

Застосування даного пристрою суттєво спрощує практичне використання запропонованого алгоритму подолання прогнозованих перешкод КТЗ.

Список літератури

1. Audi's new traffic-light countdown is the first step to smarter cities / [Електронний ресурс] // Режим доступу <https://www.engadget.com/2016/12/09/audis-traffic-light-countdown/>
2. Колунов А.І. Пристрій для індикації рекомендованої швидкості руху / Патент на корисну модель // Пуб. № WO/2012/166010, 06.12.2012.
3. Мазилюк П. В. Подолання прогнозованих перешкод транспортними засобами / О. П. Сітовський, П. В. Мазилюк // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Серія: Автомобілебудування. — Харків: НТУ "ХПІ", 2015. — Вип. 10 (1119). С.102-106.

УДК 629.113

EKSPLOATACYJNE ZUŻYCIE TRIBOLOGICZNE CYLINDRÓW DOŁADOWANEGO SILNIKA WYSOKOPRĘŻNEGO WYNIKAJĄCE Z WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁOWYCH JEGO ŻELIWNEGO BLOKU

TRIBOLOGIC WEAR OF CYLINDERS IN TURBOCHARGED DIESEL ENGINE RESULTED FROM MATERIAL PROPERTIES OF CAST IRON BLOCK

Jacek Michalski, Paweł Woś

*Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
Aleja Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów*

The chemical composition, metallographic structure, graphite form and hardness of cast iron cylinders in 1.6D Turbo Diesel engine block powering a Polonez FSO car, after a very small run of 5762 km were shown. The accuracy of dimension and shape as well as the topography of the surface of its cylinders are also provided. A different value of abrasive wear of cylinders 1, 2, 3 was found in comparison with cylinder 4. The lower tribological wear of cylinder 4 resulted from its higher hardness caused by pearlite dispersion and more favorable shape of gray iron graphite particles, as compared to cylinders 1, 2 and 3 shown. This occurred for a similar geometric structure of the surface of the coated cylinders at a slightly higher height surface roughness of the fourth cylinder.

Wprowadzenie

Silniki spalinowe tłokowe pomimo swojej ponad stuletniej historii nadal pozostają i prawdopodobnie pozostaną na najbliższe dziesięciolecia podstawową jednostką napędową środków transportu i maszyn roboczych [1]. 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.

Rozwój konstrukcyjny silników spalinowych wymaga od gładzi 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 podatność technologiczną nowych gatunków materiałów, w tym zwłaszcza żeliw w procesie ich odlewania, oraz zdolność technologiczną uzyskania makroształu i mikroształu otworu.

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, falistość, mikrofalistość, topografia, czystość powierzchni i skazy).

Stosowane rozwiązania konstrukcyjne cylindrów w zależności od materiału to najczęściej: blok monolityczny żeliwny lub ze stopu aluminium, wciskane, zaciskane lub zalewane (wbudowane w procesie odlewania) 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 [2-12].

Korzystną mikrostrukturę stopów nadeutektycznych Al-Si o wysokiej odporności na zużycie ścierne i zacieranie tulei silników samochodowych można uzyskać poprzez drobne ziarna z krzemu [5].

