

## OIL MICROCONTAINERS – LASER DRILLING METHOD AND APPLICATION TESTS

Zdzisław Bogdanowicz\*, Jan Marczak\*\*, Wojciech Napadlek\*, Antoni Rycyk\*\*

Military University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering\*

Military University of Technology, Institute Optoelectronics\*\*

Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warsaw, Poland

tel.: +48 22 68394471; 6839345

e-mail: z.bogdanowicz@wme.wat.edu.pl

### Abstract

Paper presents a method of laser drilling of oil microcontainers at the smooth surface of cylinder sleeve of piston combustion engine. During the process of normal exploitation, system of piston-rings-cylinder is lubricated by oil introduced together with fuel (two-stroke engine) or by oil mist spattered by connecting rod. The largest wear of sleeves placed directly in the engine framework or wet, unloaded sleeves takes place in the upper part of cylinder. So far, most common method of cylinder smooth surface finishing is honing, resulting in cross shaped honing scratches with diverse microgeometry, forming oil pockets which decrease friction. Utilization of laser beam show other possibilities. Method of laser honing is characterized by high regularity of honing grooves depth and spacing, which is not possible using traditional methods. Combined classical and laser honing has been utilized in the present investigations. Oil microcontainers were plotted by laser drilling of point pockets in the upper cylinder sleeve part of aircraft engine ASz-62IR. Source of radiation was Nd:YAG laser with pulse energy of 1 J and repetition rate of 10 Hz. As result of finish honing for compensate ruggedness performed during the laser tooling (the outflow), "Plateau" surfaces of the parameter of the surface roughness  $R_z$  = from 1 to 2  $\mu\text{m}$  have been obtained.

**Keywords:** combustion engine, cylinder liner, micro- oil containers, microgeometry, laser method

## MIKROZASOBNIKI OLEJOWE-METODA LASEROWEGO DRAŻENIA ORAZ PRÓBY APLIKACJI

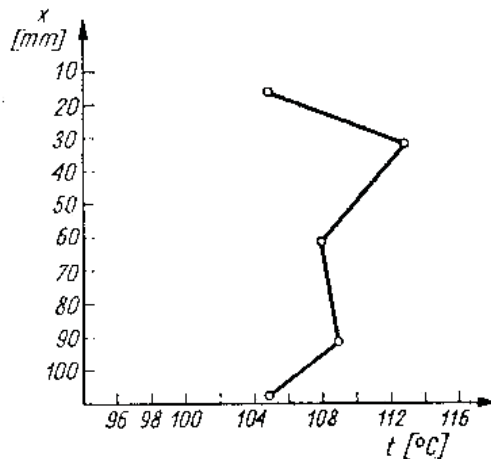
### Streszczenie

W pracy przedstawiono metodę laserowego drążenia mikrozasobników olejowych na powierzchni gładzi tulei cylindrowej tłokowego silnika spalinowego. W procesie normalnej eksploatacji tłok-pierścienie-cylinder są smarowane bądź smarem wprowadzonym do cylindra łącznie z paliwem (silniki dwusuwowe), bądź mgiełką oleju rozpryskiwanego przez korbowody. Zużycie tulei wykonanych bezpośrednio w kadłubie silnika oraz w tulejach mokrych nieobciążonych jest największe w górnej części cylindra. Dotychczas powszechnie stosowaną metodą przy obróbce wykańczającej gładzi cylindrów jest honowanie w wyniku którego otrzymujemy krzyżowy układ rys honowniczych o zróżnicowanej mikrogeometrii stanowiące kieszenie olejowe zmniejszające tarcie. Nowe możliwości wyłoniły się dzięki wykorzystaniu promienia laserowego. Metoda laserowego honowania charakteryzuje się dużą regularnością rowków honowniczych, co do ich głębokości jak i odstepu niemożliwą do uzyskania tradycyjnymi metodami. W badaniach własnych zastosowano kombinację honowania klasycznego i laserowego. Laserowo nanoszono przez drążenie mikrozasobniki olejowe w postaci punktowych kieszeni w górnej części tulei, tam gdzie zużycie jest największe. Mikrodrążenie zasobników olejowych wykonano na tulei cylindrowej silnika lotniczego ASz-62IR. W badaniach wykorzystano laser Nd-YAG o energii w impulsie 1J i repetycji 10Hz. W wyniku honowania wykańczającego służącego do wyrównania powstałych podczas obróbki laserowej nierówności (wyływek), powierzchnie "Plateau" o parametrze chropowatości powierzchni  $R_z$  = od 1 do 2  $\mu\text{m}$  zostały uzyskane.

