

Charakterystyka powierzchni tulei cylindrowych przeznaczonych do zalewania metodą Alfin

Paweł Pawlus*, Jacek Michalski*, Sławomir Ochwat**

*Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska

**Wytwórnia Sprzętu Komunikacyjnego „PZL-Rzeszów” SA

Streszczenie: Scharakteryzowano proces technologiczny tulei cylindrowych oraz sposób pomiaru i oceny struktury geometrycznej powierzchni. Półfabrykatem tulei cylindrowych był odlew wielokrotny specjalny w kształcie rury, wykonany metodą odlewania odśrodkowego poziomego. Charakteryzuje się on porowatą powierzchnią zewnętrzną, uzyskaną oddziaływaniem pokrycia formy. Powierzchnia jest oczyszczona obróbką strumieniowo-ścierną kulkami metalowymi. Tuleje cylindrowe przeznaczone są do zalewania metodą Alfin w blokach cylindrowych ze stopów aluminium. Przedstawiono analizę składu chemicznego i makrostruktury powierzchni tulei cylindrowej na poziomie mikroskopu świetlnego i elektronowego mikroskopu skaningowego z mikroanalizą składu chemicznego. Dokonano pomiaru i analizy chropowatości powierzchni. Profil tworzącej powierzchni zewnętrznej tulei cylindrowych mierzono konturografem, natomiast powierzchnię profilometrem skaningowym z czujnikiem laserowym. Podano wartości parametrów chropowatości wyodrębnionych profili wzdłuż tworzącej i obwodu powierzchni zewnętrznej tulei. Szczyty nierówności miały kształt zbliżony do kulistego. Funkcja autokorelacji powierzchni świadczy, że powierzchnia ma charakter mieszany (okresowo-losowy). Wykresy kątowe: widmowej mocy powierzchni i funkcji autokorelacji powierzchni wskazują, że jest to powierzchnia izotropowa. Zbliżone wartości udziału materiałowego i sumy kąta wzniosu profilu wzdłuż długości tworzącej i obwodu powierzchni tulei świadczą o podobnym kształcie nierówności powierzchni.

Słowa kluczowe: tuleja cylindrowa, topografia powierzchni porowatej

1. Wprowadzenie

Silnikom spalinowym stawiane są wysokie wymagania pod względem czystości spalin, mocy jednostkowej, zużycia paliwa, oleju, jak i niezawodności, funkcjonalności oraz trwałości. Prowadzi to do zwiększenia ich obciążeń mechanicznych i cieplnych [1, 2]. Zawory wydechowe, tłoki i tuleje cylindrowe należą do najbardziej obciążonych elementów silnika spalinowego. Polepszenie wyników wymiany ciepła umożliwia podwyższenie osiągnięć silników. Bardzo intensywnym badaniom podlega blok cylindrowy silnika spalinowego. Jego udoskonalenia wynikają także z faktu wpływu masy na obciążenie i dynamikę pojazdu [1, 3].

Cierna zdolność przenoszenia obciążeń jest wykorzystana w połączeniach wciskowych (wtłaczanych i skurczowych) [4] oraz w połączeniach kształtowych, natomiast adhezja lub adhezja-dyfuzja – w tulejach zalewanych, powłokach galwanicznych czy warstwach natryskiwanych [5].

Podstawową funkcją zespołu cylindra jest zapewnienie małej siły tarcia, zużycia oraz szczelności grupy tłokowo-cylindrowej. Wymagania dodatkowe odnośnie do połączenia tuleja cylindrowa – kadłub to odporność na obciążenia zmienne o dużej dynamice, wywołane ciśnieniem procesu spalania, na obciążenie siłą boczną układu korbowo-tłokowego, na obciążenie ciśnieniem, ciepłem i gradientem temperatury, jak również na odkształcenie plastyczne, pełzanie oraz zmęczenie. Uwzględnia się także zmiany stanu pola odkształceń w czasie eksploatacji oraz działania obciążenia w analizie pełzania. Istnieje szereg wymagań dodatkowych połączenia tulei z kadłubem. Powinny one zachowywać adhezję lub cechy sprężyste, bez wystąpienia odkształceń plastycznych oraz szczelin, dobrą zwilżalność olejem silnikowym, jak również być odporne na pełzanie, zmęczenie, korozję i fretting. Pojemność i przewodność cieplna tulei, jak również konduktancja kontaktowa złożeń, winna być dostateczna.

