіту платковего з рівночзеінем мніеішзю wartoцію зузичия прміеніowego.

1. WPROWADZENIE

Silniki spalinowe tłokowe pomimo swojej ponad stuletniej historii nadal pozostają i prawdopodobnie pozostaną na najbliższe dziesięciolecie podstawową jednostką napędową środków transportu i maszyn roboczych [1]. Dla rozwoju współczesnych konstrukcji silników spalinowych pozostaje niezmiennie dążenie do zapewnienia niezawodności i trwałości elementów grupy tłokowo-cylindrowej (tłok-pierścienie tłokowe-cylinder/tuleja cylindrowa). Nastąpił rozwój materiałów stosowanych na cylindry oraz rozwój technologii kształtujących strukturę geometryczną gładzi cylindrowych.

Konstrukcyjne silników spalinowych wymagają od tulei cylindrowych spełnienia ściśle określonych kryteriów w zakresie przeniesienia zwiększonych obciążeń mechaniczno-termicznych, przy zachowaniu niezmienności kształtu otworu w zakresie wymiaru, makrogeometrii i mikrogeometrii, dużej odporności na zużycie ścierne i korozyjne oraz braku skłonności do zacierania się, dobrej zdolności do tłumienia drgań i związanej z tym odporności na zjawiska kawitacji, dobrej przewodności cieplnej jak i możliwości zmniejszenia masy i gabarytów.

2. ANALIZA LITERATURY

Układy tribologiczne grupy tłokowo-cylindrowej to: tłok-cylinder, tłok-pierścienie tłokowe, pierścienie tłokowe-cylinder i tuleja

cylindrowa-blok. Na cechy użytkowe (funkcjonalne) cylindra silnika spalinowego składa się materiał i jego właściwości mechaniczne, struktura, skład chemiczny oraz w dalszej kolejności to makroształt otworu (okrągłość, prostoliniowość, walcowość, współosiowość) jak i mikrogeometria otworu - czyli struktura geometryczna powierzchni (chropowatość, faliistość, mikrofaliistość, topografia, czystość powierzchni i skazy).

Podstawowym materiałem cylindra jest ciągle żeliwo szare niskostopowe z grafitem płatkowym o osnowie perlitycznej gatunku EN-GJL-250 [2, 3, 4]. Wysokojakościowe modyfikowane żeliwa podeutektyczne na cylindry silników do ciężkich pojazdów są z zawartością pierwiastków stopowych Mo, Cu, Ni, Cr i Mn. Właściwości mechaniczne żeliwa silnie zależą od mikrostruktury i morfologii grafitu [5]. Obniżona zawartość grafitu zwiększa wytrzymałość na rozciąganie i zmęczenie. Zarówno struktura eutektyki fosforowej jak i drobne jej wydzielenia, skutecznie poprawiają właściwości zmęczeniowe. Wytrzymałość na rozciąganie i zmęczenie, żeliwa szarego tej samej klasy różnią się od odlewni, wynika to z niejednorodności materiału. Tlen w ciekłym żelwie posiada silny wpływ na kształtowanie się struktury żeliwa, szczególnie morfologii grafitu, oraz powstawanie wad typu skurczowego [6, 7, 8, 9]. Istotne znaczenie ma

ta część tlenu, która pozostaje aktywna w kąpeli w pobliżu temperatury krzepnięcia. Poprawna jego zawartość w żeliwie szarym wynosi 300-1500 ppm. Poziom, w ciekłym żeliwie, azotu 40-90 ppm sprzyja powstawaniu perlitu, poprawia twardość i wytrzymałość. Ze względu na nakłucia, graniczna zawartość azotu w żeliwie szarym to 100 ppm. Zwykle utrzymuje się azot w masie formierskiej i rdzeniowej poniżej 0,01%. Z kolei wodór w ciekłym metalu stwarza zagrożenie powstania pęcherzy (wad typu gazowego) w odlewach. Cylindry silników spalinowych mają także grafit krętkowy (robaczkowy, zwarty, wermikularny) lub grafit sferoidalny (kulkowy) [9, 10, 11, 12]. Strukturą osnowy żeliwa to: perlit, ferryt, bainit i martenzyt. Stosowanych jest kilka odmiennych procesów hartowania żeliwa z przemianą izotermiczną np. ADI, DADI, AADI, AVCI i AGI. Zdolność technologiczna kształtowania wytrzymałości na rozciąganie R_m żeliwa standardowego w procesie odlewania odśrodkowego metodą wirującej formy wynosi $C_p=1,38$ i $C_{pk}=1,16$ [6]. Jest ona mniejsza dla formowania odlewów żeliwnych z dodatkiem Mo i Cu, gdyż wynosi $C_p=1,20-1,29$, $C_{pk}=0,98-1,04$. Oznacza to, że odlewanie tulei żeliwnych z dodatkiem Mo i Cu nie jest uregulowany statystycznie. Analogiczne odlewanie tulei żeliwnych z udziałem azotu jest uregulowana statystycznie, gdyż $C_{pk}=1,16$.

Topienie żeliwa odbywa się często w tyglowych piecach indukcyjnych średniej częstotliwości [12, 13]. Temperatura przegrzania kąpeli metalowej wynosi około 1550-1650 °C. Modyfikację przeprowadza się na strugę metalu w kadzi rozlewczej o temperaturze 1440-1480 °C. Czerpiąc metal z kadzi rozlewczej o temperaturze 1375-1440 °C, w czasie do 15 min, odlewa się kadłuby. Z kolei tuleje cylindrowe zalewa się najczęściej łyżką odlewniczą. Dla żeliwa o wytrzymałości na rozciąganie min. 250 MPa zalecane zawartości węgla, krzemu i manganu wynoszą odpowiednio; 3,1-3,3%, 1,3-1,5% i 0,6-0,8% [12]. Z kolei norma BN-78/1372-01 wymaga wówczas skład chemiczny orientacyjny: C 3,0-3,7%, Si 2,0-

2,8%, Mn 0,7-1,2% oraz wymagany: P 0,40-0,80%, S_{max} 0,15%, i Cr 0,25-0,55%. Szerokie zastosowanie znajduje modyfikator SB-5 w ilości 0,4% masowo, zawierający obok krzemu, żelaza, wapnia i aluminium około 2% baru.

Struktura geometryczna powierzchni otworu cylindra kształtowana jest najczęściej poprzez wytaczanie oraz gładzenie wstępne, wykończeniowe i ostateczne [6, 14, 15, 16, 17]. Przebieg kształtowanie topografii powierzchni nośnej, określonej parametrem R_{pq} , z krzywej Abbotta Firestona, i powierzchni wgłębień, opisanej parametrem R_{vq} , jest przedstawiony diametralnie odmiennie w publikacjach Pawlus i inni oraz Mezghani i inni [16, 17]. W pracy [17] stwierdzono, że gdy czas gładzenia plateau jest zróżnicowany, parametr S_{mq} wzrosła, podczas gdy inne parametry, S_{pq} i S_{vq} , są stabilne. Dotyczy to zarówno gładzenia plateau osłkami diamentowymi jak i ceramicznymi.

Cechy użytkowe warstwy powierzchniowej cylindra mają zróżnicowany wpływ na pracę silnika spalinowego: czas docierania, zużycie oleju, przedmuchy, osiągi, straty mocy, awarie, zatarcie i trwałość [18, 19, 20, 21].

Badano wpływu składu chemicznego i mikrostruktury żeliwa szarego na zużycie cylindrów silników diesla do ciężkich pojazdów [22, 23]. Stosowano urządzenie testowe o ruchu posuwisto-zwrotnym, oraz handlowy olej syntetyczny. Próbkę cylindrów polerowane, o wysokości R_a chropowatości powierzchni 0,09 μm , wykonane z niskostopowego żeliwa szarego z fosforem i borem o twardości 264 HB, wykazały lepszą odporność na zużycie ściernie niż analogiczne próbki z żeliwa szarego perlitycznego z eutektyką fosforową i wydzieleniami węglików o twardości 240 HB. Jednakże żeliwo niskostopowe nie tworzy na swojej powierzchni, przy współpracy ze stalową kulką, filmu smarowego, złożonego z twardej eutektyki fosforowej i węglików. Obydwa badane żeliwa wykazały duży spadek szybkość zużycia w czasie testu. Opory ruchu podczas testu obydwu żeliw badanych w pracy były niskie i zbliżone, współczynnik

tarcia wynosił około 0,08. Należy jednak pamiętać iż małe opory ruch podczas badań na testerze tribologicznym nie odpowiadają w eksploatacji małemu zużyciu oleju napędowego silnika wysokoprężnego [24].