Tabela 1

Charakterystyka silnika wysokoprężnego 1.6D Turbo

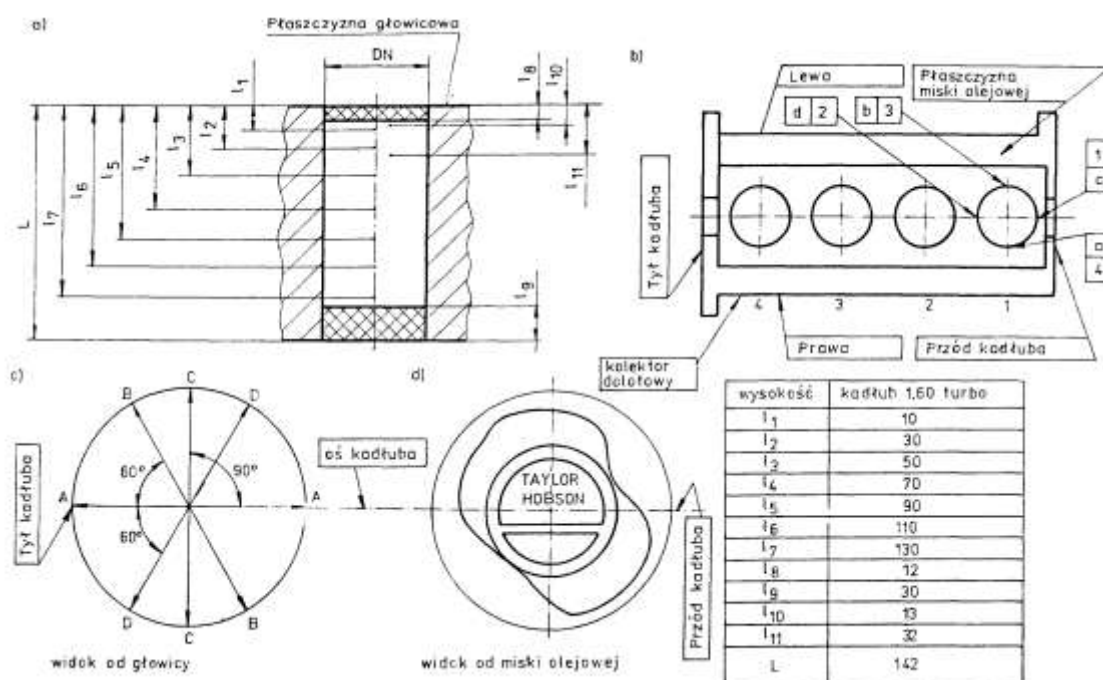
Wielkości charakterystyczne	Wartość
Średnica cylindra:	76,5 mm
Skok tłoka:	86,4 mm
Pojemność skokowa:	1588 cm ³
Stopień sprężania:	23,0
Ciśnienie sprężania: - standardowe, - minimalne, - maksymalna różnica ciśnienia między cylindrami.	3,4 MPa 2,6 MPa 0,5 MPa
Moc przy 4500 obr/min:	51 kW (70 KM)
Maksymalny moment obrotowy osiągnąty od 2500 obrotów na minutę:	133 Nm

Uzyskiwane jest to poprzez modyfikację ciekłego metalu, przyspieszone chłodzenie w fazie krzepnięcia stopu, w tym przetapianie powierzchni odlewu za pomocą skoncentrowanego strumienia ciepła z wiązki laserowej lub łuku elektrycznego, jak i natryskiwanie plazmowe w celu uzyskania powłoki gradientowej NiAl+Al₂O₃ lub nanoszenie natryskiwanej plazmowo powłoki przy użyciu proszku wytworzonego ze stopu Al-Si, zawierającego do 30% Si. Stwierdzono korzystne właściwości gładzonej tulei cylindrowych ze stopu Al-Si (Al-9.0% Si) po termicznym natrysku plazmowym stałą 1010, przy współpracy z pierścieniami tłokowymi o powłokach węgiel diamentopodobny (DLC) i azotek chromu (CrN) [6].

Warunki badań

Badaniom poddano czterosuwowy, rzędowy, czterocylindrowy silnik z zapłonem samoczynnym typu 1.6D Turbo, chłodzony cieczą, 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.

Wartości średnicy otworów cylindrów kadłuba zmierzono na wysokości 22, 63, 103 mm w czterech płaszczyznach (A-A wzdłuż płaszczyzny wzdłużnej, C-C wzdłuż płaszczyzny prostopadłej do osi wału korbowego oraz wzdłuż płaszczyzn B-B i C-C położonych pod kątem 60°). Umożliwiło to numeryczne wyznaczenie odchyłki kąta przestrzennego położenia i odległości osi cylindra do osi wału korbowego.



