

Jacek MICHALSKI  
Politechnika Rzeszowska

## TECHNOLOGICZNA I EKSPLOATACYJNA CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI GŁADZI CYLINDROWEJ SILNIKA SPALINOWEGO

Analizowano charakterystyczne cechy chropowatości powierzchni gładzi cylindra silnika spalinowego po gładzeniu, dotarciu pracą oraz po badaniach pracy silnika w warunkach umownych. Dokonano analizy zmiany podstawowych parametrów i funkcji profili chropowatości powierzchni gładzi cylindra. W badaniach uwzględniono udział materiałowy, widmową moc skumulowaną, funkcję autokorelacji, funkcję struktury, widmo amplitudowe oraz gęstości rozkładu wysokości chropowatości powierzchni, krzywizny wierzchołków, wysokości wierzchołków i pochylenia boków nierówności. Zamieszczono dystrybuanty kąta wzniosu profili chropowatości powierzchni cylindra. Przyrosty kąta wzniosu profilu wzdłuż długości cylindra, tak jak inne parametry, wyznaczono w płaszczyźnie wzdłużnej osi wału korbowego silnika.

### 1. Wprowadzenie

System tłok-cylinder (TC) występuje we wszystkich tłokowych maszynach roboczych, w tym w: pompach, sprężarkach i silnikach spalinowych. Do analizy tribologicznej przyjmuje się zazwyczaj definicję systemu ograniczoną do cylindra i tłoka wraz z pierścieniami.

Trwałość jest jedną z najważniejszych właściwości składników (elementów i podukładów), jak i urządzeń technicznych, jako całości. Miarą trwałości urządzenia jest okres użytkowania, po upływie którego urządzenie traci swoją przydatność do stosowania zgodnie z przeznaczeniem. O trwałości silnika spalinowego decydują warunki tarcia i związane z nim zużycie elementów systemu TC. Duże znaczenie eksploatacyjne ma także: nieuszkodzalność, sozologia, funkcjonalność i możliwość recyklingu systemu TC. Sprzyjają, zwłaszcza ekologiczności, małe opory ruchu systemu TC. Limitują one także zużycie oleju silnikowego i paliwa. Jako dominujące rodzaje zużycia cylindrów wymienia się: ścierne, korozyjne i adhezyjne, dołączając niekiedy zużycie zmęczeniowe i kawitacyjne. Panuje przekonanie, że powszechnym rodzajem zużycia jest zużycie ścierne [1–3]. Zmienna grubość filmu olejowego wzdłuż drogi tłoka powoduje występowanie różnych warunków smarowania, od granicznego, mieszanego, poprzez

smarowanie elastohydrodynamiczne, aż do hydrodynamicznego na środkowym odcinku drogi tłoka.

## 2. Analiza literatury

Wstępne rozwiązanie konstrukcyjne systemu TC często jest wspomagane badaniami modelowymi, na maszynach laboratoryjnych (testerach), i badaniami stanowiskowymi silników spalinowych w warunkach umownych [4, 5]. Struktura geometryczna powierzchni jest jednym z czynników, oprócz warunków pracy silnika spalinowego i danych materiałowych, mających wpływ na rodzaj tarcia i związanego z nim zużycia oraz ich intensywności. Istotne są zwłaszcza zmiany zużycia tribologicznego podczas eksploatacji, zwłaszcza do momentu zachowania na powierzchniach współpracujących śladów obróbki, z punktu widzenia wpływu na proces tarcia, smarowanie i dalsze zużycie. Współczesne silniki spalinowe zachowują rysy gładzenia na cylindrach do kilkuset tysięcy kilometrów przebiegu samochodu.

Odporność na zużywanie tribologiczne, udarność, zmęczenie powierzchniowe i objętościowe zależy nie tylko od materiału, odkształcenia, naprężeń, stanu fizykochemicznego warstwy wierzchniej, ale także od wysokości chropowatości powierzchni, odległości nierówności powierzchni, udziału materiałowego, równomierności i ukierunkowania [1-5, 6-9]. Zużycie ściernie w obecności ziaren ściernych zachodzi wskutek przedostania się między powierzchnie trące zanieczyszczeń z zewnątrz, ścierniwa utworzonego w wyniku spalania i reakcji chemicznych paliwa, a także wprowadzonych związków chemicznych lub powstałych w wyniku innych rodzajów zużycia. Naprężenia własne, utwardzenie warstwy wierzchniej i wysokość chropowatości powierzchni zmieniają wytrzymałość zmęczeniową objętościową elementów maszyn w stosunku 1,5x1,25x1,03 [1]. W pracach [4-6, 8, 9] uzależniono odporność na zużycie cylindra od wysokości chropowatości, udziału materiałowego, odstępu głębokich rys gładzenia, w różnym stopniu zależnie od struktury metalograficznej materiału, jak i stopnia zanieczyszczenia systemu TC, w tym zasysanego powietrza zanieczyszczonego pyłem drogowym.

Propozycje opisu profilu powierzchni uwarstwionej, cylindra po gładzeniu płaskowierchołkowym oraz jego powierzchni eksploatacyjnej zawarto w pracach [10-13]. Z kolei modelowanie topografii powierzchni cylindra silnika spalinowego po gładzeniu, obróbce laserowej i eksploatacji zamieszczono w publikacjach [14-17]. Uzależniono także kształtowanie powierzchni gładzonych od gęstości rozkładu wysokości i odległości ziaren oselek ściernych [18, 19]. Powierzchnia nośna modelowanych topografii gładzi cylindra miała także cechy fraktalne. W literaturze [20, 21] stwierdzono, że powierzchnie eksploatowane mogą mieć takie cechy. Wymiar fraktalny  $D$  powierzchni ruchowych, w kontak-

cie sprężysto-plastycznym, umożliwia analizę szerokiego spectrum zmiany siły tarcia, zwłaszcza w tarciu suchym [20].

Autorzy pracy [2] analizowali w układzie trójwymiarowym powierzchnie gładzonych cylindrów po docieraniu i dużym zużyciu ściernym oraz ich powierzchnie o dużej gładkości po pracy. Zauważyli niewielką zmianę długości korelacji topografii powierzchni  $Sal$  oraz wskaźnika utrzymania płynu przez doliny  $Svi$ , jak i wysokości topografii według dziesięciu punktów  $Sz$ . Stwierdzili, że o wartości zużycia cylindrów świadczy duże zmniejszenie współczynnika asymetrii  $Ssk$  oraz wzrost współczynnika nachylenia  $Sku$ . W zamieszczonej analizie gęstość szczytów tulei cylindrowej  $Sds$  uległa dużemu zwiększeniu w wyniku docierania, a następnie silnie malała w niekorzystnych warunkach pracy (polerowaniu). Wznios powierzchni  $SAq$  oraz krzywizna szczytów  $Ssc$  miały tendencje malejące. W przypadku powierzchni innych elementów maszyn, jak i skojarzenia trzpień-tarcza w trakcie procesu zużycia obserwuje się jednak zwiększanie gęstości szczytów. Powierzchnia nośna gładzi cylindrowej charakteryzuje się z kolei nachyleniem prostej regresji obszaru plateau  $Rpq$  liniowo zależnym od aktualnej wysokości chropowatości powierzchni [22].

