

УДК 621.3.019.32
UDK 621.3.019.32

WPLYW WAD STREFY PODPOWIERZCHNIOWEJ "BLECHMANTEL" I STRUKTURY METALOGRAFICZNEJ ŻELIWA NA WARTOŚĆ ZUŻYCIA TRIBOLOGICZNEGO I SKŁONNOŚĆ DO ZATARCIA GŁADZI CYLINDROWYCH SILNIKA WYSOKOPRĘŻNEGO

WOŚ Paweł, Dr inż., Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, Polska, pwos@prz.edu.pl, orcid.org/0000-0003-2730-3258

MICHALSKI Jacek, Dr hab. inż., Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, Polska, jmichals@prz.edu.pl

INFLUENCE OF DEFECTS LAYER SUBSURFACE "BLECHMANTEL" AND METALLOGRAPHIC STRUCTURE CAST IRON ON VALUE WEAR TRIBOLOGICAL AND TENDENCY TO SCUFFING SMOOTHING A CYLINDERS OF A DIESEL ENGINE

WOŚ Paweł, PhD., Rzeszow University of Technology, Rzeszow, Poland, pwos@prz.edu.pl, orcid.org/0000-0003-2730-3258

MICHALSKI Jacek, Doctor of Technical Science, Rzeszow University of Technology, Rzeszow, Poland, jmichals@prz.edu.pl

ВПЛИВ ДЕФЕКТІВ ШАРУ ПІДПОВЕРХНЕВОГО "BLECHMANTEL" І МЕТАЛОГРАФІЧНОЇ СТРУКТУРИ ЧАВУНУ НА ВАРТІСТЬ ТРИБОЛОГІЧНОГО ЗНОСУ І ТЕНДЕНЦІЮ ДО ЗГЛАДЖУВАННЯ ПОВЕРХНІ ЦИЛІНДРІВ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА

ВОШ Павел; кандидат технічних наук, Жешовська Політехніка, Жешув, Польща, pwos@prz.edu.pl, orcid.org/0000-0003-2730-3258

МІХАЛЬСКИ Яцек, доктор хабілітований, Жешовська Політехніка, Жешув, Польща, jmichals@prz.edu.pl

WSTĘP

Silniki spalinowe tłokowe pomimo swojej ponad stuletniej historii nadal pozostają i prawdopodobnie pozostaną na najbliższe dziesięciolecia podstawową jednostką napędową środków transportu i maszyn roboczych [2]. Dla współczesnych konstrukcji silników spalinowych nowe kierunki rozwoju wyznaczają wymagania: środowiskowe z zakresie emisji składników toksycznych i dwutlenku węgla, zużycia paliwa i oleju silnikowego, źródeł energii, bezpieczeństwa, atrakcyjności handlowej, kosztów wytwarzania i kosztów eksploatacji, wysokich osiągnięć - głównie w zakresie mocy i momentu obrotowego, strat energii, 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. Cechą charakterystyczną gładzenia ośkami ściernymi w porównaniu z ośkami z warstwą diamentową jest większa powtarzalność parametrów amplitudowych stereometrii powierzchni (SPa, SPq, SPt, SPsk i SPku) [12]. Z kolei ośki z diamentami kruchymi w porównaniu z ośkami z węgla krzemowego i korundu krystalicznego umożliwiają obróbkę cylindrów o większej powtarzalności na całej powierzchni pod względem wysokości szczytów WS oraz głębokości WR i szerokości rys gładzenia SR.

Konstrukcyjne silników spalinowych wymagają od tulei cylindrowych spełnienia ściśle określonych kryteriów w zakresie: przeniesienia zwiększonych obciążeń mechaniczno-termicznych, przy zachowaniu stałości 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.

Producenci zwrócili uwagę na zdolność technologiczną nowych gatunków materiałów, w tym zwłaszcza żeliw w procesie ich odlewania, oraz zdolność technologiczną uzyskania makrokształtu i mikrokształtu otworu.

ANALIZA LITERATURY

Przykłady nowej generacji silników samochodowych, ze szczególnym uwzględnieniem silników

z blokami cylindrów w żeliwie zawarto w publikacji [8]. Omówiono nowe gatunki żeliwa, o wysokiej wytrzymałości, szare i wermikularne oraz ich właściwości. Dokonano przeglądu rozwoju procesu wytwarzania złożonych i lekkich bloków cylindrów, z innowacjami dla przemysłu odlewniczego.

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, falistość, mikrofalistość, topografia, czystość powierzchni i skazy) [22].

Konstrukcyjnie najczęściej: blok monolityczny jest żeliwny lub ze stopu aluminium, wciskane, zaciskane lub zalewane (wbudowane) tuleje cylindrowe żeliwne oraz tuleje żeliwne z pokryciem (galwanicznym, termicznym np. Ni, Cr, NiSi, FeCr, FeCrMo, SiCrFe, CrFeC, B₄C, TiB₂, SiC, TiC, SiO₂, ZrO₂), tuleje stalowe i tuleje stalowe obrabiane cieplno-chemicznie, tuleje ze stopów aluminium z wbudowanymi kryształami krzemu lub z pokryciem (galwanicznym, termicznym) oraz tuleje z kompozytów [21, 18]. Wysokojakościowe modyfikowane żeliwa eutektyczne 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 [3]. Obniżona zawartość grafitu zwiększa wytrzymałość na rozciąganie i zmęczenie. Zarówno struktura eutektyki fosforowej jak i drobne jej wydzielienia, 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 żeliwie ma silny wpływ na kształtowanie się struktury żeliwa, szczególnie morfologii grafitu, oraz powstawanie wad typu skurczowego [1]. 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) [20]. Strukturą osnowy żeliwa to: perlit, ferryt, bainit i martenzyt. Jest kilka odmiennych procesów hartowania żeliwa z przemianą izotermiczną: 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 [7]. Jest ona mniejsza dla 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 uregulowane statystycznie, gdyż C_{pk}=1,16.

Tabela 1. – Charakterystyka silnika wysokoprężnego 1,6D Turbo
Table 1. – Characteristics of the 1.6D Turbo diesel engine

Wielkości charakterystyczne	Wartość
Średnica cylindra:	76,5 mm
Skok tłoka:	86,4 mm
Pojemność skokowa:	1,580 dm 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 osiągną od 2500 obrotów na minutę:	133 Nm

Tabela 2. – Dokładność wymiarów i kształtu cylindrów oraz szacowane wartości zużycia tribologicznego promieniowego

Table 2. – Accuracy of cylinders dimensions and shape and estimated values of radial tribological wear

Wyszczególnienie	Cylinder 1	Cylinder 2	Cylinder 3	Cylinder 4
Średnia średnica cylindra, mm	76,520	76,519	76,521	76,524
Różnica maksymalnej i minimalnej średnicy, mm	0,040	0,042	0,049	0,049
Średnia odchyłka okrągłości na wysokości 22, 63, 103 mm, LSC, filtr GS, 1-3 f/obr, mm	0,0170	0,0149	0,0170	0,0188
Średnia odchyłka makrofalistości na wysokości 22, 63, 103 mm, LSC, filtr GS 3-15, f/obr, mm	0	0	0	0
Średnia odchyłka mikrofalistości na wysokości 22, 63, 103 mm, LSC, filtr GS, 15-500 f/obr, mm	0,019	0,020	0,019	0,022
Średnia odchyłka prostoliniowości dla tworzących a4, b3, c1, d2, metoda LSC, mm	0,0675	0,0738	0,0788	0,0625
Średnia odchyłka walcowości LSC, strategia przekrojów poprzecznych 22, 63, 103 mm, mm	0,020	0,021	0,019	0,024
Wysokość profilu chropowatości powierzchni gładzonej Ra, płaszczyzna d2, l7=130 mm (FSO 0,5-0,7 μm, RVI max 1,4 μm, Volvo 0,8-1,2 μm), μm	0,67	0,60	0,58	0,83
Udział materiałowy profilu na wysokości 2 μm od Mr=5% (Volvo min. 70%, Goetze 55-75%), %	57-63	58-70	73-86	20-39
Kąt gładzenia (Goetze 40°-65°), °	60	60	55	50
Średni odstęp rys (Goetze 200-300 μm), μm	102	110	124	94
Średnia szerokość rys (Goetze 30-75 μm), μm	35	30	36	25
Wysokość rys smarowych (Goetze 7-10 μm), μm	4	4	5	5
Wysokość rys gładzenia na powierzchni nośnej, μm	1	1	1	1
Liczba zliczeń wierzchołków na cal na głębokości 2 μm (Perkins 122-240), wierzchołki/cal	135	130	140	100
Liczba wierzchołków na głębokości 5 μm poniżej linii odniesienia o nośności 20% (Perkins > 0), -	25	18	21	0
Poziom wysokości profilu przed linią odniesienia 20% na której występuje Mr=1% (Perkins 0,5-2,0 μm), μm	1,9	2,4	1,4	2,6
Poziom wysokości profilu poniżej Mr=20% na której występuje Mr=80% (Volvo 1,05-2,5 μm), μm	1,5	1,4	1,3	1,4
Pojemność olejowa dla Mr=70% (Volvo 0,025-0,070 mm ³ /cm ²), mm ³ /cm ²	0,026	0,021	0,020	0,018
Średnia wysokość proggu zużycia z płaszczyzn c1, d2, b3, a4, μm	22,8	20,3	19,6	13,1
Zużycie tribologiczne, zmiana parametru R _{tm} , μm	3,45	3,44	3,49	3,55
Zużycie tribologiczne określone zmianą parametru R dla Mr=90% z krzywej Abbotta Firestone, μm	4,0	3,9	3,9	3,6
Zużycie tribologiczne określone zmianą parametru R dla PC=75 wierzchołków/cal, μm	3,7	4,0	3,8	4,0

