

Dr inż. Józef GRUSZKA
Mahle Polska Sp z o.o.
jozef.gruszka@pl.mahle.com

mgr inż. Andrzej SUCHECKI
Ośrodek Badawczo-Rozwojowy
Samochodów Małolitrażowych BOSMAL
andrzej.sucheki@bosmal.com.pl

Nowe kierunki kształtowania powierzchni cylindrów

1. WSTĘP

Główne kierunki zmian w konstrukcji silników są wyznaczone w ostatnich latach przez wymagania przepisów prawnych dotyczących emisji toksycznych składników w spalinach jak również emisji CO₂. W związku z tym producenci silników spalinowych jak i dostawcy elementów silnikowych wprowadzają i doskonalą rozwiązania techniczne. Jednym z podstawowych obszarów, który podlega bardzo intensywnym pracom rozwojowym jest węzeł tłok-pierścienie tłokowe-cylinder (TPC) głównie w celu zmniejszenia zużycia oleju przez silnik i dalej z tym związanej emisji toksycznych składników.

Wielkość zużycia oleju jest jednym z parametrów służącym do oceny stopnia nowoczesności konstrukcji silnika spalinowego. Parametr ten świadczy również o staranności z jaką wyprodukowany był silnik i jest wskaźnikiem jego prawidłowej pracy oraz prawidłowości i wielkości zużycia poszczególnych części. Ponadto małe zużycie oleju ma wpływ na ocenę silnika nie tylko pod względem ekonomicznym ze względu na wysokie ceny nowoczesnych syntetycznych olejów silnikowych, ale również na fakt wpływu zużycia oleju na ochronę środowiska. Badania przeprowadzone w OBR SM BOSMAL wykazały, że w nowoczesnych silnikach samochodowych około 95% oleju zużytego w silniku ulega spaleni w cylindrze [14], co powoduje dodatkowy wzrost emisji cząstek stałych w spalinach rzędu 30% [10].

Norma EURO IV dla samochodowych osobowych (PC) ograniczyła emisję cząstek stałych (PM) do poziomu 0,025 g/km [3]. Natomiast wymagania proponowane w normie EURO V (które będą wprowadzone prawdopodobnie w roku 2008), ograniczą jeszcze emisję PM do bardzo niskiego poziomu 0,005 g/km [1].

W celu spełnienia tych ostrych wymagań producenci silników spalinowych dążą do uzyskania zużycia oleju w silniku na poziomie poniżej 0,07 l/100 km [11], lub jednostkowego zużycia oleju wynoszącym poniżej 0,4 g/kWh [14].

Producenci silników spalinowych prowadzą również ciągły nadzór w trakcie produkcji silnika w zakresie:

- prawidłowości wykonania części silnika zgodnie z dokumentacją konstrukcyjną,
- wysokiej czystości montowanych części i całego procesu montażu silnika,
- prawidłowej selekcji części i ich odpowiedniego doboru do montażu w silniku, w celu uzyskania prawidłowych luzów współpracujących części,
- odpowiedniej jakości uszczelnień, zaślepek, korków w celu prawidłowego i trwałego zabezpieczenia przed przedostawaniem się oleju na zewnątrz silnika.

Wycieki oleju na zewnątrz silnika spowodowane wadliwym uszczelnieniem są łatwe do wychwycenia i zdiagnozowania. W przypadku stosowania uszczelnień renomowanych firm wycieki oleju na zewnątrz silnika nie występują lub występują bardzo rzadko po dużych przebiegach.

Jednak nawet w bardzo dobrze skonstruowanym i wyprodukowanym silniku straty oleju są nieuniknione, jak również nieuniknione jest spalanie tego oleju w komorze silnika.

Z badań przeprowadzonych w OBR SM BOSMAL wynika, że węzeł TPC odpowiedzialny jest w największym stopniu za przedostawanie się oleju do komory spalania. W nowoczesnym silniku o zapłonie samoczynnym z turbodoładowaniem węzeł ten może być odpowiedzialny za straty oleju nawet w 97% [14]. Z tego względu przemysł motoryzacyjny stale udoskonala technologie obróbkowe oraz wprowadza nowe metody obróbki powierzchni cylindrów.