Uważa się, że przy tarciu kinetycznym metali, ze spadkiem wysokości nierówności powierzchni współczynnik tarcia początkowo maleje, osiąga minimum, a następnie rośnie. Taka zależność jest spowodowana spadkiem mechanicznych oraz wzrostem molekularnych oporów względnego przemieszczania się ciał. Niezależnie od prędkości 0,18-0,3 m/s i nacisku jednostkowego 1-3,5 MPa smarowanej pary ślizgowej, skrzyżowane prostokątne rowki o głębokości 4-5  $\mu\text{m}$  i szerokości 40-100  $\mu\text{m}$  zapewniają najmniejszą wartość współczynnika tarcia kinetycznego dla niezmienniej wartości ilorazu ich szerokości do cosinusa kąta skrzyżowania [23]. Zwiększenie długości korelacji chropowatości powierzchni  $DK_{0,1}$  oraz zmniejszenie gęstości szczytów  $Sds$  prowadzi do asymptotycznego zmniejszenia współczynnika tarcia ślizgowego powierzchni smarowanych części [7].

Zwiększenie pojemności olejowej wgłębień chropowatości powierzchni płaskowierzchołkowych powoduje zmniejszenie oporów ruchu silnika spalinyowego. Zbyt duża jej wartość przyczynia się jednak do zwiększonego zużycia oleju silnikowego, jak i zwiększenia emisji cząstek stałych, tlenku i dwutlenku węgla oraz węglowodorów. W ustalonych warunkach cieplnych i odkształceń następuje ujednorodnienie przebiegu makrotwardości w warstwie wierzchniej cylindra, niezależnie od technologicznych sposobów obróbki [6].

Badania procesu docierania eksploatacyjnego w warunkach tarcia granicznego pozwoliły na stwierdzenie, że istnieje pewna optymalna wysokość nierówności. Deformacja plastyczna warstwy wierzchniej systemu TC nie powinna być zbyt duża, aby nie zaszło uszkodzenie zmęczeniowe, oraz zbyt mała. Powinny bowiem powstawać tlenki metalu. Ich niewystarczająca ilość sprzyja polerowaniu gładzi cylindra, uszkodzeniom systemu TC, w tym zatarciu [3].

### 3. Przedmiot, zakres i metodyka badań

Obiektem badań był silnik lotniczy chłodzony powietrzem FRANKLIN F. 4A-235-B4. Badania przeprowadzono na stanowisku do badań kwalifikacyjnych oraz badań w warunkach zwiększonego zapylenia powietrza silnika spalinyowego. Temperatura cylindra mierzona pod świecą zapłonową nie przekraczała 185°C, a temperatura spalin wynosiła 820°C, w odległości 50 mm od zespołu cylindra. Stosowano paliwo 100LL (ASTM D910-04a), olej semisyntetyczny dyspersyjny wielosezonowy „Anti-wear Aero-Shell oil W multigrade” 15W-50. Świece zapłonowe Champion RHB-36S miały szczelinę pomiędzy elektrodami 0,7 mm. Inne nastawy regulacyjne wynosiły: szczeliny na stykach iskrowników 0,35-0,5 mm, kąt wyprzedzenia zapłonu 32°, luzy zaworów dolotowych 1,25-1,3 mm i zaworów wylotowych 1,3-1,35 mm. Każdy z pięciu silników miał nowe komplety zespołu cylindra o gładzonych tulejach cylindrowych oraz nowe tłoki, sworznie, pierścienie tłokowe i zawory.

Próbę docierania przeprowadzono według programu opracowanego na bazie normy branżowej BN-79/1374-05. Ograniczono czas docierania do 10 godzin, a zakres prędkości i obciążeń silnika został zmodyfikowany. Przyspieszenie badań w drugim etapie osiągnięto wskutek wprowadzenia do gaźnika pracującego silnika powietrza zanieczyszczonego pyłem o właściwościach ściernych. Wykonywano 7 cykli 3-godzinnych pracy silnika w warunkach sztucznie zwiększonego zapylenia zasysanego przez silnik powietrza do gaźnika. Każdy z cykli składał się z 2 h i 50 min pracy silnika, przy pełnym obciążeniu z prędkością obrotową 2800 obr./min, oraz z 10 min postoju. Podczas pracy na pełnym obciążeniu do kolektora doprowadzającego powietrze podawany był pył dozownikiem poprzez gaźnik, w ilości 1,3 g/h, co odpowiada koncentracji zapylenia około 8 mg/m<sup>3</sup>. Zużycie systemu TC silnika, w tych umownych warunkach pracy, odpowiadało jego zużyciu w czasie 1500-godzinnej pracy w samolocie KOLIBER.

Program badań stanowiskowych obejmował: skróconą próbę 10-godzinną docierania silnika. Następnie przeprowadzono demontaż silnika, w celu wykonania pomiarów systemu TC, a następnie jego montaż i uruchomienie na stanowisku badań umownych. Po próbie pracy w warunkach umownych przeprowadzono kolejny demontaż silnika i wykonano ponownie pomiary metrologiczne.

Zespół cylindra tworzy tuleja połączona skurczowo-rozprężnie z kadłubem oraz prowadniki zaworowe, gniazda zaworowe, kolektory wydechowe i inne części. Tuleja cylindrowa z żeliwa szarego perlitycznego M-219 (ASTM A48) ma granicę wytrzymałości na rozciąganie 248 MPa i twardość 95-104 HV (200-262 HB). Płatki grafitu są wielkości 4-6 o rozmieszczeniu A lub B według normy ASTM. Cylindry były gładzone w trzech operacjach, na podstawie własnej technologii obróbki. Gładzenie przeprowadzono u producenta silnika, w Wytwórni Sprzętu Komunikacyjnego „PZL-Rzeszów” S.A. Topografia po-

wierzchni po gładzeniu była płaskowierzchołkowa. Kadłub zespołu cylindra wykonany był z odlewniczego żaroodpornego stopu aluminium M-309 (Al-Cu4Ni2Mg2 – 4,3% Cu, 2,1% Ni, 1,5% Mg, 0,3% Zn, 0,1% Fe, 0,1% Si, Al stanowiło resztę) poddanego wyżarzaniu zmiękczającemu, starzeniu i utwardzaniu wydzieleniowemu. Tłoki ze stopu eutektycznego aluminium-krzem AK12 (AlSi12CuNiMg – 10,5-13,5% Si, 0,6% Fe, 0,8-1,5% Cu, 0,35% Mn, 0,9-1,5% Mg, 0,7-1,3% Ni, 0,35% Zn, Al stanowiło resztę) zostały utwardzone dyspersyjnie. Pierścienie tłokowe z żeliwa szarego stopowego perlitycznego AMTU 311-52 (2,8-3,25% C (całkowity), 0,65-1,0% C (związany), 1,7-2,2% Si, 1,0-1,5% Mn, 0,4-0,7% P, 0,5-0,7% Cr, 0,15-0,3% Ti, 0,5-1,0% W, <0,4% Ni, <0,5% Cu, <0,1% S) miały twardość 110-107 HRB. Pierścień uszczelniający prostokątny był chromowany galwanicznie, drugi uszczelniający prostokątny noskowy był fosforanowany, a uszczelniający daszkowy chromowany. Powierzchnie czołowe pierścieni były docierane technologicznie. Średnia wysokość pierścieni wynosiła: uszczelniającego 2,28 mm, uszczelniającego drugiego 2,31 mm oraz zgarniającego 4,74 mm. Luzy zamków wszystkich pierścieni tłokowych, w sprawdzanie walcowym o średnicy 117,475 mm, miały wartość średnią 0,45 mm. Z kolei siła styczna kolejnych pierścieni wynosiła: 53, 35 i 80 N. Montowano tłoki z tulejami zespołu cylindra, zapewniając luz średnicowy o wartości 0,11-0,13 mm.