Rys. 1. Schemat pomiaru cylindrów w kadłubie 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 kadłuba silnika i wykres odchylek kształtu cylindrów

Przestrzenna odległość osi wału korbowego do osi cylindrów wynosiła od 0,03 do 0,05 mm. Również wyznaczono minimalną wpisaną średnicę cylindrów oraz maksymalną opisaną średnicę tłoków, aby sprawdzić poprawność luzu tego złozenia. Pomiar przeprowadzono 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 trzpienia kulistych 8 mm. Średnice cylindrów mierzono w przekrojach A-A, B-B, C-C i D-D na siedmiu wysokościach od l₁ do l₇ (rys. 1). Dla prowadzonych analiz rozpatrywano także cechy gładzi cylindrów na wysokościach l₉-l₁₁. Z kolei odchyłki kształtu okrągłości, makrookrągłości i mikrofalistości, mierzono maszyną Taylor Hobson

Talyrond 3 PC. Wyznaczono odchyłki promieniowe strategią przekrojów poprzecznych oraz przekrojów wzdłużnych, metodą najmniejszych kwadratów LSC [13, 14]. Stosowano filtr Gaussa.

Tabela 2

Dokładność wymiaru i kształtu cylindrów oraz szacowane wartości zużycia tribologicznego promieniowego

Wyszczególnienie	Cylinder 1	Cylinder 2	Cylinder 3	Cylinder 4
Średnia średnica cylindra, mm	76,520	76,519	76,521	76,524
Maksymalna średnica cylindra, mm	76,540	76,537	76,543	76,544
Minimalna średnica cylindra, mm	76,500	76,495	76,494	76,435
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
Wartość odchyłki walcowości LSC, strategią przekrojów poprzecznych na wysokości 22, 63, 103 mm, mm	0,020	0,021	0,019	0,024
Wysokość 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
Kąt gładzenia (Goetze 40°-65°), °	60	60	55	50
Średnia wysokość progu zużycia z płaszczyzn c1, d2, b3, a4, mm	0,0228	0,0203	0,0196	0,0131

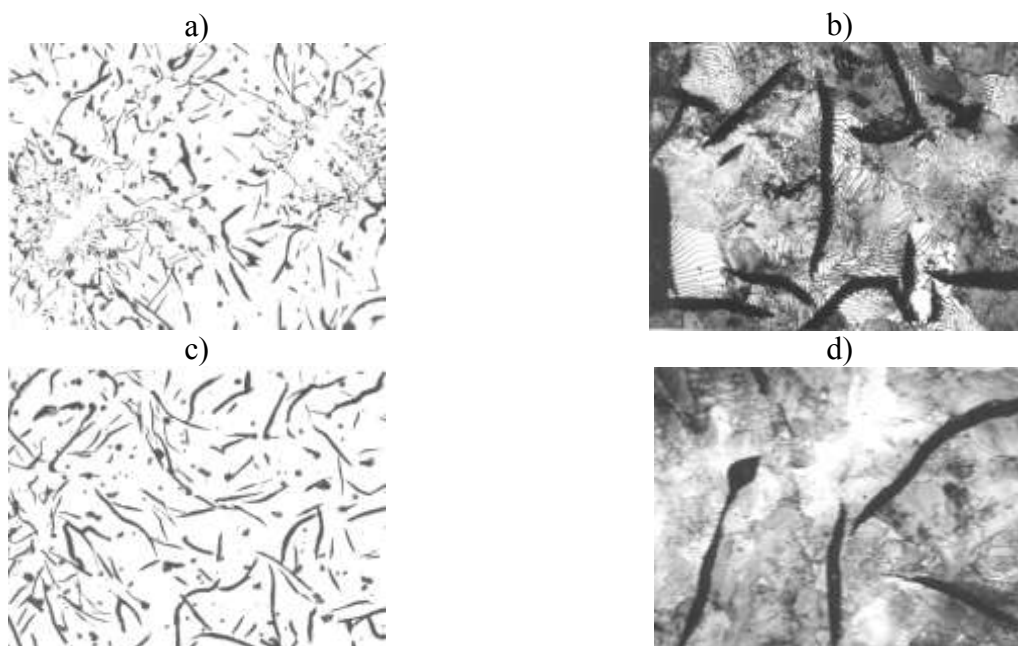
Analizowano pomiary o liczbie fal na obrót 1-3, 3-15, 15-500 f/obr (ang. upr - undulation per revolution) [15, 16]. Wyznaczono także wartości prostoliniowości i walcowości cylindrów (tab. 2). Odchylenia promieniowe zarysów tworzących cylindrów wyznaczano na wysokościach l₁-l₁₁ od płaszczyzny płyty górnej kadłuba. Pomiary zarysu przekroju wzdłużnego przeprowadzono wzdłuż tworzących cylindrów które oznaczono; a4, b3, c1 i d2. Kadłub silnika spoczywał na odpowiednio zamocowanej głowicy silnika, natomiast pomiary przeprowadzono od strony miski olejowej.