Odporność na zużycie cylindra silnika spalinowego zależy jednak od warunków pracy. Gdy silnik pracuje w warunkach zwiększonego zapylenia powietrza pyłem drogowym, zalecane są cylindry wykonane z żeliwa szarego o strukturze ferrytyczno-perlitycznej (wielkości płatków grafitu 4 według ASTM A 247-67) [25]. Odporność na ścieranie tych cylindrów jest większa w porównaniu z bardziej drogimi cylindrami, których osnową metalograficzną jest perlit oraz występują płatki grafitu. Wyniki te można wyjaśnić tym, że cząstki ściernie mogą się osadzać w płatkach grafitu, jak i w osnowie ferrytycznej, co zmniejsza zużywanie ściernie grupy tłokowo-cylindrowej. W tych warunkach obecność eutektyki fosforowej w strukturze metalograficznej cylindra wywiera nieznaczny wpływ na wartość zużycia tłokopierścieni tłokowych-cylindra. Możliwość zmniejszenia zużycia elementów, poprzez osadzone cząstek twardych ściernych w miękkim materiale części współpracującej tzw. zużycie heterogenne, przedstawił między innymi Chruščov i Babičev [26] oraz Legutko i Nosal [27]. Także w takich warunkach użytkowania silnika spalinowego wpływ topografii powierzchni cylindra z żeliwa szarego jest znaczny [25]. W czasie eksploatacji silnika, kształt rozkładu mikrotwardości jest niezależna od jego charakteru po obróbce mechanicznej, co wskazuje, że własności fizyczne zewnętrznej warstwy cylindra mogą nie mieć wpływ na jego zużycie [28, 29]. Zanieczyszczenie powietrza pyłem powoduje trzy do pięciokrotnego zwiększenia zużycia cylindra w silniku wysokoprężnym, w porównaniu do stanu normalnego [30]. Duże wartości zużycia występują po stronie obciążonej cylindra zarówno w obszarze zwrotu zewnętrznego jak i wewnętrznego.

Rysy gładzenia, zarówno na powierzchni nośnej jak i we wgłębieniach, powinny być ostro cięte, bez odkształcenia plastycznego,

na całej powierzchni cylindra. Wskazywano, że wzrost zużycia może być spowodowane przez odkształcenia plastyczne (zamazania) materiału na powierzchni cylindra [31, 32]. Ten odkształcony plastycznie metal, znany w literaturze niemieckiej jako "blechmantel", jest zazwyczaj konsekwencją gładzenia ośkami bez por, najczęściej ośkami z warstwą diamentową ze spoiwem metalowym [33].

3. WARUNKI BADAŃ

Badaniom poddano popularny silnik Volkswagen 1.6D Turbo czterosurowy, rzędowy, czterocylindrowy, chłodzony cieczą, o zapłonie samoczynny z turbosprężarką oraz wtryskiem pośrednim paliwa do komory wirowej (Ricardo Comet Mark V), mający wałek rozrządu w głowicy. Charakterystykę silnika zamieszczono w tabeli 1. Silnik był poddany badaniom eksploatacyjnym drogowym w warunkach normalnych w samochodzie Polonez, który był wyprodukowany przez Fabrykę Samochodów Osobowych w Warszawie. Przebieg samochodu był niewielki i wynosił 5762 km.

Dokładność wymiaru i kształtu kadłuba i jego cylindrów określono przemysłową współrzędnościową maszyną pomiarową FN1106 Mitutoyo. Maszyna miała głowicę przełączającą z przetwornikiem elektrostatycznym, głowicę przegubową i trzpień pomiarowy kulisty o średnicy 2 mm. Siłę docisku trzpienia pomiarowego w przetworniku elektrostatycznym TP2 każdorazowo regulowano do wartości $0,1 \pm 0,01$ N. Dokonano także pomiarów średnicy cylindrów średnicówką mikrometryczną Compac Genewa o promieniu trzpieni kulistych 8 mm. Średnice cylindrów mierzono w przekrojach A-A, B-B, C-C, D-D na wysokościach od l_1 do l_{11} (rys. 1). Odchyłki kształtu okrągłości, makrookrągłości, mikrofałdowości, prostoliniowości, walcowości mierzono maszyną Taylor Hobson Talyrond 3 PC. Wyznaczono odchyłki promieniowe strategią przekrojów poprzecznych oraz przekrojów wzdłużnych, metodą najmniejszych kwadratów LSC [34, 35]. Stosowano filtr Gaussa, analizowano pomiary o liczbie fal na

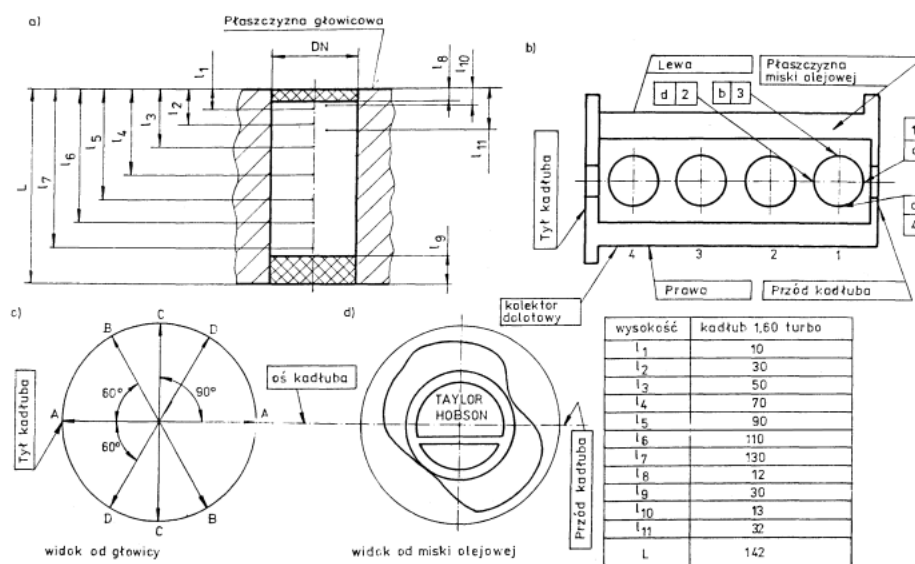
obrót 1-3, 3-15, 15-500 f/obr (ang. upr - undulation per revolution) [36, 37]. Odchylenia promieniowe zarysów poprzecznych cylindrów wyznaczano na wysokościach l_1 - l_{11} od płaszczyzny płyty górnej kadłuba. Pomiary zarys przekroju wzdłużnego przeprowadzono wzdłuż tworzących cylindrów które oznaczono a4, b3, c1 i d2. Kadłub silnika spoczywał na odpowiednio zamocowanej głowicy silnika, natomiast pomiary przeprowadzano od strony

miski olejowej.

Parametry chropowatości powierzchni cylindrów wyznaczono ze zmierzonych profili wzdłuż tworzących cylindrów a4, b3, c1, d2 na odpowiednich wysokościach. Odcinek pomiarowy wynosił 4 mm i 12,5 mm, w analizach nie używano filtrów profilu. Pomiar przeprowadzono profilometrem Taylor Hobson Talysurf 6 i Hommel Tester T1000.

Tabela 1. Charakterystyka silnika 1.6D Turbo

Wielkości charakterystyczne	Wartość
Srednica cylindra:	76,5 mm
Skok tłoka:	86.4 mm
Pojemność skokowa:	1588 cm ³
Stopień sprężania:	23.0
Ciśnienie sprężania: - standardowe, - minimalne, - maksymalna różnica ciśnienia między cylindrami.	3,4 MPa 2,6 MPa 0,5 MPa
Moc przy 4500 obr/min:	51 kW (70 KM)
Maksymalny moment obrotowy osiągniany od 2500 obrotów na minutę:	133 Nm

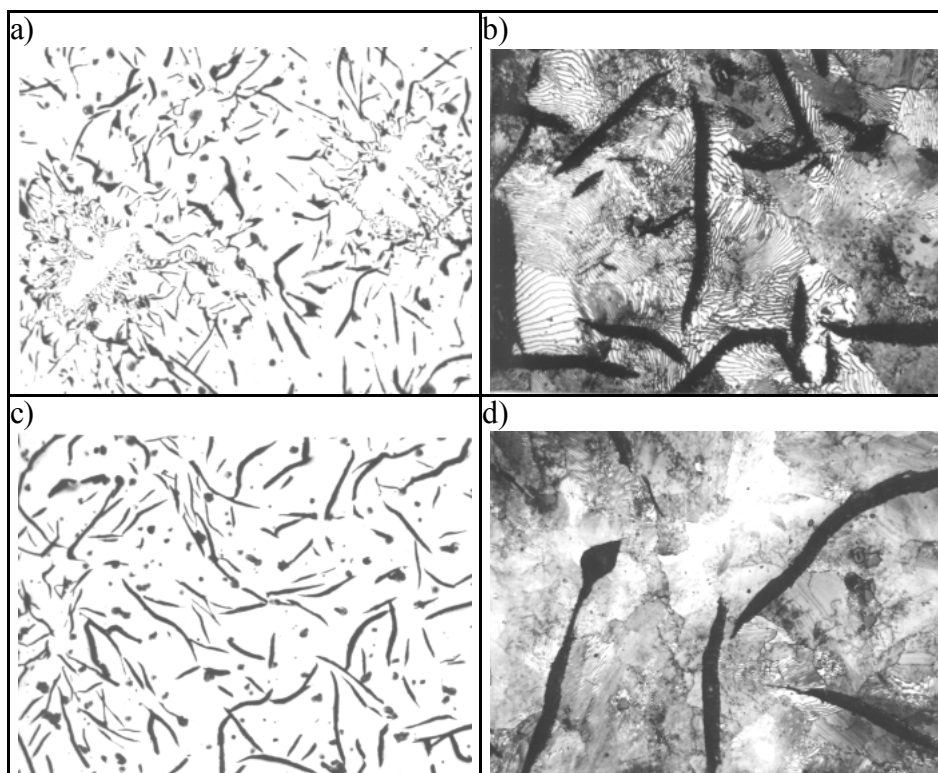


Rys. 1. Schemat pomiaru cylindrów w kadłubie silnika 1.6D Turbo. Oznaczenia: a) wysokość dokonanych pomiarów, b) położenie tworzących cylindrów dla pomiaru chropowatości powierzchni i zarysu przekroju wzdłużnego, c) płaszczyzny pomiaru średnic cylindrów, d) wzajemne ustawienie kątowe kadłuba silnika i wykresu odchyłek kształtu cylindrów