Zmianę topografii powierzchni gładzonej tulei cylindrowej, w wyniku docierania (10 h) pracą silnika i badań umownych (21 h) pracy silnika, scharakteryzowano liczbowo i wykreślnie. Zamieszczono przykładowe zmiany topografii tulei cylindrowych jednego silnika. Analiza dotyczyła zmiany podstawowych parametrów i funkcji profili chropowatości powierzchni gładzi cylindra. Pomiaru chropowatości powierzchni dokonano w płaszczyźnie wzdłużnej osi wału korbowego silnika na wysokości 25 mm tulei cylindrowej. Pomiaru przeprowadzono profilometrem Form Talysurf Series 2, z zastosowaniem filtra Gaussa o granicznej długości fali filtru 2,5 mm. Badania dotyczyły tulei cylindrowych gładzonych, dotartych pracą silnika i po badaniach umownych pracy silnika.

#### 4. Wyniki badań

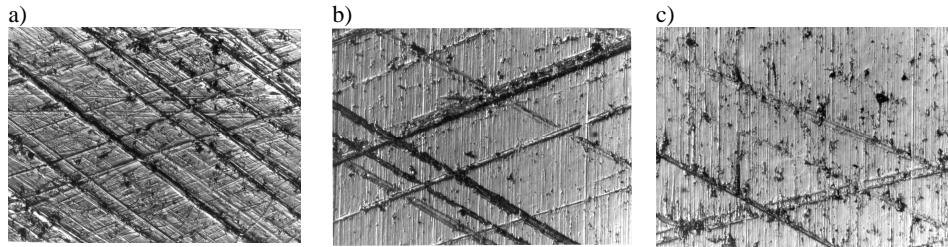
Zakresy wartości parametrów chropowatości powierzchni gładzonych tulei cylindrowych silnika podano w tabeli 1. Zamieszczono wartości: głębokości najniższego wgłębienia profilu  $R_v$ , nachylenia prostej regresji obszaru wgłębień materiałowej krzywej gęstości prawdopodobieństwa  $R_vq$ , średniego kwadratowego wzniosu profilu  $R\Delta q$ , pola powierzchni wgłębień  $A_2$ , krzywej udziału materiałowego opisanej metodą siecznej, wysokości najwyższego wzniesienia profilu  $R_p$ , zredukowanej wysokości wzniesień  $Rpk$ , głębokości rdzenia chropowatości  $Rk$ , zredukowanej głębokości wgłębień  $Rvk$ , pola powierzchni krzywej

wzniesień udziału  $AI$  oraz średniej arytmetycznej  $Ra$  i kwadratowej rzędnych profilu  $Rq$ . Podano także charakterystykę wierzchołków profili chropowatości powierzchni: średnią arytmetyczną wysokość  $Zs$ , odchylenie standardowe wysokości  $\sigma$ , średni arytmetyczny promień  $\beta$  i gęstość  $\eta$ . Charakterystyczne obrazy topografii powierzchni gładzi cylindrowej, uzyskane mikroskopowo z repliki negatywowej, zamieszczono na rys. 1. Z kolei na rys. 2. zamieszczono charakterystykę profili chropowatości powierzchni tulei cylindrowych i funkcje ich opisu dla gładzenia, docierania silnika pracą i dużego zużycia w badaniach umownych pracą silnika. Przedstawiono kolejno: wykres profilu, funkcję udziału materiałowego, widmową moc skumulowaną, funkcję autokorelacji, funkcję struktury i widmo amplitudowe. Zamieszczono także wartości krzywizny wierzchołków,

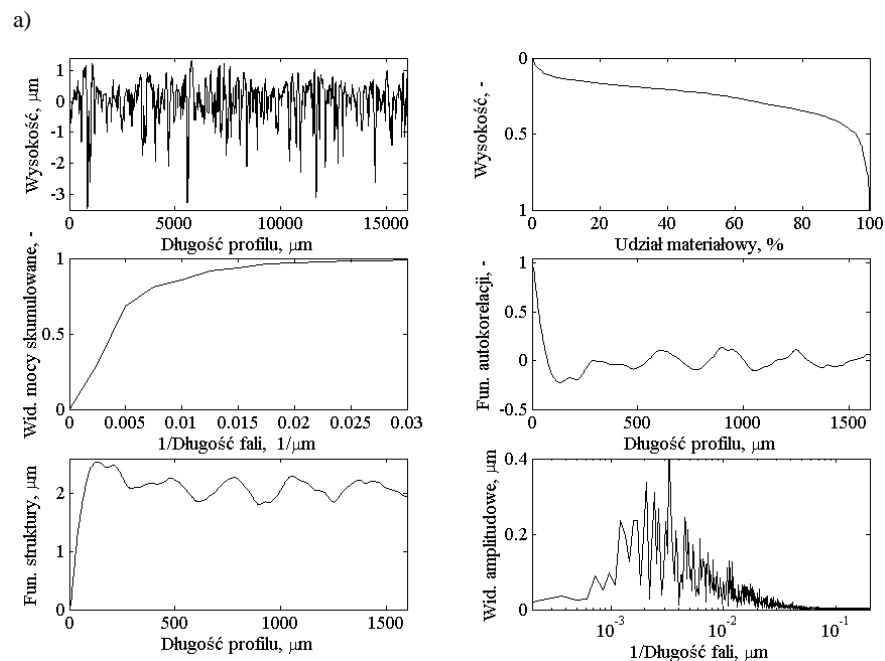
Tabela 1. Zmiana parametrów chropowatości powierzchni gładzonej tulei cylindrowej silnika FRANKLIN F. 4A-235-B4 wzdłuż osi wału korbowego w wyniku docierania (10 h) pracą silnika i badań umownych (21 h) pracy silnika