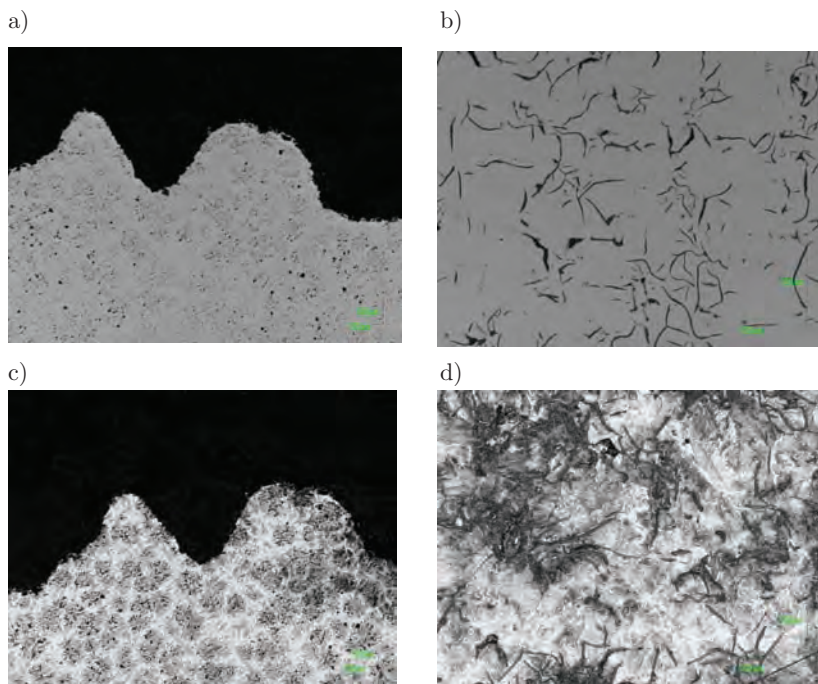
W pracy [6] stwierdzono, że prawidłowe połączenie wtopki żeliwnej, alfinowanej z siluminem występuje wtedy, gdy na żeliwie powstanie nierozpuszczona warstwa złożona z węgla Fe-4CSi oraz fazy Al-12Fe-3Si. W silniku Mercedes-Benz V6 OM642 320 CDI i silniku Mercedes-Benz 4,0 dm³ V8 CDI blok cylindrowy wykonany jest ze stopu aluminium AlSi9Cu3 a tuleja cylindrowa z żeliwa szarego EN-GJL-300 i EN-GJL-350, odpowiednio. Powierzchnia zewnętrzna tulei cylindrowej jest porowata, ukształtowana w procesie odlewania specjalnego i zalana technologią Alfin. Monobloki cylindrowe silnika BMW 3,0 dm³ Twin Turbo ze stopu aluminium A380 mają zalane tuleje cylindrowe z żeliwa szarego EN-GJL-300. Tuleja ta ma powierzchnię zewnętrzną walcową, kształtowaną przez toczenie, z naciętym gwintem o zarysie kołowym i stożkowy kołnier.

Kontrola tulei cylindrowych w produkcji masowej obejmuje optyczne sprawdzanie struktury geometrycznej porowatej powierzchni zewnętrznej oraz optyczny pomiar wymiarów zewnętrznych [7] i pomiar stykowy powierzchni wewnętrznej [8].

2. Cel i zakres badań

Obiektem badań były tuleje cylindrowe z żeliwa, o porowatej powierzchni zewnętrznej ukształtowanej w procesie technologicznym odlewania specjalnego, przeznaczone do zalewania w blokach cylindrowych ze stopów aluminium technologią Alfin. Celem artykułu jest analiza materiału i struktury geometrycznej powierzchni zewnętrznej analizowanych tulei cylindrowych.