Tabela 2. Dokładność wymiaru i kształtu cylindrów, charakterystyka chropowatości powierzchni oraz szacowane wartości zużycia tribologicznego promieniowego cylindra 1 i 4

Wyszczególnienie	Cylinder 1	Cylinder 4
Średnia średnica cylindra, mm	76,520	76,524
Maksymalna średnica cylindra, mm	76,540	76,544
Minimalna średnica cylindra, mm	76,500	76,435
Różnica maksymalnej i minimalnej średnicy, mm	0,040	0,049
Średnia odchyłka okrągłości na wysokości 22, 63, 103 mm, LSC, filtr GS, 1-3 f/obr, mm	0,0170	0,0188
Średnia odchyłka makrofalistości na wysokości 22, 63, 103 mm, LSC, filtr GS 3-15, f/obr, mm	0	0
Średnia odchyłka makrofalistości na wysokości 22, 63, 103 mm, LSC, filtr GS 3-15, f/obr, mm	0	0
Średnia odchyłka mikrofalistości na wysokości 22, 63, 103 mm, LSC, filtr GS, 15-500 f/obr, mm	0,019	0,022
Średnia odchyłka prostoliniowości dla tworzących a4, b3, c1, d2, metoda LSC, mm	0,0675	0,0625
Średnia odchyłka walcowości LSC, strategia przekrojów poprzecznych 22, 63, 103 mm, mm	0,020	0,024
Wysokość chropowatości powierzchni gładzonej Pa, profil niefiltrowany, płaszczyzna d2, l ₇ =130 mm, μm	1,37	1,57
Skośność rzędnych profilu niefiltrowanego Psk, -	-0,71	0,70
Kurioza (spłaszczenie) rzędnych profilu niefiltrowanego Pku, -	7,58	3,14
Mediana rzędnych profilu niefiltrowanego Me, μm	-0,05	-0,24
Moda rzędnych profilu niefiltrowanego Mo, μm	-0,15	-0,73
Moment stopnia zerowanego rzędnych profilu niefiltrowanego m ₀ , μm ²	1,80	2,35
Moment stopnia drugiego rzędnych profilu niefiltrowanego m ₂ , -	0,05	0,07
Moment stopnia czwartego rzędnych profilu niefiltrowanego m ₄ , μm ⁻²	0,09	0,13
Krzywizna wierzchołków z trzech współrzędnych profilu niefiltrowanego ρ ₃ , 1/μm	0,1414	0,106
Krzywizna wierzchołków z siedmiu współrzędnych profilu niefiltrowanego ρ ₇ , 1/μm	0,0845	0,1064
Wznios z dwóch współrzędnych profilu niefiltrowanego Δ2q, °	8,62	10,76
Wznios z trzech współrzędnych profilu niefiltrowanego Δ3q, °	7,60	9,03
Wznios z siedmiu współrzędnych profilu niefiltrowanego Δ7q, °	8,64	10,46
Udział materiałowy na wysokości 2 μm od Mr=5%, %	57-63	20-39
Kąt gładzenia, °	60	50
Liczba wierzchołków na głębokości 5 μm poniżej linii odniesienia o nośności 20%, -	25	0
Poziom wysokości profilu przed linią odniesienia	1,9	2,6

20% na której występuje $M_r=1\%$, μm		
Pojemność olejowa dla $M_r=70\%$, mm^3/cm^2	0,026	0,018
Średnia wysokość progu zużycia z płaszczyzn c1, d2, b3, a4, mm	0,0228	0,0131
Zużycie tribologiczne, zmiana parametru R_{tm} , μm	3,45	3,55
Zużycie tribologiczne określone zmianą parametru R dla $M_r=90\%$ z krzywej Abbotta Firestone, μm	4,0	3,6
Zużycie tribologiczne określone zmianą parametru R dla $PC=75$ wierzchołków/cal, μm	3,7	4,0

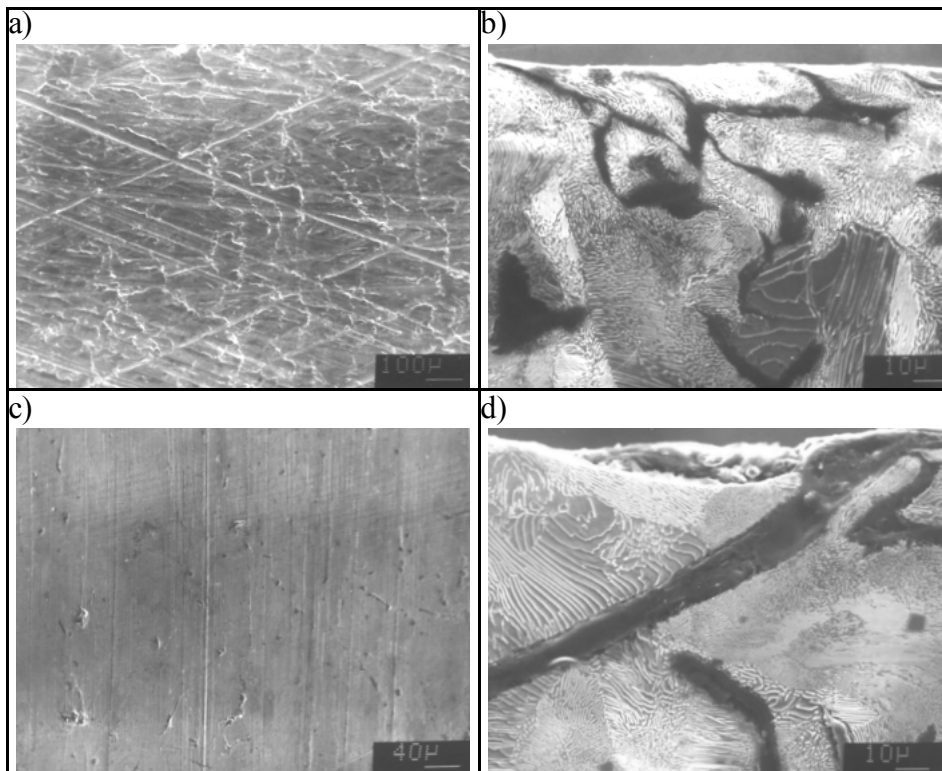


Rys. 2. Postać grafitu w górnej części cylindra (a, c, pow. 110x) i struktura metalograficzna: perlit, grafit płatkowy (b, d, pow. 440x): cylinder 1 (a, b), cylinder 4 (c, d)

Strukturę metalograficzną cylindrów wyznaczono z wyciętych skrawaniem próbek z kierunku prostopadłego do tworzących cylindrów. Obserwacje przeprowadzono na zglądach polerowanych nietrafionych i trawionych Nitalem, mikroskopem metalograficznym Neophot 2 Carl Zeiss Jena oraz mikroskopem skaningowym Novascan 30. Skład chemiczny określono analizą ilościową, metodą emisyjnej spektrometrii atomowej ze wzbudzeniem iskrowym przy pomocy spektrometru ARL 3460. Zawartość

C i S wyznaczono metodą wysokotemperaturowego spalania z detekcją IR przy pomocy analizatora Leco. Przeprowadzono także analizę składu chemicznego metodą miareczkową i metodą wagową.

Pomiar twardości wykonano metodą Brinella, w wyniku pięciokrotnego powtórzenia, w warunkach określonych normą PN-EN ISO 6508-1:2007. Stosowano kulkę o średnicy Φ 2,5 mm i siłę 1,839 kN, od masy 187,5 kg.



