

TOPOGRAFIA POWIERZCHNI GŁADZI CYLINDROWEJ

Józef GRUSZKA

Streszczenie: *We współczesnych rozwiązaniach konstrukcyjnych tulei cylindrowych coraz większą rolę odgrywają parametry i cechy funkcjonalne powierzchni gładzi. Głównie z powodu nowych wymagań dla silników spalinowych w zakresie zmniejszenia zużycia oleju i emisji składników toksycznych w spalinach. W artykule przedstawiono opis pojęcia topografii powierzchni gładzi tulei cylindrowej oraz z tym związanych parametrów i cech, które są istotne dla funkcjonalności układu tłokowo-cylindrowego w silnikach spalinowych. Przedstawiono wyniki z badań i analiz topografii powierzchni w układzie 2D i 3D po procesie obróbki metodą wielostopniowego gładzenia.*

Słowa kluczowe: *topografia powierzchni, tuleja cylindrowa, pomiary*

1. WPROWADZENIE

Tuleja cylindrowa jako podstawowy element układu tłokowo-cylindrowego silnika spalinowego ma za zadanie utworzenie wspólnie z tłokiem i pierścieniami tłokowymi skutecznego uszczelnienia przestrzeni roboczej cylindra w której zachodzą podstawowe dla pracy silnika procesy przemiany termodynamicznej spalania oraz zamiany siły gazowej na ruch posuwisto-zwrotny. Sam układ tłokowo-cylindrowy poza spełnieniem podstawowych zadań w zakresie uszczelnienia przestrzeni roboczej oraz zminimalizowaniem strat tarcia powstającego podczas suwu tłoka z pierścieniami po powierzchni gładzi cylindra jest odpowiedzialny za zużycie oleju i emisję cząstek stałych w spalinach [2,5,7,8]. Dlatego jednym z kierunków rozwoju i prac badawczych stała się struktura powierzchni warstwy wierzchniej gładzi tulei cylindrowej, która może być źródłem obniżenia zużycia oleju i emisji cząstek stałych [2,4,5,7,8]. Kierunki zmian w ukształtowaniu struktury powierzchni gładzi tulei cylindrowej są związane z rozwojem zarówno materiałów konstrukcyjnych jak i procesów technologicznych wytwarzania odlewów i kształtowania na gotowo struktury warstwy wierzchniej. Zmiany w kształtowaniu struktury warstwy wierzchniej gładzi tulei cylindrowych są związane z przejściem z honowania jedno, dwustopniowego na honowanie wielostopniowe z możliwością stosowania różnych narzędzi skrawających łącznie z możliwością wykorzystania lasera [2,6,8,9]. Stąd istotna jest znajomość parametrów i cech kształtujących topografię powierzchni gładzi tulei cylindrowych oraz ich oddziaływanie funkcjonalne w układzie tokowo-cylindrowym silnika spalinowego.

2. ZAKRES TEMATYCZNY POJĘCIA TOPOGRAFIA POWIERZCHNI GŁADZI TULEI CYLINDROWEJ

Dotychczas pojęcie topografii było znane i stosowane w dziedzinie kartografii gdzie określa konfigurację powierzchni terenu uwzględniając jego kształt oraz obecność i wzajemne położenie punktów charakterystycznych. Znajduje też coraz częściej zastosowanie w budowie maszyn głównie za sprawą wymagań jakie stawia się powierzchnią pod względem tribologicznym na przykład w nowych rozwiązaniach konstrukcyjnych tulei cylindrowych tłokowych silników spalinowych [2,8,9].

Ogólnie w budowie maszyn przyjmuje się, że zbiór wszystkich nierówności powierzchni rzeczywistej nazywany jest strukturą geometryczną powierzchni (SGP), składającą się z trzech składowych: odchyłek kształtu, falistości i chropowatości, oraz z wad powierzchni, które są z zasady ściśle związane z procesem technologicznym, kształtowania wyrobu.