**Słowa kluczowe:** combustion engine, tuleja cylindrowa, mikrozasobniki olejowe, mikrogeometria, metoda laserowa

## 1. Wstęp

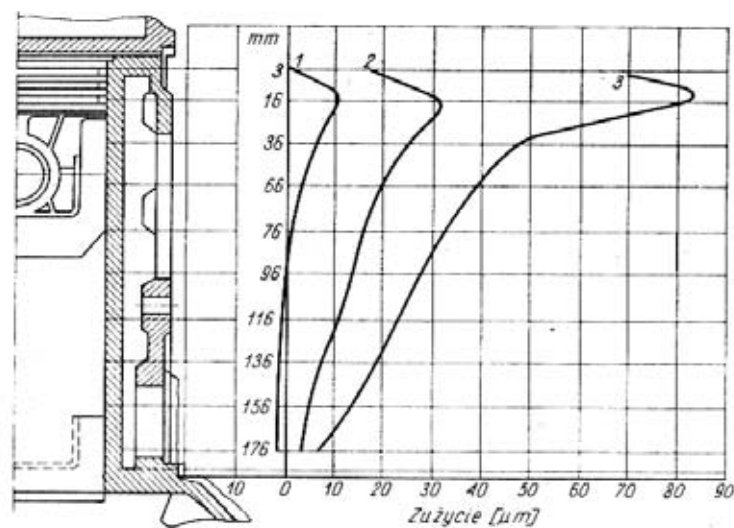
W czasie pracy silnika, podczas spalania benzynowej mieszanki palnej, temperatura w komorze spalania wynosi 2000 do 2500°C, ciśnienie wytwarzanych gazów pod koniec procesu spalania sięga 4 do 4,5 MPa. Temperatura denka tłoka w jego górnej części sięga 300 do 450°C, w części prowadzącej zaś dochodzi do 200°C. Temperatura ścianek cylindrów również osiąga znaczne wartości. Na rysunku 1 przedstawiono rozkład temperatury wzdłuż tworzącej tulei silnika gaźnikowego (S47), mierzonej za pomocą termistorów wmontowanych do tulei na głębokość 1mm od powierzchni tarcia. Należy przypuszczać, że średnia temperatura powierzchni tarcia może osiągać 150 do 250°C.



Rys. 1. Rozkład temperatury wzdłuż tworzącej tulei silnika gaźnikowego [1]

Fig. 1. Distribution of temperature along generating line of sleeve of carburetor engine [1]

Warunki współpracy części tego skojarzenia są ciężkie również z powodu utrudnionego smarowania powierzchni trących. Części te są smarowane bądź smarem wprowadzonym do cylindra łącznie z paliwem (silniki dwusuwowe), bądź mgiełką oleju rozpryskiwanego przez korbowody. Własności smarowe oleju, a głównie jego lepkość, znacznie pogarszają się w podwyższonych temperaturach, co pogarsza warunki współpracy części skojarzenia.



Rys. 2. Rozkład zużycia gładzi cylindrów wzdłuż tworzącej: 1 - zużycie w płaszczyźnie wału korbowego, 2 - zużycie w płaszczyźnie 45° do osi wału korbowego, 3 - zużycie w płaszczyźnie prostopadłej do osi wału [1]

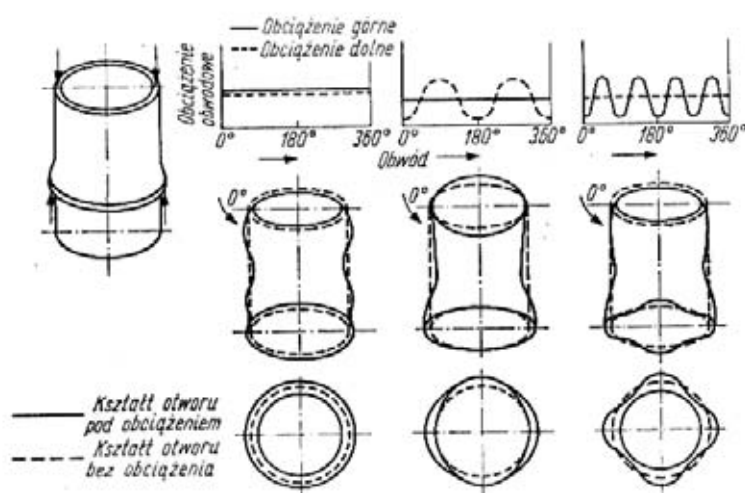
Fig. 2. Distribution of wear of cylinders bearing surface along generating line: 1- wear in the plane of crankshaft, 2 - wear in the 45° plane to axis of crankshaft, 3 - wear in the perpendicular plane to axis of crankshaft [1]

W procesie normalnej eksploatacji gładz cylindrów silnika spalinowego zużywa się równomiernie tak wzdłuż tworzącej cylindra jak i po obwodzie [1]. Rozróżniamy zużycia „na stożek” oraz „na owal”. Mówiąc ściślej, kształt zużytego cylindra tylko w przybliżeniu przypomina te figury. Klasyczny rozkład zużycia wzdłuż tworzącej cylindra przedstawiono na rys.2. Tego rodzaju zużycie występuje w cylindrach wykonanych bezpośrednio w kadłubie silnika oraz w tulejach mokrych nie obciążonych (np. silniki W-46, S-359 i inne). Jak widać na rysunku, w górnej części cylindra zużycie jest znacznie większe niż w części dolnej. W pionowym przekroju cylindra można stwierdzić kształt zużycia zbliżony do ściętego stożka, odwróconego podstawą do góry.