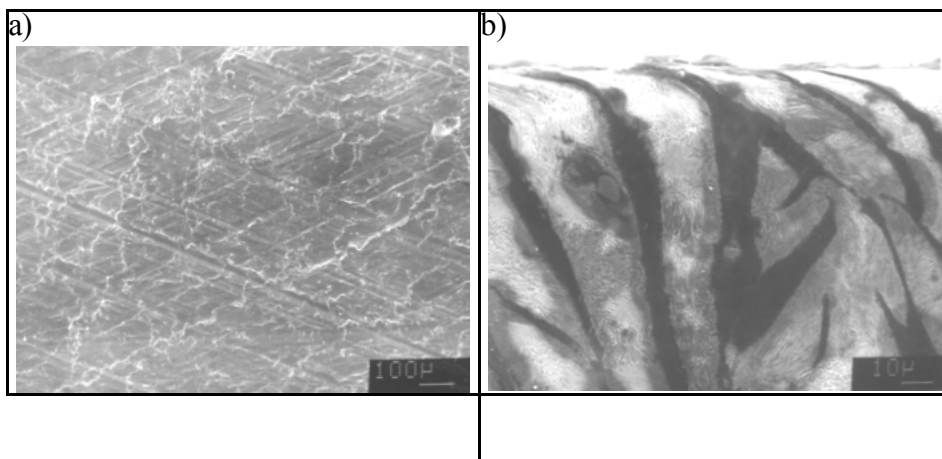
Rys. 3. Stan powierzchni (a, c) i strefy podpowierzchniowej (b, d) cylindra 1 po gładzeniu (a, b, płaszczyzna d2, głębokość $l_7=130$ mm, głębokość odkształcenia plastycznego $10 \mu\text{m}$) i cylindra po eksploatacji (c, d, płaszczyzna b3, głębokość $l_{10}=13$ mm)

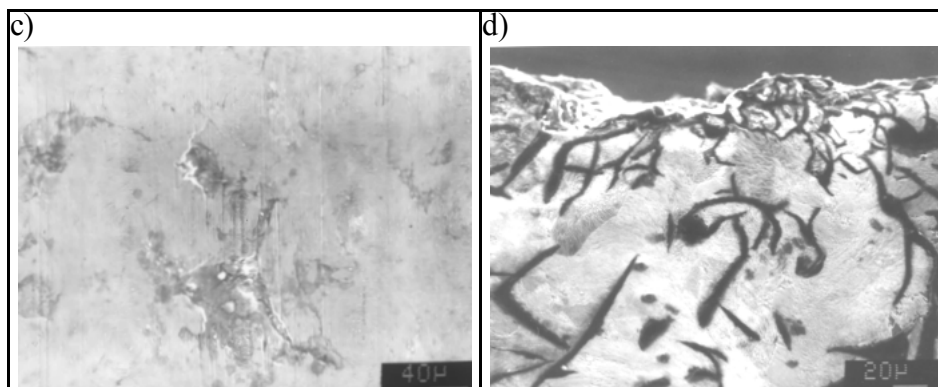
4. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wyniki pomiaru średnic cylindrów monobloku 1.6 D Turbo zamieszczono w tabeli 2. Analizując średnice cylindrów w płaszczyźnie A-A, czyli w płaszczyźnie osi kadłuba stwierdzono, że wszystkie cylindry były gładzone ze wstępną odchyłką stożkowości o zbieżności w kierunku płyty górnej kadłuba (zwrotu zewnętrznego silnika). Wstępna odchyłka stożkowości na średnicy wynosiła dla kolejnych cylindrów

13, 15, 21 i $40 \mu\text{m}$. Zamieszczono także uśrednione wartości odchyłki okrągłości, makrofalistości (graniastości), mikrofalistości, zarysu przekroju wzdłużnego i walcowości. Największe wartości odchyłek okrągłości dla kolejnych cylindrów wynoszą 20, 21, 24,5 i $24,5 \mu\text{m}$.

Natomiast największe wartości odchyłek prostoliniowości zarysu przekroju wzdłużnego wynoszą 9, 10, 11,5 i $7,5 \mu\text{m}$. Czyli odchyłki



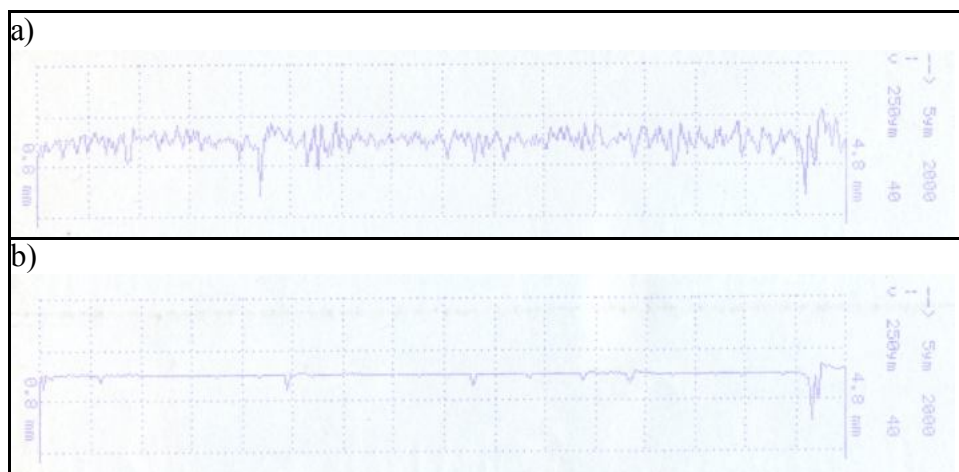


Rys. 4. Stan powierzchni (a, c) i strefy podpowierzchniowej (b, d) cylindra 4 po gładzeniu (a, b, płaszczyzna d2, głębokość $l_7=130$ mm, głębokość odkształcenia plastycznego 20 μm) i cylindra po eksploatacji (c, d, płaszczyzna b3, głębokość $l_{10}=13$ mm)

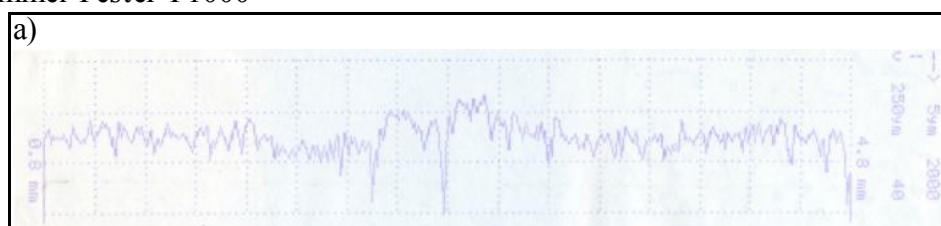
walcowości dla kolejnych cylindrów mają wartość większe jednak zbliżone do wartości odchyłek okrągłości. W tabeli 2 podano maksymalne i minimalne wartości średnicy cylindrów 1 i 4, wynikłe zarówno ze zużycia tribologicznego spowodowanego pracą jak i odkształceń cieplnych i zmian naprężeń własnych. Maksymalne zmiany średnicy tych cylindrów wynoszą 40 i 49 μm . Odchyłki okrągłości cylindrów w wyniku zamontowania głowicy i dokręcenia śrub

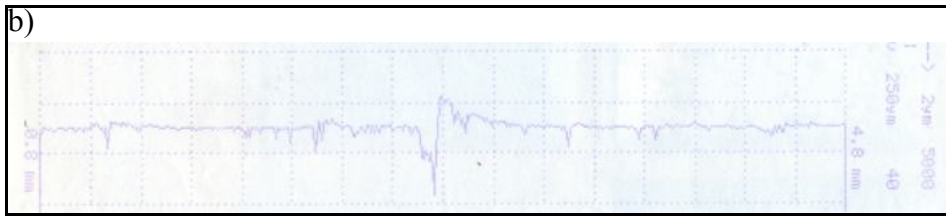
momentem 40 Nm, 60 Nm i ich dociągnięcia o kąt 180° (wynikowi moment dokręcenia 150 - 180 Nm) mają większe wartości. Ich wartości maksymalne dla cylindrów od 1 do 4 wynosiły $26,1$, $18,9$, $21,8$ i $21,8$ μm .

Są one na trzech wyszczególnionych przekrojach owalami (tab. 2), o osi dużej odchylonej w kierunku tyłu kadłuba o kąt około 10 - 15° . Największe zmiany kształtu cylindrów zaobserwowano na wysokości od



Rys. 5. Profilogramy chropowatości kadłuba 1.6D Turbo po honowaniu (głębokość 136 mm, tworząca d2) $R_a=0,73$ μm , $R_z=5,75$ μm , $R_t=6,72$ μm i po eksploatacji (głębokość 34 mm, tworząca b3), $R_a=0,23$ μm , $R_z=4,66$ μm , $R_t=6,26$ μm cylinder 1, profilometr Hommel Tester T1000

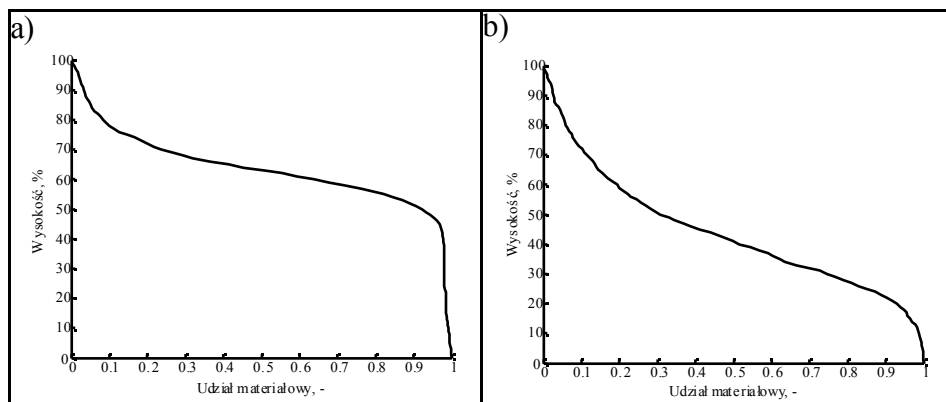




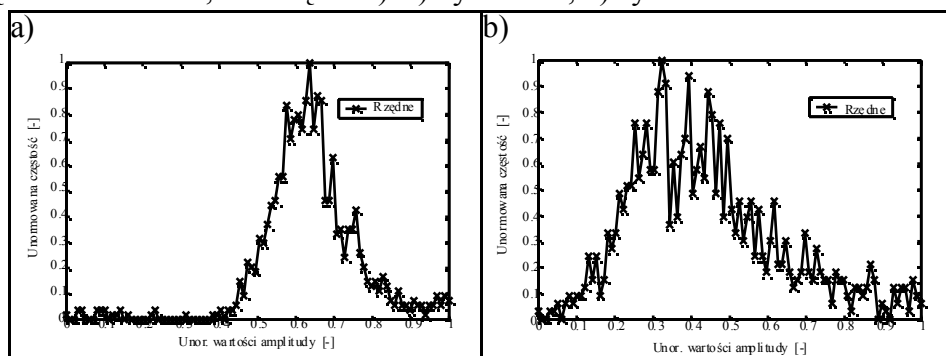
Rys. 6. Profilogramy chropowatości kadłuba 1.6D Turbo po honowaniu (głębokość 136 mm, tworząca d2) Ra=1,05 μm, Rz=9,96 μm, Rt=11,74 μm i po eksploatacji (głębokość 34 mm, tworząca b3), Ra=0,15 μm, Rz=2,85 μm, Rt=3,96 μm cylinder 4, profilometr Hommel Tester T1000