Pomiar i analiza struktury geometrycznej powierzchni jest najczęściej realizowany w przekrojach, czyli profilach powierzchni w układzie 2D, a faktycznie każda powierzchnia jest wytwarzana i pracuje w układzie 3D. Stąd też wzrastające zainteresowanie analizą trójwymiarową powierzchni a pomiary 3D określa się często pomiarami stereometrii lub topografii powierzchni [1,6]

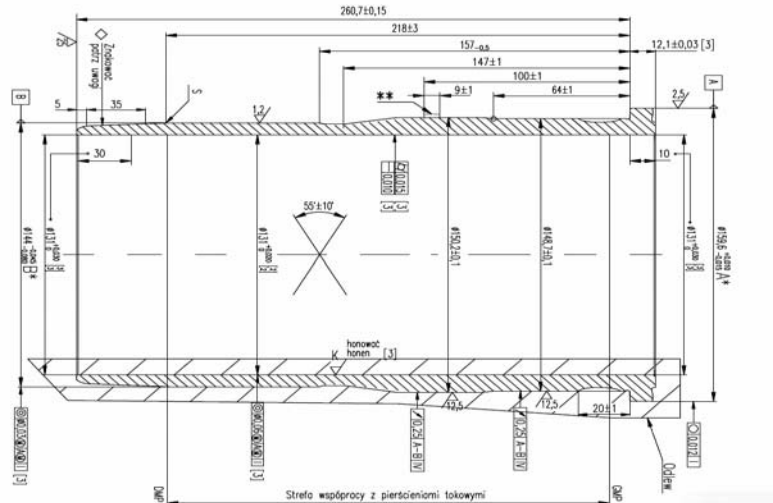
Dla potrzeb niniejszej publikacji postanowiono połączyć pojęcia topografii i SGP celem objęcia nimi następującego zakresu tematycznego powierzchni gładzi tulei cylindrowej:

- analiza zadań i funkcji trybologicznych w układzie TPC silnika spalinowego
- proces kształtowania struktury warstwy wierzchniej i z tym związane parametry i cechy
- dobór warunków pomiaru, pomiar i analiza parametrów i cech kształtujących topografię powierzchni gładzi tulei cylindrowych .

3. PROCES KSZTAŁTOWANIA STRUKTURY POWIERZCHNI WARSTWY WIERZCHNIEJ GŁADZI TULEI CYLINDROWEJ I Z TYM ZWIĄZANE PARAMETRY

3.1. Opis procesu

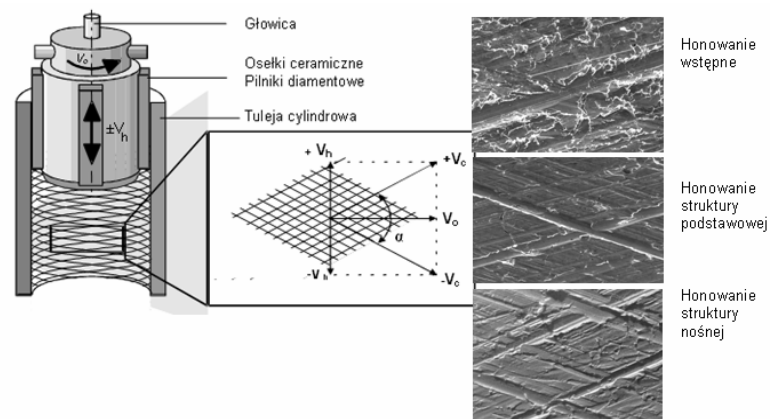
Ukształtowanie topograficzne struktury warstwy wierzchniej gładzi tulei cylindrowej następuje dwuetapowo w procesie jej wytwarzania w oparciu o wymagania konstrukcyjne zawarte w specyfikacji materiałowej - SMW (w procesie odlewania) i specyfikacji geometrycznej – SGW (w procesie obróbki mechanicznej). Zakres specyfikacji (SMW/SGW) jest ściśle związany z zastosowaną techniką wytwarzania tulei cylindrowych.