Skład chemiczny tulei cylindrowych wyznaczono spektrometrem emisyjnym ze wzbudzeniem jarzeniowym



Rys. 1. Struktura metalograficzna tulei cylindrowej: a) strefa przypowierzchniowa, zgląd nietrawiony, b) strefa przypowierzchniowa zgląd trawiony, c) strefa środkowa, zgląd nietrawiony, d) strefa środkowa zgląd trawiony (perlit, grafit płatkowy, eutektyka fosforowa pseudopodwójna)

Fig. 1. Metallographic structure of cylinder liner: a) zone material surface, polished section not etched, b) zone material, surface polished section etched, c) central zone, polished section not etched, d) central zone, polished section etched (pearlite, graphite flake, pseudo-dual phosphorous eutectic)

LECO GDS 850. Strukturę metalograficzną określono na zglądach poprzecznych, przygotowanych przez cięcie, szlifowanie i polerowanie w mikroskopie świetlnym metalograficznym NIKON typ ECLIPSE L300. Mikrostrukturę żeliwa ujawniano przez trawienie powierzchni zglądu odczynnikami Nital. Obrazy mikrostruktury rejestrowano kamerą cyfrową NIKON DS5. Analizę jakościową poszczególnych pierwiastków powierzchni cylindrów przeprowadzono mikroanalizatorem rentgenowskim EDS NORAN sprzężonym z mikroskopem skaningowym HITACHI S-3400N z zastosowaniem systemu SIX Thermo. Twardość zmierzono twardościomierzem

Brinell HB (2,5/187,5). Przeprowadzono także ścisłą próbę rozciągania próbek żeliwa. Próby prowadzono w temperaturze pokojowej. Stosowano maszynę wytrzymałościową UTS 100 Testsysteme. Profil tworzącej powierzchni zewnętrznej tulei cylindrowych mierzono konturografem Formtester MMQ40 firmy Perthen. Z kolei powierzchnię zewnętrzną mierzono profilometrem skanującym Talyscan 150 firmy Taylor Hobson Precision. Korzystano z czujnika laserowego w układzie triangulacyjnym oraz z oprogramowania Talymap 3D. Kwadratowy obszar pomiaru miał długości boków 5017,6 μm . Krok pomiaru wzdłuż tworzącej i obwodu powierzchni zewnętrznej tulei cylindrowej był jednakowy i wyniósł 9,8 μm .

3. Wyniki badań i ich analiza

Analizowane tuleje cylindrowe miały średnicę wewnętrzną 78,2–78,4 mm, średnicę zewnętrzną 91,5–91,8 mm oraz wysokość 151,8–152,2 mm. Twardość tulei cylindrowej wyniosła 220-240 HB.

Strukturę metalograficzną komórkową tulei cylindrowej żeliwnej, ze strefy przypowierzchniowej, powierzchni zewnętrznej ukształtowanej w procesie odlewania specjalnego zamieszczono na rys. 1a, 1b. Skład chemiczny strefy przypowierzchniowej i strefy środkowej jest zbliżony, co stwierdzono na podstawie badań spektrometrem emisyjnym LECO. W strefie środkowej odlewu analizowane tuleje cylindrowe mają strukturę metalograficzną, składającą się z perlitu, steatytu i grafitu płatkowego (rys. 1c, 1d). Wytrzymałość na rozciąganie wynosząca 320 MPa wskazuje, że jest to żeliwo EN-GJL-300 według PN-EN 1561:2000. Skład chemiczny i uzyskane właściwości mechaniczne tulei zamieszczono w tab. 1. Tuleja cylindrowa ma odmienny jakościowy skład chemiczny powierzchni zewnętrznej od składu chemicznego powierzchni wewnętrznej obrabianej przez wytaczanie. Na powierzchni zewnętrznej, w porównaniu z powierzchnią wewnętrzną, występuje zwiększona zawartość węgla oraz zauważalny jest glin, fosfor, siarka, mangan i ko-