37 do 57 mm od płaszczyzny głowicy. Wówczas największe wartości odchyłek zarysu przekroju wzdłużnego wynoszą dla cylindrów od 1 do 4: 13,1, 14,5, 16,7 i 10,9 μm. W kadłubie bez przykręconej głowicy nie stwierdzono odchyłek graniastości.

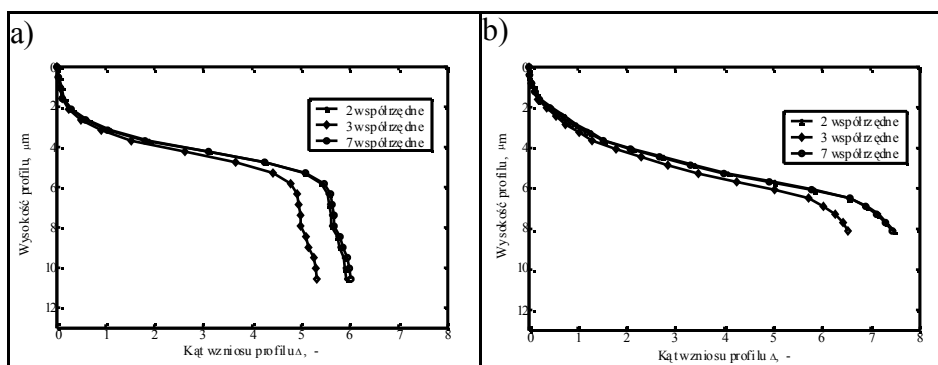
Na podstawie wykresów odchyłek mikrofalistości, chropowatości gładzi cylindrów, obserwacji powierzchni cylindra warstwy podpowierzchniowej stwierdzono występowanie obok licznych śladów



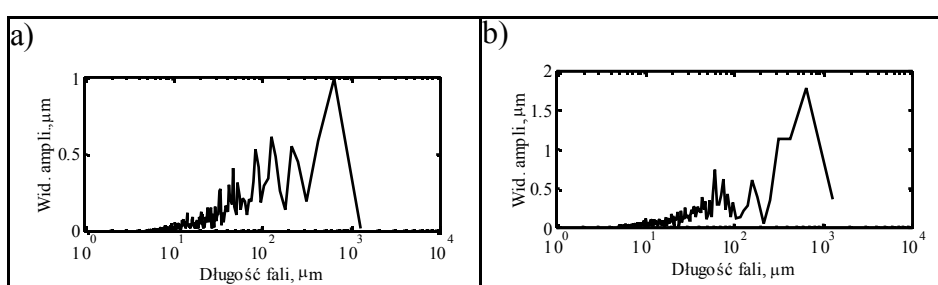
Rys. 7. Krzywa udziału materiałowego powierzchni warstwy powierzchniowej po gładzeniu (głębokość 136 mm, tworząca d2): a) cylinder 1, b) cylinder 4



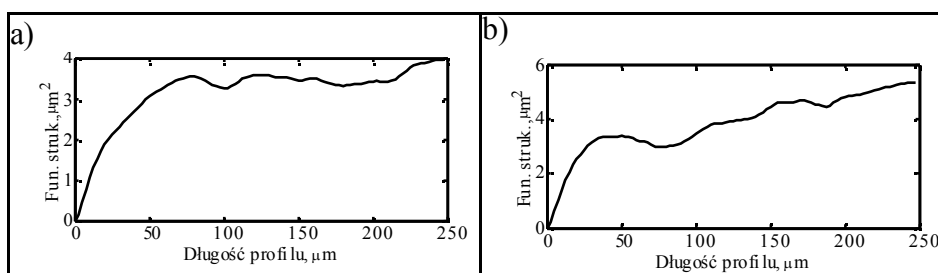
Rys. 8. Gęstość rozkładu rzędnych profilu niefiltrowanego tworzącej po gładzeniu (głębokość 136 mm, tworząca d2): a) cylinder 1, b) cylinder 4



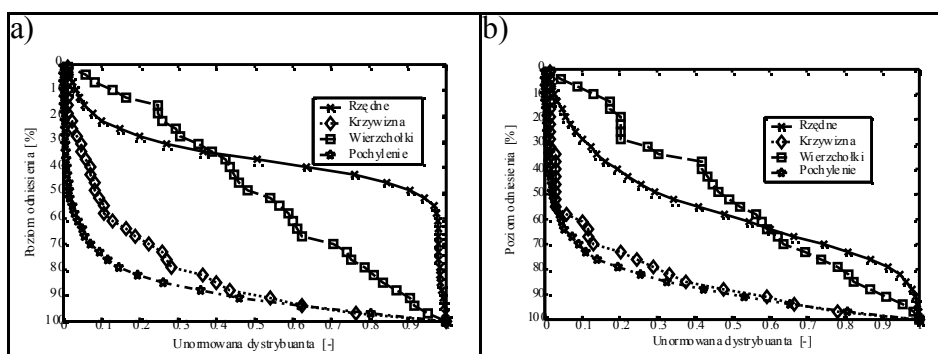
Rys. 9. Wykresy wartości przyrostu kąta wzniosu profilu niefiltrowanego wzdłuż tworzącej dla jego poszczególnych wartości wysokości po gładzeniu (głębokość 136 mm, tworząca d2): a) cylinder 1, b) cylinder 4



Rys. 10. Widma amplitudowe profilu niefiltrowanego tworzącej po gładzeniu (głębokość 136 mm, tworząca d2): a) cylinder 1, b) cylinder 4



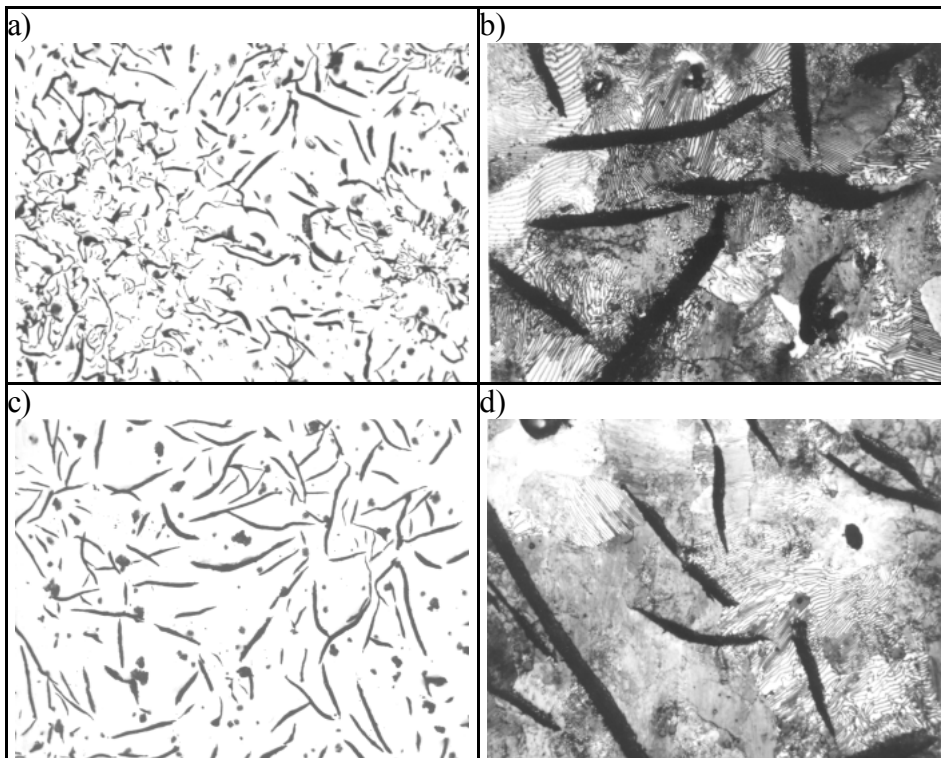
Rys. 11. Wykresy funkcji struktury profilu niefiltrowanego tworzącej po gładzeniu (głębokość 136 mm, tworząca d2): a) cylinder 1, b) cylinder 4



Rys. 12. Dystrybuanty (całki) gęstości rozkładu wartości rzędnych, krzywizny wierzchołków z siedmiu współrzędnych, wysokości wierzchołków z siedmiu współrzędnych i pochylenia z siedmiu współrzędnych dla profilu niefiltrowanego tworzącej po gładzeniu (głębokość 136 mm, tworząca d2): a) cylinder 1, b) cylinder 4

gładzenia zarówno na wysokości 34 mm jak i strefach dolnych, obszary wyrwań osnowy metalowej

cyldrów, świadczące o zużyciu adhezyjnym. Również obszary skaz osnowy metalowej występują na



Rys. 13. Postać grafitu w górnej części cylindra (a, c, pow. 110x) i struktura metalograficzna: perlit, grafit płatkowy (b, d, pow. 440x): cylinder 1 (a, b), cylinder 4 (c, d)

Tabela 3. Skład chemiczny monobloku

Zawartość pierwiastków, % wagowo									
C	Si	Mn	N	Cu	Cr	Mo	P	S	
3,31	1,87	0,80	0,22	0,25	0,04	0,015	0,31	0,09	

powierzchni gładzonej nie objętej pracą pierścieni tłokowych.