Parametry chropowatości powierzchni cylindrów wyznaczono na podstawie zmierzonych profili wzdłuż tworzących cylindrów profilometrem Taylor Hobson Talysurf. Odcinek pomiarowy wynosił 4 mm, z zastosowaniem filtra Gaussa 0,8 mm. Strukturę metalograficzną cylindrów wyznaczono z wyciętych próbek z kierunku prostopadłego do tworzących cylindrów. Obserwacje przeprowadzono na zglądach polerowanych nietrafionych i trawionych Nitaliem, mikroskopem metalograficznym Neophot 2 Carl Zeiss Jena oraz mikroskopem skaningowym Novascan 30.

Tabela 3

Skład chemiczny monobloku

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



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)

Skład chemiczny wybranych obszarów kadłuba silnika określono analizą ilościową, metodą emisyjnej spektrometrii atomowej ze wzbudzeniem iskrowym przy pomocy spektrometru ARL 3460 (tab. 3). 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.

Tabela 4

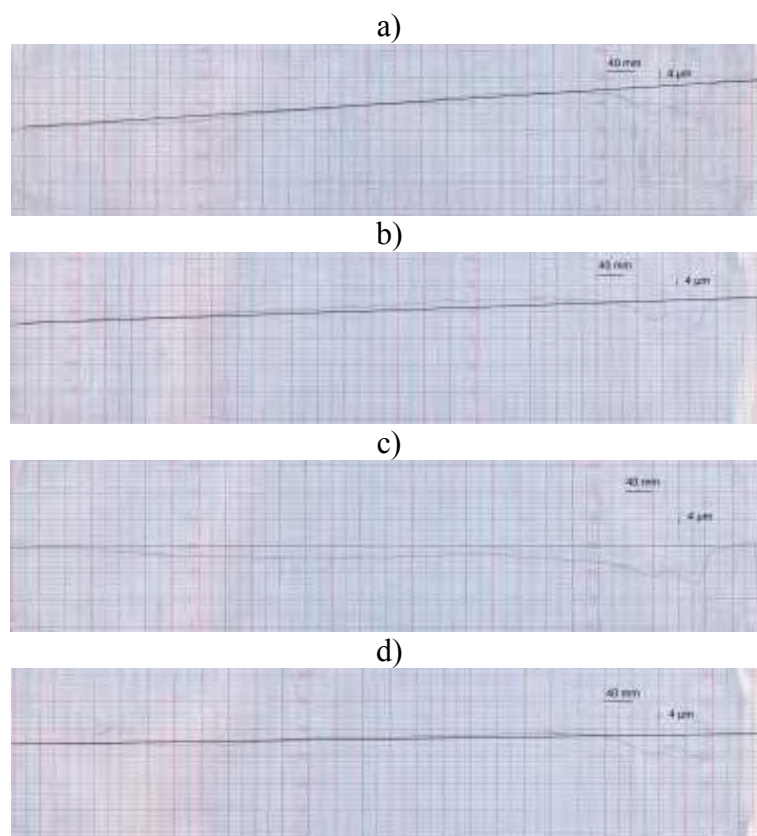
Określenie mikrostruktury cylindrów - warstwa podpowierzchniowa, według PN-75/H-04661