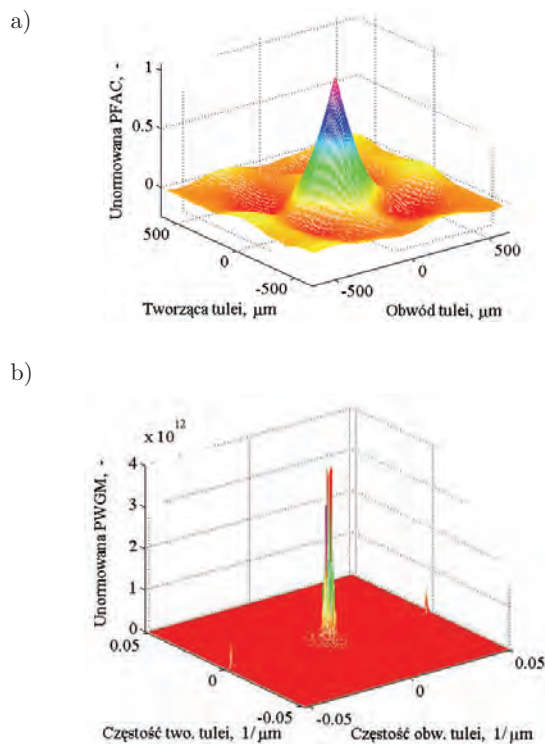
Tab. 1. Skład chemiczny i właściwości mechaniczne żeliwa badanej tulei cylindrowej

Tab. 1. Chemical composition and mechanical properties of tested cast iron cylinder liner

Skład chemiczny %											
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	W	V	Ti	Cu
3,46	0,65	2,03	0,52	0,06	0,24	0,12	0,02	0,005	0,013	0,024	0,35
Wytrzymałość na rozciąganie $R_m = 320 \text{ MPa}$ Granica plastyczności $R_e = 250 \text{ MPa}$ Wydłużenie $A_5 = 0,4 \%$ Moduł sprężystości $E = 130\,000 \text{ MPa}$						Liczba Poissona $\nu = 0,260$ Twardość HB 220 – 240 Masa właściwa $7,36 \text{ g/cm}^3$					

balt. Powierzchnia wewnętrzna ma z kolei większą ilość krzemu i żelaza. Przypisano to oddziaływaniu pokrycia na bazie bentonitu, mączki kwarcowej silikonu i mydła rozcieńczonego wodą.

Zarys profilu powierzchni zewnętrznej tworzącej tulei zmierzono konturografem Formtester z końcówką pomiarową kulistą o promieniu 0,25 mm na długości profilu 30 mm. Wysokość nierówności powierzchni wynosiła $Pt=725 \mu\text{m}$, a średnia odległość między wierzchołkami 3333 μm . Analiza nierówno-



Rys. 2. Charakterystyka stereometrii powierzchni zewnętrznej tulei cylindrowej: a) obraz izometryczny powierzchniowej funkcji autokorelacji, b) obraz izometryczny powierzchniowej widmowej gęstości mocy

Fig. 2. Surface topography of outer surface of cylinder liner: a) the isometric image of surface autocorrelation function, b) the isometric image of surface power spectral density

ści powierzchni odwzorowanej czujnikiem laserowym profilometru skanującego Talyscan 150 wskazuje, że jest to powierzchnia mieszana (okresowo-losowa). Wynika to z charakteru funkcji autokorelacji (rys. 2). Potwierdza to także moc skumulowana i rzeczywista powierzchni, wyodrębniona dla tworzącej i obwodu tulei cylindrowej (rys. 4).

Wykresy kątowne widmowej mocy powierzchni i funkcji autokorelacji stereometrii powierzchni zewnętrznej tulei cylindrowej wskazują, że jest to powierzchnia izotropowa (rys. 3). Także róża anizotropii świadczy, że jest to powierzchnia izotropowa. Udział materiałowy powierzchniowy ma kształt litery S (rys. 3). Podobne wartości sumy kąta wzniosu, lewych i prawych boków profilu, wzdłuż długości tworzącej i obwodu powierzchni tulei świadczą o zbliżonym kształcie nierówności powierzchni. Szczyty nierówności mają kształt zbliżony do kulistego.