Szczególnie intensywnie występują obszary wyrwań osnowy metalowej dla cylindra czwartego. Na powierzchni cylindra czwartego zaobserwowano cztery takie obszary, obejmujące cały obwód cylindra (wysokość 33, 58, 76 i 85 mm). Na powierzchni gładzi cylindrów objętej pracą

pierścieni tłokowych oprócz obszarów wyrwań osnowy metalowej, występują w przeważającej mierze, zwłaszcza dla cylindrów 1, 2 i 3 obszary o dużej gładkości. Nie obserwuje się dla nich objawów zacierania oraz cząstek zużycia. Dobrze przedstawia to stan powierzchni i strefy podpowierzchniowej (rys. 3 i 4) jak i profilogramy chropowatości

Tabela 4. Określenie mikrostruktury cylindrów - warstwa podpowierzchniowa, według PN-75/H-04661

Ocena grafitu i osnowy	Cylinder 1	Cylinder 4
1. Górna część cylindra:		
Kształt wydzielen grafitu:	Gf1, Gf2	Gf 2
Wielkość wydzielen grafitu:	Gw 45-90, Gw 25 w	Gw 45-90

Rozmieszczenie wydzielen grafitu: Udział perlitu: Twardość HB:	rozetach Gr 1, Gr 5 (rozetkowe) P 185-193	Gr 2 P 202-206
2. Środek wysokości cylindra: Kształt wydzielen grafitu: Wielkość wydzielen grafitu: Rozmieszczenie wydzielen grafitu: Udział perlitu: Twardość HB:	Gf 2 Gw 45-90, Gw 25 rozety Gr 2, Gr 6, Gr5 (rozetkowe) P 185-193	Gf 2 Gw 45-90 Gr 2 P 202-206
3. Dolna część cylindra: Kształt wydzielen grafitu: Wielkość wydzielen grafitu: Rozmieszczenie wydzielen grafitu: Udział perlitu: Twardość HB:	Gf2 Gw 45-90, Gw 25 w rozetach Gr 2, Gr 5 (rozetkowe) P96/F4 185-193	Gf 2 Gw 45-90 Gr 2 P 202-206

powierzchni (rys. 5, 6).

Chropowatość powierzchni wewnętrznej cylindrów po gładzeniu normalnym wykazuje dużo rozbieżności z wymaganiami stawianymi ich warstwie powierzchniowej silników wysokoprężnych, znanych firm samochodowych [38, 39]. Udział materiałowy Mr wykazuje największe rozbieżności od wartości wymaganej na wysokości 2 μm od $M_r=5\%$, minimum 70%, wynosi bowiem nawet 20% (tab. 2, rys. 7). Również bardzo niekorzystna, zwłaszcza dla cylindra 4, jest liczba wierzchołków na głębokości 5 μm poniżej linii odniesienia o udziale materiałowym 20%, gdyż jest zerowa. Pojemność olejowa jest w dolnych granicach dopuszczalnych wartości, wynosi bowiem 0,018-0,026 mm³/cm². Gęstości rozkładu amplitudy wysokości nierówności (Rys. 8), określona zarówno współczynnikiem niepełności Rp/Rt jak współczynnikiem skośności, jest nieoprawna. Skośność dla cylindra 1 jest ujemna Psk=-0,71 z kolei dla cylindra 4 dodatnia, Psk=0,70 (tab. 2, rys. 7, 8). Powierzchnie cylindra 1, 2, 3 jest lekko odkształcona plastycznie, do 10 μm, i wygląd jej wskazuje na gładzenie ośkami z warstwą diamentową o spoiwie metalowym (rys. 3).

Natomiast cylinder 4 jest silnie odkształcony plastycznie, o głębokości do 20 μm i powierzchni "blechmantel" (rys. 4). Dla wszystkich cylindrów kadłuba 1.6D Turbo występują wyrwania osnowy metalowej po gładzeniu. Odległości pomiędzy motywami chropowatości powierzchni gładzonej określony parametrami Sm, λq wynosi 51-53 μm. Przyrost pochyleni chropowatości powierzchni jest większy w cylindrze 4 (rys. 9). Cylinder ten ma także większą wysokość chropowatości powierzchni Pa=1,57 μm (tab. 2), większe wartości widma rzędnych profilu (rys. 10) jak i większą wartość funkcji struktury (rys. 11). Reasumując; cylinder 4 ma niekorzystną dystrybuantę rzędnych profilu (krzywą Abbotta Firestone) i dystrybuantę krzywizny wierzchołków (rys. 12). Z kolei dystrybuanta wysokości wierzchołków jest korzystniejsza cylindra 4 niż cylindra 1. Zbliżone cechy ma dystrybuanta pochylenia, dla tych cylindrów. Nie stwierdzono wykuszonych ziaren ściernych na gładzi cylindrów.

Wysokość chropowatości powierzchni, określona parametrem Ra, zawiera się w granicy 0,73-1,57 μm i jest większa do wymagań technicznych znanych

producentów. Korzystną wartość mają głębokości nierówności powierzchni $R_t=6,72-11,74 \mu\text{m}$ (rys. 5, 6 i 7). Kąt przecięcia rys gładzenia zawiera się w granicy $50-60^\circ$ i zgodny jest z często wymaganymi wartościami $40-65^\circ$. Odległości rys gładzenia zawiera się w granicy $94-124 \mu\text{m}$ i odbiega od wymaganej wartości $200-300 \mu\text{m}$. Natomiast ich szerokość jest korzystna, wynosi $25-36 \mu\text{m}$, jest zbliżona do wymaganych wartości $30-75 \mu\text{m}$. Wysokość rys smarowych wynoszą $4-5 \mu\text{m}$. Są one mniejsze od wymaganej wysokości wynoszącej często $7-10 \mu\text{m}$. Wysokość rys gładzenia na powierzchni nośnej jest niewielka, wynosi $1 \mu\text{m}$. Liczba zliczonych wierzchołków na głębokości $2 \mu\text{m}$, wynosząca $100-140$ wierzchołków/cal, jest w dolnej granicy wymagań.

Odmienność profilu cylindra 1 i 4 (rys. 5 i 6) scharakteryzowano parametrami i wykresem rozkładu rzędnych (rys. 7, 8 i 12) oraz wartością rzędnych: średnią kwadratową P_q , medianą Me , modą Mo , wartościami momentów rzędu zerowego m_0 , drugiego m_2 i czwartego m_4 , krzywizną wierzchołków - wyznaczoną na podstawie trzech ρ_3 i siedmiu ρ_7 współrzędnych, pochylenia z dwu Δ_{2q} , trzech Δ_{3q} i siedmiu współrzędnych Δ_{7q} (tab. 2).

Na podstawie wykresu udziału materiałowego i liczby zliczonych wierzchołków nierówności chropowatości po gładzeniu i po eksploatacji (rys. 5, 6), określono średnią promieniową wartość zużycia tribologicznego gładzi cylindra na głębokości 34 mm (tab. 2) [41]. Wyznaczona wartość zużycia cylindrów od 1 do 4 wynosiła $3,7-4 \mu\text{m}$, $3,9-4,0 \mu\text{m}$, $3,8-3,9 \mu\text{m}$ i $3,6-4 \mu\text{m}$. O poprawności otrzymanych wartości mogą świadczyć także zmiany parametrów amplitudowych chropowatości powierzchni po gładzeniu R_{tm} , R_{ymax} , R_t i ich odpowiednie wartości po eksploatacji. Przedstawione wartości jak i wykresy chropowatości powierzchni wskazują, że głębokość rys gładzenia wzdłuż całej długości tworzącej cylindra była jednakowa. Jednocześnie wysokość progu zużycia cylindra 4, wynosząca $13,1 \mu\text{m}$ jest znacznie

mniejsza aniżeli dla cylindrów 1, 2 i 3, który wynosi $19,6-22,8 \mu\text{m}$. Świadczy to o mniejszym zużyciu tribologicznym cylindra 4. Jest to uzasadnione strukturą metalograficzną cylindrów kadłuba i ich twardością, przedstawioną poniżej. Zbliżona wartość zużycia promieniowego, określona zmianą parametrów wysokości i odstępu chropowatości [37], wnika prawdopodobnie z odmiennego i niekorzystnego ukształtowania warstwy powierzchniowej cylindra 4.