Rys. 1. Typowy rysunek konstrukcyjny tulei cylindrowej

W pierwszym etapie w procesie odlewania odśrodkowego w oparciu o wymagania specyfikacji SMW/SGW następuje kształtowanie konstrukcji tulei i własności materiału w zakresie składu chemicznego, struktury, twardości i wytrzymałości. Ukształtowane w procesie odlewania własności materiału gwarantują po procesie obróbki mechanicznej na powierzchni gładzi wymaganą warunkami specyfikacji strukturę, twardość i wytrzymałość, które to cechy mają wpływ na zużycie układu TPC a w konsekwencji na trwałość silnika.

W etapie drugim w procesie obróbki mechanicznej powstaje ostateczna postać geometryczna tulei (rys.1) w oparciu o specyfikację geometryczną tulei (SGW). Struktura topografii powierzchni gładzi jest kształtowana w operacji honowania wielozabiegowej (rys.2) w zależności od wymagań w zakresie tolerancji geometrycznych kształtu otworu (okrągłości i prostoliniowości lub walcowości i prostoliniowości) oraz tolerancji parametrów chropowatości i obrazu ukształtowania struktury warstwy wierzchniej.

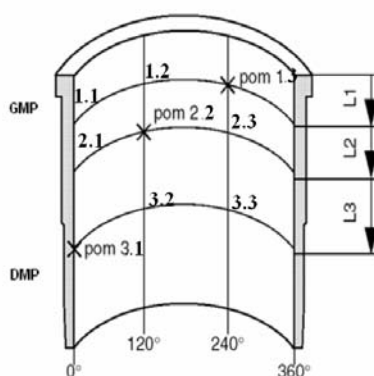


Rys. 2. Schemat procesu honowania i z tym związany charakterystyczny obraz 3D ukształtowania powierzchni gładzi tulei cylindrowej [2]

3.2. Opis parametrów i cechy struktury powierzchni warstwy wierzchniej gładzi tulei cylindrowej po procesie honowania

Dla scharakteryzowania topografii powierzchni gładzi tulei cylindrowej po procesie honowania przyjęto następujące parametry i cechy funkcjonalne oraz z tym związane warunki pomiarów i punkty pomiarowe według rys. 3:

- parametry okrągłości, prostoliniowości, walcowości przyrząd do pomiaru błędów kształtu Taly-round 365, typ filtru Gauss, rodzaj filtru LSS, zakres filtru 1-50, miejsce pomiaru pięć poziomych poniżej DMP i powyżej GMP i trzy poziomy w strefie pomiędzy GMP a DMP (okrągłość/walcowość) i dla prostoliniowości wzdłuż tworzącej tulei 0°, 120° i 240°,
- parametry chropowatości 2D/3D: profilometr Form Talysurf Series 2, parametry 2D według wymagań normy ISO 13565-2 (Rk, Rpk, Rvk, Mr1, Mr2), punkty pomiarowe 1.1 – 3.3, długość odcinka pomiarowego 12,5 mm, filtr Rk, głowica bez ślizgacza, parametry 3D według programu TalyMap pomiar powierzchni 4x4 mm w strefie GMP,
- kąt przecięcia rys honowniczych, obraz ukształtowania powierzchni gładzi, głębokość deformacji: system wizyjny CCD, skaningowy mikroskop elektronowy,



Rys. 3. Rozmieszczenie punktów pomiarowych

4. POMIARY I ANALIZA PARAMETRÓW ORAZ CECH TOPOGRAFICZNYCH POWIERZCHNI GŁADZI TULEI CYLINDROWYCH

Do pomiarów i analiz przyjęto jeden typ tulei o średnicy otworu $\varnothing 131$ mm (rys.1) z tego samego gatunku materiału (żeliwo stopowe) z ukształtowaną powierzchnią gładzi po honowaniu trzyczabiegowym (rys.2).