Wartości liczbowe parametrów i funkcji topografii powierzchni zewnętrznej tulei cylindrowej (odlew specjalny) zamieszczono w tab. 2. Podano także wartości średnie i odchy-

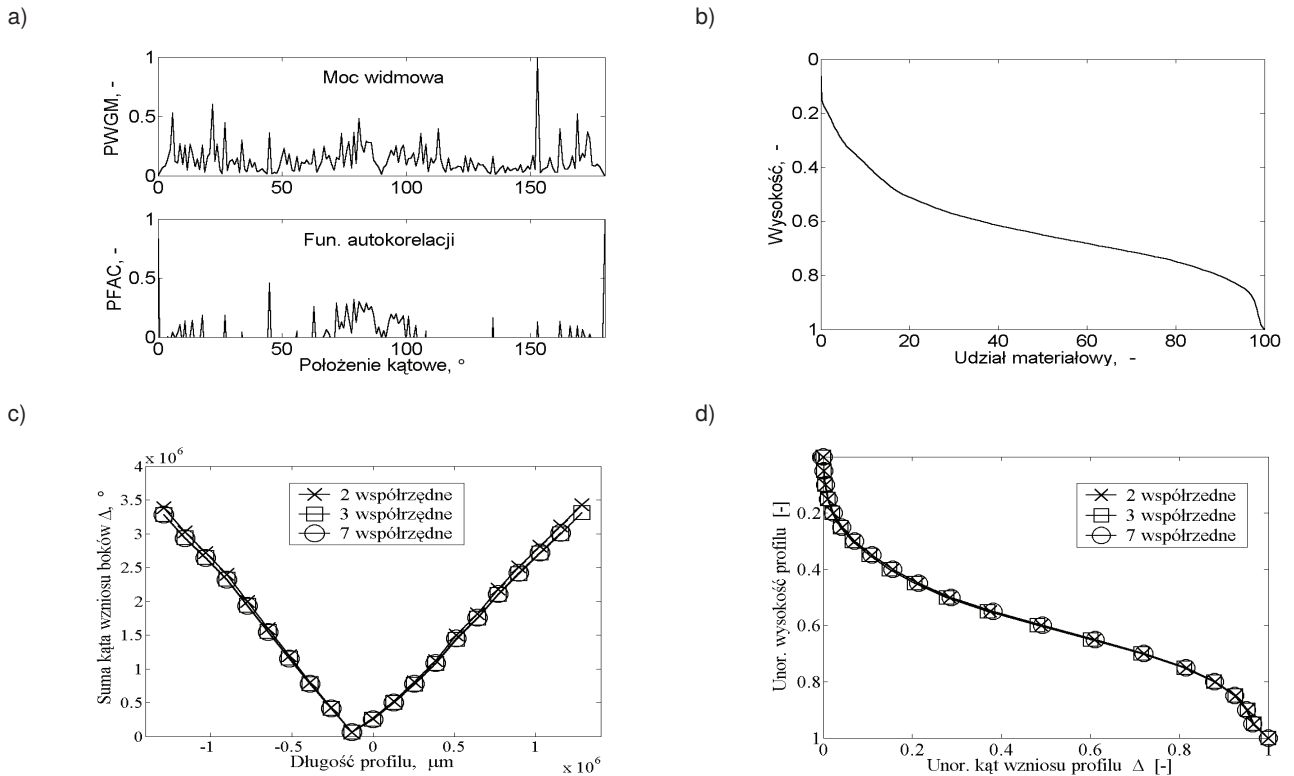
Tab. 2. Parametry powierzchni zewnętrznej tulei cylindrowej

Tab. 2. Parameters of the outer surface topography of cylinder liner

Parametry i funkcje topografii powierzchni	
Sa (μm)	105
Sq (μm)	136
Sp (μm)	500
Sv (μm)	306
Sz (μm)	806
Ssk (-)	0,70
Sku (-)	3,64
STp 1 μm , (%)	0
SHTp 20 % - 80 %), (μm)	264
Sc 1 μm -10 μm , ($1/\text{mm}^2$)	1,72
Spd ($1/\text{mm}^2$)	50,5
Str (-)	0,795
Sal (μm)	325
Std, °	26,5
Siso (%)	79,5
Sfd (-)	-
Sdq ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	9,03
Spc ($1/\mu\text{m}$)	0,275
Sdr (%)	1917

Parametry i funkcje topografii powierzchni	
Sk (μm)	147
Spk (μm)	159
Svk (μm)	138
Sr1 (-)	Sr1 (%)
Sr2 (-)	Sr2 (%)