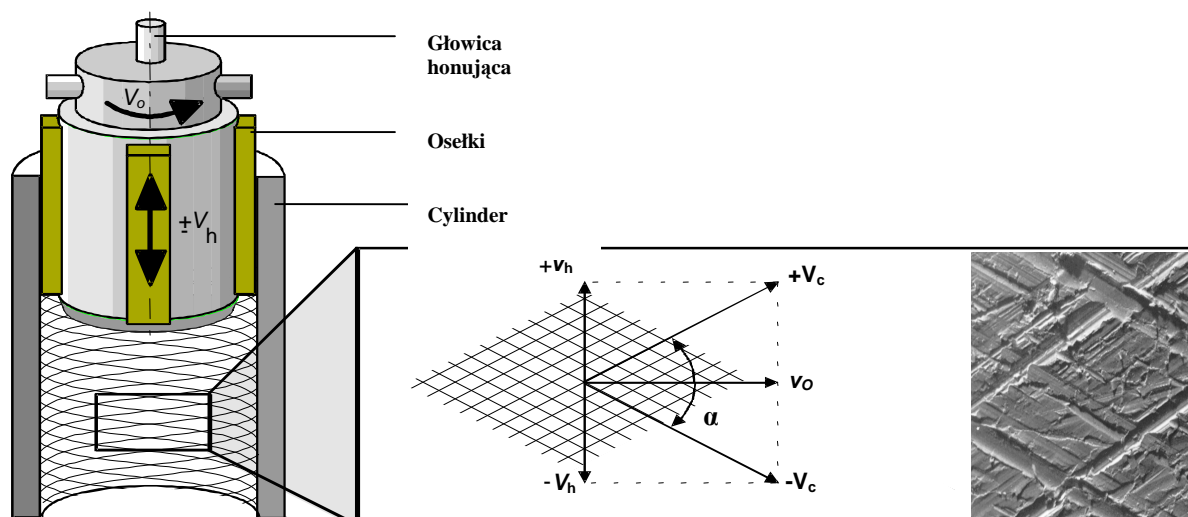
2. OPIS METOD OBRÓBKI POWIERZCHNI CYLINDRÓW

2.1 Proces obróbki powierzchni cylindrów metodą tradycyjną

Tradycyjna mechaniczna obróbka powierzchni cylindrów odbywa się w kilku operacjach: toczenia, wytaczania, gładzenia (honowania) i mycia, których operacje końcowe wytaczania, honowania i mycia są decydujące o jakości eksploatacyjnej powierzchni w układzie TPC.

Proces wytaczania otworu cylindrów odbywa się na precyzyjnych wytaczarkach pozwalających na uzyskanie właściwej tolerancji wymiaru średnicy wewnętrznej i tolerancji geometrycznych kształtu otworu cylindra z pozostawieniem nadatku technologicznego na proces honowania.

Proces honowania jest typową obróbką powierzchniowo-ścierną stosowaną do obróbki wykańczającej powierzchni cylindrów silników spalinowych. Proces ten polega na działaniu ściernym osełek ceramicznych lub diamentowych umieszczonych osiowo na obwodzie głowicy honującej co przedstawia schemat procesu zawarty na rysunku 1.



Rys. 1 Schemat procesu honowania i z tym związany charakterystyczny obraz powierzchni cylindra [15]

Głowica honująca wykonuje ruch obrotowy z prędkością obrotową V_o i równocześnie ruch posuwisto-zwrotny z prędkością V_p a przedmiot blok cylindrowy-tuleja cylindrowa jest w spoczynku.

Osełki ściernie w trakcie procesu obróbki są dociskane do powierzchni otworu cylindra nadając powierzchni charakterystyczny obraz i kierunkowość rys. Ślady ruchu wypadkowego V_w tworzą na obrabianej powierzchni układ pętli śrubowych krzyżujących się wzajemnie. Rozwinięcie śladów obróbki na płaszczyźnie przedstawia układ prostych linii krzyżujących się pod kątem α , którego wielkość zależy od stosunku obu prędkości V_o/V_p

Proces honowania jest wykonywany w kilku etapach w zależności od wymagań stawianych strukturze geometrycznej powierzchni cylindra:

- honowanie wstępne - w wyniku którego otrzymuje się właściwą formę otworu opisaną tolerancją kształtu (prostoliniowości, okrągłości i walcowości). Na tym etapie procesu honowania używa się osełek diamentowych o ziarnistości D 150-350 i spoiwie brązowym,
- honowanie bazowe - w wyniku którego otrzymuje się powierzchnię z dużą ilością głębokich rys. Do nacinania głębokich rys stosowane są osełki z węgla krzemu o ziarnistości 100-150, miękkim spoiwie i otwartej porowatej strukturze,
- honowanie końcowe - wykańczające typu płasko wierzchołkowego „plateau”. Ten etap honowania wymaga stosowania osełek ceramicznych drobnoziarnistych o ziarnistości 320-500 wyjątkowo nawet i 1000. Ta operacja honowania ma na celu ścięcie ostrych wierzchołków chropowatości z operacji honowania bazowego z jednoczesnym pozostawieniem wcześniej ukształtowanej bazy głębokich rys-dolin, które stanowią zasobniki dla oleju smarującego w trakcie współpracy z pierścieniami i tłokiem.