Samosmarujące działanie żeliwa szarego wynika głównie z obecności płatków grafitowych w mikrostrukturze, w której w stanie poślizgowym cząstki grafitu są zużywane, a pozostałości grafitu trafiają na oleju silnikowego lub pozostają na powierzchni [17]. Ten mechanizm tworzenia filmu smarującego; wpływa na charakterystykę zużycia systemu TPC oraz zmniejsza tarcie i określa szybkość zużycia. Ponadto proces smarowania grafitem, pomiędzy powierzchniami ślizgowymi powoduje również zmniejszenie ryzyka porysowania i zatarcia. Cząstki grafitu powinny pozostawać otwarte na powierzchniach ślizgowych, aby

Tabela 3 – Skład chemiczny żeliwa szarego monobloku silnika 1.6D Turbo
Table 3 – Chemical composition of cast iron of 1.6D Turbo monoblock

Zawartość pierwiastków, % wagowo								
C	Si	Mn	Cr	Cu	Ti	Mo	P	S
3,31	1,87	0,80	0,22	0,25	0,04	0,015	0,031	0,09

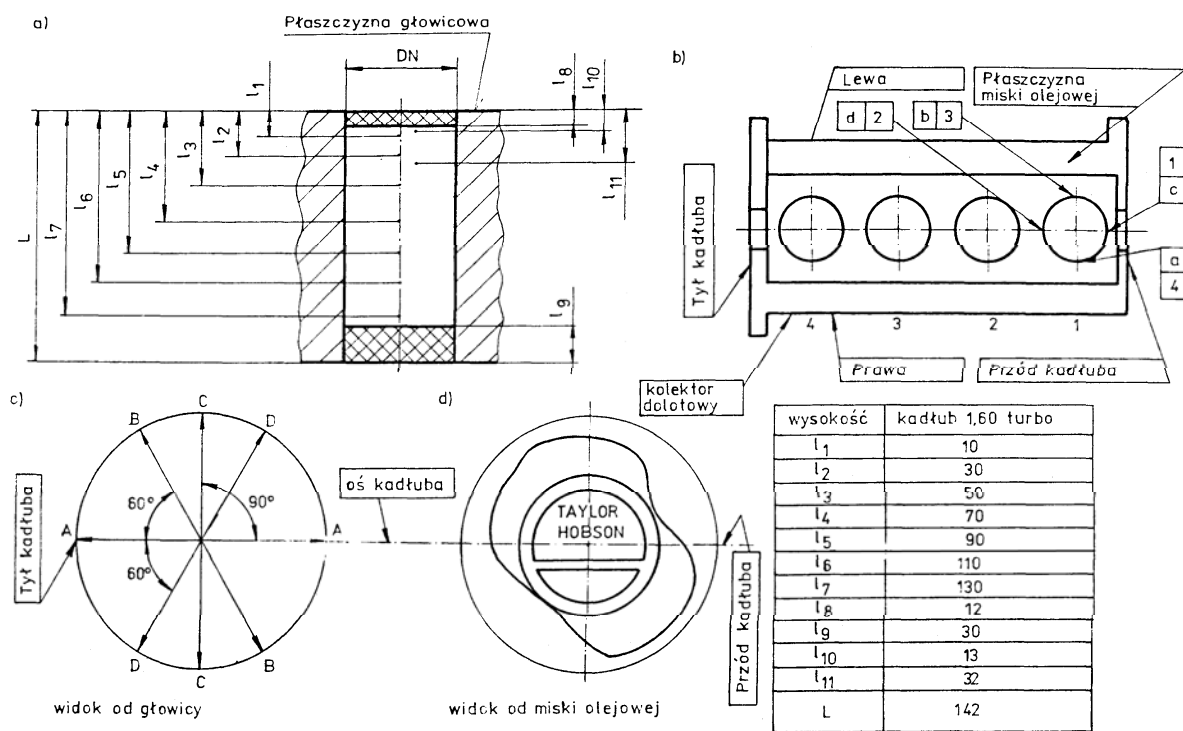
Tabela 4 – Określenie mikrostruktury cylindrów - warstwa podpowierzchniowa, według PN-75/H-04661

Table 4 – Determination of cylinder microstructure - subsurface layer, according to PN-75 / H-04661

Ocena grafitu i osnowy	Cylinder 1, 2, 3	Cylinder 4
1. Górna część cylindra: Kształt wydzielen grafitu: Wielkość wydzielen grafitu: Rozmieszczenie wydzielen grafitu: Udział perlitu: Twardość HB:	Gf1, Gf2 Gw 45-90, Gw 25 w rozetach Gr 1, Gr 5 (rozetkowe) P 185-193	Gf 2 Gw 45-90 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

uniknąć zacierania, szczególnie w warunkach ograniczonego lub słabego smarowania ślizgowego. Jednak duża część płatków grafitu jest zamknięta w wyniku dużych deformacji matrycy spowodowanych zarówno przez mechanizmy ściernie jak i adhezyjne [6]. Badania wykazały wpływ struktury metalograficznej i orientacji grafitu, na zużycie ciernie i znaczną zmienność współczynnika tarcia wzdłuż obszarów zawierających grafity [11]. Zużycie ściernie spowodowane przez twarde zanieczyszczenia cząstkami stałymi (drobinami), jest jedną z głównych przyczyn uszkodzeń krytycznych i awarią silników. Pojedyncza duża cząstka stała może prowadzić bezpośrednio do awarii systemu, podczas gdy małe cząstki mogą powodować ciągłe podwyższone zużycie [4]. Dlatego też, poza teksturą powierzchni materiałów, należy zachować szczególną ostrożność, aby zapewnić stałe kontrolowanie krytycznych czynników, takich jak czystość paliwa i oleju [9]. Ponadto bardziej prawdopodobne jest zacieranie w obszarze zwrotu zewnętrznego komory spalania, gdzie zarówno przyczepność, jak i ścieranie powodują poważne odkształcenie plastyczne struktury metalograficznej materiału cylindra. Występuje w tym obszarze dramatyczny wzrost tarcia [24], z powodu braku smaru i pokrycia zanieczyszczeniami dużej części grafitowych płatków. Cząstki ściernie w procesie tarcia/pracy tulei cylindrowej z żeliwa szarego, mogą wytwarzać głębokie zadrapania przy silnym zniekształceniu matrycy, co skutkuje zamknięciem na powierzchni warstwy grafitu i tym samym pogarsza odporność na ścieranie [6].

Zużycie cylindra podczas 21 godzinowego testu w warunkach zwiększonego zapylenia powietrza jest bardzo silnie skorelowane z największą wysokością profilu chropowatości powierzchni Rp [13]. Parametry Rv i Rp mają interpretacja odpowiednich pól wykresu udziału materiałowego Abbotta Firestone. Istnieje możliwość modelowania wpływu topografii powierzchni na wartość zużycia cierniego cylindra [16].



Rysunek 1 – Schemat pomiaru cylindrów w kałdubie silnika wysokoprężnego 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 kałduba silnika i wykresu odchyłek kształtu cylindrów

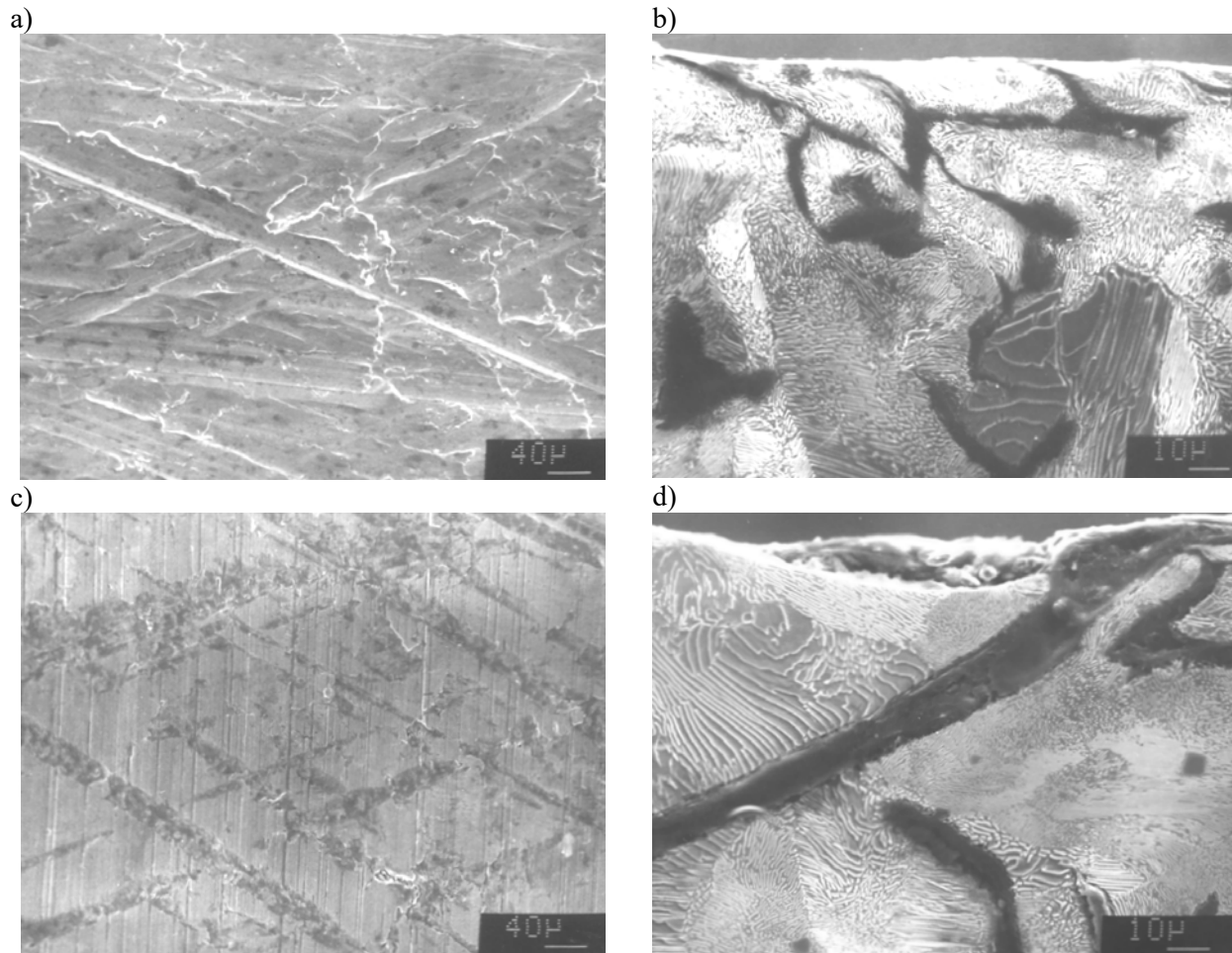
Figure 1 – Cylinder measurement scheme for the 1.6D Turbo Diesel engine. Markings: a) height of measurements, b) location of cylinders for measuring surface roughness and profile of longitudinal section, c) measurement plane of cylinder diameters, d) mutual angle setting of engine block and cylinder shape deviation diagram