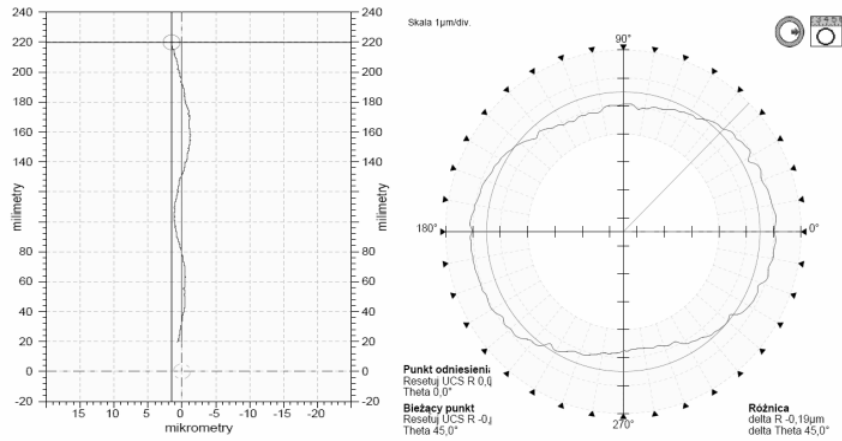
4.1. Kształt otworu tulei

Ocenę kształtu otworu tulei oparto o wyniki pomiarów :

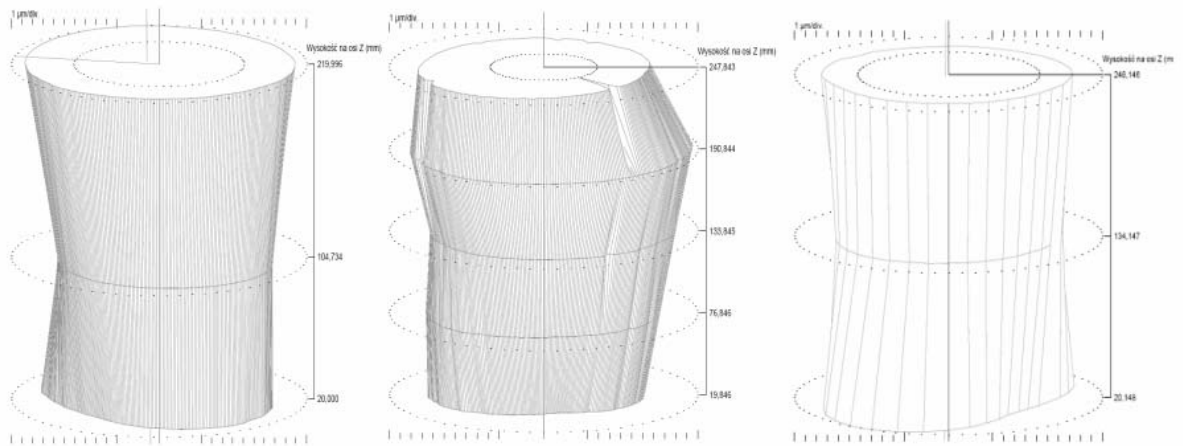
- odchyłki okrągłości które ukształtowały się w zakresie 0,72 – 5,47 μm
- odchyłki prostoliniowości 1,89 - 9,29 μm
- odchyłki walcowości metodą przekrojów poprzecznych zawierały się w zakresie 5,69-13,86 μm i metodą tworzących 5,72 μm w porównaniu do metody przekrojów poprzecznych 5,69 μm

Graficzną prezentację wybranych parametrów przedstawiono na rys. 4 i 5

Uzyskane wyniki z pomiarów tolerancji kształtu wykazały możliwość zastosowania do oceny kształtu otworu zarówno metodę przekrojów poprzecznych (odchyłka okrągłości i walcowości) i metodę tworzących (odchyłka prostoliniowości i walcowości). Odchyłka walcowości jest wymogiem silniejszym i bardziej pożądanym z punktu oceny kształtu otworu jako cechy funkcjonalnej cylindra w układzie TPC ponieważ obrazuje kształt otworu w układzie 3D w przeciwieństwie do odchyłek okrągłości i prostoliniowości, które prezentują wyniki w układzie 2D.