Ocena grafitu i osnowy	Cylinder 1, 2, 3	Cylinder 4
1. Górna część cylindra:		
Kształt wydzieliń grafitu:	Gf1, Gf2	Gf 2
Wielkość wydzieliń grafitu:	Gw 45-90, Gw 25 w rozetach	Gw 45-90
Rozmieszczenie wydzieliń grafitu:	Gr 1, Gr 5 (rozetkowe)	Gr 2
Udział perlitu:	P	P
Twardość HB:	185-193	202-206
2. Środek wysokości cylindra:		
Kształt wydzieliń grafitu:	Gf 2	Gf 2
Wielkość wydzieliń grafitu:	Gw 45-90, Gw 25 rozety	Gw 45-90
Rozmieszczenie wydzieliń grafitu:	Gr 2, Gr 6, Gr5 (rozetkowe)	Gr 2
Udział perlitu:	P	P
Twardość HB:	185-193	202-206
3. Dolna część cylindra:		
Kształt wydzieliń grafitu:	Gf2	Gf 2
Wielkość wydzieliń grafitu:	Gw 45-90, Gw 25 w rozetach	Gw 45-90
Rozmieszczenie wydzieliń grafitu:	Gr 2, Gr 5 (rozetkowe)	Gr 2
Udział perlitu:	P96/F4	P
Twardość HB:	185-193	202-206

Wyniki badań i ich analiza

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. 2). 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). Występują również płatki grafitu w obszarze międzydendrytycznym E o wielkości 7 (długość powyżej 15 do 30 μm). Oznaczenie wydzieleni 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 wydzieleni grafitu 5/6. W minimalnym stopniu występuje grafit drobny międzydendrytyczny D. Wzdłuż wysokości cylindra w warstwie powierzchniowej obserwuje się niewielkie różnice mikrostruktury ocenianej 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-ferrytyczną P92. Twardość obszarów ze środka grubości i wysokości cylindra jest mniejsza i wynosi 185-191 HB. Jest to zdecydowanie obszar cylindra o najmniej korzystnych właściwościach. Występuje także zwiększenie twardości na ściance zewnętrznej monobloku, naprzeciw cylindrów, o wartości wynoszącej 210-223 HB. Warstwa podpowierzchniowa cylindrów w strefie górnej (zwrotu zewnętrznego tłoka) i strefie środkowej ma perlit płytkowy P (powierzchnia na zglądzie zajmowana 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 wykazuje 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.

Wyniki pomiaru średnic cylindrów monobloku silnika wysokoprężnego 1.6D 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 . Z tego można wnioskować, że odchyłki walcowości dla kolejnych cylindrów mają wartość większe jednak zbliżone do wartości odchyłek okrągłości. Wyznaczone wartości odchyłek walcowości dla kolejnych cylindrów na wysokości 22, 63, 103 mm, mają wartości odpowiednio 0,020, 0,021, 0,019 i 0,024 mm (tab. 2).



Rys. 3. Zarys przekroju wzdłużnego cylindrów wzdłuż tworzącej $d(2)$;
wartość progu zużycia: a) cylinder 1 – $28 \mu\text{m}$, b) cylinder 2 – $20 \mu\text{m}$,
c) cylinder 3 – $28 \mu\text{m}$, d) cylinder 4 – $16 \mu\text{m}$

W tabeli 2 podano maksymalne i minimalne wartości średnicy cylindrów wynikłe zarówno ze zużycia tribologicznego spowodowanego pracą jak i odkształceniami cieplnymi i zmianami naprężeń własnych. Maksymalne zmiany średnicy dla kolejnych cylindrów wynosiły 40, 42, 49 i $49 \mu\text{m}$.

Wysokość chropowatości powierzchni gładzonej R_a , w płaszczyźnie d_2 , na wysokości cylindrów $l_7=130 \text{ mm}$ ma wartość od $0,58 \mu\text{m}$ do $0,83 \mu\text{m}$. Największa wartość dotyczyła cylindra czwartego. Jest ona zbliżona do wymagań technicznych gładzi cylindrów silników spalinowych firm samochodowych (tab. 2).

Na powierzchni gładzi cylindrów objętej pracą pierścieni tłokowych występują przeważająco mierze, zwłaszcza dla cylindrów 1, 2 i 3 obszary o dużej gładkości o charakterze łagodnego zużycia ściernego.