Na podstawie literatury stwierdzono istnienie wpływu morfologii wydzielań grafitu na rodzaj zużycia tribologicznego gładzi cylindra silników wysokoprężnych. Dla wielkości wydzielań grafitu $15 \mu\text{m}$ (Gw15) przy rozłożeniu międzydendrytycznym stwierdzono, wyrwania materiału gładzi cylindra. W przypadku wydzielenia grafitu o wielkości od $31 \mu\text{m}$ do $60 \mu\text{m}$ (Gw45) rozłożonego w osnowie perlitycznej równomiernie lub nierównomiernie zużycie gładzi jest łagodne ściernie. Z kolei wydzielenia grafitu płatkowego o długości od $61 \mu\text{m}$ do $120 \mu\text{m}$ (Gw90), mające dużą grubość, ustawione równolegle lub pod niewielkim kątem do powierzchni gładzi, powodują na mostkach osnowy perlitycznej, pomiędzy zakończeniami grafitu a powierzchnią gładzi, rozwój zmęczeniowego niszczenia materiału, co skutkuje tworzeniem się dużych wyrwań. Badania dotyczyły silników wysokoprężnych eksploatowanych w europejskich samochodach osobowych.

WARUNKI BADAŃ

Badaniom poddano silnik Diesla 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 kałduba 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 $0.1 \pm 0.01 \text{ N}$.

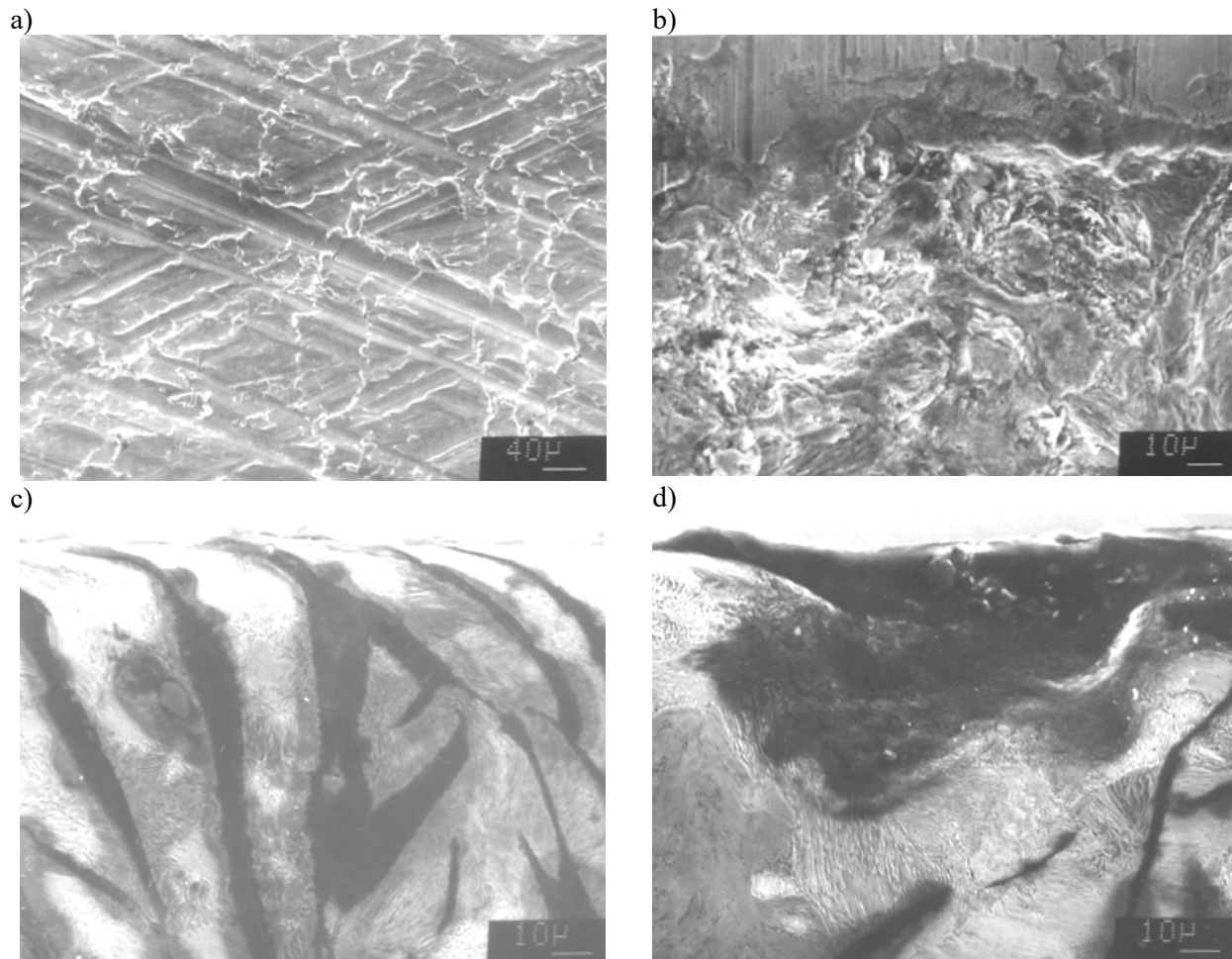


Rysunek 2 – Stan powierzchni (a, c) i strefy podpowierzchniowej (b, d) cylindra 1 po gładzeniu (a, b, płaszczyzna d2, głębokość l7=130 mm, głębokość odkształcenia plastycznego 10 µm) i cylindra po eksploatacji (c, d, płaszczyzna b3, głębokość l10=13 mm)

Figure 2 – Surface condition (a, c) and subsurface area (b, d) of cylinder 1 after honing (a, b, plane d2, depth l7 = 130 mm, plastic deformation depth 10 µm) and cylinder after operation (c, d, plane b3, depth l10 = 13 mm)

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 l1 do l11 (rys. 1). Odchyłki kształtu okrągłości, makrookrągłości, mikrofalistości, prostoliniowości, walcowości mierzono maszyną Taylor Hobson Talyrond 3 PC. Wyznaczono odchyłki promieniowe strategią przekrojów poprzecznych oraz przekrojów wzdłużnych, metodą najmniejszych kwadratów LSC. Stosowano filtr Gaussa, analizowano pomiary o liczbie fal na obrót 1-3, 3-15, 15-500 f/obr (upr - undulation per revolution, ISO 12180-1, ISO 12180-2). Odchylenia promieniowe zarysów poprzecznych cylindrów wyznaczano na wysokościach l1-l11 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 przeprowadzano profilometrem Taylor Hobson



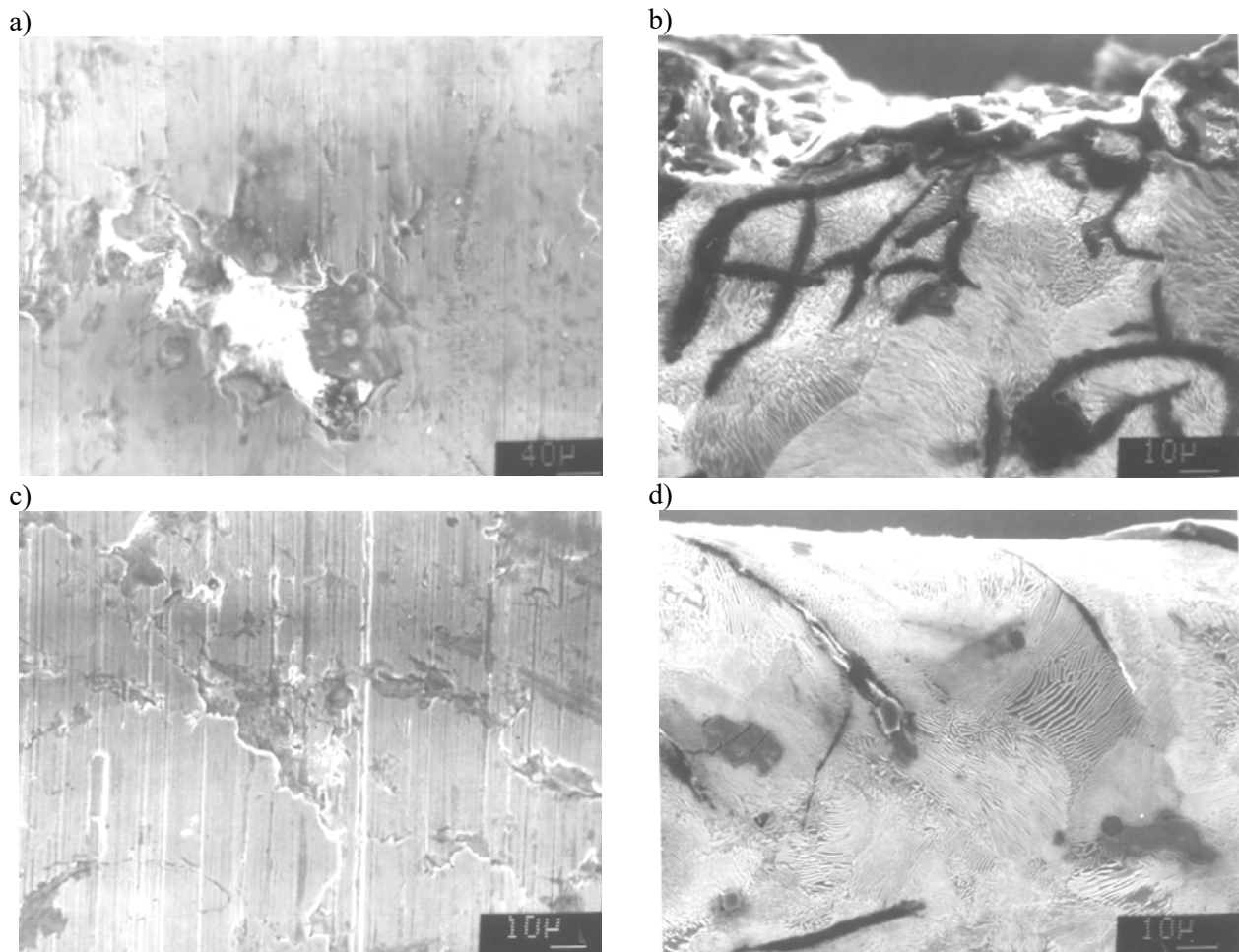
Rysunek 3– Powierzchni (a, b) i strefy podpowierzchniowej (c, d) cylindra 4 po gładzeniu: (a, c, płaszczyzna d2, głębokość l7=130 mm, głębokość odkształcenia plastycznego 20 μm i silne pocienienie płatków grafitu), warstwa powierzchniowa cylindra po eksploatacji (b, d, płaszczyzna b3, głębokość l10=13 mm, zużycie ściernie i adhezyjne, wyrwanie osnowy metalowej)

