

*Układ tribologiczny łoż - tuleja cylindrowa - pierścień,  
mikrozasobniki, teksturowanie laserowe*

Wojciech NAPADŁEK<sup>1</sup>  
Piotr BALICKI<sup>2</sup>

### **TEKSTUROWANIE WARSTWY POWIERZCHNIOWEJ GŁADZI CYLINDROWEJ Z WYKORZYSTANIEM ABLACYJNEJ MIKROOBRÓBK LASEROWEJ**

*W artykule zaprezentowano rozważania na temat współpracy skojarzenia łoż – tuleja – pierścienie tłokowe (T-P-C) w aspekcie poprawy własności tribologicznych. Przedstawiono modele tribologiczne przedstawiające współpracę skojarzenia pierścień – tuleja oparte na tradycyjnej obróbce mechanicznej (honorowanie) oraz na nowoczesnej obróbce laserowej. Wykorzystując ablacyjną mikroobróbkę laserową przeprowadzono teksturowanie warstwy powierzchniowej gładzi cylindra, wytwarzając charakterystyczne mikrozasobniki olejowe. Przedstawiono wstępne wyniki badań własnych w zakresie teksturowania warstwy powierzchniowej. Badania wstępne mające na celu poprawę własności tribologicznych skojarzenia (T-P-C) obejmowały: dobór najlepszych parametrów mikroobróbki laserowej, badania topografii powierzchni, twardości oraz składu chemicznego w mikroobszarach.*

### **TEXTURING OF THE CYLINDER BEARING SURFACE WITH THE APPLICATION OF LASER ABLATION MICRO-TREATMENT**

*This paper presents piston – brush – piston rings association interaction (TPC) in the aspect of tribological characteristics improvement. Tribological models showing piston – brush association interaction, which are based on traditional mechanical treatment (honing process) and modern laser treatment are presented. Laser ablation micro-treatment was applied and texturing of the cylinder bearing surface was performed to produce characteristic oil micro-containers. Preliminary own experimental results in the field of topography of superficial layer's texturing are presented. Preliminary tests included: selection of optimum parameters of laser processing, measurement and analysis on surface topography, hardness and chemical constitution in microvolumes.*

---

<sup>1</sup> dr inż. Wojciech NAPADŁEK, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, tel. (0-22) 683-73-57, tel/fax 683-76-02, e-mail: wnapadlek@wat.edu.pl

<sup>2</sup> mgr inż. Piotr BALICKI, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: pbalicki@wat.edu.pl

## 1. WSTĘP

W wielu aplikacjach technologicznych istnieje rosnące zapotrzebowanie na wysoko wydajne układy smarowane przez media (np. wodę, olej, lub paliwa). W przypadku ograniczonego smarowania pary tribologicznej, pojawia się wysokie tarcie pomiędzy współpracującymi powierzchniami z powodu miejscowego przzerwania filmu smarowego. Wydajność systemu tribologicznego można poprawić za pomocą zoptymalizowania topografii powierzchni, poprzez zastąpienie idealnie gładkiej powierzchni powierzchnią z wytworzoną teksturą. Do procesów teksturowania warstwy powierzchniowej (WP) elementów maszyn mogą być zastosowane min. metody: mechaniczne (polerowanie, docieranie, szlifowanie, obróbka ultradźwiękowa), wiązkowe (laserowa, elektronowa itp.).

Teksurowanie za pomocą ukształtowanej wiązki laserowej budzi duże zainteresowanie, ponieważ pozwala ono na wytworzenie topografii powierzchni na niemal wszystkich materiałach takich jak: metale, ceramika, szkło oraz kompozyty itp..

Siły tarcia jak i zużycie pary tribologicznej można zmniejszyć wprowadzając selektywnie mikrostruktury na powierzchniach współpracującej pary tribologicznej. Z jednej strony wytworzone mikrostruktury powinny działać jak pułapki na cząstki ściernie, z drugiej strony, powinny one zapewnić dostawę czynnika smarnego działając, jako zbiorniki płynu smarującego. Przykładem tego jest wewnętrzna powierzchnia cylindra (gładź) poddana modyfikacji laserowej.