Parametry, profile	Gładzenie	Docieranie (10 h) pracą silnika	Badania umowne (21 h) pracy silnika
Średnia arytmetyczna rzędnych profilu $Ra$ , $\mu\text{m}$	0,77	0,24	0,13
Wysokość najwyższego wzniesienia profilu $Rp$ , $\mu\text{m}$	2,11	0,51	0,36
Głębokość najniższego wgłębienia profilu $Rv$ , $\mu\text{m}$	5,99	2,63	1,63
Średnia kwadratowa rzędnych profilu $Rq$ , $\mu\text{m}$	1,02	0,36	0,19
Średnia szerokość rowków elementów profilu $RSm$ , $\mu\text{m}$	258	233	222
Długość korelacji $DK_{0,1}$ , $\mu\text{m}$	66	64	58
Długość korelacji aproksymowana $2,3\beta^*$ , $\mu\text{m}$	90	89	78
Długość fali wyznaczona punktem największej krzywizny aproksymowanego wykresu widmowej mocy skumulowanej $1/f_{WMS}$ , $\mu\text{m}$	81	54	29
Średni kwadratowy wznios profilu $Rdq$ , $^\circ$	2,57	1,07	0,85
Zredukowana głębokość wzniesień $Rpk$ , $\mu\text{m}$	0,31	0,14	0,09
Głębokość rdzenia chropowatości $Rk$ , $\mu\text{m}$	1,29	0,20	0,11
Zredukowana głębokość wgłębień $Rvk$ , $\mu\text{m}$	1,59	1,28	0,91
Pole powierzchni wzniesień $AI$ , $\mu\text{m}^2/\text{mm}$	8,7	8,4	6,1
Pole powierzchni wgłębień $A2$ , $\mu\text{m}^2/\text{mm}$	182	71	50
Nachylenie prostej regresji w obszarze plateau $Rpq$ , $\mu\text{m}$	0,50	0,11	0,07
Nachylenie prostej regresji w obszarze wgłębień $Rvq$ , $\mu\text{m}$	1,43	1,37	0,72
Średnia arytmetyczna wysokość wierzchołków profilu z 7 współrzędnych $Zs$ , $\mu\text{m}$	0,26	0,88	0,77
Odchylenie standardowe wysokości wierzchołków z 7 współrzędnych $\sigma$ , $\mu\text{m}$	0,37	0,27	0,29
Średni arytmetyczny promień wierzchołków $\beta$ , $\mu\text{m}$	42	88	105
Gęstość wierzchołków $\eta$ , $1/\mu\text{m}$	0,0330	0,0237	0,0239
Wysokość falistości $Wt$ ( $\lambda c = 0,8 \text{ mm}$ , $\lambda f = 8 \text{ mm}$ ), $\mu\text{m}$	4,24	1,37	0,62

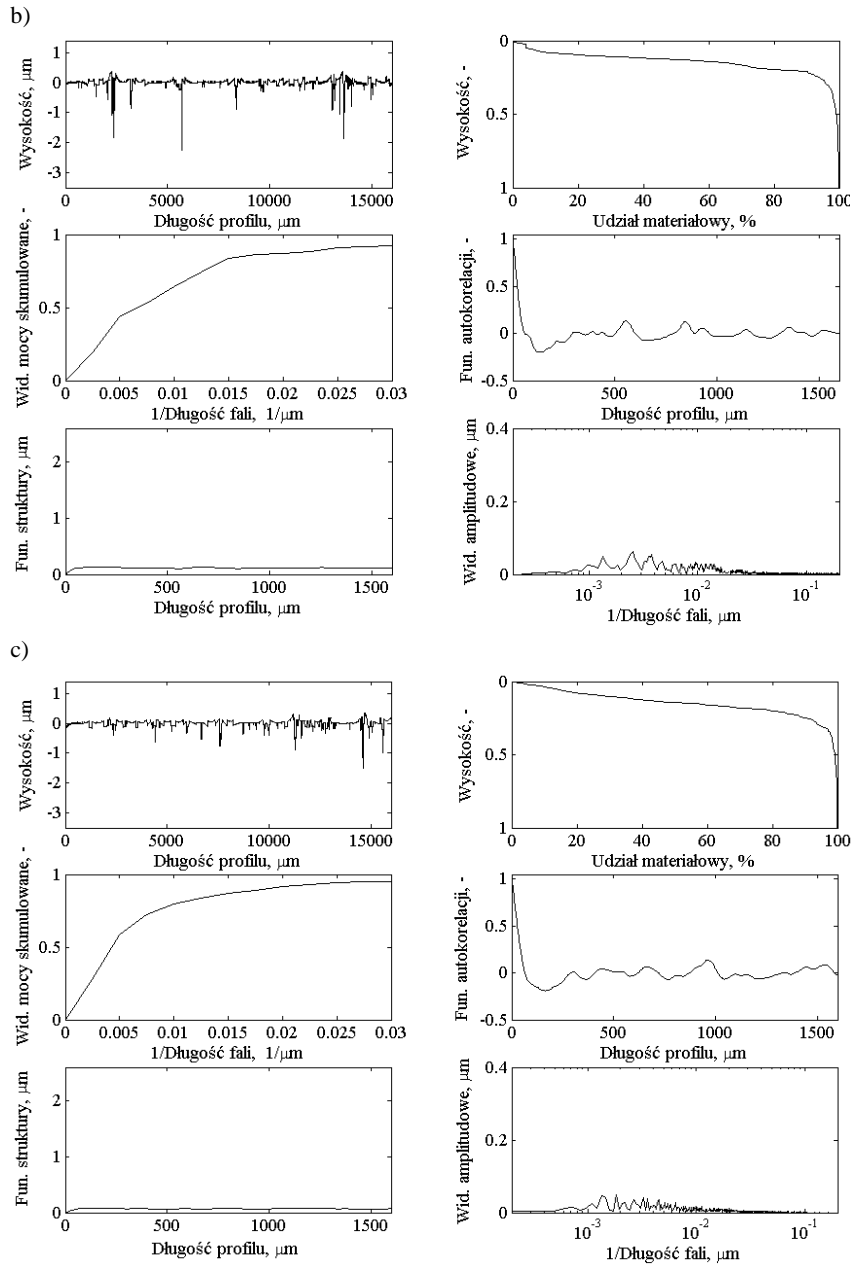
ich wysokości oraz pochylenia boków tulei cylindrowej. Dla analizowanych charakterystyk profilu wyznaczono dystrybuanty (rys. 3.) i gęstości rozkładu (rys. 4.).