Figure 3 – Surface (a, b) and subsurface area (c, d) of cylinder 4 after honing: (a, c, plane d2, depth l7 = 130 mm, plastic deformation depth 20 μm and strong thinning of graphite flakes), surface layer cylinder after operation (b, d, plane b3, depth l10 = 13 mm, abrasion and adhesive wear, breakout of the metal matrix)

Talysurf 6 oraz mikroskopem światła białego Talysurf CCI Lite. Przed pomiarami długości przyrządy sprawdzano i porównywano ich zgodność niepewności pomiaru z certyfikatami.

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 (pięciokrotne powtórzenie), zgodnie z 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.

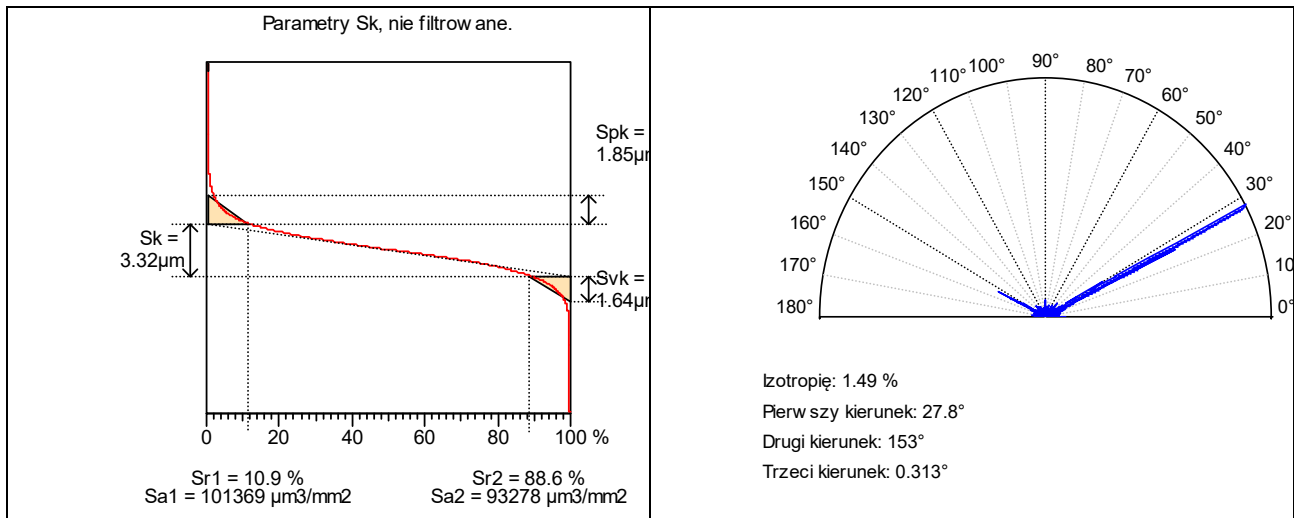


Rysunek 4 – Stan powierzchni i strefa podpowierzchniowa cylindra 4 po eksploatacji: w płaszczyźnie b3 na głębokości: 110=13 mm, wyrwanie osnowy metalowej (a, b), w płaszczyźnie b3 na głębokości: 111=32 mm, odkształcenie plastyczne z zamknięciem płatków grafitu (c, d)

Figure 4 – Surface condition and subsurface zone of cylinder 4 after exploitation: in plane b3 at depth: 110 = 13 mm, breakout of metal matrix (a, b), in plane b3 at depth: 111 = 32 mm, plastic deformation with closing of graphite flakes (c, d)

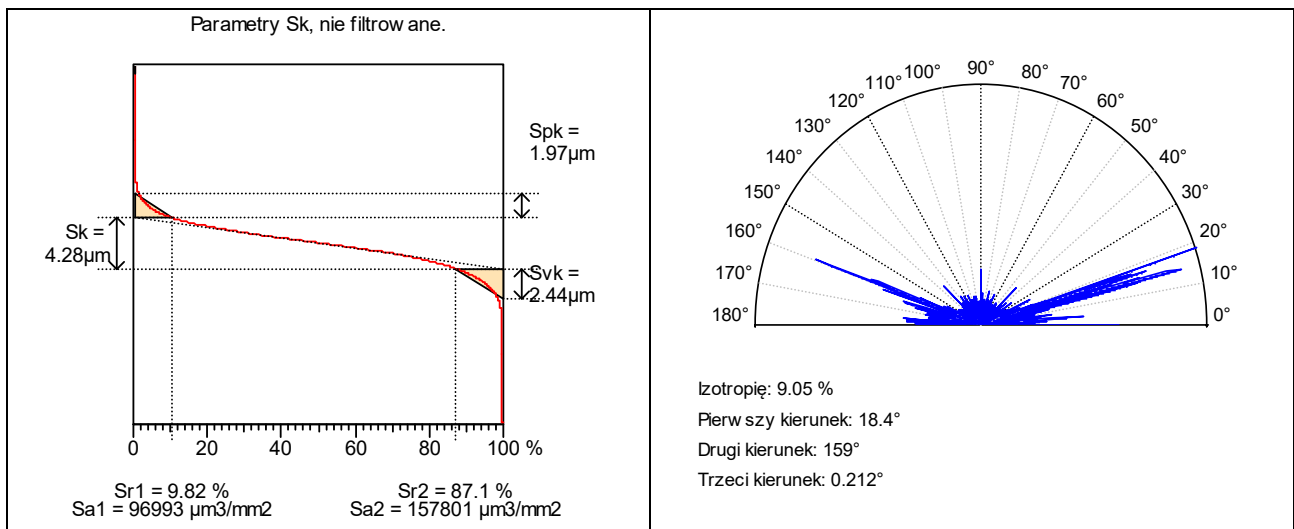
WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wyniki pomiaru średnic cylindrów monobloku silnika wysokoprężnego 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 μm . 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 μm . Natomiast największe wartości odchyłek prostoliniowości zarysu przekroju wzdłużnego wynoszą 9, 10, 11,5 i 7,5 μm . Czyli odchyłki walcowości dla kolejnych cylindrów mają wartość większe jednak zbliżone do wartości odchyłek okrągłości. Podano także wartości średnicy cylindrów wynikłe zarówno ze zużycia tribologicznego spowodowanego pracą jak i odkształceń cieplnych i zmian naprężeń własnych. Maksymalne zmiany średnicy dla kolejnych cylindrów wynoszą 40, 42, 49 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 wynosiły 26,1, 18,9, 21,8 i 21,8 μm . Są one na trzech wyszczególnionych przekrojach owalami, o osi dużej odchylonej w kierunku tyłu kadłuba o kąt około 10-15°. Największe zmiany kształtu cylindrów zaobserwowano na wysokości od 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.