Wartość średnia parametrów i funkcji 512 profilu tworzących powierzchni		Odchylenie standardowe
Pa (μm)	102,9	27,0
Pq (μm)	129,8	32,2
Pt (μm)	607,4	136,2
Psk (-)	0,50	0,44
Pku (-)	3,13	0,84



Rys. 3. Charakterystyka stereometrii powierzchni zewnętrznej tulei cylindrowej: a) wykresy katowej widmowej mocy powierzchni PWGM i funkcji autokorelacji powierzchni PFAC, b) udział materiałowy powierzchniowy, c) suma kąta wzniosu boków profilu wzdłuż długości tworzącej, d) unormowany kąt wzniosu profilu na wysokości profilu wzdłuż tworzącej

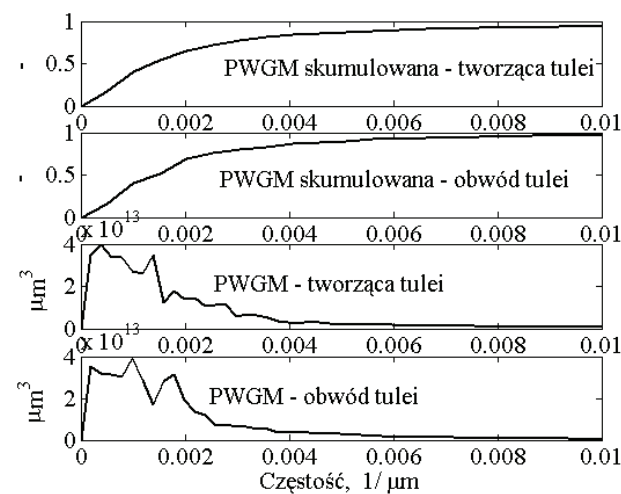
Fig. 3. Surface topography of outer surface of cylinder liner: a) angular power spectral density PWGM and surface autocorrelation function PFAC, b) material ratio plot, c) the sum of the profile slope along the assessment length, d) normalized profile slope

nia standardowe parametrów 512 profili wzdłuż tworzącej tej tulei cylindrowej. Profile wyodrębniono cyfrowo ze zmierzonej powierzchni.

4. Wnioski

Analizowane tuleje cylindrowe, przeznaczone do zalewania w blokach cylindrowych ze stopów aluminium, są wykonane z żeliwa szarego perlitycznego z eutektyką fosforową potrójną. Twardość tulei wynosi 220–240 HB. Tuleje cylindrowe mają powierzchnię zewnętrzną porowatą, ukształtowaną odlewaniem odśrodkowym poziomym w wyniku oddziaływania pokrycia formy i oczyszczania obróbką strumieniowo-ścierną. Mają one odmienny skład chemiczny punktowy powierzchni od składu chemicznego powierzchni wewnętrznej obrabianej przez wytaczanie. Na powierzchni zewnętrznej, w porównaniu z powierzchnią wewnętrzną, występuje zwiększona zawartość węgla oraz zauważalny jest glin, fosfor, siarka, mangan i kobalt. Powierzchnia wewnętrzna ma z kolei większą ilość krzemu i żelaza.

Z pomiaru konturografem wynika, że tuleja cylindrowa żeliwna mająca powierzchnię zewnętrzną porowatą, ukształtowaną poprzez odlewanie odśrodkowe, ma wysokość nierówności 725 μm i średnią odległość między wierzchołkami 3333 μm. Wysokość chropowatości powierzchni jest równa



Rys. 4. Widmowa moc skumulowana i rzeczywista dla tworzącej i obwodu powierzchni zewnętrznej tulei cylindrowej

Fig. 4. Power spectral density in perpendicular directions

$S_z=806 \mu\text{m}$, $P_t=589-623 \mu\text{m}$ oraz odległość rowków profilu wynosi $PS_m=717-1004 \mu\text{m}$. Gęstość powierzchniowa szczytów ma wartość $50,5$ szczytów/ cm^2 . Jest to powierzchnia izotropowa (izotropowość $79,5 \%$) o charakterze mieszanym (okresowo-losowym).