Dla scharakteryzowania obrazu struktury geometrycznej powierzchni cylindra po procesie honowania a w szczególności po honowaniu typu płasko wierzchołkowego „plateau” zarówno dla potrzeb produkcyjnych jak i również analiz i badań trybologicznych przyjmuje się następujące wymagania :

- parametry chropowatości
- kąt przecięcia rys honowniczych
- udział powierzchni nośnej
- opis stanu powierzchni a w szczególności geometria rozłożenie rys honowniczych,
- odkształcenie plastyczne warstwy wierzchniej.

Wymagania te bardzo często są zróżnicowane zarówno co do samych wartości, przyjmowanych parametrów chropowatości jak i również opisu obrazu struktury. I można przyjąć, że są indywidualnymi wymaganiami danego producenta silników spalinowych[8,12].

2.2. Nowe kierunki obróbki powierzchni cylindrów.

Nowe kierunki obróbki powierzchni cylindrów wynikają z zmian w konstrukcjach silników, które wyznaczają głównie wymagania dotyczące:

- zmniejszenia zużycia oleju
- przepisów prawnych dotyczących zawartości toksycznych składników w spalinach jak i również emisji CO₂ [11,14].

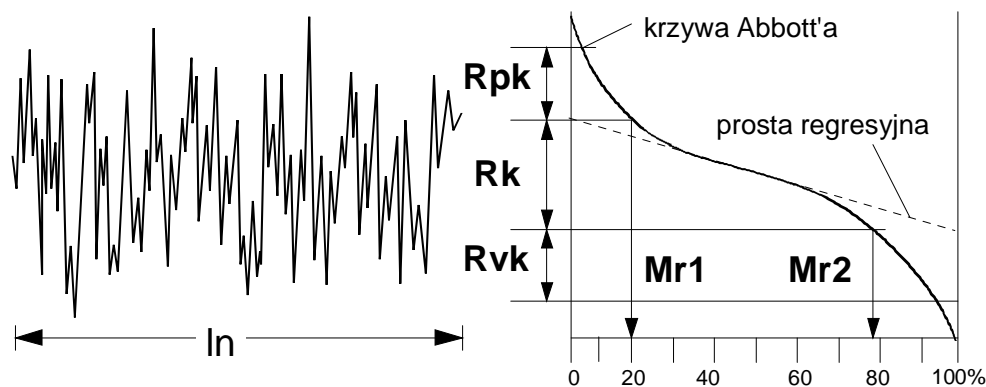
Aktualnie w procesach produkcyjnych obróbki powierzchni cylindrów dominuje kierunek procesu honowania konwencjonalnego wielostopniowego z strukturą geometryczną

powierzchni typu płasko wierzchołkowego „plateau” zbliżonej swoim obrazem jak i parametrami chropowatości do powierzchni po okresie docierania silnika [8,4].

Dla opisanie obrazu takiej struktury powierzchni cylindra przyjmuje się parametry chropowatości według wymagań normy ISO 13565-2 [7].

Są to parametry, które opisują profil powierzchni na bazie krzywej udziału materiałowego tzw. krzywej Abbotta (rys.2) :

- R_k (μm) - głębokość rdzenia chropowatości
- Mr_1 (%) – udział materiałowy w procentach, wyznaczony przez linię przecięcia oddzielającą wystające wzniesienia od profilu rdzenia chropowatości
- Mr_2 (%) - udział materiałowy w procentach, wyznaczony przez linię przecięcia oddzielającą głębokie wgłębienie od profilu rdzenia chropowatości
- R_{pk} (μm) – średnia wysokość wzniesień wystających ponad profil rdzenia chropowatości
- R_{vk} (μm) – średnia głębokość wgłębien wystających poniżej profilu rdzenia chropowatości