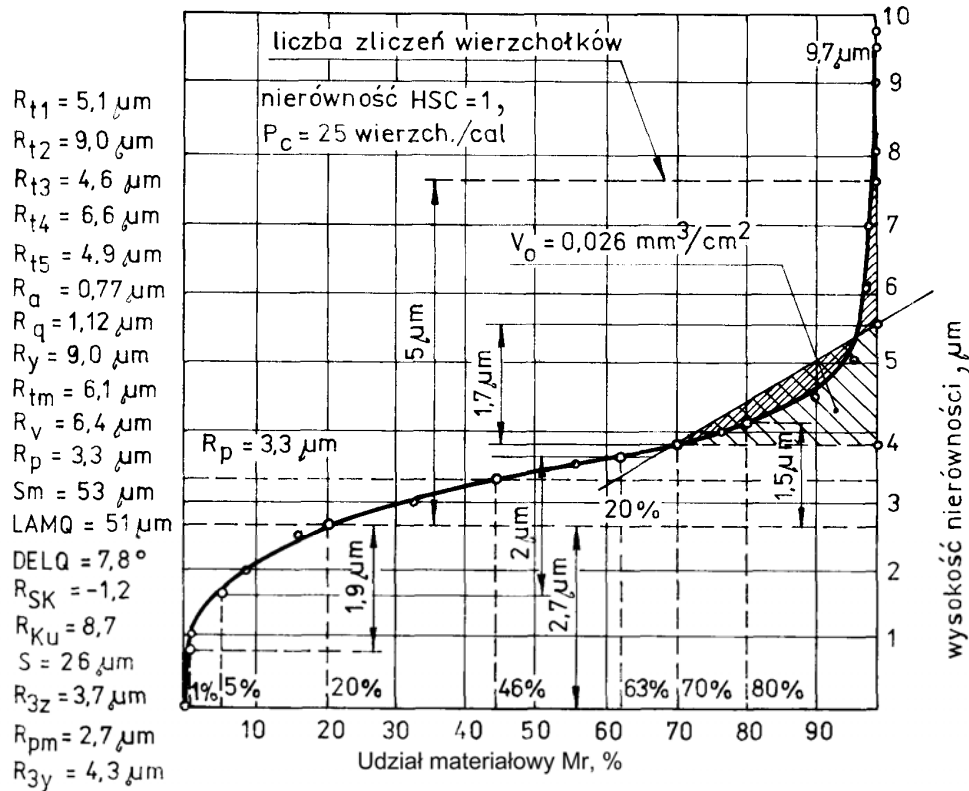
Rysunek 5 – Charakterystyka topografii powierzchni cylindra 1, po gładzeniu na głębokość 136 mm, tworząca 2(d): a) krzywa Abbota Firestone, b) wykres kątowy funkcji autokorelacji. Wartości chropowatości powierzchni: $S_q=1,45 \mu\text{m}$, $S_{sk}=0,31$, $S_{ku}=4,58$, $S_p=11,8 \mu\text{m}$, $S_v=10,3 \mu\text{m}$, $S_z=22,1 \mu\text{m}$, $S_a=1,10 \mu\text{m}$

Figure 5 – Characteristics of cylinder surface topography 1, after honing to a depth of 136 mm, forming 2 (d): a) Firestone Abbot curve, b) angular diagram of the autocorrelation function. Surface roughness values: $S_q = 1.45 \mu\text{m}$, $S_{sk} = 0.307$, $S_{ku} = 4.58$, $S_p = 11.8 \mu\text{m}$, $S_v = 10.3 \mu\text{m}$, $S_z = 22.1 \mu\text{m}$, $S_a = 1.10 \mu\text{m}$



Rysunek 6 – Charakterystyka topografii powierzchni cylindra 4, po gładzeniu na głębokość 136 mm, tworząca 2(d): a) krzywa Abbota Firestone, b) wykres kątowy funkcji autokorelacji. Wartości chropowatości powierzchni: $S_q=1,84 \mu\text{m}$, $S_{sk}=-0,13$, $S_{ku}=3,99$, $S_p=15,0 \mu\text{m}$, $S_v=15,1 \mu\text{m}$, $S_z=30,1 \mu\text{m}$, $S_a=1,42 \mu\text{m}$

Figure 6 – Characteristics of cylinder surface topography 4, after honing to a depth of 136 mm, forming 2 (d): a) Firestone Abbot curve, b) angular diagram of the autocorrelation function. Surface roughness values: $S_q=1.84 \mu\text{m}$, $S_{sk}=-0.13$, $S_{ku}=3.99$, $S_p=15.0 \mu\text{m}$, $S_v=15.1 \mu\text{m}$, $S_z=30.1 \mu\text{m}$, $S_a=1.42 \mu\text{m}$

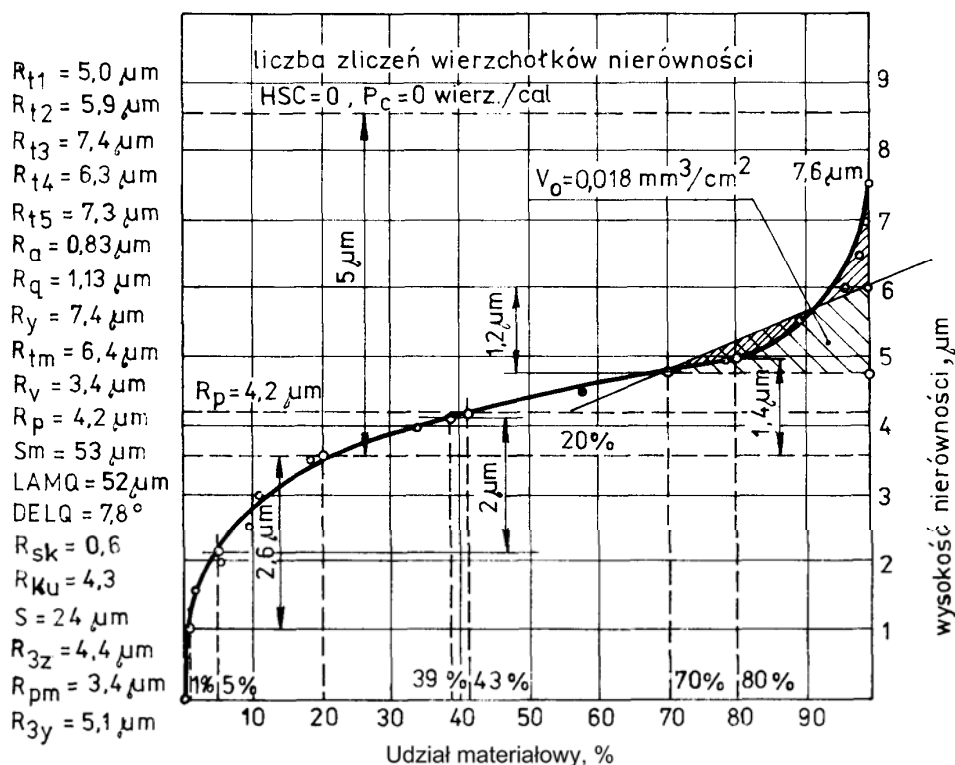


Rysunek 7 – Wartości parametrów profilu chropowatości powierzchni cylindra 1 po gładzeniu, głębokość pomiaru $l=130$ mm, w płaszczyźnie d2 oraz krzywa Abbotta Firestone i jej charakterystyczne parametry (współczynnik niepełności $R_p/R_t=0,37$, skośność $R_{sk}=-1,2$). Odcinek pomiarowy 12,5 mm

Figure 7 - Values of cylinder surface roughness profile parameters 1 after honing, depth of measurement $l=130$ mm, in d2 plane and Abbott Firestone curve and its characteristic parameters (incompleteness factor $R_p/R_t=0,37$, obliquity $R_{sk}=-1,2$). Measuring section 12.5 mm

Na podstawie wykresów odchyłek mikrofalistości, chropowatości gładzi cylindrów, obserwacji powierzchni cylindra warstwy podpowierzchniowej stwierdzono występowanie obok licznych śladów gładzenia zarówno na wysokości 34 mm jak i strefach dolnych, obszary wyrwań osnowy metalowej cylindrów, świadczące o zużyciu adhezyjnym. Również obszary skaz osnowy metalowej występują na 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. 2, 3 i 4).

Chropowatość powierzchni wewnętrznej cylindrów po gładzeniu normalnym wykazuje dużo rozbieżności z wymaganiami stawianymi ich warstwie powierzchniowej silników wysokoprężnych, znanych firm samochodowych [15]. Udział materiałowy M_r wykazuje największe rozbieżności od wartości wymaganej, dla wysokości 2 μm liczonej od wartości $M_r=5\%$ do $M_r=55-75\%$ lub często $M_r=70\%$, wynosi

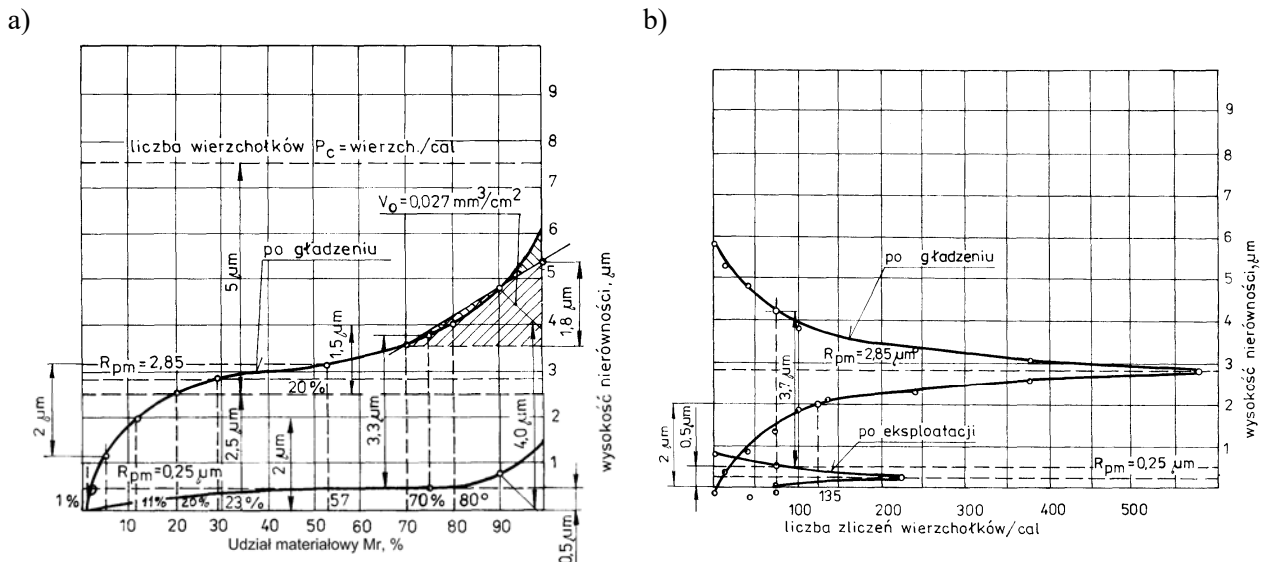


Rysunek 8 – Wartości parametrów profilu chropowatości powierzchni cylindra 4 po gładzeniu, głębokość pomiaru $l_7=130$ mm, w płaszczyźnie d2 oraz krzywa Abbotta Firestone i jej charakterystyczne parametry (współczynnik niepełności $R_p/R_t=0,57$, skośność $R_{sk}=0,60$). Odcinek pomiarowy 12,5 mm