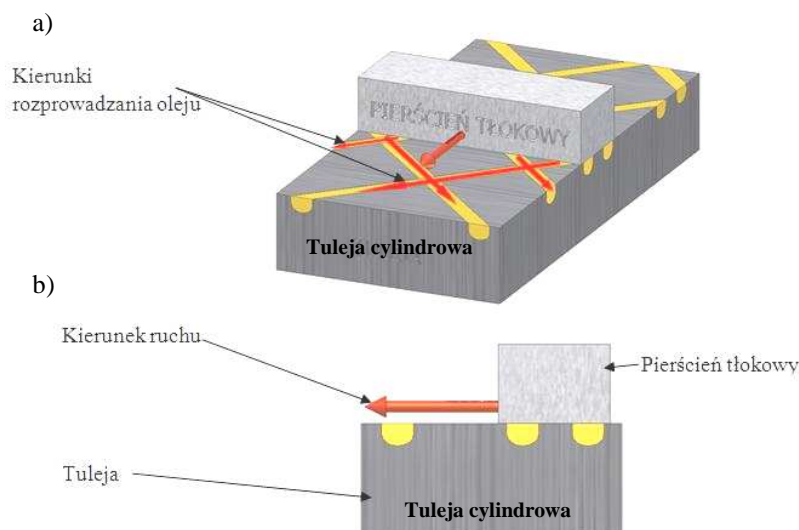
Badania efektów teksturowania laserowego prowadzone w wielu ośrodkach na świecie, wykazały zwiększoną grubość filmu olejowego pomiędzy pierścieniem tłoka i cylindrem, a tym samym znaczne zmniejszenie intensywności zużycia współpracujących elementów. Ponadto zamknięte mikrozasobniki oleju, mogą spełniać funkcję mikrołożyska. W procesie współpracy dwóch powierzchni w mikrozasobnikach następuje ściskanie czynnika smarowego i wytwarzanie ciśnienia, skutkiem czego jest powstanie smarowania hydrostatycznego. Wytworzona laserowo mikrostruktura może pozytywnie wpływać na powstawanie hydrodynamicznego filmu olejowego. Oprócz pozytywnych efektów mikrozasobników oleju, istnieje również możliwość występowania zaburzenia hydrodynamicznego czynnika smarującego. Rodzaj tekstury powierzchni (np. półczasze, rowki), ich geometria i rozmieszczenie odgrywają bardzo istotną rolę. W większości przypadków odpowiednie powierzchnie tekstur prowadzą do poprawy właściwości tribologicznych elementów maszyn. Zoptymalizowaną teksturę (WP) można osiągnąć jedynie wtedy, gdy jest ona odpowiednio zoptymalizowana i dostosowana do systemów tribologicznych [1].

## 2. METODY TEKSTUROWANIA GŁADZI CYLINDRA, TULEI ORAZ MONOBŁOKÓW SILNIKÓW SPALINOWYCH

### 2.1. Metody tradycyjne

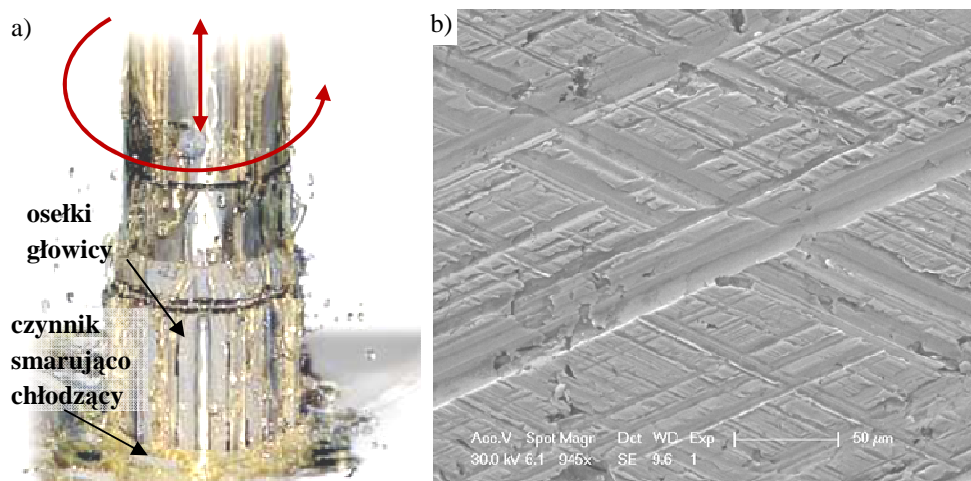
Do metod tradycyjnych obróbek powierzchniowych cylindrów tulei cylindrowych i monobloków silnika spalinowego zaliczana jest m. in. obróbka mechaniczna. Polega ona na wytaczaniu oraz na jedno- lub dwuzabiegowym honowaniu; wstępnym oraz wykańczającym. Powszechnie stosowany jest także system trzystopniowy w którym stosuje się honowanie wstępne i wykańczające oraz następując po nich honowanie metodą na