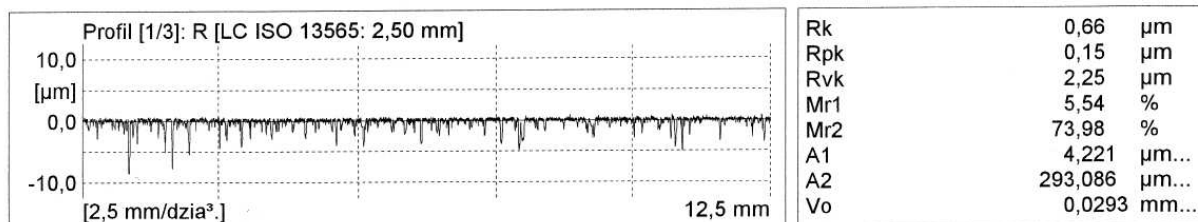


Rysunek 2. Parametry chropowatości R_{pk} , R_k , R_{vk} , Mr_1 , Mr_2 według normy ISO 13565-2 oparte na wykorzystaniu krzywej udziału materiałowego Abbotta [7]

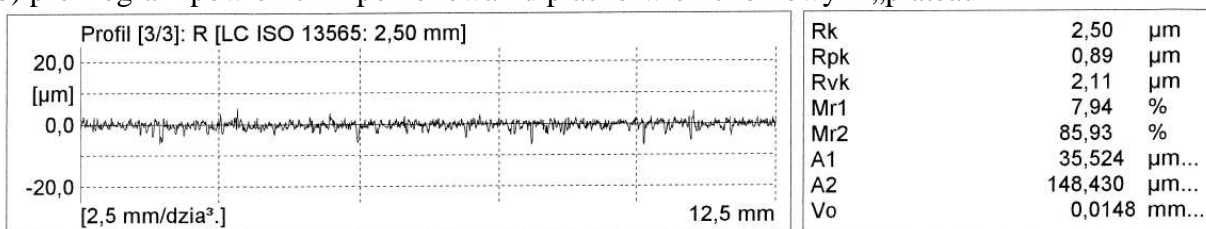
Poziom zmian w kierunku powierzchni gładziej w strukturze geometrycznej powierzchni cylindrów oznacza powierzchnie charakteryzujące się mniejszymi parametrami chropowatości zarówno w strefie „plateau” ($R_{pk} < 0,3 \mu\text{m}$) jak i również w strefie struktury bazowej ($R_k < 0,8 \mu\text{m}$) i w strefie zasobników olejowych ($R_{vk} < 1,5 \mu\text{m}$) [4,8,12]

Przykładem takiej powierzchni są zawarte na rysunku 3 profilogramy powierzchni struktury geometrycznej po honowaniu płasko wierzchołkowego „plateau” typu gładkiego oraz typu tradycyjnego „plateau”. W obu tych typach powierzchni występują różnice zarówno w wartościach parametrach chropowatości jak i również w ich udziale nośnym.

a) profilogram powierzchni po honowaniu płasko-wierzchołkowym „plateau” typu gładkiego



b) profilogram powierzchni po honowaniu płasko-wierzchołkowym „plateau”



Rysunek 3. Przykłady profilogramów struktury geometrycznej powierzchni po honowaniu Płasko-wierzchołkowym „plateau” a) typu gładkiego i b) typu tradycyjnego honowania „plateau” .

Również pozostałe nowe kierunki obróbki powierzchni cylindrów są oparte na bazie honowania konwencjonalnego wielostopniowego z strukturą geometryczną powierzchni typu płasko-wierzchołkowego „plateau”. Są to procesy typu :

- honowania ślizgowo-spiralnego (ang. slide honing) polegający na zmianie kąta honowania $\alpha > 90^0$ (ok. 135^0) [6,11,12],
- honowania strumieniowego (ang. fluid-jet honing) polegające na zastosowaniu czwartego etapu honowania w postaci obróbki powierzchni cylindra cieczą pod wysokim ciśnieniem [6,11,12,13],
- honowania laserowego zapewniające nacięcie głębokich rys lub wykonanie laserem kieszeni olejowych w formie systemu mikrokomór ciśnieniowych (pkt.2.3,3) względnie poddanie obróbce laserem powierzchni po procesie honowania metodą tzw. „ablacji” [2,6,12].