Figure 8 – Values of roughness profile parameters of the cylinder surface 4 after honing, depth of measurement $l_7=130$ mm, in the d2 plane and Abbott Firestone curve and its characteristic parameters (incompleteness factor $R_p/R_t=0.57$, skewness $R_{sk}=0.60$). Measuring section 12.5 mm

bowiem nawet $M_r=20\%$ dla (tab. 2). Również bardzo niekorzystna, zwłaszcza dla cylindra 4, jest liczba wierzchołków na głębokości $5 \mu\text{m}$ poniżej linii odniesienia o udziale materiałowym 20% , gdyż jest zerowa. Pojemność olejowa jest w dolnych granicach dopuszczalnych wartości, wynosi bowiem $0,018-0,026 \text{ mm}^3/\text{cm}^2$. Gęstości rozkładu amplitudy wysokości nierówności określona zarówno współczynnikiem niepełności R_p/R_t jak współczynnikiem skośności R_{sk} dla cylindra 4, jest niepoprawna. Skośność R_{sk} ma zarówno wartość ujemną (profil) $-1,20$ oraz $0,31$ (powierzchnia, rys. 5), cylinder 1, jak i wartość $-0,13$ (powierzchnia) - cylinder 4, rysunek 6. Powierzchnie cylindra 1, 2, 3 jest lekko odkształcona plastycznie, do $10 \mu\text{m}$, i wygląd jej wskazuje na gładzenie ośkami z warstwą diamentową o spoiwie metalowym (rys. 2). Natomiast cylinder 4 jest silnie odkształcony plastycznie, o głębokości do $20 \mu\text{m}$ i ma powierzchnię typu "blechmantel" (rys. 3, 4). Dla wszystkich cylindrów kadłuba diesla 1,6D Turbo występują wyrwania osnowy metalowej po gładzeniu (rys. 2, 3, 4). Odległości pomiędzy motywami chropowatości powierzchni gładzonej określony parametrami S_m, λ_q wynosi $51-53 \mu\text{m}$. Pochylenie chropowatości powierzchni jest bardzo duże, wynosi bowiem $\Delta q=7,8^\circ$. Nie stwierdzono wykruszonych ziaren ściernych na gładzi cylindrów.

Wysokość chropowatości powierzchni, określona parametrem R_a , zawiera się w granicy $0,77-0,83 \mu\text{m}$ oraz $S_a=1,10-1,42 \mu\text{m}$ (powierzchnia) i jest zbliżona do wymagań technicznych zamieszczonych w tabeli 2. Korzystną wartość mają głębokości nierówności powierzchni $R_t=5-9 \mu\text{m}$. Kąt przecięcia rys gładzenia zawiera się w granicy $50^\circ-60^\circ$ i jest zgodny z często wymaganymi wartościami $40^\circ-65^\circ$. Odległości rys gładzenia zawiera się w granicy $94-124 \mu\text{m}$ i odbiega od wymaganej wartości $200-300 \mu\text{m}$, natomiast ich



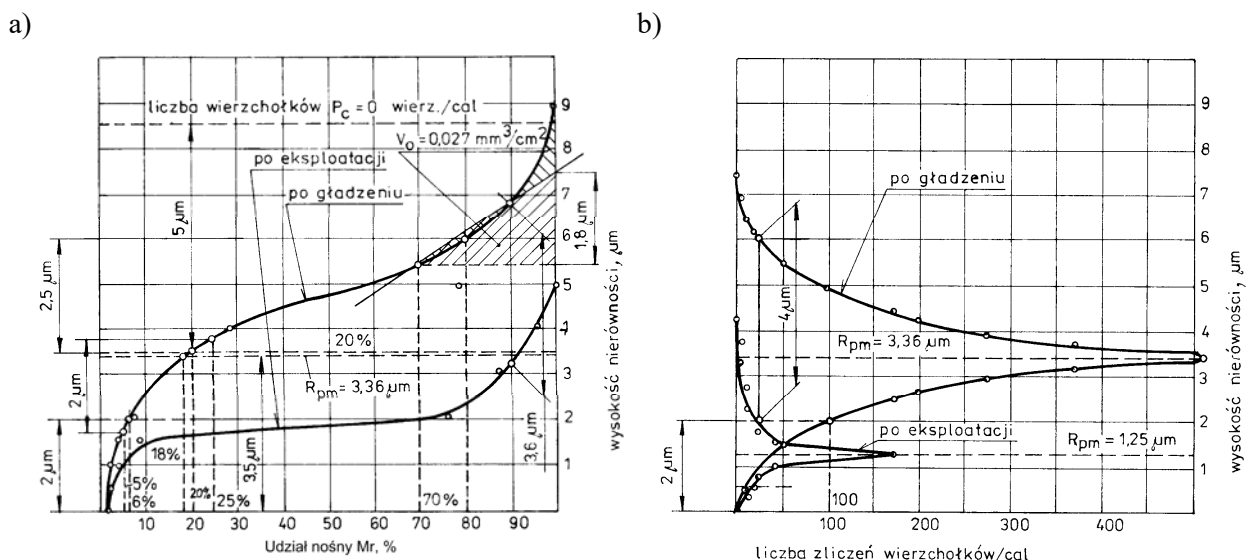
Rysunek 9 – Wykresy Abbota Firestone i liczby zliczeń wierzchołków nierówności cylindra 1 po gładzeniu (płaszczyzna d2, głębokość l7=130 mm) i eksploatacji (płaszczyzna a4, głębokość l2=30 mm) z zaznaczeniem wartości zużycia tribologicznego

Figure 9 – Abbot Firestone charts and number of counts of cylinder inequalities 1 after honing (plane d2, depth l7=130 mm) and exploitation (plane a4, depth l2=30 mm) with the indication of the value of tribological wear

szerokość wynosi 25-36 μm i zbliżona jest do wymaganych wartości 30-75 μm . Wysokość rys smarowych wynosi 4-5 μm i jest mniejsza od wymaganej wysokości wynoszącej 7-10 μm . Wysokość rys gładzenia na powierzchni nośnej jest niewielka, wynosi 1 μm . Liczba zliczonych wierzchołków na głębokości 2 μm , wynosząca 100-140 wierzchołków/cal, jest w dolnej granicy wymagań.

Odchylenie standardowe wysokości powierzchni wzniesień P_pq cylindra 1 jest prawie dwukrotnie mniejsze od cylindra 4, przy zbliżonym odchyleniu standardowym wysokości powierzchni wgłębień P_vq . Odmiennosc profilu cylindra 1 i 4 scharakteryzowano parametrami i wykresem rozkładu rzędnych (rys. 7, 8). Na podstawie wykresu udziału materiałowego i liczby zliczonych wierzchołków nierówności chropowatości po gładzeniu i po eksploatacji (rys. 9, 10), określono średnią promieniową wartość zużycia tribologicznego gładzi cylindra na głębokości 34 mm (tab. 2). Wyznaczona wartość zużycia cylindrów od 1 do 4 wynosiła 3,7-4,0 μm , 3,9-4,0 μm , 3,8-3,9 μm i 3,6-4,0 μm . 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. Analizowane wartości jak i wykresy profili chropowatości powierzchni wskazują, że głębokość rys gładzenia wzdłuż całej długości tworzącej cylindra była jednakowa. Jednocześnie wysokość progu zużycia cylindra 4, wynosząca 16 μm jest znacznie mniejsza aniżeli dla cylindrów 1, 2 i 3, który wynosi 28, 20, 28 μm . 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 odstępów chropowatości [11], 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 (tab. 3). Świadczy o tym zarówno skład chemiczny jak i ocena osnowy struktury metalograficznej (tab. 4, rys. 11). 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 μm) oraz 6 (długość płatków powyżej 30 do 60 μm). Występuje również płatki grafitu w obszarze międzydendrytycznym E o wielkości 7 (długość