Rys. 1. Topografia powierzchni gładzi cylindra po: a) gładzeniu, b) docieraniu przez 10 h, c) próbie pracy w warunkach zwiększonego zapalenia przez 21 h (pomiary w płaszczyźnie osi wału korbowego, obraz repliki negatywowej „fax-film” w mikroskopie Neophot 2, powiększenie 40x)

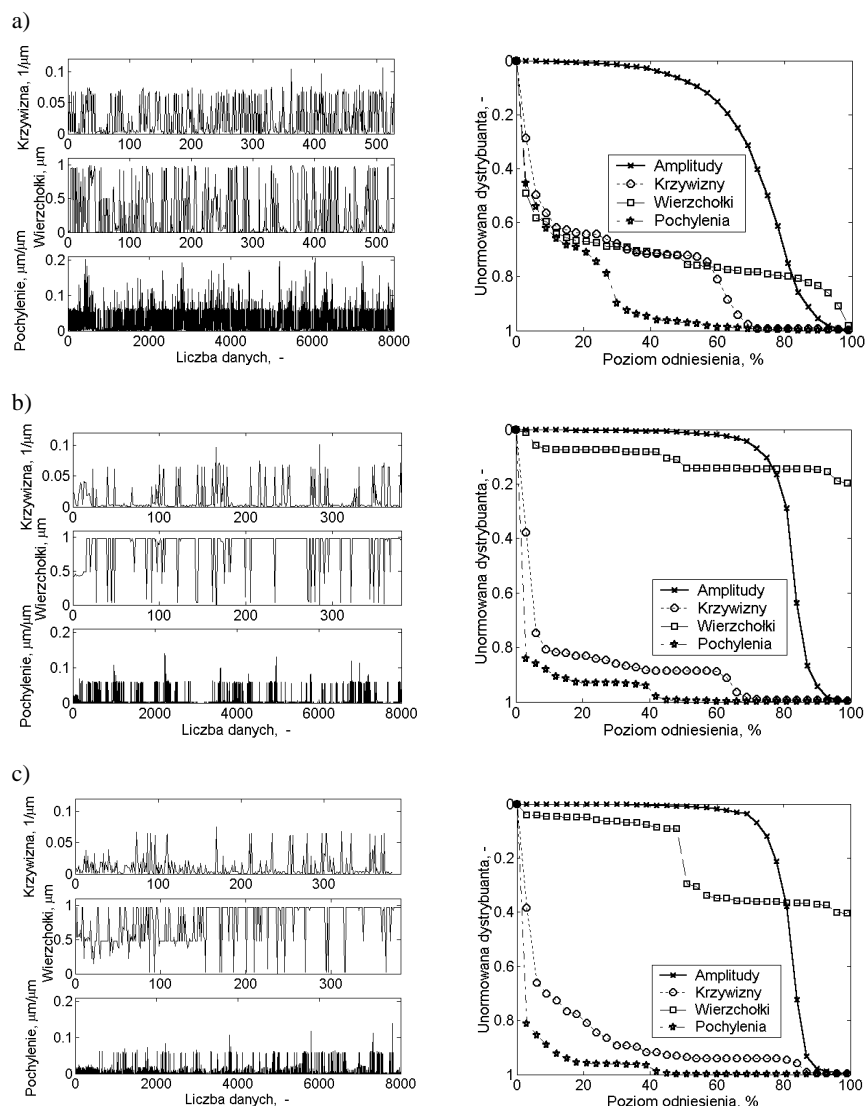


Rys. 2. Charakterystyka chropowatości powierzchni tulei cylindrowej silnika wzdłuż osi wału korbowego po: a) gładzeniu. Wykres profilu chropowatości powierzchni, udziału materiałowego, widmowej mocy skumulowanej, funkcji autokorelacji, funkcji struktury i widma amplitudowego



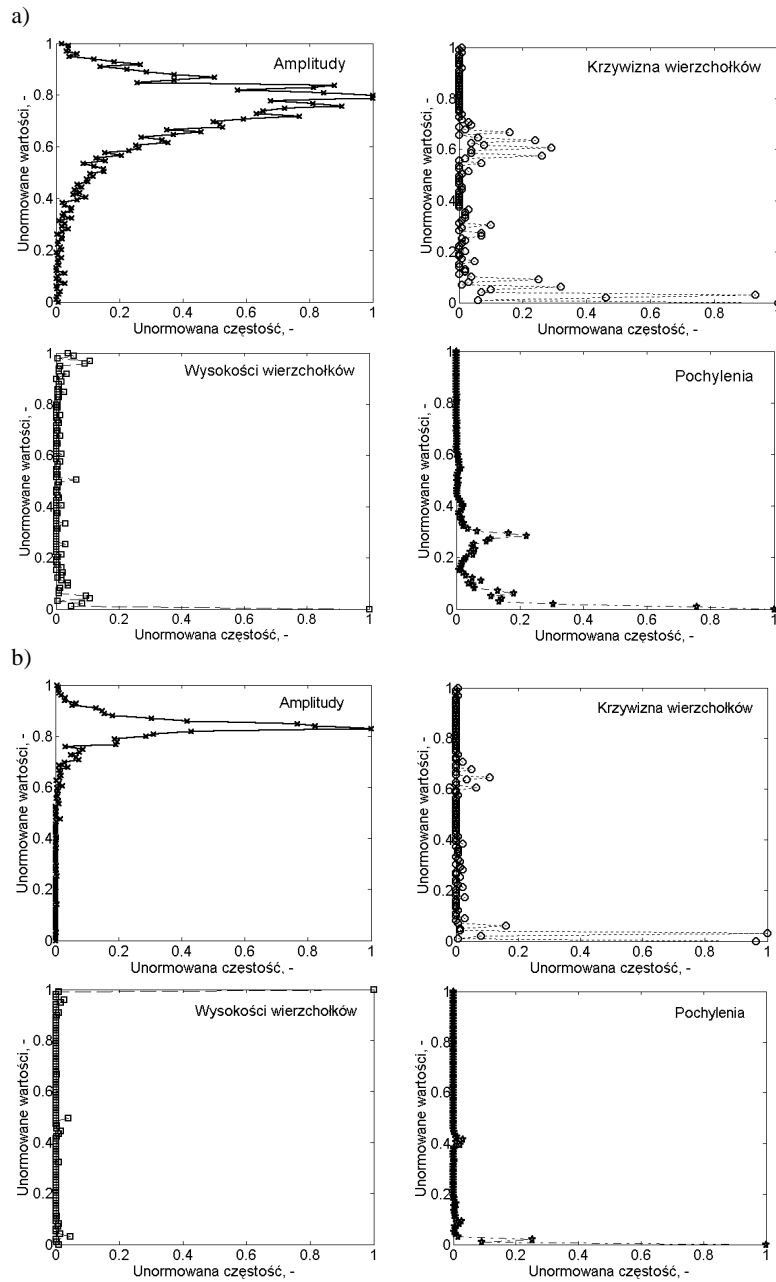
Rys. 2. (cd.). Charakterystyka chropowatości powierzchni tulei cylindrowej silnika wzdłuż osi wału korbowego po: b) dotarciu przez 10 h pracą silnika, c) badaniach umownych przez 21 h pracy silnika. Wykres profilu chropowatości powierzchni, udziału materiałowego, widmowej mocy skumulowanej, funkcji autokorelacji, funkcji struktury i widma amplitudowego