Rys. 4. Graficzna prezentacja odchyłki prostoliniowości 1,89 μm i okrągłości 1,42 μm

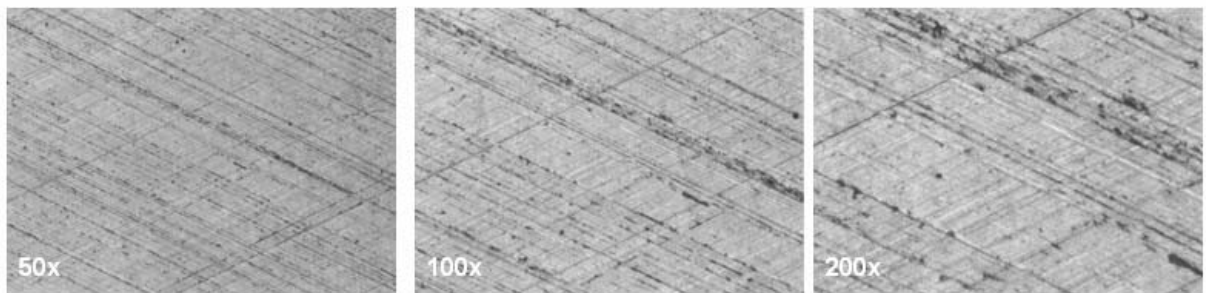


Rys. 5. Porównanie graficzne odchyłek walcowości na bazie pomiaru metodą przekrojów poprzecznych: a) w trzech płaszczyznach 5,91 μm , b) pięciu płaszczyznach 9,13 μm , c) metodą tworzących 5,72 μm

5.2. Ukształtowanie struktury rys na powierzchni gładzi

Pomiary chropowatości 2D zrealizowano zgodnie z schematem zawartym na rysunku 3 w kombinacji 3 punktów wzdłuż tworzących na różnych płaszczyznach (L1 pom.1.3, L2 pom.2.3 i L3 pom.3.1) oraz w 9 punktach dla każdej z badanej tulei (po 3 pomiary na każdym poziomie L1-L3). Uzyskane wyniki wartości średnich z 3 i 9 punktów pomiarowych dla każdej zbadanych tulei zestawiono w tabeli 1.

Ukształtowania struktury rys na powierzchni gładzi w formie obrazu z systemu wizyjnego ilustrują przykłady zamieszczone na rys.6 .



Rys. 6. Obraz ukształtowania rys na powierzchni gładzi tulei w strefie GMP z systemu wizyjnego CCD.

Tab. 1. Zestawienie wartości średnich z pomiarów chropowatości 2D

Parametr – Ilość punktów pomiarowych	Numer tulei								
	502.1	502.2	422.1	422.2	451.1	451.2	235.1	235.2	
Rpk	3	0.15	0.18	0.13	0.15	0.18	0.16	0.12	0.23
[μm]	9	0.18	0.27	0.11	0.14	0.13	0.13	0.12	0.21
Rk	3	0.62	0.82	0.29	0.27	0.76	0.64	0.83	1.06
[μm]	9	0.67	0.66	0.38	0.55	0.76	0.82	0.75	0.81
Rvk	3	1.82	1.77	1.25	1.08	1.90	2.14	2.24	2.07
[μm]	9	1.84	1.81	1.47	1.93	1.95	2.17	2.18	2.08
Mr1	3	5.10	5.93	7.38	7.82	3.85	4.45	2.85	2.53
[%]	9	4.97	5.30	5.84	5.51	3.29	3.42	2.89	3.13
Mr2	3	78.15	79.80	77.71	80.91	70.00	70.45	64.77	65.78
[%]	9	77.25	77.48	74.45	77.13	69.57	68.08	66.60	66.87