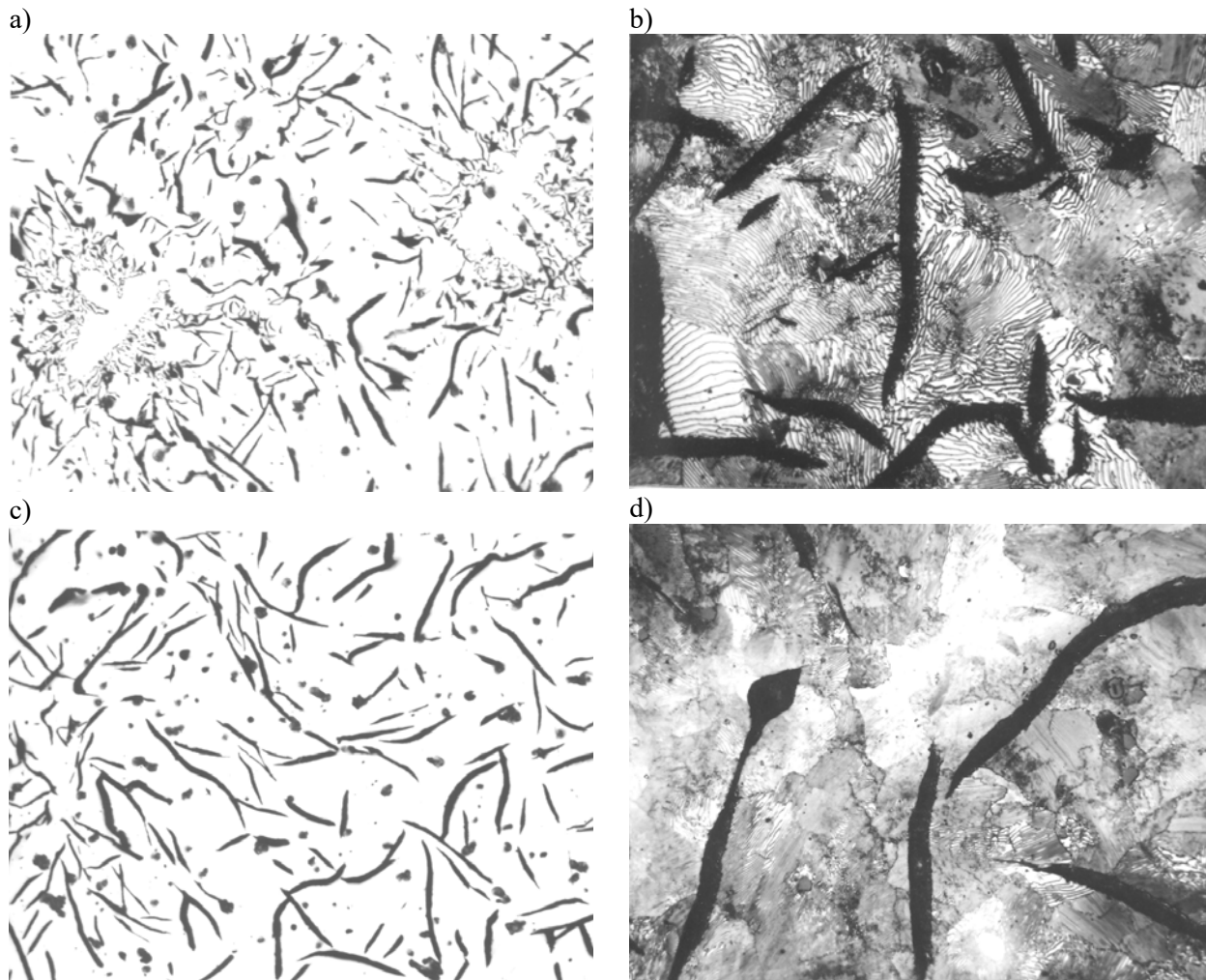
Rysunek 10 – Wykresy Abbota Firestone i liczby zliczeń wierzchołków nierówności cylindra 4 po gładzeniu (płaszczyzna d2, głębokość 17=130 mm) i eksploatacji (płaszczyzna a4, głębokość 12=30 mm) z zaznaczeniem wartości zużycia tribologicznego

Figure 10 – Abbot Firestone charts and number of counts of unevenness of the cylinder 4 after honing (plane d2, depth 17 = 130 mm) and exploitation (plane a4, depth 12 = 30 mm) with the indication of the value of tribological wear

powyżej 15 do 30 μm). Oznaczenie wydzielań grafitu cylindrów 1, 2 i 3 o zróżnicowanym kształcie, rozmieszczeniu i wielkości można zapisać: 60%IB5/6+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 wydzielań grafitu 5/6. W minimalnym stopniu występuje grafit drobny międzycytryczny 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 międzycytrycznym oraz mikrostrukturę perlityczno-ferrytyczną P92. Twardość obszarów ze środka grubości i wysokości cylindra jest najniższa i wynosi 185-191 HB. Jest to najgorszy obszar cylindra. Występuje także zwiększona twardości na ściance 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 zgładzie 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 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 kadłuba mają twardość 185-193 HB. Eutektyka fosforowa i wtrącenia cementytu nie występują w strukturze metalograficznej warstwy powierzchniowej cylindrów.

WNIOSKI

Cylindry badanego kadłuba 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 diesla 1,6D Turbo 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.



Rysunek 11 – 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)

Figure 11 – Formation of graphite in the upper part of the cylinder (a, c, area 110x) and metallographic structure: perlite, flake graphite (b, d, area 440x): cylinder 1 (a, b), cylinder 4 (c, d)

Parametry chropowatości powierzchni cylindrów po gładzeniu konwencjonalnym mają wiele niezgodności w porównaniu z wymaganiami silników wysokoprężnych. Najważniejszym jest zbyt mały udział materiałowy, liczony od $M_r=5\%$, na głębokości $2\ \mu\text{m}$ oraz niepoprawny 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. Wysokość, szerokość, odstęp rys gładzenia są poprawne. Pojemność olejowa nierówności, dla udziału materiałowego 70%, jest w dolnej dopuszczanej granicy. Jednak gładzenie cylindrów jest niepoprawne z uwagi na zbyt duże odkształcenie plastyczne warstwy powierzchniowej "blechmantel", zamknięcie płatków grafitu (do $20\ \mu\text{m}$) 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 R_a chropowatości powierzchni, wynoszącą $0,16-0,20\ \mu\text{m}$. Natomiast cylinder 4 ma większą chropowatość wynoszącą około $R_a=0,32\ \mu\text{m}$. 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.

Monoblok silnika wykonano z żeliwa szarego modyfikowanego z grafitem płatkowym o osnowie

perlitycznej z małą zawartością fosforu (0,031% masowo). Oznaczenie wydzieleni grafitu cylindrów 1, 2 i 3 można zapisać: 60%IB5/6+40%IE7 oraz cylindra 4 jako IA5/6. Świadczy to, że cylinder 4 nie ma grafitu o rozłożeniu międzydentrycznym. 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 międzydentrycznym 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 ścian bocznych monobloku, naprzeciw cylindrów, wynosiła 210-223 HB.

Wartość zużycia promieniowa cylindrów od 1 do 4 była zbliżona i wynosiła 3,7-4,0 μm , 3,9-4,0 μm , 3,8-3,9 μm i 3,6-4,0 μm . Wyznaczono ją na podstawie zmiany parametrów pionowych i poziomych profilu chropowatości powierzchni warstwy powierzchniowej [13]. Wysokość progu zużycia cylindra 4 wynosi 16 μm . Jest ona znacznie mniejsza aniżeli dla cylindrów 1, 2 i 3, gdzie wynosi 28, 20, 28 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. Cylinder 4, wskutek zamknięcia płatków grafitu na powierzchni gładzi cylindra oraz odkształcenia plastycznego, wad strefy podpowierzchniowej „blechmantel”, uległ w krótkim okresie pracy silnika w samochodzie Polonez zużyciu adhezyjnemu ze silnie wyodrębnionymi strefami zacierania. Wyniki badań wskazują, że struktura metalograficzna żeliwa szarego była czynnikiem decydującym o wartości zużycia ciernego silnika w eksploatacji. Z kolei wad strefy podpowierzchniowej „blechmantel” wpłynęły na nieakceptowane formy zużycia gładzi cylindra, tj. zużycie adhezyjne i zacieranie.

REFERENCES

1. Cai A.-K., Cheng J.-W., Gong C.-Q., Cao S.-F., Yang Y.-L. (2013) Reason analysis and solving measures of crack-shaped blowhole in thick wall gray iron casting. *Zhuzao/Foundry*, 62 (6) 557-560.
2. Challenges and Priorities for Automotive R&D (2011) The Strategic Pillars of Research & Innovation. EUCAR European Council for Automotive R&D, Proceeding, 27th May, Brussels, 2011.
3. Collini L., Nicoletto G., Konečná R. (2008) Microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron. *Materials Science and Engineering: A*, 488 (1-2) 529-539.
4. Cozza R.C., Tanaka D.K., Souza R.M.: (2011) Friction coefficient and wear mode transition in micro-scale abrasion tests, *Tribology International*, 44 (12), 1878-1889.
5. Dimkovski Z., Anderberg C., Ohlsson R., Rosén B-G. (2011) Characterisation of worn cylinder liner surfaces by segmentation of honing and wear scratches. *Wear*, 271, 548-552.
6. Ghasemi, R.; Elmquist, L.; Ghassemali, E.; Salomonsson K., Parfors A.E.W. (2018) Abrasion resistance of lamellar graphite iron: Interaction between microstructure and abrasive particles. *Tribology International*, 120 (465-475).
7. Gruszka J. (2012) Technologiczne kształtowanie cech funkcjonalnych warstwy powierzchniowej tulei cylindrowych. *Rozprawy nr 465*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
8. Guesser W., Guedes L.: (2016) The new generation of engines and the challenges for the foundry industry. *Blucher Engineering Proceedings*, 3(1):28-47.
9. Keller J., Fridrici V., Kapsa Ph., Huari J.F. (2009) Surface topography and tribology of cast iron in boundary lubrication. *Tribology International*, 42 (6) 1011-1018.
10. Mezghani, S., Demirci, I., Yousfi, M., El Mansoria M. (2013) Running-in wear modeling of honed surface for combustion engine cylinder liners. *Wear* 302 (1-2) 1360-1369.