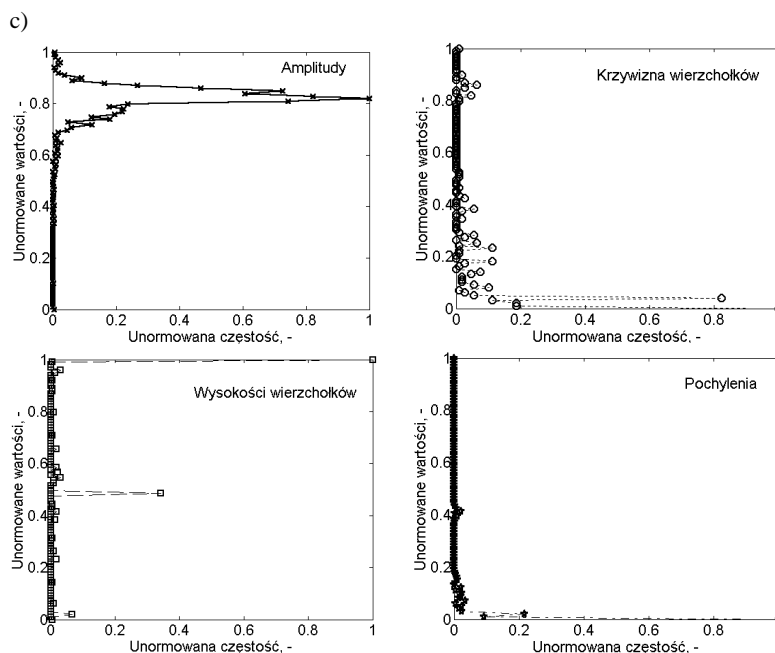


Rys. 3. Przebiegi wartości i dystrybuanty dla wysokości chropowatości powierzchni, krzywizny wierzchołków i ich wysokości oraz pochylenia boków nierówności tulei cylindrowej silnika wzdłuż osi wału korbowego po: a) gładzeniu, b) docieraniu przez 10 h pracą silnika, c) badaniach umownych przez 21 h pracy silnika

Tendencje stopniowego zmniejszenia pochylenia nierówności chropowatości tulei cylindrowych, dla analizowanych etapów pracy silnika, przedstawiają wykresy unormowanej wysokości profilu w funkcji unormowanego kąta wznio-



Rys. 4. Gęstości rozkładu wysokości chropowatości powierzchni, krzywizny wierzchołków i ich wysokości oraz pochylenia boków nierówności tulei cylindrowej silnika wzdłuż osi wału korbowego po: a) gładzeniu, b) docieraniu przez 10 h pracą silnika

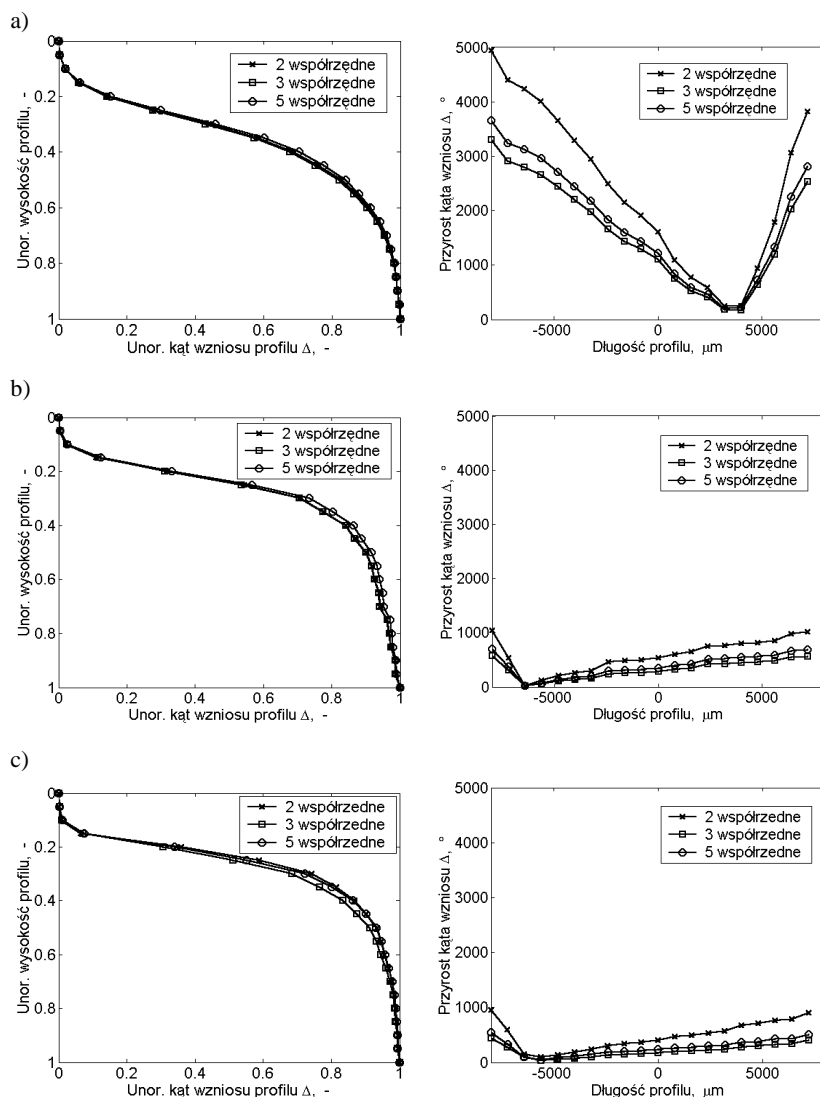


Rys. 4. (cd.). Gęstości rozkładu wysokości chropowatości powierzchni, krzywizny wierzchołków i ich wysokości oraz pochylenia boków nierówności tulei cylindrowej silnika wzdłuż osi wału korbowego po: c) badaniach umownych przez 21 h pracy silnika

su profilu (rys. 5.). Zmiana pochylenia boków profilu chropowatości powierzchni tulei cylindrowych, po gładzeniu i w wyniku docierania pracą i badań umownych silników, jest charakteryzowana tutaj poprzez sumaryczną długość profilu i przyrost kąta ich pochylenia.

## 5. Analiza wyników badań

Potwierdzono znaną w literaturze [2, 9, 22], małą zmianę odstępów chropowatości powierzchni tulei cylindrowych w miarę ich zużywania tribologicznego. Długość korelacji miała dla gładzonej tulei cylindrowej silnika poddanego następnie (10 h) docieraniu pracą i (21 h) pracą w warunkach umownych zakresy wartości:  $DK_{0,1} = 66\text{--}58\text{ }\mu\text{m}$  i  $2,3\beta^* = 90\text{--}78\text{ }\mu\text{m}$  (tab. 1.). Równocześnie jednak charakterystyczna długość fali, wyznaczona punktem największej krzywizny widmowej mocy skumulowanej, uległa znacznemu zmniejszeniu (rys. 2., tab. 1.). Bowiem jej wartość z  $81\text{ }\mu\text{m}$  po gładzeniu zmniejszyła się do wartości  $54\text{ }\mu\text{m}$  po docieraniu i  $29\text{ }\mu\text{m}$  po pracy silnika w warunkach umownych.



Rys. 5. Charakterystyki wysokości chropowatości powierzchni tulei cylindrowej w funkcji unormowanego kąta wzniosu profilu oraz przyrostu kąta wzniosu profilu wzdłuż długości profilu wyznaczone w płaszczyźnie wzdłuż osi wału korbowego po: a) gładzeniu, b) docieraniu przez 10 h pracą silnika, c) badaniach umownych przez 21 h pracy silnika

Unormowana krzywa udziału materiałowego miała coraz mniejsze względne wysokości powierzchni nośnej i mniejsze względne pochylenie (rys. 2.). Potwierdzają to także parametry profilu chropowatości  $R_p$ ,  $R_v$  i parametry krzywej udziału materiałowego  $Rpk$ ,  $Rk$ ,  $Rpq$ ,  $Rvq$  (tab. 1.).