Do przyczyn powodujących tego rodzaju zużycie gładzi cylindra należą:

- działanie wysokich temperatur gazów spalinowych,
- działanie ciśnienia gazów spalinowych,
- zmiana kierunku ruchu tłoka,
- działanie korozyjne kwasów i gazów.

Nieco odmienny charakter zużycia wykazują tuleje cylindrów niektórych silników spalinowych (S-47 i inne), które w czasie pracy ulegają deformacji. Powodem deformacji są obciążenia mechaniczne jako skutek napięcia pochodzącego od śrub mocujących głowicę i działania ciśnienia wytwarzanego wewnątrz cylindra oraz obciążenia cieplne w czasie pracy silnika. Czynniki te oddziałują nierównomiernie na tuleję tak po obwodzie jak i wzdłuż tworzącej, co powoduje nierównomierne jej odkształcenie. Kształt zużycia tulei przypomina raczej baryłkę niż stożek (rys.3.)



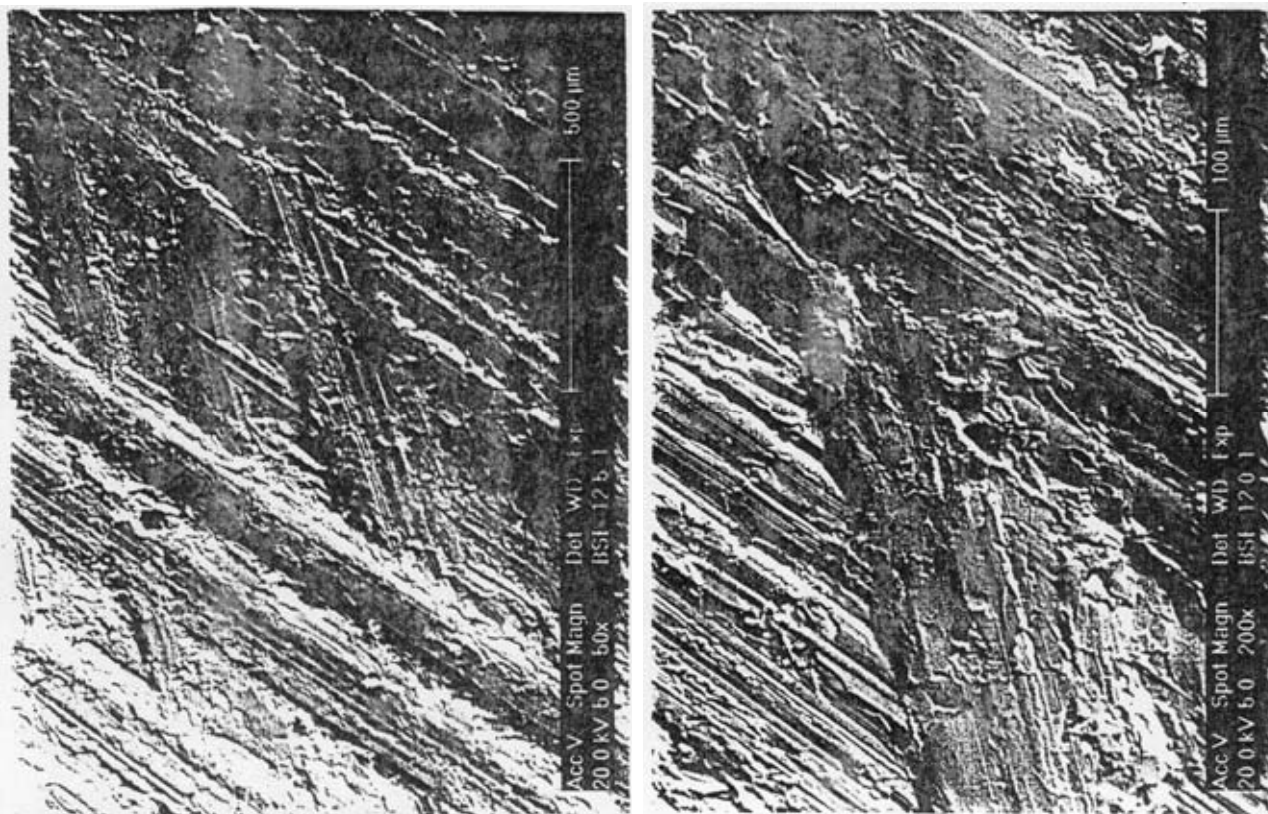
Rys. 3. Rozkład zużycia wzdłuż tworzącej tulei silnika S-47 po przebiegu 40 000km [1]  
Fig. 3. Distribution of wear along generating line of S-47 sleeve after 40 000 km mil age [1]

Celem niniejszej pracy jest opracowanie laserowej metody nanoszenia (drażenia) mikrozasobników olejowych na powierzchni gładzi tulei cylindrowej silnika spalinowego i stworzenie tym samym korzystniejszych warunków smarowania dla skojarzenia ciernej tło–pierścienie–cylinder.