11. Michalski J., Pawlus P. (1994) 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.
12. Michalski J. (2006) Tendencje rozwoju technologii gładzenia cylindrów silników o zapłonie samoczynnym. Науково-мехнічний збірник НТУ, Київ, 12, 30-39.
13. Michalski J., Woś P. (2011) The effect of cylinder liner surface topography on abrasive wear of piston-cylinder assembly in combustion engine. *Wear*, 271 (3-4) 582-589.
14. Pawlus P., Dzierwa A., Michalski J., Reizer R., Wiczerowski M., Majchrowski R. (2013) The effect of selected parameters of the honing process on cylinder liner surface topography. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2 025004.
15. Pawlus P., Michalski J., Rejzer R. (2012) 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.
16. Pawlus P., Michalski J. (2009) Simulation of cylinder 'zero-wear' process, *Wear*, 266 (1-2) 208-213.
17. Saeed A., Khan Z.A., Hadfield M., Davies S. (2013) Material characterization and real-time wear evaluation of pistons and cylinder liners of the Tiger 131 military tank. *Tribology Transactions*, 56 (4), 637-644.
18. Slattery B.E., Edrissy A., Perry T. (2010) Investigation of wear induced surface and subsurface deformation in a linerless Al-Si engine. *Wear*, 269 (3-4) 298-309.
19. Tomanik E. (2008) Friction and wear bench tests of different engine liner surface finishes. *Tribology International*, 41 (11) 1032-1038.
20. Trytek A., Orłowicz A. W., Mróz M., Tupaj M. A. (2015) Shaping the microstructure of cast iron automobile cylinder liners aimed at providing high service properties. *Archives of Foundry Engineering*, 15 (2), 79-84.
21. Tupaj M. (2013) 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.
22. do Vale J. L. C. M., Bertolini V. M. S., da Silva C. H., Pintaude G.: (2017) Comparison of scratch resistance of lamellar and compacted graphite irons used in cylinder liners. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39 (10), 3981-3988.
23. Woś P., Michalski J. (2011) Effect of initial cylinder liner honing surface roughness on aircraft piston engine performances. *Tribology Letters*, 41 (3) 555-567.
24. Zabala B., Igartua A., Fernández X., Priestner C., Ofner H., Knaus O., Abramczuk M., Tribotte P., Girot F., Roman E., Nevshupa R. (2017) Friction and wear of a piston ring/cylinder liner at the top dead centre: experimental study and modeling, *Tribology International*, 106, 23-33

STRESZCZENIE

WOŚ Paweł, MICHALSKI Jacek. Wpływ wad strefy podpowierzchniowej "blechmantel" i struktury metalograficznej żeliwa na wartość zużycia tribologicznego i skłonność do zatarcia gładzi cylindrowych silnika wysokoprężnego / Paweł WOŚ, Jacek MICHALSKI // *Wisnyk Narodowego Uniwersytetu Transportu. Seria "Nauki techniczne"*. – K. : NTU, 2018. – № 3(42).

Przedstawiono dokładność wymiaru i kształtu, topografię powierzchni, parametry chropowatości powierzchni, charakterystykę metalograficzną oraz wady strefy podpowierzchniowej tak zwany "blechmetal" cylindrów kadłuba silnika wysokoprężnego diesla 1.6D Turbo, napędzającego samochód Polonez FSO, po przebiegu 5762 km. Stwierdzono odmienny charakter i wartość zużycia cylindrów 1, 2, 3 w porównaniu z cylindrem 4. Mniejsze zużycie tribologiczne cylindra 4 wynikało z jego większej twardości, spowodowanej dyspersją perlitu, korzystnych wydzieleni grafitu płatkowego w porównaniu z cylindrami 1, 2 i 3. Z kolei zatarcie i zużycie adhezyjne gładzi cylindra 4 uzasadniono zwiększonym odkształceniem plastycznym powierzchni uzyskanej gładzeniem. Nastąpiło to pomimo nieco większej wysokości chropowatości powierzchni i powszechnej opinii, że zwiększenie wysokości chropowatości zmniejsza niebezpieczeństwo zatarcia.

РЕФЕРАТ

ВОШ Павель, МІХАЛЬСКИ Яцек. Вплив дефектів шару підповерхневого "blechmantel" і металографічної структури чавуну на вартість зносу трибологічних і тенденція до згладжування згладжування циліндрів дизельного двигуна / Павель ВОШ, Яцек МІХАЛЬСКИ // Вісник Національного транспортного університету. Серія "Технічні науки". Науково-технічний збірник. – К.: НТУ, 2018. – Вип. 3 (42).

В статті наведено результати досліджень впливу дефектів підповерхневого шару та металографічної структури чавуну на величину трибологічного зносу та тенденцію до схоплювання матеріалу циліндричного вкладиша дизеля.

Об'єкт експериментальних досліджень – чотирициліндровий дизель 1.6D автомобіля Polonez.

Наведено точність вимірювання та форми, топографії поверхні, параметри шорсткості поверхні, металографічні характеристики та недоліки підповерхневого шару циліндрів двигуна автомобіля Polonez з пробігом 5762 км. Встановлено різну природу та значення зносу першого, другого і третього циліндрів в порівнянні з четвертим циліндром. Менший трибологічний знос четвертого циліндра зумовлений його більшою твердістю, обумовленою дисперсією перліту, корисними вставками плавленого графіту в порівнянні з циліндрами 1, 2 і 3. У свою чергу, в четвертому циліндрі спостерігали часткове схоплення матеріалу та підвищений адгезійний знос. Це можна пояснити збільшенням пластичної деформації поверхні, отриманої шляхом шліфування.

Після експлуатації поверхневий шар циліндрів 1, 2 і 3 має численні сліди хонінгу та приблизно однакове значення висоти R_a шорсткості поверхні (0,16-0,20 мкм). На відміну від цього, циліндр 4 має більшу шорсткість, приблизно $R_a = 0,32$ мкм. В результаті аналізу стану поверхні і приповерхневого шару виявлено розірваний матричний матеріал після хонінгування, виникнення заїдання. Слід зазначити, що це сталося, незважаючи на більшу шорсткість циліндра 4. При тому, що вважається, що збільшення висоти нерівності знижує ризик схоплювання матеріалу.

Результати випробувань вказують на те, що металографічна структура сірого чавуну була вирішальним фактором в значенні тертя зносу двигуна в експлуатації. У свою чергу, дефекти в приповерхневому шарі призвели до неприйнятних форм зносу стінки циліндра, тобто, адгезійного зносу і задирів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЗНОС, ШОРСТКІСТЬ, ШЛІФУВАННЯ, НЕРІВНОСТІ, ЗАДИРИ, ДИЗЕЛЬ, ТРИБОЛОГІЯ.

ABSTRACT

WOŚ Paweł, MICHALSKI Jacek. Influence of defects layer subsurface "blechmantel" and metallographic structure cast iron on value wear tribological and tendency to scuffing smoothing a cylinders of a diesel engine. Visnyk of National Transport University. Series "Technical sciences". Scientific and Technical Collection. Kyiv. National Transport University. 2018. Vol. 3(42).

The article presents the results of investigations of the influence of defects of the subsurface layer and the metallurgical structure of cast iron on the magnitude of tribological wear and the tendency to adhere to the material of the cylindrical liner of the diesel engine.

The object of experimental research is a 1.6D Polonez four-cylinder diesel.

The accuracy of the measurement and form, the topography of the surface, the surface roughness parameters, the metallographic characteristics and the disadvantages of the sub-surface layer of the cylinders of the Polonez engine with a run of 5762 km are given. Different nature and significance of wear of the first, second and third cylinders in comparison with the fourth cylinder have been established. Less tribological wear of the fourth cylinder is due to its higher hardness due to the perlite dispersion, useful inserts of fused graphite in comparison with cylinders 1, 2 and 3. In turn, in the fourth cylinder, partial grabbing of the material and increased adhesive wear were observed. This can be explained by an increase in the plastic deformation of the surface obtained by grinding.

After use, the surface layer of cylinders 1, 2, and 3 has numerous traces of honing and approximately the same value of height R_a of surface roughness (0.16-0.20 microns). In contrast, the cylinder 4 has a greater roughness, about $R_a = 0.32$ microns. As a result of the analysis of the surface and sub surface layer, a tattered matrix material was detected after honing, the occurrence of jamming. It should be noted that this

occurred, despite the greater roughness of the cylinder 4. In spite of the fact that it is believed that an increase in the height of the inequality reduces the risk of grappling material.

The results of the tests indicate that the metallographic structure of gray cast iron was a decisive factor in the value of friction wear of the engine in operation. In turn, defects in the near-surface layer led to unacceptable forms of wear of the cylinder wall, that is, adhesion wear and tear.

KEY WORDS: WARNING, REDUCTION, SLEEPING, INHERNITY, RADIATION, DIESEL, TRIBOLOGY.

AUTOR:

WOŚ Paweł, Dr inż., Politechnika Rzeszowska, adiunkt, Katedra Silników Spalinowych i Transportu, pwos@prz.edu.pl, tel.: +48178651805, 35-959, Rzeszów, Polska, Al. Powstańców Warszawy 12, orcid.org/0000-0003-2730-3258.

MICHALSKI Jacek, Prof. Dr hab. inż., Politechnika Rzeszowska, Profesor, Katedra Silników Spalinowych i Transportu, jmichals@prz.edu.pl, tel.: +48178651531, 35-959, Rzeszów, Polska, Al. Powstańców Warszawy 12

АВТОРИ:

ВОШ Павел, кандидат технічних наук, Жешовська Політехніка, доцент, кафедра двигунів внутрішнього згоряння і транспорту, pwos@prz.edu.pl, тел.: +48178651805, 35-959, Жешув, Польща, бульвар Повстанців Варшави 12, orcid.org/0000-0003-2730-3258.

МІХАЛЬСКИ Яцек, професор, доктор хабілітований, Жешовська Політехніка, професор кафедри двигунів внутрішнього згоряння і транспорту, jmichals@prz.edu.pl, тел.: +48178651531, 35-959, Жешув, Польща, бульвар Повстанців Варшави 12

AUTHORS:

WOŚ Paweł, PhD, Rzeszow University of Technology, associate professor of the internal combustion engines and transport department, pwos@prz.edu.pl, tel.: +48178651805, 35-959, Rzeszow, Poland, Av. Powstancow Warszawy 12, orcid.org/0000-0003-2730-3258.

MICHALSKI Jacek, Doctor of Technical Science, Rzeszow University of Technology, professor of the internal combustion engines and transport department, jmichals@prz.edu.pl, tel.: +48178651531, 35-959, Rzeszow, Poland, Av. Powstancow Warszawy 12

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Посвятенко Е.К., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, професор кафедри виробництва, ремонту і матеріалознавства, Київ, Україна.

Любас Януш, доктор технічних наук, професор, Жешувська політехніка, професор кафедри двигунів внутрішнього згоряння і транспорту, Жешув, Польща.

REVIEWER:

Posviatenko E.K., Doctor of Technical Sciences, professor, National Transport University, professor of the production, repair and materials science department, Kyiv, Ukraine.

Lubas Janush, Doctor of Technical Sciences, professor, Rzeszow University of Technology, professor of the internal combustion engines and transport department, Rzeszow, Poland.