Chropowatość powierzchni gładzi cylindrowej na podstawie funkcji autokorelacji i funkcji struktury, w analizowanych okresach pracy silnika, ma charakter losowy, ze stopniowo malejącym udziałem cech okresowych (rys. 2.). Funkcja struktury ulega dużemu zmniejszeniu, zwłaszcza po dotarciu silnika. Wynika to głównie ze zmniejszenia wysokości chropowatości.

Amplitudy fal profilu chropowatości powierzchni gładzonej tulei cylindrowej, w funkcji ich długości, ulegają znacznemu zmniejszeniu w wyniku docierania i badań umownych pracy silnika (rys. 2.). Dużemu zmniejszeniu ulegają zarówno amplitudy chropowatości powierzchni, jak i amplitudy falistości powierzchni. Znajduje to odzwierciedlenie w zmniejszeniu parametrów wysokości chropowatości i falistości powierzchni tulei cylindrowych (tab. 1.).

Gęstość rozkładu rzędnych profilu tulei cylindrowej gładzonej ma szerokie pasmo wysokości profilu o względnie dużych częstościach (rys. 4.). W wyniku docierania silnika zmieniał się profil chropowatości tulei cylindrowej (rys. 2.). Wówczas gęstość rozkładu rzędnych miała wąskie pasmo wysokości chropowatości powierzchni, o małej wysokości i dużej częstości rozkładu. Tuleja cylindrowa, po badaniach w umownych warunkach pracy silnika, w niewielkim stopniu zwiększała udział materiałowy powierzchni nośnej. Jest to dobrze widoczne na podstawie dystrybucyjności gęstości rozkładu rzędnych profilu (rys. 3.) oraz na podstawie gęstości rozkładu rzędnych (rys. 4.).

Profil chropowatości powierzchni tulei cylindrowej silnika dotartego pracą zachowuje charakter gęstości rozkładu krzywizny wierzchołków tulei gładzonej. Cechą charakterystyczną jest występowanie licznych wierzchołków o małych krzywiznach. Równocześnie docieranie tulei cylindrowej, jak i praca silnika w warunkach zwiększonego zanieczyszczenia zasysanego powietrza zmniejszają częstość występowania wierzchołków chropowatości powierzchni (tab. 1.). Liczne wierzchołki występujące po gładzeniu mają wówczas mniejszą wysokość spowodowaną zużyciem ściernym. Kształtują się wierzchołki o większych względnych wysokościach. Jest to diametralnie odmienna ich cecha w porównaniu z gładzeniem. Liczbowo powoduje to zwiększenie średniej arytmetycznej wysokości wierzchołków profilu z  $Z_s = 0,26 \mu\text{m}$  po gładzeniu do wartości  $Z_s = 0,77 \mu\text{m}$  po wykonanej pracy przez silnik (tab. 1.). Dotarcie tulei cylindrowej pracą silnika zmniejsza odchylenie standardowe wysokości ich wierzchołków  $\sigma$ , w porównaniu z wartością po gładzeniu, natomiast średni arytmetyczny promień wierzchołków  $\beta$  jest znacznie większy. Stwierdzono gęstość wierzchołków chropowatości tulei cylindrowej gładzonej równą  $\eta = 0,0330 \text{ 1}/\mu\text{m}$ . Po docieraniu pracą silnika zmniejsza się ona do wartości  $0,0237 \text{ 1}/\mu\text{m}$ , by następnie ulec niewielkiemu zwiększeniu, po pracy silnika w warunkach umownych, do wartości  $0,0239 \text{ 1}/\mu\text{m}$ . W przypadku wyodrębnienia wierzchołków profilu chropowatości powierzchni z trzech współrzędnych, ten stopień zwiększenia gęstości wierzchołków tulei wynosi aż 22%. Docieranie pracą tulei cylindrowych nie zmienia krzywizny wierzchołków profilu położonych na dużych głębokościach

(rys. 3.). Cechą charakterystyczną gęstości wierzchołków profilu chropowatości powierzchni gładzonej tulei cylindrowej jest największa ich gęstość dla niskiej wysokości chropowatości powierzchni (rys. 4.). Docieranie silnika diametralnie zmienia gęstość rozkładu wysokości wierzchołków tulei cylindrowej. Tuleja cylindrowa, po pracy silnika w warunkach umownych, zachowuje cechy gęstości rozkładu wysokości wierzchołków tulei docieranej, z równoczesnym kształtowaniem nowych wierzchołków wynikających z procesu jej zużycia. Dystrybucja wysokości wierzchołków tulei cylindrowej ulega ciągłemu zmniejszeniu dla poszczególnych poziomów ich głębokości (rys. 3.).

Pochylenie boków chropowatości powierzchni tulei gładzonej ulega zmniejszeniu w wyniku procesu jej zużycia ściernego. Stopniowo zanikają bowiem większe pochYLENIA profilu chropowatości powierzchni tulei cylindrowej (rys. 3.). Powierzchnia nośna profilu tulei cylindrowej, w wyniku docierania pracą silnika, ma małą wartość dystrybucji pochYLENIA. Ulega ona zwiększeniu dla głębiej położonych nierówności tulei cylindrowej po wykonanej pracy silnika w warunkach umownych. Obserwuje się także zmianę pochYLENIA chropowatości powierzchni tulei cylindrowych, docieranych pracą, w porównaniu z powierzchnią gładzoną, polegającą nie tylko na zmniejszeniu jego wartości, ale także na odmiennej relacji długości lewych i prawych boków pochYLENIA profilu powierzchni (rys. 5.). Badania pracy silników w warunkach umownych w małym stopniu zmieniają ukształtowanie pochYLENIA boków profilu chropowatości powierzchni.

## Podsumowanie

W wyniku docierania pracą silnika, jak i pracy silnika w warunkach umownych zwiększonego zapylenia powietrza zasysanego tuleje cylindrowe zachowują rysy obróbki ukształtowane gładzeniem. Chropowatość powierzchni tulei cylindrowych, po docieraniu, jak i pracy silnika w warunkach umownych, zachowuje cechy odstępów charakteryzowane długością korelacji, ukształtowane w procesie technologicznym wytwarzania. Równocześnie charakterystyczna długość fali chropowatości powierzchni, wyznaczona punktem największej krzywizny widmowej mocy skumulowanej, ulega znacznemu zmniejszeniu w wyniku zużycia ściernego tulei cylindrowej silnika spalinowego.