## 2. Honowanie klasyczne i laserowe tulei cylindrowych

Honowanie jest dotychczas powszechnie stosowaną metodą przy obróbce wykańczającej gładzi cylindrów. Po dokładnym wytaczaniu i szlifowaniu następuje zazwyczaj honowanie wstępne i wykańczające jako dwustopniowy proces lub honowanie metodą „Plateau” jako proces trzystopniowy, preferowany ze względu na tarcie, ale trudny jest do osiągnięcia w praktyce. Przy konwencjonalnej metodzie honowania nieuniknione są nieregularności powierzchni obrabianej.

Wyczerpane są też możliwości polepszenia jej ukształtowania przez zaciśnięcie tolerancji wykonawczych. Od dłuższego czasu weryfikowano doświadczalnie geometrię powierzchni pod kątem zmniejszenia tarcia [2]. Analizowano to poprzez zmianę głębokości rowków honowniczych i ich wzajemnej odległości. Przykład powierzchni po honowaniu klasycznym na „Plateau“ przedstawiono na rys.4. Uwidacznia się kątowy układ rys honowniczych widziany przy różnych powiększeniach.



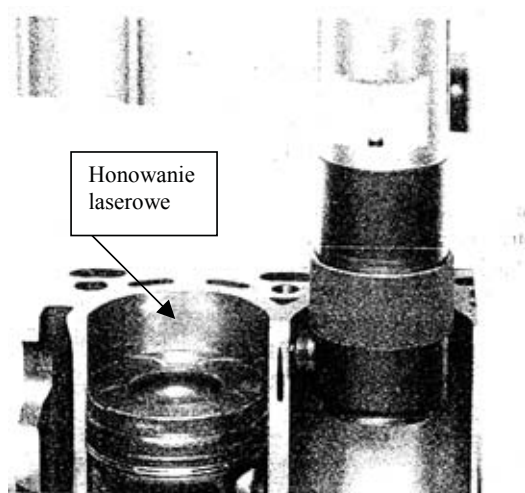
Rys. 4. Mikrogeometria powierzchni gładzi cylindrowej po honowaniu klasycznym  
 Fig. 4. Micro-geometry of surface of cylinder liner after classical honing process

Uzyskano głębokie rowki honownicze będące kieszeniami olejowymi zmniejszającymi tarcie w skojarzeniu i powierzchnię nośną o bardzo małej chropowatości tzw. plateau. Ważną sprawą weryfikowaną przy produkcji tulei cylindrowych jest zawartość oleju w głębokich rysach honowniczych, którą wyznacza się z objętości rys na danym odcinku pomiarowym.

Nowe możliwości wyłoniły się dzięki wykorzystaniu promienia laserowego. Jedną z pierwszych firm która opracowała laserową metodę honowania i zgłosiła do powszechnego opatentowania była niemiecka firma GEHRING [3]. Metoda charakteryzuje się kombinacją honowania klasycznego i laserowego. Końcowa obróbka tulei składa się z trzech operacji: honowania klasycznego wstępnego, obróbki laserowej i honowania wykańczającego. Przy honowaniu wstępnym uzyskuje się formę geometryczną powierzchni w skali makro i bazę obróbkową dla honowania laserowego. Honowanie wykańczające służy do wyrównania powstałych podczas obróbki laserowej nierówności i do uzyskania powierzchni plateau od 1 do 2 µm jako parametr chropowatości powierzchni  $R_z$ .

Budowa obrabiarki do honowania laserowego jest identyczna jak typowej honownicy. Wrzeczono wykonuje ruch posuwisto-zwrotny i obrotowy. Trzy podstawowe elementy budowy honownicy do laserowego honowania powierzchni to:

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

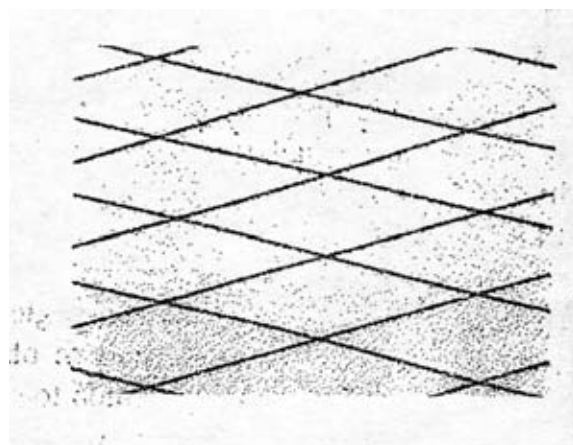


Rys. 5. Krzyżowy układ rys laserowego honowania na szerokości pakietu pierścieni tłokowych w górnym punkcie zwrotnym (lewa strona rysunku), głowica optyczna z wrzecionem głównym w bloku cylindrowym silnika w pozycji pracy (prawa strona rysunku) [3]

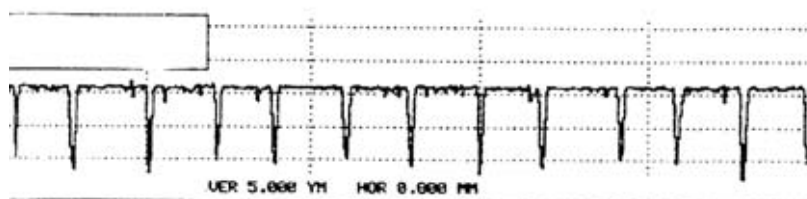
Fig. 5. Cross arrangement of laser honing scratches on the width of packet of piston rings in the top dead centre (the left side of figure), optical head with main spindle in the cylinder block of engine in work position (the right side of figure) [3]