Bibliografia

1. Idzior M.: *Rozwój samochodowych silników spalinowych w aspekcie metod ich wytwarzania*, „Silniki Spalinowe”, r. 124, nr 1/2006, 60–70.
2. Wiśniewski T.S.: *Badanie procesów wymiany ciepła w wybranych elementach silników tłokowych*. „Prace Naukowe, Mechanika”, z. 203, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.
3. Materiały firm: Audi, BMW, Honda, Mercedes, PSA, Renault, Toyota.
4. Kosior A.: *Wpływ parametrów wybranych połączeń z tarciami konstrukcyjnymi na właściwości sprężysto-tłumiące układów mechanicznych*. „Prace Naukowe, Mechanika”, Politechnika Warszawska, z. 209, Warszawa 2005.
5. Bus J.: *Wybrane problemy technologii galwanicznych pokryć kompozytowych węzłów ciernych*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2004.
6. Pietrowski S., Szymczak T.: *Budowa połączenia powłoki alfinowanej z siluminem*. „Archiwum Odlewnictwa”, r. 4, nr 14/2004, 393–404.
7. Schwenke H., Neuschaefer-Rube U., Pfeifer T., Kunzmann H.: *Optical methods for dimensional metrology in production engineering*. „CIRP Annals – Manufacturing Technology”, vol. 51, no 2/2002, 685–699.
8. Adamczak S.: *Pomiary geometryczne powierzchni – Zarysy kształtu, falistość i chropowatość*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008. ■

Characteristic of cylinder liner surfaces subjected to cast by Alfin method

Abstract: Production process of cylinder liners and methods of measurement and analysis of their surface topography are described. Special multiple casting of tube shape, made by centrifugal horizontal method was the semi-product of cylinder liner. It has porous outer surface as a result of form coating. This surface is cleaned by vapor blasting method using steel balls. Cylinder liners are subjected to casting by Alfin method in cylinder blocks from aluminum alloys. The analysis of chemical constitutions and macrostructure of cylinder liner are presented. The measurement and analysis of cylinder liner surface topography was done. The profile of generating line of external cylinder liner surface was measured

with contour measuring machine, but its surface topography by scanning equipment Talyscan 150 with laser sensor. The surface summits shape is similar to spherical. The analysis of areal autocorrelation function proves mixed (random-periodic) character of surface topography of cylinder liner. It was shown after the analyses of angular plots of power spectral density and autocorrelation functions that the analysed surface is isotropic.

Keywords: cylinder liner, porous surface topography

prof. dr hab. inż. Paweł Pawlus

Pracuje w Katedrze Technologii Maszyn i Organizacji Produkcji Politechniki Rzeszowskiej. Główny obszar badań naukowych: tribologia, metrologia techniczna. Jest autorem oraz współautorem około 200 artykułów, głównie z zakresu analizy i oddziaływań tribologicznych struktury geometrycznej powierzchni.

e-mail: ppawlus@prz.edu.pl



dr inż. Jacek Michalski

Urodzony 15.10.1950 r. w Olkuszu. Ukończył studia w 1976 r. na Wydziale Mechanicznym Politechniki Rzeszowskiej. Tam też uzyskał stopień doktora w 1981 r. W latach 1974–1976 pracował w przemyśle. Jest zatrudniony w PRz od 1976 r. Był adiunktem od 1981 do 2006 r. Jego zainteresowania obejmują technologię silnika spalinowego, pojazdu mechanicznego, technologie specjalne oraz eksploatację silników i pojazdów. W latach 1997–2006 wykonywał prace naukowo-badawcze. Aktualnie jest starszym wykładowcą.

e-mail: jmichals@prz.edu.pl



mgr inż. Sławomir Ochwat

Urodzony 07.10.1975 r. w Rzeszowie. Ukończył studia w 2000 r. na Wydziale Mechanicznym Politechniki Rzeszowskiej (aktualnie doktorant PRz). Jest zatrudniony w dziale rozwoju Wytwórni Sprzętu Komunikacyjnego „PZL-Rzeszów” SA. Jego zainteresowania obejmują zagadnienia zużycia ściernego w węzłach tribologicznych oraz technologie wykonywania kieszeni smarowych i ich wpływu na warunki pracy.

e-mail: sochwat1975@poczta.onet.pl