2.3 Proces obróbki powierzchni cylindrów z wykorzystaniem lasera

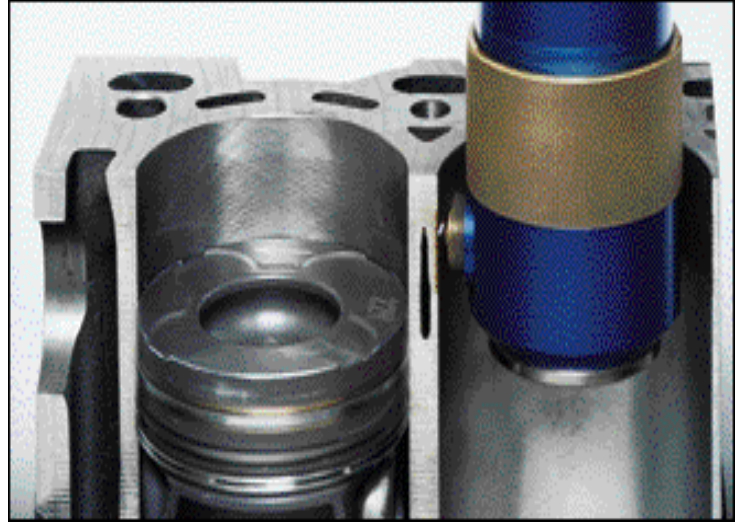
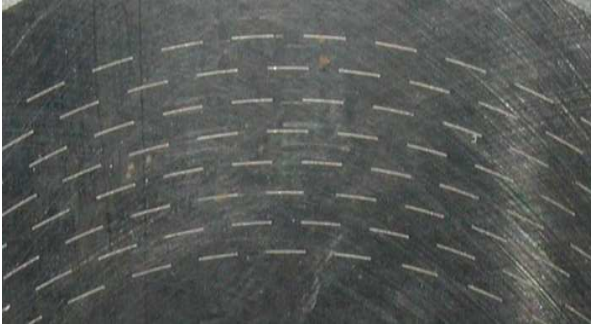
Najnowsze technologie obróbki powierzchni cylindrowych f-my Gehring [9,11,12] są połączeniem obróbki konwencjonalnej honowania z obróbką laserem i obejmują następujące operacje:

- honowanie konwencjonalne-wstępne i bazowe według zasad opisanych w punkcie 2.1
- obróbka laserowa polegająca na wypalaniu wąskich, głębokich rowków lub kieszeni olejowych w górnej części tulei cylindrowej (rys. 4 ,5),
- honowanie końcowe-wykańczające mająca na celu usunięcie nadtopionych warstw

materiału (osadów i wypływek) powstałych w wyniku wypalania laserem rys/kieszeni olejowych oraz utworzenie płaskiej powierzchni typu „plateau”.

Zasada honowania laserowego jest taka sama jak w honowaniu konwencjonalnym. Wrzeciono z głowicą optyczną i laserową wykonuje w zależności od kształtu struktury (krzyżowa, kieszeni olejowych) ruch obrotowy i posuwisto-zwrotny. Znaczącymi elementami głowicy laserowej jest (rys. 4) :

- źródło światła laserowego,
- system prowadzenia promienia,
- głowica optyczna.



Rysunek 4. Głowica laserowa w trakcie wykonywania zasobników oleju w górnej części powierzchni cylindra [9].

W czasie procesu wysoka energia promieniowania laserowego kierowana jest na obrabianą powierzchnię, częściowo jest odbijana i pochłaniana przez materiał cylindra. Energia pochłonięta jest tak duża, że powoduje podgrzanie materiału do stanu lotnego i następuje wypalenie określonego rowka lub kieszeni. Kształt struktury laserowej jest zapewniany w cyklu sterowanym numerycznie .

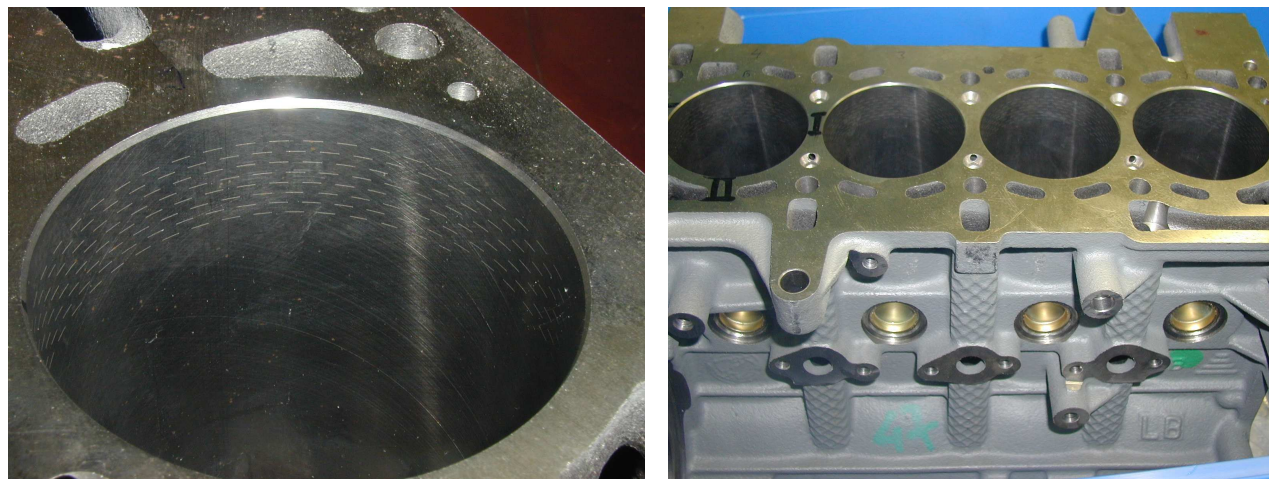
Ilość wypalanego materiału uzależniona jest od parametrów promieniowania takich jak:

- częstotliwość impulsów,
- moc,
- rodzaj promieniowania,
- szybkość posuwu głowicy laserowej.

W wyniku dużego gradientu temperatury oraz bardzo skupionej wiązki promieniowania o dużej mocy, oddziaływanie promieniowania na materiał cylindra jest ograniczony do niewielkiej powierzchni, a całkowity wzrost temperatury obrabianej powierzchni jest nieznaczny. Dzięki temu następuje zahartowanie materiału w okolicy wypalanego rowka i wzrost twardości.

3. Badania struktury powierzchni cylindrów po obróbce laserem

Badania struktury powierzchni cylindrów po procesie obróbki laserem według technologii f-my Gehring przeprowadzono na bazie 4 cylindrowego żeliwnego bloku silnikowego o średnicy cylindra 70 mm, którego zdjęcie ilustruje rysunek 5.



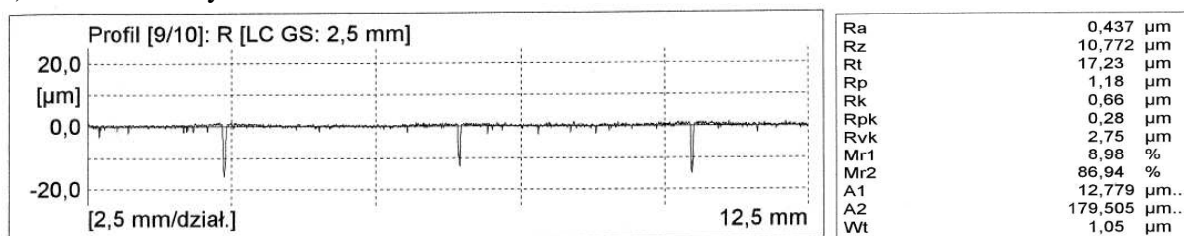
Rysunek 5. Zdjęcie 4 cylindrowego bloku silnikowego po obróbce laserem według technologii f-my Gehring

Na rysunku 5 wyraźnie widać w górnej strefie cylindrów ukształtowaną laserem strukturę typu kieszeniowego na bazie struktury honowanej.

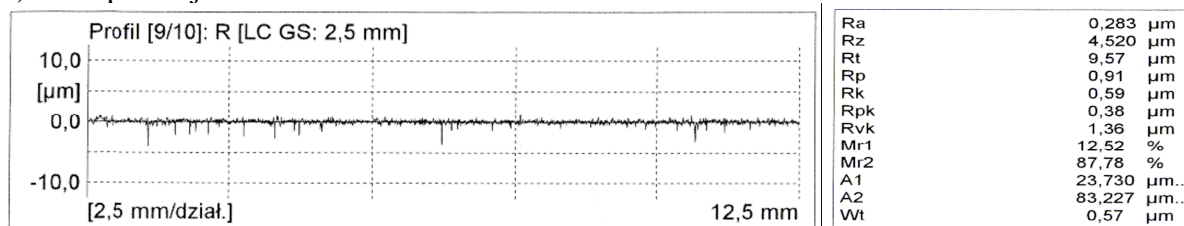
Badanią poddano strukturę geometryczną powierzchni metodą profilometrii stykowej, strukturę warstwy wierzchniej metodą mikroskopii elektronowej oraz przeprowadzono badania składu chemicznego materiału bloku silnikowego metodą spektrometrii.