Rysunek 5 pokazuje głowicę optyczną na wrzecionie głównym honownicy w bloku cylindrów. W głowicy optycznej promień laserowy jest ogniskowany na ścianie otworu cylindra. Płynne dopasowanie obróbki laserowej zapewnione jest przez numeryczne sterowanie NC. W wyniku obróbki laserowej można uzyskać krzyżowy układ rowków przedstawiony na rys. 6a.

a)



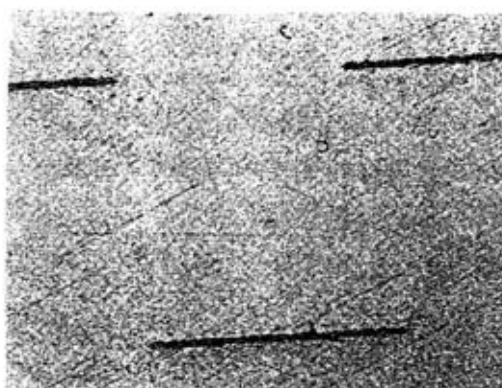
b)



Rys.6. Krzyżowy układ rys laserowego honowania: a-widok na powierzchni gładzi cylindrowej, b- w przekroju poprzecznym [3]

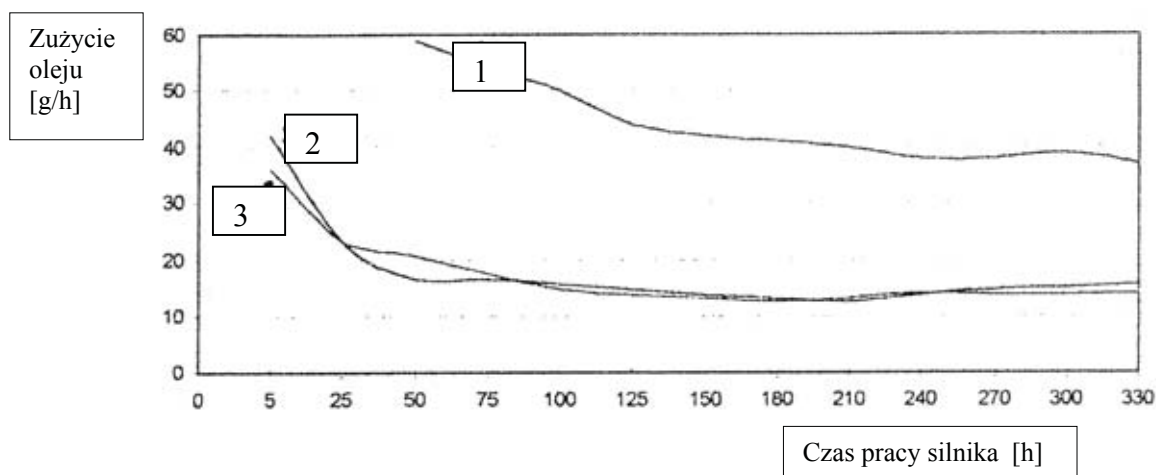
Fig.6. Cross arrangement of laser honing scratches: a- view on the cylinder bearing surface, b- in the cross-section [3]

Wyraźnie uwidaczniają się kanałki (wypalone laserowo rowki) służące do transportu czynnika smarującego. Na transport oleju smarowego wywiera wpływ kąt pochylenia rowków, który w przypadku klasycznego honowania wynosi 55 do 60°. Przy laserowym honowaniu wartości tego kąta są mniejsze, co widać na zdjęciu i wynoszą 30°. Geometrię rys honowniczych w przekroju poprzecznym przedstawiono na rys.6b. Charakteryzuje się ona dużą regularnością rowków honowniczych, co do ich głębokości jak i odstępów niemożliwą do uzyskania tradycyjnymi metodami. Zamiast nanosić laserowo ciągłe rowki honownicze wprowadza się obecnie nanoszenie na powierzchni gładzi cylindrowej kieszenie przedstawione na kolejnym rysunku 7.



Rys. 7. Układ kieszeni laserowego honowania [3]  
Fig. 7. Arrangement of laser honing pockets [3]

Metoda ta obniża koszty obróbki laserowej, a przynosi również zadawalające rezultaty. Kieszenie w laserowym honowaniu nanosi się w górnej części tulei, w górnym punkcie zwrotnym na szerokości pakietu pierścieni tłokowych. Wymiary nanoszonych kieszeni mogą kształtować się dla przykładu następująco: odstęp rowków-600 $\mu$ m, szerokość rowków-30 $\mu$ m, głębokość rowków-5 $\mu$ m, kąt pochylenia 30°. Honowanie wykańczające klasyczne wykonuje się na całej powierzchni gładzi z chropowatością  $R_a=0,1\mu$ m.