Docieranie oraz praca silnika spalinowego powodują zmniejszenie amplitud fal nierówności powierzchni tulei cylindrowych w dużym zakresie ich częstotliwości. Objawia się to zmniejszeniem wysokości profilu chropowatości i falistości ich powierzchni. Występuje bowiem zużycie ściernie wierzchołków. Występują wówczas liczne wysokie wierzchołki, a ich średnia wysokość jest większa aniżeli ukształtowana gładzeniem. Ma miejsce zmniejszenie odchylenia standardowego wysokości wierzchołków. Średni arytmetyczny promień wierzchołków jest

wówczas znacznie większy, a gęstość wierzchołków chropowatości tulei cylindrowej po docieraniu pracą silnika zmniejsza się w porównaniu z tuleją gładzoną, by następnie ulec niewielkiemu zwiększeniu po wykonanej pracy przez silnik w warunkach umownych.

Pochylenie boków chropowatości powierzchni tulei gładzonej ulega zmniejszeniu w wyniku procesu jej zużycia ściernego. Stopniowo zanikają większe pochylenia profilu chropowatości powierzchni tulei cylindrowej i kształtują się odmienne relacje długości lewych i prawych boków pochylenia profilu powierzchni w porównaniu z tuleją gładzoną.

## Literatura

- [1] Bezjazycznyj W.F., Kożyna T.D., Konstantinow A.K. i inni: *Optimizacyja tiehniczeskich uslowij miechanicheskoj obrabotki dietalej awiacyonnych dwigatielej*. Izd. MAI, Moskva 1993.
- [2] Dong W.P., Stout K.J.: An integrated approach to the characterization of surface wear. I: Qualitative characterization. *Wear*, 181-183 (2), 1995, 700-716.
- [3] Galligan J., Torrance A.A., Liraut G.: A scuffing test for piston ring/bore combinations: Pt. II. Formulated motor lubrication. *Wear*, 236 (1-2), 1999, 210-220.
- [4] Jabłoński J.: Zmniejszenie zużycia liniowego cylindra przez zmianę topografii warstwy wierzchniej. *Materiały IV Sympozjum IPM WAT, Warszawa 1992*, 238-240.
- [5] Jabłoński J., Michalski J., Pawlus P.: Wpływ własności warstwy wierzchniej cylindrów na własności użytkowe ich par ciernych w różnych warunkach pracy. *Materiały Seminarium Naukowego KBN PAN „Współzależność warstwy wierzchniej z właściwościami użytkowymi maszyn”*, Krasiczyn 1995, 45-47.
- [6] Michalski J., Pawlus P.: Changes of the state of cylinders surface layer in dependence on their operating conditions. *Proceedings of the International Congress on Tribology, Eurotrib'93, Budapest 1993*, 4, 317-322.
- [7] Nakahara T., Momozono S.: Effects of surface roughness parameters on static friction coefficient of the contact between rough surfaces with soft film on substrate. *13th Nordic Symposium on Tribology, Tampere University of Technology, Finlandia, 2008*, NT2008-78-15.
- [8] Pawlus P., Jabłoński J., Michalski J.: Zmiany stanu warstwy wierzchniej cylindrów w procesie gładzenia i eksploatacji. *Materiały VI Międzynarodowego Sympozjum Instytutu Pojazdów Mechanicznych. „Doskonalenie konstrukcji oraz metod eksploatacji pojazdów mechanicznych”*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa-Rynia 1996, 275-280.
- [9] Pawlus P., Jabłoński J.: Cumulative curves characterising load carrying capabilities and wear properties of surfaces. *Measurement Science Review, Institute of Measurement Science, Slovak Academy of Science, section 1: Measurement of physical quantities*, t. 1, z. 1, Bratislava 2001, 85-88.
- [10] Jabłoński J., Pawlus P.: Calculation of the profile peak radii. *Proceedings International Conference on Measurement, Measurement'97, Slovak Academy of Sciences, Bratislava 1997*, 105-108.

- [11] Jabłoński J.: Proposal of the mean value computation for roughness profile of asymmetrical height distribution. Proceedings of the 6th ISMQC IMEKO Symposium „Metrology for Quality Control in Production”, TU, Vienna 1998, 271-276.
- [12] Jabłoński J., Pawlus P.: Problems of surface topography parameters computation based on the peculiar points method. Proceedings of IX International Colloquium of Surfaces, Shaker Verlag Aachen, Chemnitz 2000, 426-433.
- [13] Jabłoński J., Pawlus P.: Theoretical considerations of surfaces having stratified functional properties. Measurement Science Review, Institute of Measurement Science, Slovak Academy of Science, section 1: Measurement of physical quantities, t. 1, z. 1, Bratislava 2001, 77-80.
- [14] Jabłoński J., Pawłowski S.: 3D fraktalny model powierzchni honowanej typu plateau. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, PAN, Oddział w Poznaniu, 1999, 83-91.
- [15] Jabłoński J., Pawlus P.: Computer generation of cylinder surface from internal combustion engine. Western Scientific Centre of Ukrainian Transport Academy, 7, 2000, 153-156.
- [16] Jabłoński J.: Digital generation of surface of asymmetrical height distribution. Measurement, 34 (3), 2003, 187-191.
- [17] Liubymov V., Pawłowski S., Jabłoński J.: 3D-numerical model of surface after laser machining. Measurement Science Review, Institute of Measurement Science, Slovak Academy of Science, t. 3, z. 3, Bratislava 2003, 87-90.
- [18] Jabłoński J., Pawłowski S.: Binary method of grinding wheel surface descriptions. Journal of Physics: Conference Series, Bristol and Philadelphia 2005, 13 (1), 40-43.
- [19] Jabłoński J., Pawlus P.: Binary method of porous surface description. Dietzsch M. (ed.), Proceedings of XI International Colloquium on Surfaces, Shaker Verlag Aachen, February 2nd and 3rd Chemnitz, Part II, 2004, 69-74.
- [20] Sahoo P., Roy Chowdhury S.K.: A fractal analysis of adhesive friction between rough solids in gentle sliding. Journal Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 214 (6), 2000, 583-595.
- [21] Wu J. J.: Characterization of fractal surfaces. Wear, 239 (1), 2000, 36-47.
- [22] Pawlus, P.: A study on the functional properties of honed cylinders surface during running-in. Wear, 176 (2), 1994, 247-254.
- [23] Suh M-S., Chae Y-H., Kim S-S., Hinoki T., Kohyama A.: Influence of angle and width on friction in micro-grooved crosshatch pattern under lubricated sliding friction. 13th Nordic Symposium on Tribology, Tampere University of Technology, Finlandia 2008, NT2008-55-26.

## **A MACHINED CYLINDER LINER SURFACE ROUGHNESS VERSUS THE ROUGHNESS AFTER ENGINE RUNING-IN**

### **S u m m a r y**

The paper's topic deals with the surface characteristics of machined and used cylinders of the internal combustion engine. The changes of some basic roughness parameters and functions were analyzed on the basis of measurements performed for new honing cylinders and after their



running-in and wear bed testing through the engine operation. The study considers the parameters such as: cumulative spectral power, structure function, bearing ratio, autocorrelation function, power spectral density, peak curvature, density peak of the profile, slope of the profile. Distributions of profile roughness slope angle are also shown. Alike to other parameters, integrals of profile roughness slope angle were determined along the cylinder surface and the plane, which crosses both the crankshaft axis and cylinder axis.

*Złożono w redakcji w czerwcu 2010 r.*