Wartość zużycia gładzi cylindrów określono zmianą średnicy cylindrów oraz wysokością progu zużycia. Różnica maksymalnej i minimalnej średnicy cylindrów 3 i 4 była jednakowa i wynosiła $0,049 \text{ mm}$. Mniejsze wartości zmiany średnicy miały cylindry 1 i 2, gdyż wyniosły one odpowiednio $0,040 \text{ mm}$ oraz $0,042 \text{ mm}$ (tab. 2). Cylinder 4 miał najmniejszą wartość odchyłki prostoliniowości o wartości $0,0625 \text{ mm}$. Jest to wartość średnia z tworzących a_4 , b_3 , c_1 , d_2 , wyznaczonych względem linii średniej (rys. 1). Średnia, większa wartość odchyłek prostoliniowości pozostałych cylindrów wynosiła od $0,0675 \text{ mm}$ do $0,0788 \text{ mm}$. Średnia odchyłka walcowości i mikrofalistości cylindra 4 jest także większa od pozostałych cylindrów (na wysokościach 22, 63, 103 mm).

Z kolei wysokość progu zużycia ciernego cylindra 4 wynosiła $16 \mu\text{m}$ (tab. 2, rys. 3). Jest ona znacznie mniejsza aniżeli dla cylindrów 1, 2 i 3, których wartości tej miary zużycia wynosiły 28, 20, $28 \mu\text{m}$. Świadczy to o mniejszym zużyciu tribologicznym cylindra 4. Uznano w świetle

prorowadzonych badań i analiz, że jest to wynikiem korzystniejszej struktury metalograficznej tj. wielkości i kształtu płatków grafitu, dyspersji płytek perlitu tego cylindra kadłuba oraz większej twardości jego powierzchni.

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 samochodu Polonez FSO Warszawa około 5762 km z silnikiem diesla 1.6D Turbo dokładność wymiaru średnicy kolejnych jego cylindrów jest dość mała i wynosi 76,540-76,500, 76,537-76,995, 76,543-76,494, 76,544-76,495 mm. Odchyłka walcowości kolejnych cylindrów jest dość duża i ma zbliżone wartości wynoszące 20, 21, 19, 24 μm . Cylindry nie mają odchyłki typu graniastości (makrofalistości).

Wartości wysokości chropowatości powierzchni cylindrów po gładzeniu konwencjonalnym mają wartość typową dla silników spalinowych wynoszącą od 0,58 μm do 0,83 μm .

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 μm . Natomiast cylinder 4 ma większą chropowatość wynoszącą około $R_a=0,32 \mu\text{m}$, która jest także poprawna.

Monoblok silnika wykonano z żeliwa szarego modyfikowanego z grafitem płatkowym o podstawie 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 posiada w strukturze grafitu o rozłożeniu międzydendrycznym. Również osnowa mikrostruktury wzdłuż wysokości cylindra 4 jest perlityczna P, jednak o większej dyspersji w porównaniu do cylindrów 1, 2 i 3. Efektem tego jest większa twardość powierzchni czwartego cylindra wynosząca 202-206 HB, w porównaniu do cylindrów 1, 2, 3 o wartości 185-193 HB. Większa dyspersja 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 międzydendrycznym D, E o wielkości 7.

Według normy BN-78/1312 wymagana masowo wartość fosforu w odlewie tulei silników wysokoprężnych wynosi 0,4-0,8%. Efektem braku eutektyki fosforowej (siatki słabo Fr2 lub dobrze ukształtowanej Fr3) była również niższa od wymaganej normą BN-78/1312 twardość. Norma wymaga twardości 210-280 HB. Twardość cylindrów 1, 2 i 3 była znacznie mniejsza i wynosiła 185-193 HB. Twardość cylindra 4 wynosiła z kolei 202-206 HB. Twardość ścian bocznych monobloku, naprzeciw cylindrów była wysoka, i miała wartość 210-223 HB.

Wartość zużycia promieniowa cylindra 4 określona wysokością progu zużycia cylindra wynosiła 16 μm . Jest ona znacznie mniejsza aniżeli dla cylindrów 1, 2 i 3, gdzie wynosiła 28, 20, 28 μm . Świadczy to o mniejszym zużyciu tribologicznym cylindra 4. Jest to uzasadnione właściwościami żeliwa szarego cylindrów kadłuba, w tym ich twardością.