Rys. 8. Zużycie oleju smarowego w silniku spalinowym przy różnych rodzajach honowania gładzi tulei cylindrowej  
1- tradycyjne, 2- kieszenie nanoszone laserowo, 3- krzyżowy układ rys honowniczych laserowo obrabionych [2]  
Fig. 8. Wear of lubricating oil in combustion engine at different kinds of honing of sliding surface of cylinder liner  
1- traditional, 2- laser drilled pockets, 3 – cross arrangement of laser worked honing scratches [2]

Jak stwierdzono w badaniach doświadczalnych przeprowadzonych przez firmę GEHRING w porównaniu ze standardową tuleją cylindrową obniżone zostały przy laserowym honowaniu

gładzi cylindra silnika wysokoprężnego emisje sumaryczne cząstek o 20 do 25% i zużycie oleju silnikowego o 25 do 30% (rys.8). Korzystne zmiany dotyczą również zużycia pierścieni tłokowych i gładzi cylindra, zużycie to zmniejszyło się o 50%. Badania silników gaźnikowych z honowanymi laserowo tulejami wykazywały analogiczne korzyści: obniżenie zużycia oleju od 30 do 60% i zmniejszenie emisji węglowodorów o 10 do 20% [3]. Mimo tych korzystnych rezultatów technologia ta jak dotąd nie jest powszechnie wykorzystywana, a to za sprawą wysokich kosztów stanowisk do laserowego honowania cylindrów.

### 3. Nanoszenie laserowe mikrozasobników olejowych na tulei cylindrowej silnika lotniczego ASz-62IR

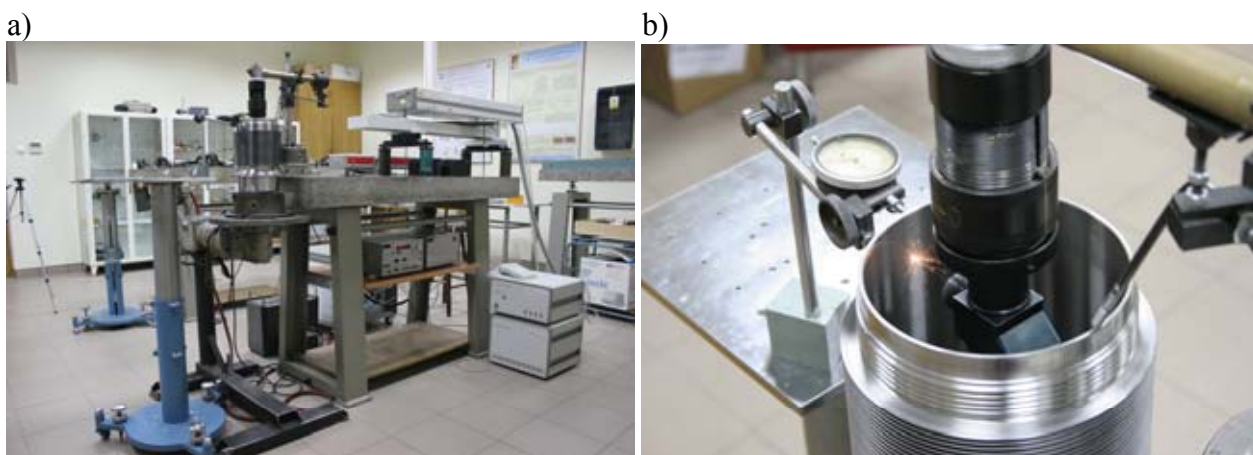
Aktualnie tuleja cylindrowa silnika ASz-62IR podlega honowaniu klasycznemu w wyniku którego uzyskuje się krzyżowy układ rys o następującej chropowatości powierzchni gładzi cylindrowej:

- struktura chropowatości płaskowyzynna,
- chropowatość na części stożkowej  $R_a = 0,7$  do  $1,5 \mu\text{m}$ ,
- chropowatość na części cylindrycznej  $R_a = 0,6$  do  $1,4 \mu\text{m}$ ,
- dążyć do uzyskania chropowatości od  $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ ,

Honowanie przeprowadza się po zmontowaniu tulei cylindrowej z głowicą silnika. Powierzchnia gładzi cylindrowej przed honowaniem jest azotowana na głębokość 0,5 do 0,7 mm i szlifowana do  $R_a = 0,63 \mu\text{m}$ .

Z uwagi na posiadane możliwości techniczne wykorzystywanego w badaniach własnych lasera Nd-YAG znajdującego się w Instytucie Optoelektroniki WAT możliwe było wykonanie mikrozasobników olejowych w postaci punktowych kieszeni [4,5].

Laserowe drażnienie mikrozasobników olejowych na gładzi cylindrowej obejmuje strefę kontaktu pierścieni przy zwrocie zewnętrznym tłoka (górnym martwym punkcie), tam gdzie zużycie tulei jest największe. Zaczyna się w odległości 5 mm od górnej krawędzi tulei i kończy w odległości 90 mm od górnej krawędzi tulei.