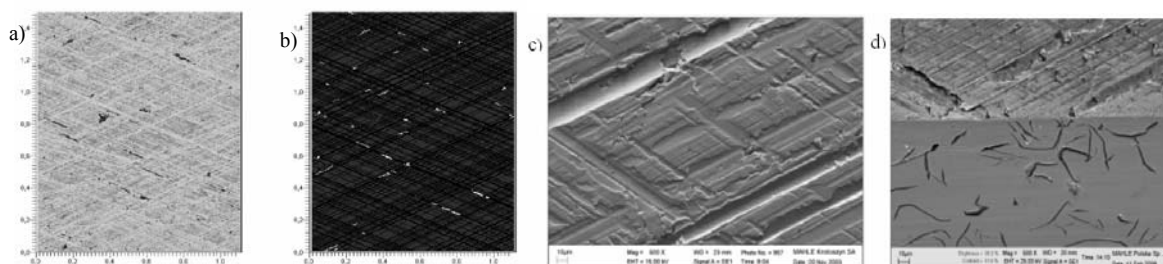
Przyjęte do pomiaru i analizy parametry SGP gładzi tulei 2D według normy ISO 13565-2 są ogólnie zalecane przez producentów silników do oceny ukształtowania struktury rys. Posiadają ograniczoną informację o charakterze ukształtowania poszczególnych badanych powierzchni. Pozostałe cechy z ukształtowania struktury rys jak kąt przecięcia rys czy obraz ukształtowania rys honowniczych wymaga zastosowania dodatkowych technik pomiarowych na przykład systemów wizyjnych CCD lub odbitek fax - filmów. Bardzo dużego doświadczenia potrzeba do oceny obrazu ukształtowania w zakresie odkształcenia rys. Problemem pozostaje ilość punktów pomiarowych, zakres dopuszczalnej tolerancji dla parametrów chropowatości oraz katalog dopuszczalnych obrazów ukształtowania rys (struktura odkształcona czy zdeformowana) o ile nie ustalono tych danych.

Wyniki pomiarów SGP w układzie przestrzennym 3D w zakresie parametrów amplitudowych, odległościowych, mieszanych oraz parametrów udziału nośnego i pojemności olejowej zestawiono w tabeli 2.

Tab.2. Zestawienie parametrów chropowatości w układzie 3D

Numer tulei	Parametry amplitudowe				Parametry odległościowe i udziału				Parametry mieszane			Parametry udziału nośnego i pojemności olejowej		
	Sq [μm]	Sz [μm]	Ssk [-]	Sku [-]	Sds [pks/ mm^2]	Str [-]	Sal [-]	Std [$^\circ$]	Sdq [$\mu\text{m}/\mu\text{m}$]	Ssc [1/ μm]	Sdr [%]	Sbi [-]	Sci [-]	Svi [-]
502.1	1.86	18.7	-0,0874	3.83	90.4	1.07	0.105	87.8	0.105	0.00955	0.533	1.14	1.49	0.0954
502.2	3.65	26.7	-0.244	1.83	535	1.07	0.105	80.3	0.0951	0.00915	0.44	0.989	1.3	0.0568
422.1	2.2	15.5	-0.174	2.09	47.7	1.07	0.105	-87.5	0.0732	0.0049	0.262	1.47	1.3	0.0576
422.2	3.61	21.2	0.0962	1.68	21.8	1.07	0.105	-87.5	0.0528	0.00441	0.136	2.91	1.47	0.0457
451.1	6.95	33.2	-0.0827	1.56	58.4	1.07	0.105	86	0.118	0.00988	0.68	6.17	1.34	0.0444
451.2	1.52	18.1	-0.864	5.71	85.9	1.07	0.105	87.5	0.101	0.0074	0.497	1.87	1.3	0.136
235.1	2.16	18.7	-0.225	3.27	98.4	1.07	0.105	87.8	0.132	0.011	0.851	1.66	1.54	0.109
235.2	2.07	20.3	-0.424	3.37	102	1.07	0.105	-82.5	0.129	0.011	0.804	1.75	1.38	0.115

Graficzna analiza w formie mapy konturowej (rys.7 a, b) pozwala na ocenę ukształtowania rys na powierzchni gładzi. Jest to struktura z udziałem „plateau” o nierównomiernym rozłożeniu rys, widoczne są niewielkie wybłyszczania rys (rys.7b).