Cylindry kadłuba silnika są wykonane z żeliwa szarego modyfikowanego o strukturze perlitycznej z małą zawartością fosforu (rys. 13, tab. 3). Świadczy o tym zarówno skład chemiczny jak i ocena osnowy struktury metalograficznej (tab. 4). Badania metalograficzne określenia mikrostruktury wskazują na zbliżoną jej ocenę dla cylindrów 1, 2 i 3 oraz odmienną dla cylindra 4. Na podstawie analizy wizualnej, cylindrów 1, 2 i 3, wydzielenia grafitu mają kształt płatkowy I, rozmieszczenie grafitu jest rozetkowe z grafitem przechłodzonym B, wielkości 5 (długość płatków powyżej 60 do $120 \mu\text{m}$) oraz 6 (długość płatków powyżej 30 do $60 \mu\text{m}$). Występuje również płatki grafitu w obszarze międzydendrytycznym E o wielkości 7 (długość powyżej 15 do $30 \mu\text{m}$). Oznaczenie wydzieleni grafitu cylindrów 1, 2 i 3 o zróżnicowanym kształcie, rozmieszczeniu i wielkości można zapisać: $60\%IB\bar{5}/6+40\%IE7$, według PN-EN ISO 945-1:2009. Z kolei cylinder 4 ma także kształt grafitu płatkowy I, lecz rozmieszczenie wyraźnie jednorodne A oraz zbliżoną jak poprzednio długość wydzieleni grafitu $\bar{5}/6$. W minimalnym stopniu występuje grafit drobny międzydendrytyczny D. Wzdłuż wysokości cylindra w warstwie powierzchniowej obserwuje się niewielki różnice mikrostruktury według PN-75/H-04661 (tab. 4). Większe zmiany mikrostruktury występują wzdłuż grubości ścianki cylindra. W połowie grubości ścianki cylindra grafit płatkowy ma zarówno rozmieszczenie rozetkowe jak i międzydendrytycznym oraz mikrostrukturę perlityczno-fertytyczną P92. Twardość obszarów ze środka grubości i wysokości cylindra jest najniższa i wynosi $185-191 \text{ HB}$.

Jest to najgorszy obszar cylindra. Występuje także zwiększona twardości na ścianie zewnętrznej monobloku, naprzeciw cylindrów, wynosząca 210-223 HB. Warstwa podpowierzchniowa cylindrów w strefie górnej (zwrotu zewnętrznego tłoka) i strefie środkowej ma perlit płytkowy P (powierzchnia na zglądzie zajmuje przez perlit powyżej 98%). Strefa dolna, jedynie cylindrów 1, 2 i 3, ma perlit płytkowy P96 (powierzchnia ferrytu powyżej 2 do 6%). Jednocześnie cylinder 1, 2 i 3 wzdłuż całej wysokości ma perlit płytkowy (rys. 13) o dyspersji Pd1,4 (powyżej 1,3 do 1,6 μm) z kolei mniejszą dyspersją perlitu płytkowego charakteryzuje się cylinder 4 (Pd0,5- powyżej 0,3 do 0,8 μm). Wpływa to na jego wyższą twardość, wynoszącą 202-206 HB. Z kolei cylindry 1, 2 i 3 kaśluba mają twardość 185-193 HB. Eutektyka fosforowa i wtrącenia cementytu nie występują w strukturze metalograficznej warstwy powierzchniowej cylindrów.

5. WNIOSKI

Cylindry badanego kaśluba były gładzone ze wstępną odchyłką stożkowości o zbieżności w kierunku płyty górnej (zwrotu zewnętrznego tłoków). Wartość jej na średnicy dla kolejnych cylindrów wynosi 13, 19, 21, 40 μm . Po eksploatacji około 5762 km silnika 1.6D Turbo o kaślubie nr CY 122516/14B84 06810 3021 G/011 w samochodzie Polonez FSO Warszawa dokładność wymiaru jest mała i dla kolejnych cylindrów wynosi 76,540-76,500, 76,537-76,995, 76,543-76,494, 76,544-76,495 mm. Również odchyłka walcowości cylindrów od 1 do 4 jest duża i ma zbliżone wartości dla cylindrów, która wynosi 20, 21, 19, 24 μm . Cylindry nie mają odchyłki typu graniastości - makrofalistości.

Parametry chropowatości powierzchni cylindrów po gładzeniu konwencjonalnym mają wiele niezgodności w porównaniu z wymaganiami silników wysokoprężnych. Najważniejszym jest zbyt mały udział materiałowy na głębokości 2 μm od Mr=5% oraz nieoprawny rozkład rzędnych profilu (kształt rozkładu wysokości chropowatości warstwy powierzchniowej). Dotyczy to

zwłaszcza cylindra 4 mającego, dodatnią wartość skośność rozkładu amplitud oraz dużą wartość współczynnika niepełności profilu chropowatości powierzchni. Pojemność olejowa nierówności, dla udziału materiałowego 70%, jest w dolnej dopuszczanej granicy. Jednak gładzenie cylindrów jest nieoprawne z uwagi na zbyt duże odkształcenie plastyczne warstwy powierzchniowej "blechmantel", zamknięcie płatków grafitu (do 20 μm) oraz skaży w postaci wyrwań osnowy metalowej.

Po eksploatacji warstwa powierzchniowa cylindrów 1, 2 i 3 ma liczne ślady rys gładzenia i zbliżoną poprawną wysokość Ra chropowatości powierzchni, wynoszącą 0,16-0,23 μm . Natomiast cylinder 4 ma większą chropowatość wynoszącą Ra=0,15-0,32 μm . Obserwacje powierzchni i strefy podpowierzchniowej wykazały oprócz wyrwań osnowy materiału po gładzeniu, wystąpienie zatarć, zużycia adhezyjnego zwłaszcza na wysokości 33, 58, 76 i 85 mm. Należy zaznaczyć że nastąpiło to mimo większej wysokości chropowatości cylindra 4. Powszechnie uważa się bowiem, że zwiększenie wysokości chropowatości zmniejsza niebezpieczeństwo zatarcia.

W wyniku dokręcenia głowicy silnika z uszczelką do kaśluba nastąpiło znaczne gdyż do 16 μm zwiększenie odchyłki okrągłości jego cylindrów na głębokości 22, 63 mm i nieznaczne zmniejszenie odchyłki okrągłości na głębokości 103 mm. Również nastąpiło powiększenie i przesunięcie pierwotnie owalnego kształtu oraz jego odchylenie w kierunku tyłu kaśluba o kąt około 10-15°, z jego zmianą na kształt typu czterokątności. Największe i zbliżone zmiany wartości i kształtu cylindrów wystąpiły dla cylindrów 2, 3, natomiast znacznie mniejsze dla cylindra 1 i 4. Odchyłki prostoliniowości cylindrów, po zamontowaniu głowicy, najczęściej ulegają zwiększeniu, lecz nie jest to regułą. Natomiast zawsze suma odchyłek prostoliniowości przeciwległych tworzących ulega powiększeniu w wyniku dokręcenia głowicy. Największe zmiany prostoliniowości mają miejsce dla tworzących cylindrów wzdłuż osi kaśluba.

Monoblok silnika wykonano z żeliwa szarego modyfikowanego z grafitem płatkowym o osnowie perlitycznej z małą zawartością fosforu (0,031% masowo). Oznaczenie wydzieli grafitu cylindrów 1, 2 i 3 można zapisać: 60%IB $\underline{5}$ /6+40%IE7 oraz cylindra 4 jako IA $\underline{5}$ /6. Świadczy to że cylinder 4 nie ma grafitu o rozłożeniu międzydendrycznym. Również osnowa mikrostruktury wzdłuż wysokości cylindra 4 posiada perlit P, o większej dyspersji w porównaniu do cylindrów 1, 2 i 3. Efektem tego jest większa twardość 202-206 HB w porównaniu do 185-193 HB. Większą dyspersję perlitu przy tym samym składzie chemicznym świadczy o większej prędkości chłodzenia odlewu w tym obszarze. Przemawia za tym również występowanie w strukturze cylindrach 1, 2 i 3 płatków grafitu rozetkowego o rozmieszczeniu B i rozmieszczeniu międzydendrytycznym D, E o wielkości 7.

Według normy BN-78/1312 wymagana masowo ilość fosforu w odlewie tulei silników wysokoprężnych wynosi 0,4-0,8%. Efektem braku eutektyki fosforowej (siatka słabo Fr2 lub dobrze ukształtowana Fr3) była również niższa od wymaganej normą BN-78/1312 twardość, 210-280 HB. Twardość cylindrów 1, 2 i 3 wynosiła 185-193 HB. Twardość cylindra 4 wynosiła z kolei 202-206 HB. Twardość na ściance monobloku naprzeciw cylindrów wynosiła 210-223 HB.