Rys. 9. Ogólny widok stanowiska do laserowego nanoszenia mikrozasobników-(a), oraz laserowa obróbka tulei cylindrowej-(b)

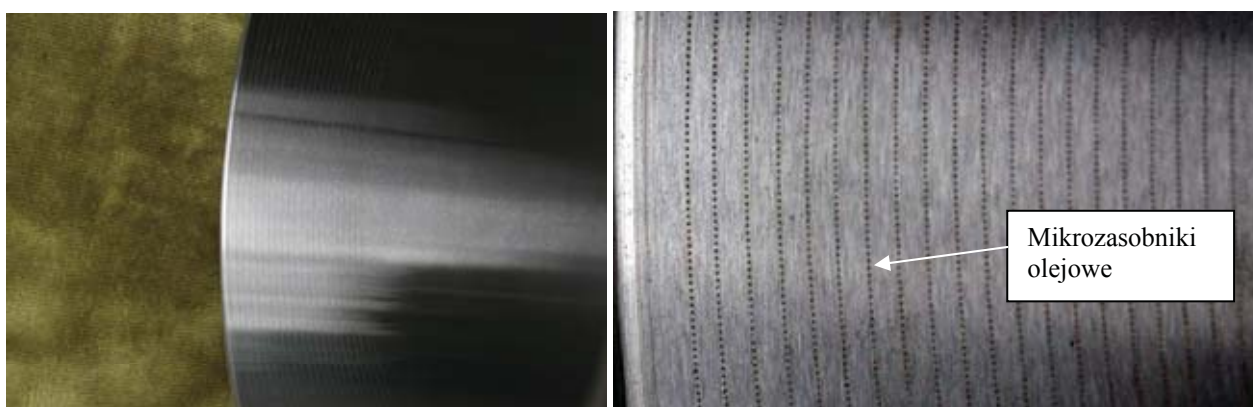
Fig. 9. General view of stand to laser drilling of micro-containers- (a), as well as laser machining of cylinder liner (b)

Obróbka tulei składa się z trzech operacji: honowania klasycznego wstępnego, obróbki laserowej i honowania wykańczającego. Przy honowaniu wstępnym uzyskuje się formę geometryczną powierzchni w skali makro i bazę obróbkową dla obróbki laserowej. Honowanie wykańczające służy do wyrównania powstałych podczas obróbki laserowej nierówności i do

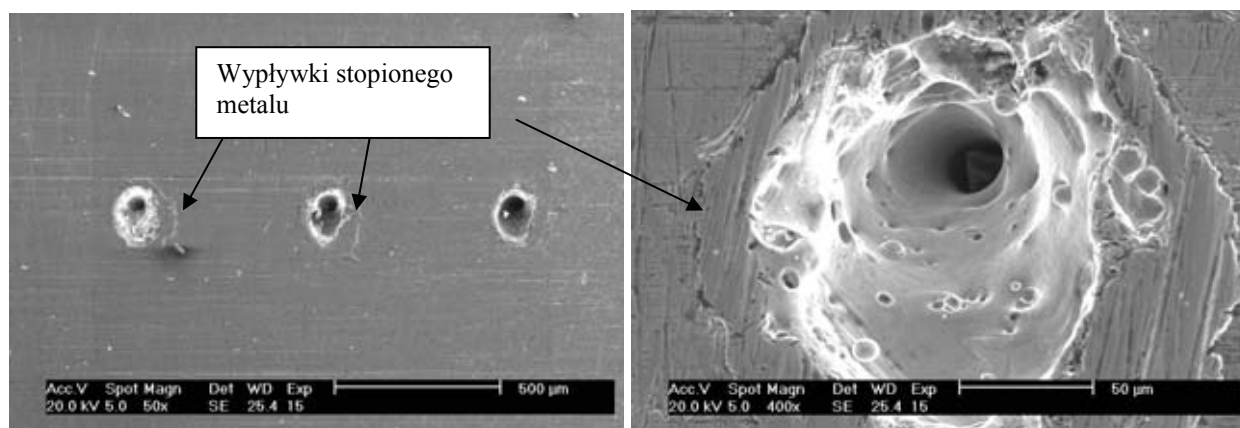
uzyskania powierzchni „Plateau” od 1 do 2  $\mu\text{m}$  jako parametr chropowatości powierzchni  $R_z$  ( $R_a=0,1 \mu\text{m}$ ). Honowanie to należy przeprowadzić po zmontowaniu tulei cylindrowej z głowicą silnika lotniczego. Po obróbce laserowej na powierzchni gładzi cylindrowej powstają kieszenie o następujących wymiarach:

- średnica na powierzchni 100 - 120  $\mu\text{m}$ , głębokość 30 - 50  $\mu\text{m}$ , odstęp 450  $\mu\text{m}$ .

Stanowisko do wykonywania kieszeni olejowych oraz przebieg procesu nanoszenia przedstawiono na rys. 9. Widok powierzchni gładzi cylindrowej po zakończeniu procesu nanoszenia kieszeni olejowych przedstawia zdjęcie na rysunku 10 i 11 przy różnych powiększeniach. Na zdjęciach widoczne są wypłytki stopionego materiału o wysokości około 10  $\mu\text{m}$ , które należy usunąć honowaniem wykańczającym.