Rysunek 6 przedstawia typowe przebiegi profilogramów struktury geometrycznej powierzchni wraz z parametrami chropowatości dla struktury kieszeni olejowych wykonanej laserem (rys.6a) oraz dla struktury honowania poza strefą obróbki laserem (rys.6b).

a) strefa oddziaływania lasera

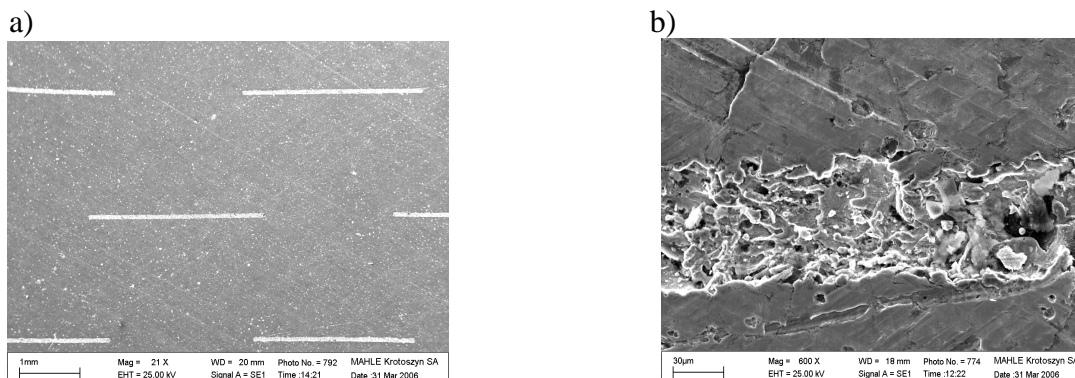


b)strefa poniżej działania lasera



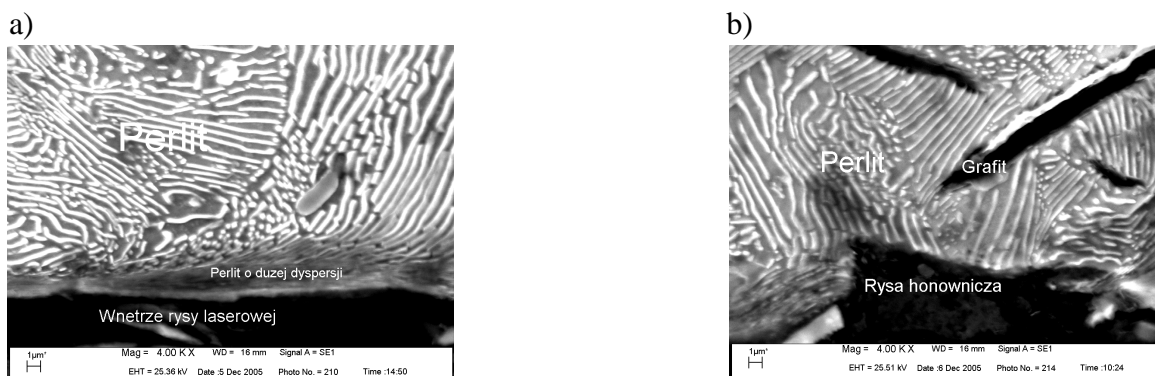
Rysunek 6. Typowe przebiegi profilogramów struktury geometrycznej powierzchni w strefie oddziaływania lasera (a) i poniżej tej strefy (b).

Metodą mikroskopii elektronicznej z zastosowaniem mikroskopu skaningowego wykonano analizy obrazu powierzchni cylindra w strefie oddziaływania lasera i poza tym obszarem. Pomiarom poddano strukturę geometryczną rozmieszczenia nacięć laserowych (rys.7,8).



Rysunek 7. Obraz struktury powierzchni cylindrów w strefie oddziaływania lasera
a) rozmieszczenie rys , b)wnętrze pojedynczej rysy

Rysunek 7 przedstawia geometrię rozmieszczenia kieszeni olejowych a rysunek 8 ilustruje typowe obrazy mikrostruktury w miejscu oddziaływania lasera na powierzchnię w stosunku do tradycyjnego obrazu powierzchni po honowaniu poza strefą oddziaływania lasera.