Plateau – inaczej zwanym honowaniem płasko-wierzchołkowym. Dzięki temu uzyskuje się charakterystyczną topografię powierzchni tworzącą siatkę wzajemnie przecinających się mikrorys stanowiących zasobniki dla filmu olejowego rozdzielającego elementy skojarzenia tłok – pierścień – tuleja cylindrowa (T-P-C) silnika spalinowego (rys. 1, 2). Prowadzone badania wykazują, że struktura powierzchni cylindra po tego rodzaju obróbce nie jest najkorzystniejsza. Aby zmniejszyć zużycie par trących wprowadza się topografię powierzchni w postaci mikrozasobników olejowych o kształcie wklęsłych mikroczasz lub mikrokanalów. Pozwala to na skuteczniejsze oddzielanie od siebie tłoka z pierścieniami od tulei cylindrowej, co znacząco zmniejsza opory tarcia analizowanego skojarzenia, jak również jego zużycie [2,4].



Rys. 1. Schemat modelowy współpracy skojarzenia pierścienia tłokowego – tuleja cylindrowa, przekrój poprzeczny z widokiem regularnych mikrokanalów olejowych wytworzonych tradycyjną obróbką mechaniczną (wytaczanie i dwukrotne honowanie)

Aby znacząco ograniczyć procesy zużycia gładzi tulei cylindrowych doskonali się ich konstrukcję, stosuje się nowe materiały, wprowadza się nowoczesne metody obróbki mechanicznej, a także stosuje się systemy warstw wierzchnich nowej generacji [2,5,6].



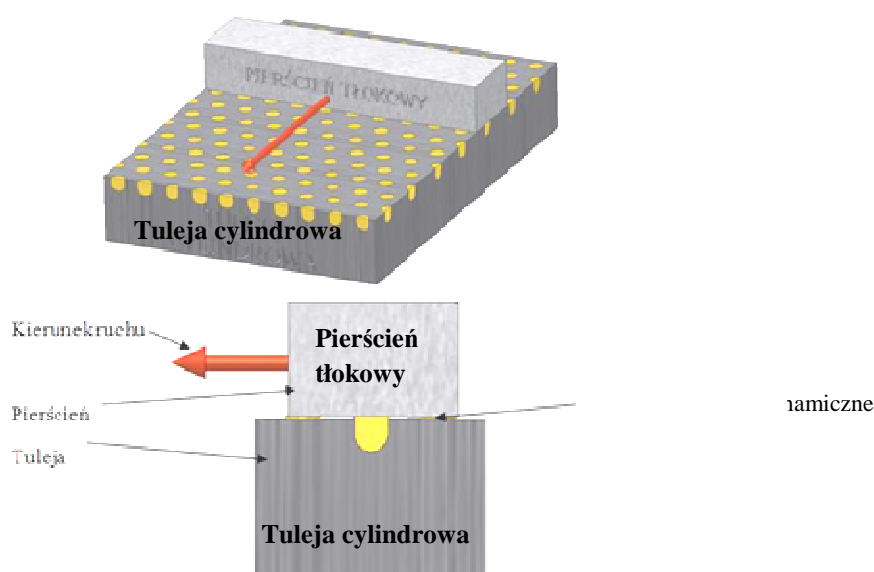
Rys. 2. Istota procesu tradycyjnego honowania mechanicznego: a - widok głowicy honującej [3], b - charakterystyczna topografia powierzchni po honowaniu wstępnym i gładkościowym gładzi cylindra

## 2.2. Metody nowoczesne

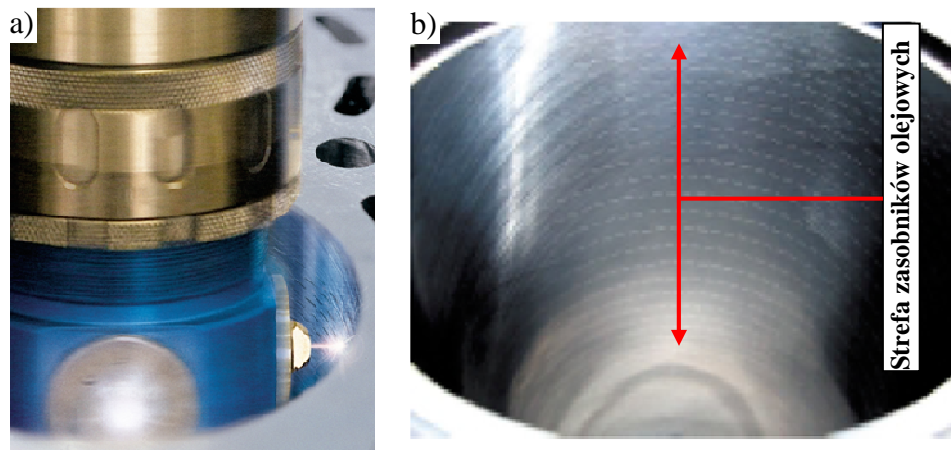
Prawidłowo ukształtowana topografia warstwy powierzchniowej gładzi cylindrów współpracującej z pierścieniami tłokowymi i tłokami, aby spełniać najwyższe wymagania eksploatacyjne, powinna być ukształtowana w sposób precyzyjny i powtarzalny. Jedną z nowoczesnych metod jest mikroobróbka laserowa. Zamiast charakterystycznej siatki rys wytworzonych na drodze kilkustopowego honowania mechanicznego, topografia powierzchni powinna posiadać charakterystyczne mikrozasobniki olejowe o kształcie wklęsłych mikrozasz lub mikrokanalów (rys. 3, 4). Pozwoli to na wytworzenie charakterystycznych mikrokomór ciśnieniowych (zasobników olejowych), zdolnych do wytworzenia smarowania hydrodynamicznego, co w konsekwencji skutecznie rozdzieli pierścień tłokowy i tłok od tulei cylindrowej. Zmniejszy to również zdecydowanie opory tarcia elementów tego skojarzenia tribologicznego T-P-C, jak również zużycie warstw powierzchniowych. Ze względu na korzystne istnienie filmu olejowego, zaletą tego układu będzie również znacznie podwyższona odporność na zacieranie elementów zespołu T-P-C, zwłaszcza w górnej strefie gładzi cylindra, w której występują niekorzystne warunki pracy (m.in. smarowanie graniczne, chwilowy brak smarowania, wysoka temperatura i ciśnienie, oddziaływanie gazów spalinowych).

Te nowoczesne, precyzyjnie sterowane metody stosowane do teksturowania powierzchni, głównie do warstwy powierzchniowej cylindrów monobloków i tulei cylindrowych polegają na wytworzeniu w procesie ablacji laserowej charakterystycznych zoptymalizowanych zasobników olejowych. Mikroobróbka ta wykorzystuje skupioną wiązkę promieniowania laserowego uzbrojoną w precyzyjną optykę i sterowanie. Proces ten jest czasochłonny i stosunkowo kosztowy, gdyż wymaga nowoczesnego oprzyrządowania, często będącego prototypowym. W nowoczesnych rozwiązaniach

technologicznych stosowanych w skali laboratoryjnej, a także przemysłowej stosuje się już zaawansowane technologie laserowe, w tym mikroobróbkę laserową, (oczyszczanie, mikrodrażenie i rozwijanie powierzchni). Często w zastosowaniach technologicznych kształtowania powierzchni gładzi cylindrowej stosuje się tzw. metodę hybrydową. Składa się ona z trzech operacji: konwencjonalnego honowania wstępnego, obróbki laserowej i honowania wykańczającego. Przy honowaniu wstępnym uzyskuje się formę w skali makro i bazę obróbkową dla obróbki laserowej otworu. Bazę obróbkową określamy w zależności od żądanej obróbki laserowej. Na powierzchni gładzi cylindrowej uzyskanej na drodze honowania wykańczającego z „plateau”, wykonuje się zogniskowaną wiązką promienia laserowego systemy zagłębień tworzące układy mikrosys, przecinających się pod odpowiednim kątem (analogia do honowania standardowego ( $30^{\circ}$  –  $60^{\circ}$ ), lub mikrowgłębień nazywane zasobnikami olejowymi (często mikrokomorami ciśnieniowymi) – rys. 3, 4. Zaawansowane badania w tym zakresie prowadzi niemiecka firma Gehring posiadająca wiele patentów, m. in. na honownice laserowe oraz wytwarzanie mikrozasobników w gładzi cylindra [3]. Taką obróbkę wykonuje się przeważnie w odniesieniu jedynie do pewnych stref gładzi cylindra, tj. współpracującej z górnym pierścieniem uszczelniającym lub najczęściej ze strefą współpracy segmentów pierścieni uszczelniających i zgarniających w ich górnym martwym położeniu (GMP).



Rys.3. Schemat modelowy tekstury powierzchni (gładź z mikrozasobnikami olejowymi) tulei cylindrowej, wytworzonej w procesie technologicznym ablacyjnej mikroobróbki laserowej



Rys. 4. Wytwarzanie zasobników olejowych na powierzchni gładzi cylindrów monobloku silnika spalinowego technologią firmy Gehring: a) widok głowicy laserowej podczas pracy, b) widok zasobników na całej wysokości skojarzenia tribologicznego pierścień - tuleja [3]

Po naniesieniu systemu mikrokomor ciśnieniowych techniką laserową, warstwa powierzchniowa gładzi cylindra podlega honowaniu gładkościowemu (superfinish) bardzo drobnymi ośłkami, w celu usunięcia wszelkich szczytów nierówności spowodowanych obróbką laserową. Promieniowanie lasera można również wykorzystywać do oczyszczania warstwy powierzchniowej materiałów konstrukcyjnych stosowanych w produkcji tulei i monobloków wykonanych, np. z żeliwa szarego. Powierzchnię o wysokiej czystości, wolną od zanieczyszczeń, tłuszczów i tlenków uzyskuje się w wyniku skoncentrowania wiązki laserowej na małej powierzchni o małej gęstości energii  $0,5 - 5 \text{ J/cm}^2$  przy bardzo krótkich czasach ekspozycji (od kilku pokosekund do kilkuset mikrosekund). Dzięki grafitowi występującemu w budowie żeliwa, absorpcyjność promieniowania laserowego jest duża, co zwiększa sprawność procesu [2,4,5,6].

### 3. METODYKA BADAŃ

W ramach badań wstępnych podjęto próbę kształtowania specyficznej topografii warstwy powierzchniowej tulei cylindrowej silnika spalinowego z wykorzystaniem ablacyjnej mikroobróbki laserowej. Modyfikacja laserowa polegała na wytworzeniu tzw. mikrozasobników olejowych w górnej strefie żeliwnej tulei (tzw. strefie pierścieniowej). Do wytwarzania mikrozasobników olejowych zastosowano laser Nd: YAG ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ) ze specjalnym systemem ogniskowania. Realizacja postawionego celu badawczego w pierwszym etapie pracy obejmowała dobór parametrów technologicznych mikroobróbki laserowej dla różnych gęstości mocy promieniowania laserowego oraz różnych prędkości skanowania. Analizując efekty technologiczne z wykorzystaniem podstawowych procedur laboratoryjnych (pomiar topografii powierzchni, geometrii zasobników olejowych, badanie

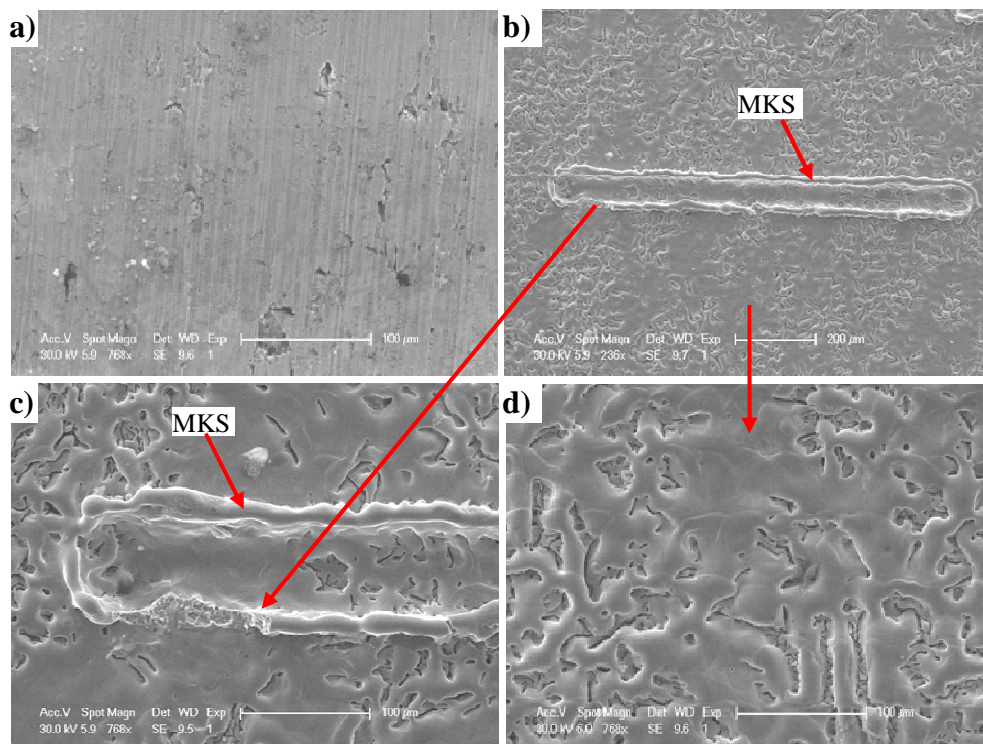
twardości, analizę składu chemicznego w mikroobszarach, badania mikrostruktury) dobrano najlepsze parametry mikroobróbki laserowej. W badaniach dokonano porównania topografii gładzi tulei cylindrowej ukształtowanej na drodze tradycyjnej obróbki mechanicznej, tj. wytaczania oraz dwuetapowego honowania mechanicznego, a także na drodze ablacyjnej mikroobróbki laserowej. Badaniom podlegały m.in. kształt i układ mikrorys pohnowniczych oraz mikrozasobników olejowych a także stref rozwiniętych mikroobróbką laserową. Analiza topografii powierzchni przeprowadzona została w Wojskowej Akademii Technicznej na profilometrze PGM –1C, elektronicznym mikroskopie skaningowym (SEM), oraz na zautomatyzowanym mikroskopie optycznym Nikon ME200. We wstępnych badaniach laboratoryjnych zaplanowano wytworzenie na próbkach różnych systemów mikrokieszeni olejowych (różne głębokości, rozmieszczenie i położenie kątowe), a także zmodyfikowanych laserowo stref. W najbliższej przyszłości przeprowadzona zostanie także analiza zwilżalności na wytworzonych systemach areologicznych, oraz badania naprężeń własnych. Ich właściwości użytkowe w najbliższej przyszłości zostaną zweryfikowane w badaniach tribologicznych w warunkach laboratoryjnych oraz w próbie hamownianej, tzw. „zimnych rozruchów” na rzeczywistym silniku spalinowym. Pozwoli to na wytypowanie najlepszych wariantów technologicznych mikroobróbki laserowej, mających szanse wdrożeń przemysłowych. Eksperymenty te pozwolą na wytypowanie najlepszych wariantów technologicznych teksturowania laserowego warstwy powierzchniowej cylindra, tzw. „gładzi”, wykonanej z żeliwa szarego niskostopowego.

#### **4. WYNIKI BADAŃ WSTĘPNYCH**

##### **4.1. Mikrozasobniki olejowe na powierzchni gładzi cylindra**

Badania wstępne przeprowadzono na próbkach oraz rzeczywistych tulejach cylindrowych wykonanych z żeliwa szarego niskostopowego o charakterystycznym rozetkowym układzie płatków grafitu. W górnej strefie współpracy gładzi cylindra z pierścieniami tłokowymi wykonano mikrozasobniki olejowe, za pomocą lasera Nd:YAG,  $\lambda = 1064\text{nm}$ , czas trwania impulsu  $\tau = 0,15\text{ms}$ , częstotliwość repetycji 50Hz. W górnej strefie gładzi cylindra tulei wykonano układy mikrozasobników olejowych przedstawionych na rysunku 5, (pkt. 3 metodyka badań). Powierzchnia gładzi cylindra tulei została dodatkowo oczyszczona laserowo. W wyniku ablacji laserowej wytworzone zostały mikrokomory, w których może gromadzić się czynnik smarny - olej silnikowy (rys. 5 b,c,d). Zwiększając gęstość energii w impulsie laserowym (ok. 2 - 10 J/cm<sup>2</sup>), przy czasie trwania impulsu 10 ns, częstotliwości repetycji 10 - 100 kHz, w wyniku występowania ultraszybkich zjawisk nagrzewania, topnienia, parowania oraz ablacji, uzyskano nadtopioną, specyficzną mikrostrefę ledeburytu o bardzo dużej dyspersji, z charakterystycznymi układami dendrytycznymi, których mikrotwardość osiągnęła wartość 1000 – 1200 HV 0,1.





Rys. 5. Widok charakterystycznych mikrozasobników olejowych w górnej strefie gładzi cylindra silnika spalinowego: a) widok powierzchni wyjściowej gładzi cylindra, b, c) widok gładzi cylindra poddanej ablacyjnej mikroobróbce laserowej, tj. mikronadtapianiu powierzchniowemu oraz wytworzeniu mikrokanalu smarowego (MKS), d) tekstura gładzi cylindrowej po mikronadtapieniu laserowym

Stwierdzono także znaczne zmniejszenie chropowatości powierzchni gładzi cylindra. W wyniku ablacji laserowej płatki grafitu, często przysłonięte w wyniku honowania mechanicznego, uległy odslonięciu oraz częściowemu odparowaniu, co w efekcie końcowym pozwoliło na wytworzenie się dodatkowych mikrozasobników olejowych [2,5,6].

#### 4. WNIOSKI

Przeprowadzone badania laboratoryjne pozwalają na sprecyzowanie następujących wniosków końcowych:

1. Bardzo ważną rolę w procesie technologicznym produkcji elementów silnika spalinowego modyfikowanych ablacyjną mikroobróbką laserową, odgrywa prawidłowe rozpoznanie charakteru oddziaływania wiązki lasera z materiałem i



- opracowanie prawidłowych parametrów przebiegu procesu (gęstość mocy, czas trwania impulsu, częstotliwość repetycji, prędkość skanowania).
2. Stosując ablacyjną mikroobróbkę laserową przy odpowiednio dobranych parametrach, możliwe jest wytworzenie na powierzchni gładzi tulei cylindrowej mikrozasobników olejowych o różnych kształtach i układach geometrycznych. Pozwala to na poprawienie warunków współpracy skojarzenia tłok – pierścienie tłokowe – tuleja cylindrowa, poprzez wytworzenie mikrofilmu olejowego, który skutecznie rozdzieli ww. elementy, zwłaszcza w warunkach dużego obciążenia cieplnego mechanicznego i termicznego.
  3. W wyniku badań przeprowadzonych przez firmę Gehring jak również pracowników Wydziału Mechanicznego WAT stwierdzono, że wykonanie w newralgicznych strefach gładzi tulei cylindrowej (tj. w strefie pierścieniowej przy GMP tłoka), systemu mikrozasobników olejowych z wykorzystaniem ablacyjnej mikroobróbki laserowej, rokuje nadzieję, że nastąpi poprawa warunków pracy silnika, zmniejszenie zużycia tribologicznego, obniżenie emisji szkodliwych związków chemicznych oraz zmniejszenie zużycia oleju smarującego.
  4. Planowane w najbliższym czasie próby tzw. „zimnych rozruchów” na rzeczywistym obiekcie tj. silniku spalinowym, zweryfikują przedstawione modele tribologiczne.

## 5. LITERATURA

- [1] Schreck S., Zum Gahr K.-H.: Laser-assisted structuring of ceramic and steel surfaces for improving tribological properties. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institute for Materials Research I, P.O. Box 3640, 76021 Karlsruhe, Germany 13 March 2005.
- [2] Napadłek W.: Zastosowanie ablacji laserowej dla zwiększenia trwałości tribologicznej elementów skojarzenia T-P-C silnika spalinowego. 13<sup>TH</sup> International Conference Computer Systems Aided Science, Industry And Transport „Transcomp 2009”, Radom 2009.
- [3] [www.gehring.de](http://www.gehring.de)
- [4] Wajand J. A., Wajand J. T.: Tłokowe silniki spalinowe średnio i szybko obrotowe. WNT, Warszawa 2005.
- [5] Napadłek W.: Zwiększenie odporności tribologicznej warstwy wierzchniej żeliwnych tulei cylindrowych z wykorzystaniem ablacji laserowej. Tribologia ISSN 0208-7774 Nr 5/2009, s. 147-159.
- [6] Napadłek W.: Modele tribologiczne współpracy skojarzenia tłok - pierścienie tłokowe – tuleja cylindrowa silnika spalinowego. Tribologia ISSN 0208-7774 Nr 5/2009, s. 135-145.