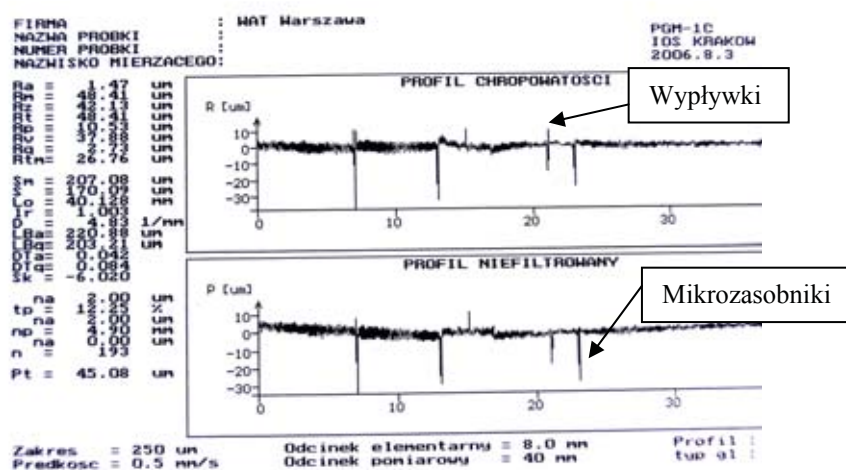
Rys.10. Widok powierzchni gładzi cylindrowej po laserowym naniesieniu mikrozasobników olejowych  
Fig.10. A view of cylinder bearing surface after drilling of micro-containers



Rys.11. Mikrozasobniki olejowe widziane przy większym powiększeniu  
Fig.11. Oil micro- containers visible at bigger enlargement

Chropowatość powierzchni gładzi cylindrowej po wykonaniu mikrozasobników olejowych przedstawiono na rys.12. Na wykresie uwidaczniają się wykonane kieszenie olejowe o głębokości około 38  $\mu\text{m}$ , przy zachowaniu ogólnej chropowatości według parametru  $R_a=1,47\mu\text{m}$  oraz wspomniane wcześniej wypłytki. Laserowe mikrozasobniki olejowe wykonano na trzynastu tulejach cylindrowych, z czego dziewięć zamontowano do silnika lotniczego ASz-62IR i poddano realizowanym obecnie badaniom doświadczalnym na stanowisku hamownianym w WSK Kalisz.





Rys. 12. Chropowatość powierzchni gładzi cylindrowej po naniesieniu laserowym mikrozasobników olejowych  
Fig.12. Surface roughness of cylinder sliding surface after drilling oil micro containers

## 5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Laserowe honowanie jest nowoczesną technologią kształtowania geometrii powierzchni gładzi cylindrowej. Układ rys laserowego honowania może być krzyżowy zapewniający wysoką jednorodność w zakresie odstepu między rysami i głębokością przy kącie pochylenia wynoszącym  $30^{\circ}$ . Dla zmniejszenia kosztów wykonania jak również czasu prowadzonego zabiegu można również nanosić na powierzchni gładzi cylindrowej spiralne lub poziome kieszenie olejowe.

W badaniach własnych zastosowano ze względów posiadanej możliwości aparaturowej punktowe kieszenie olejowe naniesione w górnej części tulei w obszarze określonym przez układ pierścieni, przy położeniu tłoka w górnym martwym punkcie. Dla tulei cylindrowej silnika ASz-62IR strefa laserowego nanoszenia mikrozasobników olejowych zaczyna się 5 mm od górnej krawędzi tulei, a kończy się w odległości 90 mm. Końcowa obróbka tulei składa się z trzech operacji: honowania klasycznego wstępnego, obróbki laserowej i honowania wykańczającego. Przy honowaniu wstępnym uzyskuje się formę geometryczną powierzchni w skali makro i bazę obróbkową dla obróbki laserowej. Honowanie wykańczające służy do wyrównania powstałych podczas obróbki laserowej nierówności (wyłytek) i do uzyskania powierzchni „Plateau” o parametrze chropowatości powierzchni  $Rz =$  od 1 do 2  $\mu\text{m}$ .

## Literatura

- [1] Niewczas, A., *Trwałość zespołu tłok-pierścienie tłokowe-cylinder silnika spalinowego*, WNT, Warszawa, 1998.
- [2] Klink, U., *Sprawozdanie z badań silnika AVL w Graz, Austria* nr TC 0150, 12, 1993.
- [3] Klink, U., *Laserowe honowanie gładzi cylindrów*, Sympozjum naukowo-techniczne. Technika laserowa w inżynierii powierzchni materiałów. WAT Warszawa, 1997.
- [4] Kusiński, J., *Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej*, Wydawnictwo Naukowe „Akapit”, Kraków, 2000.
- [5] Napadłęk, W., Przetakiewicz, W., *Wpływ obróbki laserowej na właściwości wybranych elementów silnika spalinowego*, Inżynieria Materiałowa nr 5(130)/2002, s. 547 – 553, 2002.