Rysunek 8. Obraz mikrostruktury, a) w strefie oddziaływania lasera, b) poza strefa działania lasera

W wyniku przeprowadzonych pomiarów i badań mikroskopowych można scharakteryzować, strukturę geometryczną powierzchni wykonanej laserem następującymi cechami:

- występuje w górnej strefie cylindra na długości 12,2 mm co odpowiada polu współpracy pakietu pierścieni tłokowych z gładzią cylindra w strefie GMP,
- pojedyncze poziome rysy nacięte laserem posiadają następujące parametry geometryczne :
 - długość 3 mm,
 - szerokość 80 µm
 - głębokość 15-20 µm
- odstęp pomiędzy rysami zarówno po obwodzie jak i na długości jest taki sam i wynosi 2 mm,
- parametry chropowatości powierzchni w strefie oddziaływania laserem i strefie konwencjonalnego honowania są porównywalne w zakresie parametru R_{pk} ,

Rk i Mr2 , a różnice występują w parametrach Rvk i Mr1 co jest wynikiem geometrii rys naciętych laserem.

Analiza obrazu mikrostruktury otoczni rysy naciętej laserem charakteryzuje się zmienioną strukturą w stosunku do mikrostruktury poza strefą działania lasera. Zmianie uległa dyspersja perlitu, zaobserwowano wyraźny wzrost mikrotwardości.

4.Podsumowanie

Przedstawione nowe kierunki kształtowania powierzchni cylindrów poprzez powiązanie procesu konwencjonalnego honowania cylindrów typu płasko-wierzchołkowego „plateau” z strukturą powierzchni gładkiej lub z udziałem dodatkowej obróbki laserem są wynikiem prac badawczych konstruktorów silników w kierunku spełnienia wymogów zużycia oleju i zawartości składników toksycznych w spalinach .

Przeprowadzone badania i pomiary struktur powierzchni cylindrów po procesie honowania płasko-wierzchołkowego „plateau” typu gładkiego oraz powierzchni honowanych typu płasko-wierzchołkowego „plateau” z dodatkową obróbką laserem, która kształtuje kieszenie olejowe w formie tzw. mikrokomór w strefie GMP są potwierdzeniem możliwości technologicznych przemysłu w kierunku rozwoju tego typu struktur geometrycznych. Procesy dodatkowej obróbki powierzchni cylindrów po procesie honowania z użyciem lasera dają możliwości dalszego rozwoju dla tego typu powierzchni.

LITERATURA

- [1] Amending Directive 72/306/EEC Proposal for a Regulation of European Parliament and of the council. SEC(200) 1745.
- [2] Bergmann H.W.,Brandenstein C.,Lang A., Lindner H., Queitsch R.,Stengel E.,UV-Laserbelichtung von Grauguß Zylinderlaufbahnen von Verbrennungskraftmaschinen, VDI-Berichte nr1764,2003
- [3] Dyrektywa 2005/55/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z 28.09.2005.
- [4] Hill S.H.,Cylinder Bore Finishes and Their Effect on Oil Consumption,Perfect Circle Div.of Dana Corp.,2001-01-33550
- [5] Klink U.,Laserhonen für Zylinderlaufbahnen,MTZ 58(1997)9
- [6] Kozaczewski W.,Konstrukcja grupy tłokowo-cylindrowej silników spalinowych,WKŁ Warszawa,2004.
- [7] ISO 13565-2 Struktura geometryczna powierzchni;metoda profilowa powierzchnie o warstwowych właściwościach funkcjonalnych,PKN 1999.
- [8] Lenthal J.S., Cylinder Bore Surface Finish, its Evolution and Specyfication.The Tribology of Internal Combustion Engines,University of Birmingham,1996.
- [9] Materiały firmy Gehring GmbH&Co. KG. Laserstrukturierung-Vebesserung der tribologischen Eigenschaften von Oberflächen.2004.
- [10] Merkisz J.: Zużycie oleju w szybkoobrotowych silnikach spalinowych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 1994.
- [11] Robota A, Zwein F.: Einfluss der Zylinderlaufflächentopografie auf den Ölverbrauch und die Partikelemissionen eines DI-Dieselmotors. MTZ 60 (1999) 4
- [12] Schmid J.,Übersicht zu Honverfahren an GG-Zylinderlaufflächen, 2.NÜRTINGER

HONSYMPOSIUM NAGEL,2005

- [13] Seck E.,Strobel J.,Diamant-Fluidstrahl-Glätthnung Ein neues Verfahren zur Bearbeitung der Zylinderlaufbahnen von Kurbelgehäusen aus Grauguss,MTZ 62(2001)2
- [14] Suchecki A, Sordyl A, Bielaczyc P.: Analysis of the oil consumption in the modern, EURO 4, direct-injection, turbocharger compression-ignition automobile engines. PTNSS Kongres 2005, Paper P05-C030.
- [15] Weigmann U.P.,Grundlagen des Honens und aktuelle Entwicklungen,2.NÜRTINGER HONSYMPOSIUM NAGEL,2005