Wartość zużycia promieniowa cylindrów od 1 do 4 była zbliżona i wynosiła 3,7-4 μm , 3,9-4,0 μm , 3,8-3,9 μm i 3,6-4 μm . Wyznaczono ją na podstawie zmiany parametrów pionowych i poziomych profilu chropowatości powierzchni warstwy powierzchniowej. Wysokość progu zużycia cylindra 4 wynosi 13,1 μm . Jest ona znacznie mniejsza aniżeli dla cylindrów 1, 2 i 3, gdzie wynosi 19,6-22,8 μm . Świadczy to o mniejszym zużyciu tribologicznym cylindra 4. Jest to uzasadnione strukturą metalograficzną cylindrów kadłuba i ich twardością. Zbliżona wartość zużycia promieniowego, określona zmianą parametrów chropowatości gładzi cylindra, wnika prawdopodobnie z odmiennego

i niekorzystnego ukształtowania warstwy powierzchniowej cylindra 4.

LITERATURA

- Challenges and Priorities for Automotive R&D. The Strategic Pillars of Research & Innovation. EUCAR European Council for Automotive R&D, Proceeding, 27th May, Brussels, 2011.
- GmbH Mahle: Cylinder Components: Properties, Applications, Materials. Vieweg+Teubner, Stuttgart, 2010.
- Kaźmierczak A.: Wpływ zastosowania powłoki ceramicznej na procesy tribologiczne w uszczelnieniu pierścieniowym silników spalinowych. Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, nr 88, Monografie nr 31, Wrocław 2002.
- Tupaj M.: Kształtowanie mikrostruktury i struktury geometrycznej powierzchni odlewów ze stopu aluminium-krzem w aspekcie wysokiej odporności na zużycie ściernie i zacieranie tulei silników samochodowych. Komisja Odlewnictwa PAN O/Katowice 2013.
- Collini L., Nicoletto G., Konečná R.: Microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron. Materials Science and Engineering: A, 488 (1-2) 529-539, 2008.
- Gruszka J.: Technologiczne kształtowanie cech funkcjonalnych warstwy powierzchniowej tulei cylindrowych. Rozprawy nr 465, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.
- Greenhil J.M., Reynolds N.M.: Nitrogen defects in iron castings. Foundry Trade Journal, 111-122, 1981.
- Cai A.-K., Cheng J.-W., Gong C.-Q., Cao S.-F., Yang Y.-L.: Reason analysis and solving measures of crack-shaped blowhole in thick wall gray iron casting. Zhuzao/Foundry, 62 (6) 557-560, 2013.
- Podrzucki C.: Żeliwo: struktura, właściwości, zastosowanie. T. 1, T. 2, Wydawnictwo ZG STOP, Kraków 1991.
- Guzik E.: Procesy uszlachetniania żeliwa - wybrane zagadnienia. Monografia nr 1M. Archiwum Odlewnictwa PAN O/Katowice, Katowice 2001.

- Pietrowski S.: Kompendium wiedzy o żeliwie wermikularnym. Krzepnięcie Metali i Stopów, PAN, 2 (44), 2000.
- Perzyk M., Waszkiewicz S., Kaczorowski M., Jopkiewicz A.: Odlewnictwo. Wydawnictwa Naukowo Techniczne WNT, Warszawa 2000.
- Holzer M., Bagińska E., Baliński A., Borla K., Bydałek A., Dańko J., Kowalski K., Latała Holtzer M., Młyński M., Podrzucki C., Rożek J., Żmudzińska M.: Przewodnik w zakresie najlepszych dostępnych technik (NDT) - Wytyczne dla branży odlewniczej. Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej, Ministerstwo Środowiska, Warszawa 2005.
- Koszela W., Pawlus P., Rejwer E., Ochwat S.: Possibilities of oil pockets creation by the burnishing technique. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 13, 465-471, 2014.
- Zhou Y., Zhu H., Tang W., Ma Ch., Zhang W.: Development of the theoretical model for the optimal design of surface texturing on cylinder liner. Tribology International, 52, 1-6, 2012.
- Pawlus P., Dzierwa A., Michalski J., Reizer R., Wiczorowski M., Majchrowski R.: The effect of selected parameters of the honing process on cylinder liner surface topography. Surface Topography: Metrology and Properties, 2 025004, 2013.
- Mezghani, S., Demirci, I., Yousfi, M., El Mansoria M.: Running-in wear modeling of honed surface for combustion engine cylinder liners. Wear 302 (1-2) 1360-1369, 2013.
- Pawlus P.: Struktura geometryczna powierzchni cylindrów podczas eksploatacji silnika spalinowego. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1999.
- Tomanik E.: Friction and wear bench tests of different engine liner surface finishes. Tribology International, 41 (11) 1032-1038, 2008.
- Guo Z., Yuan C., Liu P., Peng Z., Yan X.: Study on influence of cylinder liner surface texture on lubrication performance for cylinder liner-piston ring components. Tribology Letters, 51 (1) 9-23, 2013.
- Pawlus P., Michalski J., Reizer R.: Progress in cylinder honing. Part 2: Honing of cylinder liners from highly loaded internal combustion engines. Innovative Manufacturing Technology, Kraków, 2, 127-153, 2012.
- Keller J., Fridrici V., Kapsa Ph., Vidaller S., Huard J.F.: Influence of chemical composition and microstructure of gray cast iron on wear of heavy duty diesel engines cylinder liners. Wear, 263 (7-12) 1158-1164, 2007.
- Keller J., Fridrici V., Kapsa Ph., Huari J.F.: Surface topography and tribology of cast iron in boundary lubrication. Tribology International, 42 (6) 1011-1018, 2009.
- Johansson S.: A surface engineering approach to reduction of frictional losses of heavy duty diesel engines. Chalmers University of Technology, Göteborg 2012.
- Michalski J., Pawlus P.: Effects of metallurgical structure and cylinder surface topography on the wear of piston ring-cylinder assemblies under artificially increased dustiness conditions. Wear 179, 109-115, 1994.
- Chruščov M., Babičev M.: Abrazivnoe iznašivanie. Moskva 1970.
- Legutko S., Nosal S.: Kształtowanie technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej części maszyn. Ośrodek Wydawnictw Naukowych, Polska Akademia Nauk, Poznań 2004.
- Kościelny E., Michalski J., Pawlus P.: Badania doświadczalne wpływu stanu warstwy wierzchniej na zużycie cierne żeliwnych tulei cylindrowych po gładzeniu, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Mechanika, z. 99, 187-192, 1989.
- Pawlus P.: A study of the dependence of the functional properties of the cylinder liner surface layer on the operating conditions. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 210, 17-27, 1996.
- Zhenyuang Z., Yongsheng Z., Youyung Z.: Experiments on effects of dust particles on the wear of cylinder liner in internal

- combustion engine. *Industrial Lubrication and Tribology*, 64 (6) 321-330, 2012.
- Tomanik E.: Liner honing quality main characteristics. SAE International Technical, paper 921453, 1992.
- Dimkovski Z.: Surfaces of honed cylinder liners. Doctoral thesis dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg 2011.
- Tung S., Emley J.: Impacts of bore surface finish and coating treatment on tribological characteristics on engine cylinder liner bores. SAE International 2002-01-1638.
- Humienny Z. (red.): Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) Podręcznik europejski. WNT, Warszawa 2004.
- Adamczak S.: Pomiar geometryczny powierzchni, zarysy kształtu, falistość i chropowatość. Wydawnictwa Naukowo Techniczne WNT, Warszawa 2008.
- Norma PN-EN ISO 12180-1:2012: Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) - Walcowość - Część 1: Terminologia i parametry kształtu walcowego, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2012.
- Norma PN-EN ISO 12180-2:2012: Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) - Walcowość - Część 2: Operatory specyfikacji, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2012.
- Michalski J.: Wymagania jakości otworu wewnętrznego tulei cylindrowej silnika wysokoprężnego. Systemy i środki transportu samochodowego - Wybrane zagadnienia. Monografia nr 3, Seria: Transport, Kazimierz Lejda (red.), 193-204, 2012.
- Michalski J.: Analiza topografii powierzchni tulei cylindrowych współczesnego silnika wysokoprężnego. Щорічний науково-виробничий журнал. Проектування, Виробництво Та Експлуатація Автотранспортних Засобів і Поїздів. Національний Транспортний Університет України, Транспортна Академія України Львів, 20, 209-223, 2012.
- Pawlus P., Michalski J., Rejzer R.: Progress in cylinder honing Part 2: Honing of cylinder liners from highly loaded internal combustion engines. *Innovative Manufacturing Technology IOS Kraków*, 2 edited by Piotr Rusek, 2, 127-153, 2012.
- Pawlus P.: Method of measuring 'zero-wear' of the cylinder liner. *Tribo Test*, 5 (1), 53-70, 1998.

RESEARCH REASONS SEIZING CYLINDER DIESEL ENGINE

Summary

Shows the accuracy of the size and shape, surface topography, parameters of surface roughness and metallographic characteristics of the engine block, cylinder diesel 1.6D Turbo, operated in a car Polonez, the course of 5762 km. Found different nature and value of fuel cylinders 1, 2, 3 in comparison with the cylinder 4 adverse adhesive wear of the cylinder liner 4 justified the increased plastic deformation of the surface, unfavourable surface roughness and surface defects obtained the honing process. This occurred despite the greater its hardness due to the dispersion of perlite and favourable precipitates flake graphite at the same time lower the value of the radial wear.