Literatura

1. 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.
2. GmbH Mahle: Cylinder Components: Properties, Applications, Materials. Vieweg+Teubner, Stuttgart, 2010.
3. Kazmierczak A.: Physical aspects of wear of the piston-ring-cylinder set of combustion engines. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers part D-Journal of Automobile Engineering, 222 (11) 2103-2119, 2008.
4. Cai Z., Zhang P., Zeng Q. Novel surface treat technology for improving wear-resistant properties of cylinder liner. Advanced Materials Research, 168-170 (1-3) 2387-2390, 2011.
5. Orłowicz A. W., Tupaj M., Mroz M., Trytek A.: Combustion engine cylinder liners made of Al-Si alloys. Archives of Foundry Engineering, 15 (2) 71-74, 2015.

6. Banerji A., Lukitsch M. J., McClory B., White D.R., Alpas A.T.: Effect of iron oxides on sliding friction of thermally sprayed 1010 steel coated cylinder bores. *Wear*, 376, 858-868, 2017.
7. Gul H., Uysal M., Akbulut H., Alp A.: Effect of PC electrodeposition on the structure and tribological behavior of Ni-Al₂O₃ nanocomposite coatings. *Surface & Coatings Technology*, 258, 1202-1211, 2014.
8. Bara M., Kmita T., Korzekwa J.: Microstructure and properties of composite coatings obtained on aluminium alloys. *Archives of Metallurgy and Materials*, 61 (3) 1107-1112, 2016.
9. Góral A., Litynska-Dobrzynska L., Kot M.: Effect of surface roughness and structure features on tribological properties of electrodeposited nanocrystalline Ni and Ni/Al₂O₃ coatings. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26 (5) 2118-2128, 2017.
10. Góral A.: Nanoscale structural defects in electrodeposited Ni/Al₂O₃ composite coatings. *Surface & Coatings Technology*, 319, 23-32, 2017.
11. Slattery B. E., Perry T., Edrisy A.: Microstructural evolution of a eutectic Al-Si engine subjected to severe running conditions. *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 512 (1-2) 76-81, 2009.
12. Slattery B.E., Edrisy A., Perry T.: Investigation of wear induced surface and subsurface deformation in a linerless Al-Si engine. *Wear*, 269 (3-4) 298-309, 2010.
13. Humienny Z. (red.): *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) Podręcznik europejski*. WNT, Warszawa 2004.
14. Adamczak S.: *Pomiary geometryczne powierzchni, zarysy kształtu, falistość i chropowatość*. Wydawnictwa Naukowo Techniczne WNT, Warszawa 2008.
15. Norma PN-EN ISO 12180-1:2012: *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) - Walcowość - Część 1: Terminologia i parametry kształtu walcowego*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2012.
16. Norma PN-EN ISO 12180-2:2012: *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) - Walcowość - Część 2: Operatory specyfikacji*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2012.

УДК 629.113

METODY OCENY PODSTAWOWYCH PARAMETRÓW PROCESU SPALANIA W TŁOKOWYCH SILNIKACH SPALINOWYCH

METHODS OF EVALUATION OF BASIC PARAMETERS OF COMBUSTION PROCESS IN PISTON COMBUSTION ENGINES

Kazimierz Lejda¹, Michał Warianek²

¹*Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
Aleja Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów*

²*Kielce University of Technology
Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce*

W artykule przedstawiono wybrane metody oceny podstawowych parametrów procesu spalania, dokonano oceny użyteczności i ograniczeń stosowania metod służących do określania inicjacji oraz końca procesu spalania w tłokowych silnikach spalinowych. Rozpatrywane metody bazują na danych zawartych w rzeczywistych, rozwiniętych wykresach indykatorowych. Omówione zostały ponadto podstawowe założenia termodynamiczne i zakres stosowania metody oceny procesu spalania na podstawie rzeczywistego cyklu pracy tłokowego silnika spalinowego sporządzonego w podwójnej skali logarytmicznej.

Wprowadzenie

Proces spalania w tłokowym silniku spalinowym jest jednym z podstawowych procesów cyklu pracy silnika. Jego ocena wymaga zastosowania odpowiednich metod badawczych opartych na analizie rzeczywistego cyklu pracy. W celu osiągnięcia możliwie najkorzystniejszego efektu konwersji energii zawartej w paliwie na pracę mechaniczną wymagane jest precyzyjne sterowanie