Rys. 7. Porównanie obrazów mapy konturowej (a, b) z analizy graficznej pomiarów 3D ilustrującego układ rys (czarny kolor), powierzchni stykowe (niebieski kolor), wybłyszczania (kolor biały) z obrazem c) ukształtowania rys z SEM i d) obraz z SEM z analizą głębokości deformacji

Dla celów porównawczych na rysunku 7 c, d pokazano zdjęcia ukształtowanej powierzchni rys po analizie 3D przy użyciu mikroskopu skaningowego w formie obrazu bezpośredniego ilustrującego ukształtowanie struktury rys honowniczych (rys.7c) oraz obrazu ukształtowanej powierzchni rys łącznie z analizą głębokości deformacji (rys. 7d)

6. PODSUMOWANIE

Przyjęta do pomiarów i analiz topografia ukształtowanej powierzchni gładzi tulei cylindrowej po procesie honowania wielostopniowego jest typową powierzchnią o parametrach i cechach funkcjonalnych w układzie TPC silnika spalinowego

Parametry 2D oparte zostały o krzywą udziału materiałowego, która częściowo spełnia kryterium funkcjonalności w powiązaniu z analizą obrazu ukształtowania rys 2D/3D i można przyjąć, że są dobrym kryterium dla pomiarów i analiz, ale w warunkach procesu produkcyjnego

Dla potrzeb analizy współpracy powierzchni gładzi tulei z elementami układu TPC istnieje potrzeba doskonalenia pomiarów i ich analiz w układzie 3D. W układzie, jakim ta powierzchnia pracuje, przenosi obciążenia, jest źródłem tworzenia filmu olejowego i w efekcie końcowym gwarantuje wymaganą trwałość silnika spalinowego.

LITERATURA

- [1] Cellary A., Chajda J., Wieczorowski M.,: Charakterystyka chropowatości powierzchni. Przewodnik po pomiarach nierówności powierzchni czyli o chropowatości i nie tylko. Politechnika Poznańska, Poznań 2003
- [2] Gruszka J., Suchecki A.: Nowe metody kształtowania powierzchni cylindrów silników spalinowych. Silniki spalinowe nr 2-3/2007
- [3] Hill S.H., Cylinder Bore Finishes and Their Effect on Oil Consumption, Perfect Circle Div. of Dana Corp., 2001-01-33550
- [4] Lenthal J.S., Cylinder Bore Surface Finish, its Evolution and Specification. The Tribology of Internal Combustion Engines, University of Birmingham, 1996.
- [5] Merkisz J.: Zużycie oleju w szybkoobrotowych silnikach spalinowych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 1994.
- [6] Pawlus P.: Topografia powierzchni pomiar, analiza, oddziaływanie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów 2005
- [7] Robota A, Zwein F.: Einfluss der Zylinderlaufflächentopografie auf den Ölverbrauch und die Partikelemissionen eines DI-Dieselmotors. MTZ 60 (1999) 4
- [8] Suchecki A.: Wpływ obróbki powierzchni tulei cylindrowej na parametry eksploatacyjne i ekologiczne doładowanego silnika o zapłonie samoczynnym. Praca doktorska Politechnika Poznańska .Poznań 2009
- [9] Weigmann U.P., Grundlagen des Honens und aktuelle Entwicklungen, 2 HONSYMPOSIUM NAGEL, 2005

CYLINDER BEARING SURFACE TOPOGRAPHY

Abstract

Parameters and functional features of cylinder bearing surface are of more and more importance in modern cylinder liner designs. That is so due to new requirements for internal combustion engines within the range of oil consumption and emission of toxic constituents in exhaust gas. A description of cylinder bearing surface topography concept and connected with this parameters and features, essential for piston-cylinder set functionality in the internal combustion engines, have been presented in this paper. Test results and analyses of the surface topography in the 2D and 3D configurations after a treatment with a multistage honing method have been presented.

Dane autora: dr inż. **Józef Gruszka**, MAHLE Sp. z o.o., ul. Mahle 6, 63-700 Krotoszyn / PWSZ w Kaliszu, Instytut Politechniczny, ul. Częstochowska 120, 62-800 Kalisz, jozef.gruszka@pl.mahle.com

Artykuł recenzowany: