

Wojciech NAPADŁEK  
Zdzisław BOGDANOWICZ  
Adam WOŹNIAK  
Jan MARCZAK  
Antoni RYCYK

## TECHNOLOGICZNE ZASTOSOWANIA MIKROOBRÓBKI LASEROWEJ W MODYFIKACJI WARSTWY POWIERZCHNIOWEJ TULEI CYLINDROWYCH SILNIKA SPALINOWEGO<sup>\*)</sup>

**STRESZCZENIE:** *W pracy przedstawiono wyniki wstępnych badań laboratoryjnych i technologicznych stali 38HMJ azotowanej jarzeniowo poddanej modyfikacji laserowej. Do modyfikacji warstwy wierzchniej gładzi cylindrów wykorzystano mikroobróbkę laserową, mającą na celu poprawę jej makro- i mikrogeometrii (mikrodrażenie zasobników olejowych w górnej strefie tulei laserem Nd:YAG ze specjalnym systemem ogniskowania). Badaniom porównawczym poddana została topografia powierzchni ukształtowana na drodze tradycyjnej obróbki mechanicznej oraz zmodyfikowanej w wyniku mikroobróbki laserowej. Badania wstępne zmodyfikowanych gładzi tulei cylindrowych obejmowały: dobór najlepszych parametrów mikroobróbki laserowej, badania topografii powierzchni, badania struktury, twardości oraz składu chemicznego w mikroobszarach.*

**Słowa kluczowe:** *tuleja cylindrowa, topografia powierzchni, mikroobróbka laserowa, zasobniki olejowe*

---

<sup>\*)</sup> Praca została wykonana w ramach projektu nr N 3T08C 057 30 finansowanego w latach 2006–2009 przez MNiSW.

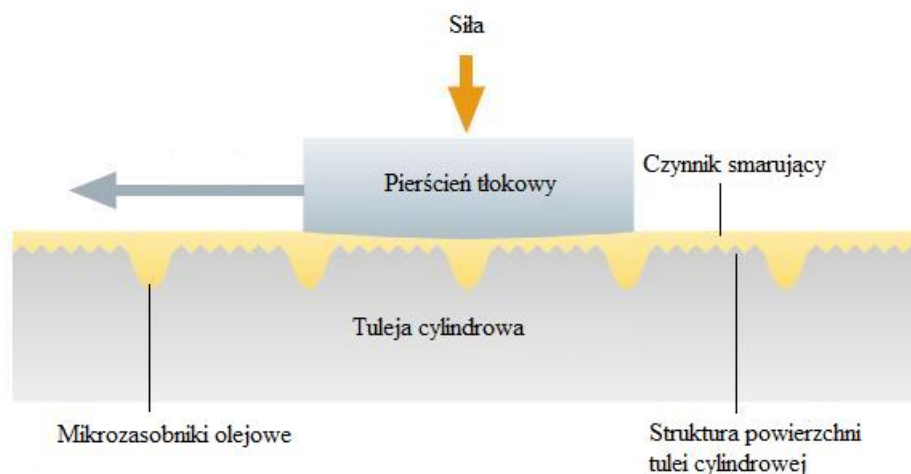
---

**dr inż. Wojciech Napadłek\***  
e-mail: wnapadlek@wat.edu.pl  
**dr hab. inż. Zdzisław Bogdanowicz\***  
e-mail: z.bogdanowicz@iwme.wat.edu.pl  
**dr inż. Adam Woźniak\***  
e-mail: a.wozniak@wme.wat.edu.pl  
**dr hab. inż. Jan Marczak\*\***  
e-mail: jmarczak@wat.edu.pl  
**mgr inż. Antoni Rycyk\*\***  
e-mail: arycyk@wat.edu.pl

\* Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny  
\*\* Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki

## 1. WSTĘP

Z punktu widzenia funkcjonowania i trwałości silników spalinowych warstwa powierzchniowa (gładź) cylindrów monobloków oraz tulei cylindrowych jest najistotniejszą strefą i dlatego poświęca się jej największą uwagę [1–14, 16]. Stan jej ma bardzo istotny wpływ na straty tarcia silnika, a więc zarówno na jego osiągi jak i na zużycie paliwa, tj. pośrednio również na emisję składników toksycznych zawartych w spalinach. Około 50% strat tarcia w silniku spalinowym pochodzi od tarcia w układzie tłokowo-cylindrowym, z czego około 70÷80% są to straty tarcia pierścieni o gładź cylindrów. Istotę współpracy skojarzenia tłok – pierścienie – tuleja cylindrowa (T-P-C) podejmuje wielu autorów prac w kraju i na świecie [1–9, 13, 15] (rys. 1).



Rys. 1. Schemat pracy skojarzenia pierścienia tłokowego – tuleja cylindrowa [3]

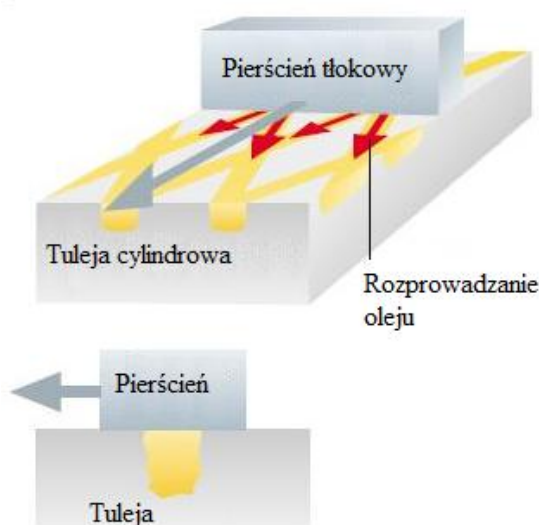
Aby znacząco ograniczyć procesy zużycia gładzi tulei cylindrowych, doskonalili się ich konstrukcję, stosuje się nowe materiały, wprowadza się nowoczesne metody obróbki mechanicznej, a także stosuje się systemy warstw wierzchnich nowej generacji [1,4–6,8,16].

## 2. METODY OBRÓBKI TULEI CYLINDROWYCH

### 2.1. Metody tradycyjne

Do metod tradycyjnych obróbki powierzchniowej cylindrów monobloków i tulei cylindrowych silnika spalinowego zaliczana jest obróbka mechaniczna. Polega na wytaczaniu (lub wytaczaniu i szlifowaniu) oraz dwustopniowym

honowaniu<sup>\*)</sup>: wstępnym oraz wykańczającym. Powszechnie stosowany jest także system trzystopniowy. Polega on na honowaniu wstępnym i wykańczającym oraz następującym po nich honowaniu metodą plateau – inaczej zwanym honowaniem gładkościowym. Dzięki temu uzyskuje się charakterystyczną topografię powierzchni, tworzącą siatkę wzajemnie przecinających się mikrorys, stanowiących zasobniki dla warstwy olejowej rozdzielającej elementy skojarzenia tłok – pierścień – tuleja cylindrowa (T-P-C) silnika spalinowego (rys. 2).



Rys. 2. Struktura po tradycyjnej obróbce tulei cylindrowej [3]

Prowadzone badania wykazują, że ta struktura powierzchni cylindra nie jest najkorzystniejsza.

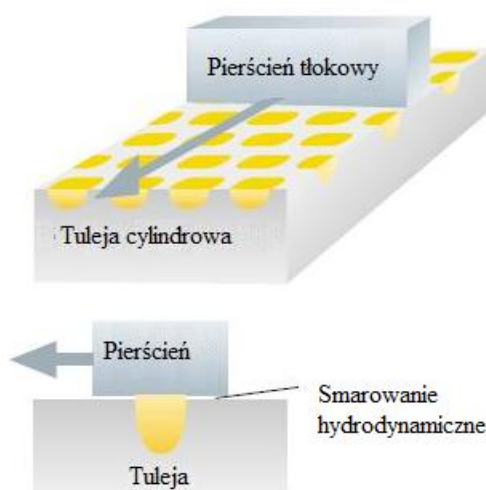
## 2.2. Metody nowoczesne

Prawidłowo ukonstruowana topografia warstwy powierzchniowej gładzi cylindrów współpracującej z pierścieniami tłokowymi i tłokami powinna posiadać zupełnie inną makro- i mikrogeometrię, niż uzyskiwana w tradycyjnie stosowanej technologii. Zamiast charakterystycznej siatki rys wytworzonych na drodze kilkietapowego honowania mechanicznego, topografia powierzchni powinna posiadać charakterystyczne mikrozasobniki olejowe o kształcie wklęsłych czasz (rys. 3). Pozwoli to na wytworzenie charakterystycznych mikrokomór ciśnieniowych (zasobników olejowych), zdolnych do gromadzenia mikrofilmów olejowych skutecznie rozdzielających pierścieni tłokowy i tłok od tulei cylindrowej. Zmniej-

<sup>\*)</sup> Honowanie – (gładzenie) obróbka wykańczająca bardzo dokładnych otworów walcowych, zwłaszcza cylindrów.

szy to zdecydowanie opory tarcia elementów tego skojarzenia tribologicznego<sup>\*)</sup> (T-P-C), jak również zużycie warstw powierzchniowych. Ze względu na korzystne istnienie warstwy olejowej, zaletą tego układu będzie również znacznie podwyższona odporność na zacieranie elementów zespołu T-P-C, zwłaszcza w górnej strefie gładzi cylindra, w której występują najgorsze warunki pracy (m.in. smarowanie graniczne, a nawet brak smarowania, wysoka temperatura i ciśnienie, oddziaływanie gazów spalinowych).

Nowoczesną, precyzyjnie sterowaną metodą stosowaną do kształtowania topografii powierzchni, głównie do warstwy powierzchniowej cylindrów monobloków i tulei cylindrowych jest mikroobróbka laserowa (mikrodrażenie – mikroobróbka ubytkowa). Jest to jednak proces czasochłonny i stosunkowo kosztowny, gdyż wymaga nowoczesnego oprzyrządowania (laser, odpowiednia optyka, precyzyjne sterowanie) [10, 14]. W nowoczesnych rozwiązaniach technologicznych stosowanych w skali laboratoryjnej, a także przemysłowej, stosuje się już zaawansowane technologie laserowe, w tym mikroobróbkę laserową (mikrodrażenie, oczyszczanie i rozwijanie powierzchni).

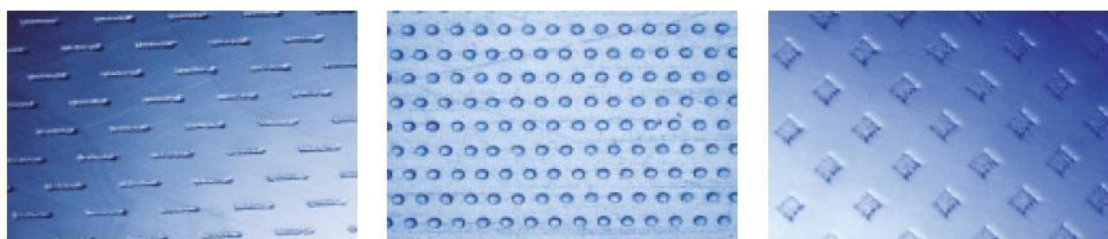


Rys. 3. Struktura po mikroobróbce laserowej tulei cylindrowej [3]

Nowa metoda charakteryzuje się kombinacją honowania i techniki laserowej. Ta końcowa obróbka składa się 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 (mikrootworki nazywane również mikroko-

<sup>\*)</sup> Procesy tribologiczne – procesy zachodzące w ruchomym styku ciał stałych.

morami ciśnieniowymi lub zasobnikami olejowymi – rysunki 3 i 4), tworzące układy linii przecinających się pod odpowiednim kątem (analogia do honowania standardowego  $30^{\circ}$ – $60^{\circ}$ ). Zaawansowane badania w tym zakresie prowadzi niemiecka firma GEHRING, posiadająca wiele patentów, m.in. na honownice laserowe oraz wytwarzanie mikrozasobników w gładzi cylindra. 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). Po naniesieniu systemu mikrokomór ciśnieniowych przy użyciu lasera, warstwa powierzchniowa (gładź) cylindra podlega honowaniu (superfinish) bardzo drobnoziarnistymi ośłkami w celu usunięcia wszelkich szczytów nierówności spowodowanych obróbką laserową [6, 8, 9].



Rys. 4. Struktury na powierzchni tulei cylindrowej uzyskiwane przez firmę GEHRING [3]

Promieniowanie lasera można również wykorzystywać do oczyszczania warstwy powierzchniowej żeliwa szarego (skorodowane, zatłuszczone, pokryte pyłem oraz innymi związkami organicznymi). Powierzchnię o wysokiej czystości, wolną od zanieczyszczeń, tłuszczów i tlenków, uzyskuje się w wyniku skoncentrowania wiązki laserowej na małej powierzchni o małej gęstości energii  $0,5 - 5 \text{ J/cm}^2$ . Dzięki grafitowi występującemu w budowie żeliwa, absorpcyjność promieniowania laserowego jest duża, co zwiększa sprawność procesu.

### 3. CEL BADAŃ

---

Celem badań jest opracowanie systemów areologicznych, tj. współpracujących warstw wierzchnich i powłok, w których:

- a) materiałem podłoża (elementy zespołu T-P-C) jest m.in. stal konstrukcyjna do azotowania (np. 38HMJ), stosowana w produkcji tulei cylindrowych;
- b) układ warstw wierzchnich i powłok (tzw. „systemy areologiczne”) będą tworzyły:

- warstwy wierzchnie przeciwzużyciowe o dużym przewodnictwie cieplnym, twardości i najkorzystniejszych właściwościach tribologicznych;
  - warstwy wierzchnie o odpowiedniej mikrogeometrii i wysokiej odporności na zmęczenie cieplne;
- c) ablacyjna mikroobróbka laserowa zostanie wykorzystana jako nowoczesna technologia inżynierii powierzchni do kształtowania specyficznej topografii powierzchni w górnej strefie tulei cylindrowej do wytworzenia tzw. mikrozasobników olejowych.

Pod pojęciem ablacyjnej mikroobróbki laserowej autorzy artykułu mają na myśli: mikrodrażenie, oczyszczanie oraz modyfikację laserową w lokalnych mikrostrefach z wykorzystaniem zjawiska usuwania materiału [10].

Aby zrealizować postawiony cel zaplanowano:

- dobór najlepszych parametrów mikroobróbki laserowej na systemach warstw wierzchnich gładzi cylindrów wykonanych ze stali 38HMJ w stanie ulepszonym cieplnie, jak również po azotowaniu jarzeniowym;
- przeprowadzenie badań właściwości użytkowych materiałów konstrukcyjnych stosowanych w budowie tulei cylindrowej z wytworzonymi warstwami wierzchnimi przy wykorzystaniu mikroobróbki laserowej w celu określenia ich przydatności technologicznej;
- opracowanie podstaw technologii wykorzystania mikroobróbki laserowej w procesie modyfikacji warstwy wierzchniej tulei cylindrowych mających potencjalne szanse zastosowania w konstrukcji ekologicznych silników spalinowych nowej generacji.

W artykule autorzy przedstawili tylko wybiórczą część badań wstępnych dotyczących doboru parametrów mikroobróbki laserowej oraz efektów rozwijania topografii powierzchni stalowej tulei cylindrowej azotowanej.

## 4. METODYKA BADAŃ

---

W ramach badań wstępnych podjęto próbę kształtowania specyficznej topografii powierzchni tulei cylindrowej wykonanej ze stali 38HMJ do azotowania z wykorzystaniem ablacyjnej mikroobróbki laserowej. Modyfikacja ta polegała na wytworzeniu tzw. mikrozasobników olejowych w górnej strefie tulei, wcześniej poddanej azotowaniu jarzeniowemu. Do wytwarzania mikrozasobników olejowych zastosowano laser Nd:YAG ze specjalnym systemem ogniskowania.

Realizacja postawionego celu badawczego w pierwszym etapie obejmowała dobór rodzaju i parametrów technologicznych procesów wytwarzania warstw wierzchnich (azotowanie jarzeniowe, mikroobróbka laserowa) na modyfikowanej stali.

W pierwszym etapie pracy, badaniom porównawczym poddana została topografia powierzchni tulei cylindrowej, ukształtowana na drodze tradycyjnej obróbki mechanicznej, tj. szlifowania, oraz dwuetapowego honowania mechanicznego. W ramach badań podstawowych, stosując różną długość fali, różną gęstość mocy oraz różny czas trwania impulsu promieniowania emitowanego przez laser Nd:YAG, zostały dobrane najlepsze parametry mikroobróbki laserowej (mikrodrażenia).

W badaniach zaplanowano wytworzenie na próbkach różnych układów systemów mikrokieszeni (różne głębokości, rozmieszczenie i położenie kątowe) oraz stref po modyfikacji laserowej, które wykorzystane zostaną w badaniach tribologicznych. Pozwoli to na wytypowanie najlepszych wariantów technologicznych mikroobróbki laserowej.

Badania porównawcze obejmowały: analizę topografii powierzchni ww. materiałów konstrukcyjnych przed i po modyfikacjach warstwy wierzchniej, analizę struktury, pomiary twardości, składu fazowego, składu chemicznego oraz stanu naprężeń własnych w mikroobszarach umocnionej warstwy wierzchniej.

Analizie poddana została również topografia powierzchni tulei cylindrowej, tj. kształt i układ mikrorys pohnowniczych kształtowanych tradycyjną technologią szlifowania i honowania oraz mikrozasobników olejowych lub stref rozwiniętych mikroobróbką laserową.

Analizę topografii powierzchni przeprowadzono przy użyciu profilografometrów oraz skaningowej mikroskopii elektronowej – SEM. Przeprowadzono również analizę składu chemicznego w mikroobszarach. W kolejnym etapie badań wstępnych zostanie przeprowadzona analiza mikrostruktury w zmodyfikowanej warstwie wierzchniej (mikroskopia optyczna, mikroskopia elektronowa skaningowa i transmisyjna), analiza zwilżalności na wytworzonych systemach areologicznych, badania twardości oraz stanu naprężeń własnych. Przeprowadzone zostaną również wielowariantowe badania tribologiczne. Eksperymenty te pozwolą na wytypowanie najlepszych wariantów technologicznych modyfikacji laserowej połączonej na badanym materiale – stali 38HMJ.

Warstwa wierzchnia zmodyfikowana m.in. poprzez mikroobróbkę laserową została wytworzona w firmie GEHRING oraz w laboratoriach Wojskowej Akademii Technicznej na nowoczesnej aparaturze badawczej i technologicznej (nowoczesne lasery Nd:YAG). Ta nowoczesna technologia laserowa ma na celu wytworzenie korzystnej mikrogeometrii (topografii powierzchni) gładzi tulei cylindrowej silnika spalinowego, uzyskanie specyficznego stanu materiału, wysokich właściwości mechanicznych i zmęczeniowych, dobrej odporności na



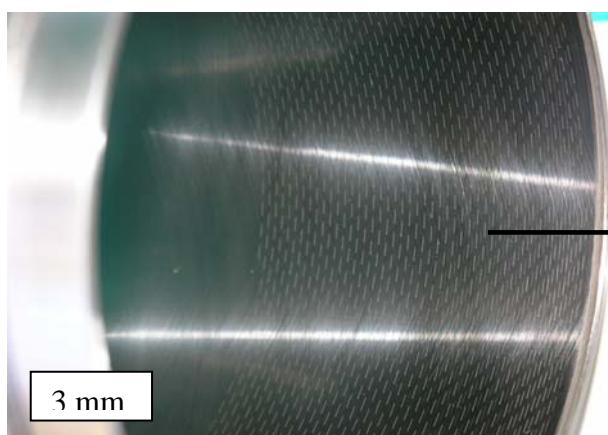
zużycie przez tarcie oraz wysokiej odporności na szoki cieplne i erozję warstwy wierzchniej, ukonstruowanej w badanej stali za pomocą mikroobróbki laserowej (mikrodrażenie, modyfikacja laserowa) oraz obróbki mechanicznej (wieloetapowe honowanie). Analiza topografii powierzchni przeprowadzona została w WAT na profilografometrze PGM –1C oraz elektronowym mikroskopie skaningowym (SEM).

## 5. WYNIKI BADAŃ WSTĘPNYCH

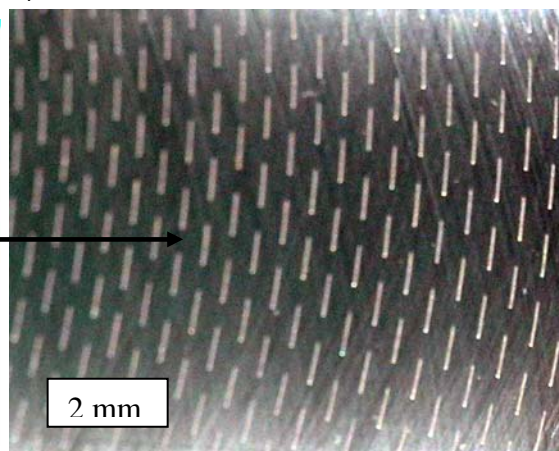
Badania wstępne przeprowadzono na próbkach oraz rzeczywistych tulejach cylindrowych wykonanych ze stali 38HMJ azotowanej jarzeniowo, a następnie szlifowanej. W pierwszym etapie badań próbki oraz tuleje wykonała firma GEHRING, a w drugim etapie na specjalnie skonstruowanym stanowisku laboratoryjnym wykonano partie próbek oraz tulei cylindrowych w laboratoriach Wojskowej Akademii Technicznej.

Dobór parametrów oraz technologiczne aspekty mikroobróbki laserowej ze względów komercyjnych zostały w artykule pominięte. W pierwszym wariantcie mikroobróbki laserowej w górnej strefie tulei cylindrowej wykonano mikrozasobniki olejowe w układzie widocznym na rysunkach 5a, b, e. Charakterystyczna topografia powierzchni gładzi cylindra wytworzona w drugim wariantcie została przedstawiona na rysunkach 5c, d, f. Różnią się one między sobą zasadniczo układem geometrycznym mikrozasobników olejowych.

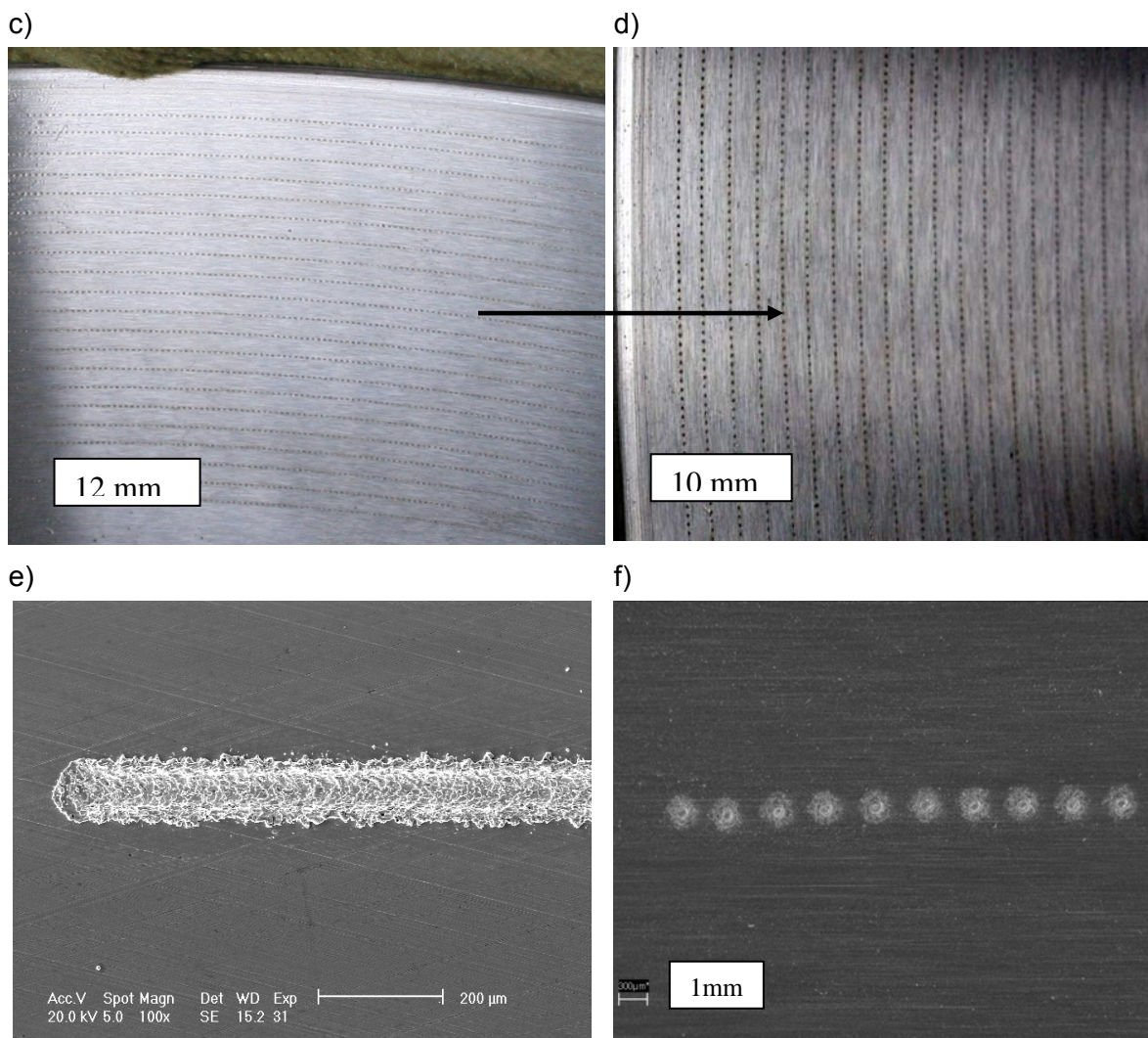
a)



b)



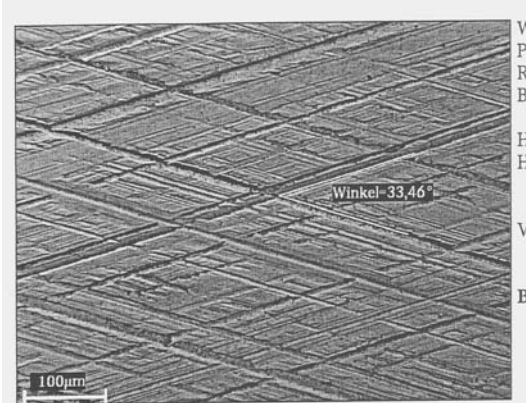




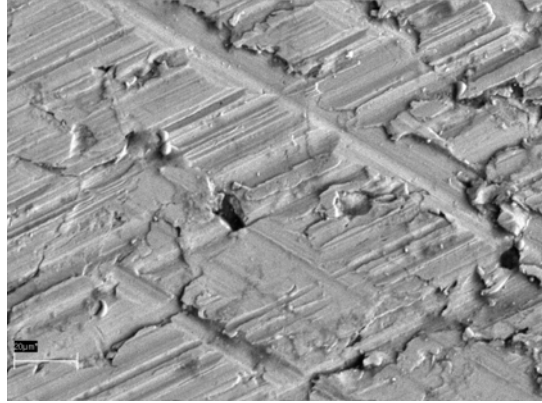
**Rys. 5. Charakterystyczna topografia powierzchni stalowej tulei cylindrowej azotowanej jarzeniowo po modyfikacji laserowej: a – d) charakterystyczny układ mikrozasobników olejowych; e, f) topografia powierzchni w strefie zasobnika olejowego; promieniowanie impulsowe lasera Nd:YAG 1064 nm, częstotliwość repetycji 50 Hz, mikrodrążenie realizowane na zautomatyzowanym stanowisku technologicznym**

Widok charakterystycznej topografii powierzchni uzyskanej na drodze tradycyjnej obróbki mechanicznej wykańczającej (honowanie wstępne i gładkościowe) przedstawiono na rysunkach 6a–d, a po modyfikacji laserowej, tj. mikrodrążeniu zasobników olejowych, ale przed honowaniem gładkościowym na plateau – na rysunkach 6e–h.

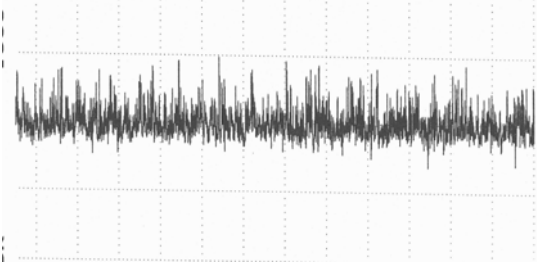
a)



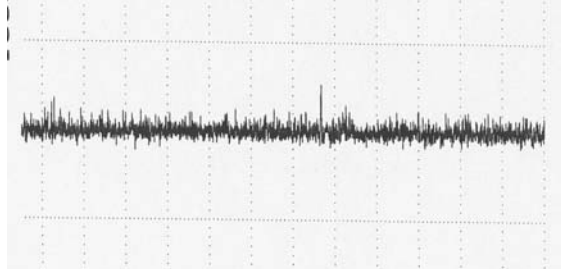
b)



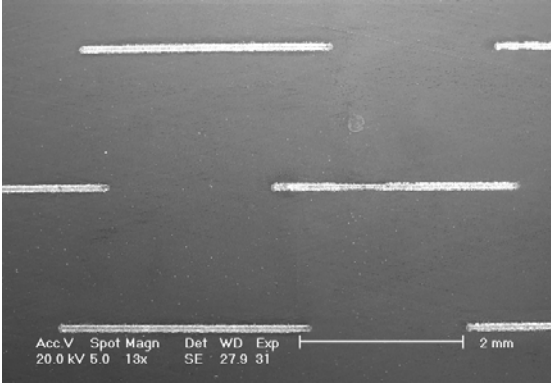
c)



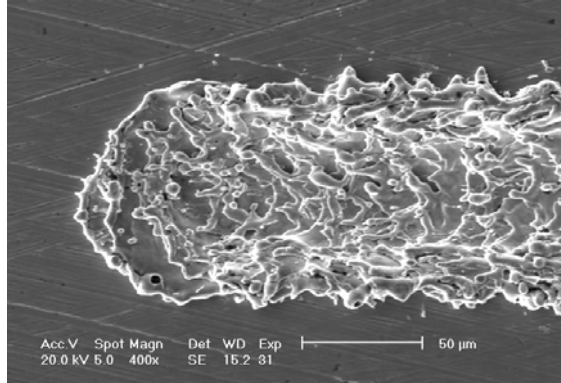
d)



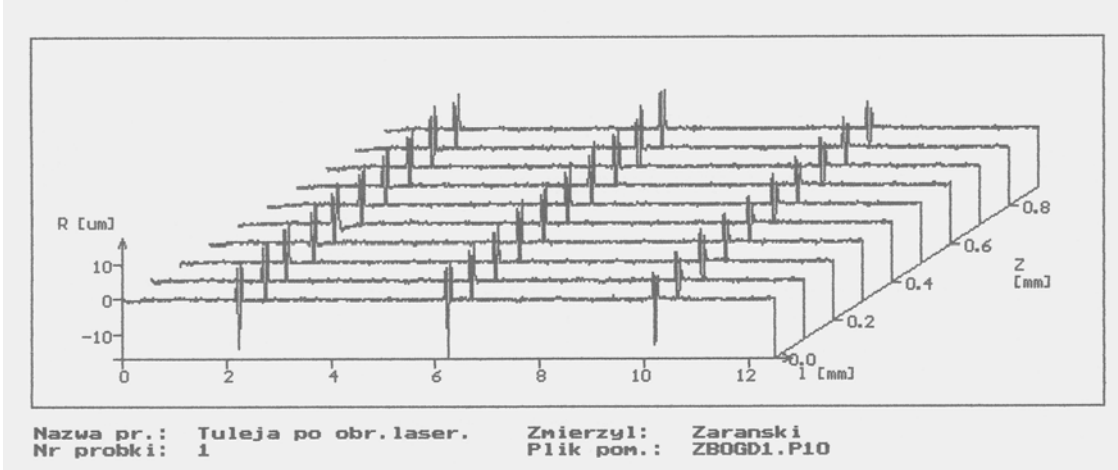
e)



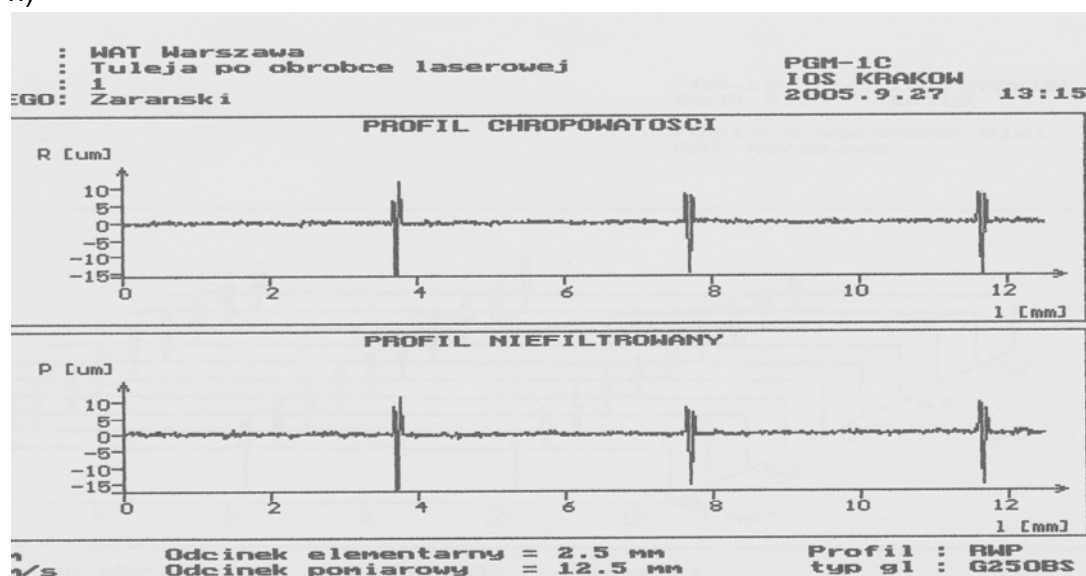
f)



g)



h)

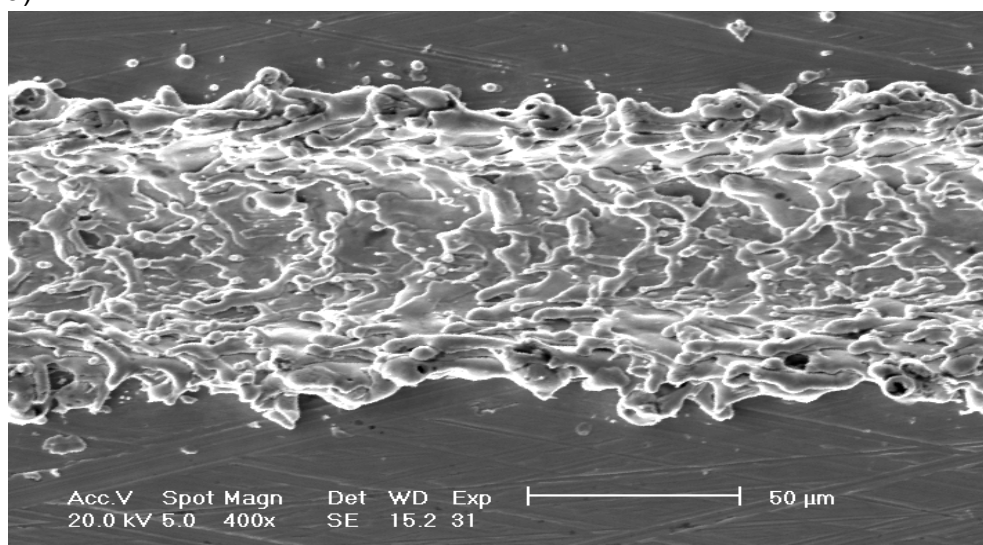


Rys. 6. Charakterystyczna topografia warstwy powierzchniowej z jej profilogramami: a, b) po tradycyjnej obróbce mechanicznej wykańczającej (honowanie wstępne i gładkościowe); c, d) po obróbce mechanicznej półwykańczającej (honowanie wstępne) oraz mikroobróbce laserowej; g, h) charakterystyczne profilogramy warstwy powierzchniowej wykonane wzdłuż tworzącej tulei w strefie obróbki laserowej z rys. a i b

Widoczne wypłytki technologiczne na zdjęciach (rys. 5e, 6f, 7a) oraz profilogramach (6g, h) w wyniku honowania wykańczającego jako obróbki ostatecznej zostaną usunięte.

Stosując wariantowo różne parametry technologiczne wiązki laserowej oraz automatyki sterującej, uzyskano szereg wariantów mogących znaleźć zastosowanie technologiczne w rzeczywistym obiekcie – stalowej tulei cylindrowej azotowanej laserowo. Wybrane charakterystyczne efekty badań laboratoryjnych przedstawiono na rysunku 7.

a)

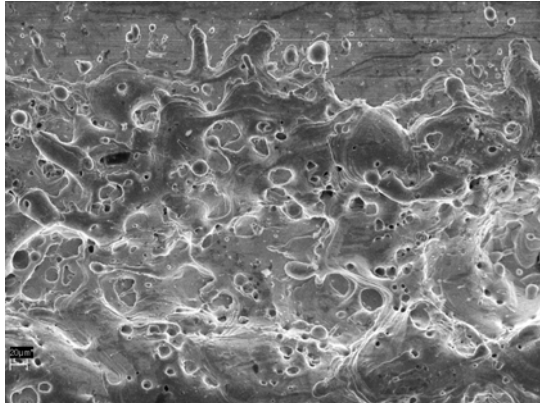




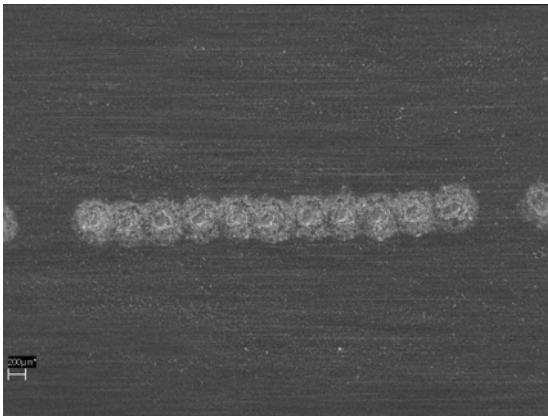
b)



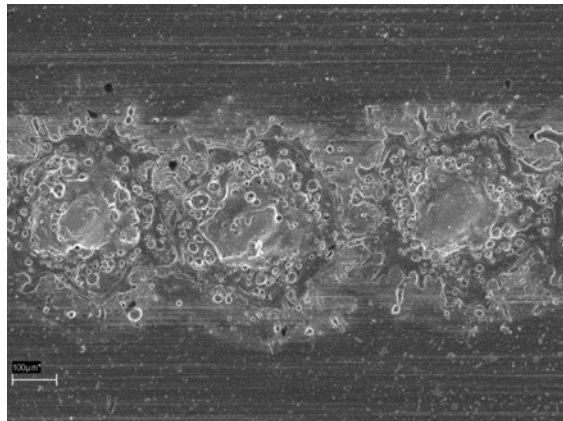
c)



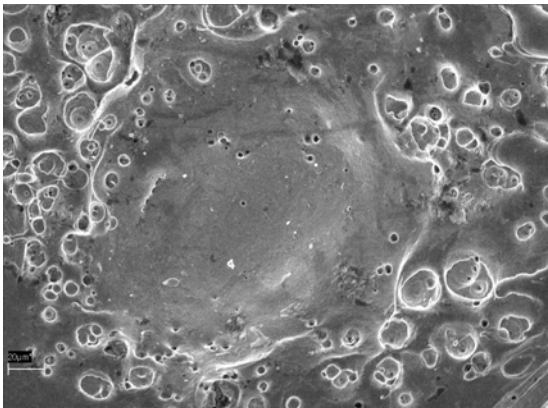
d)



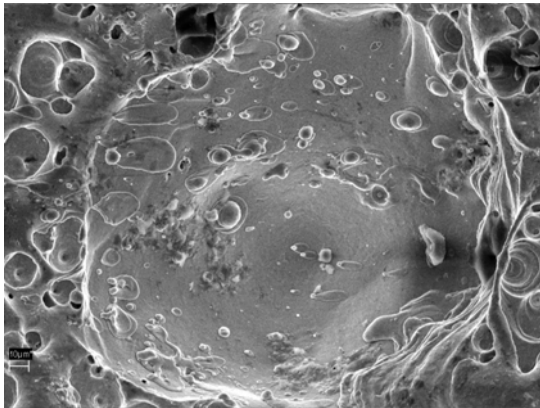
e)

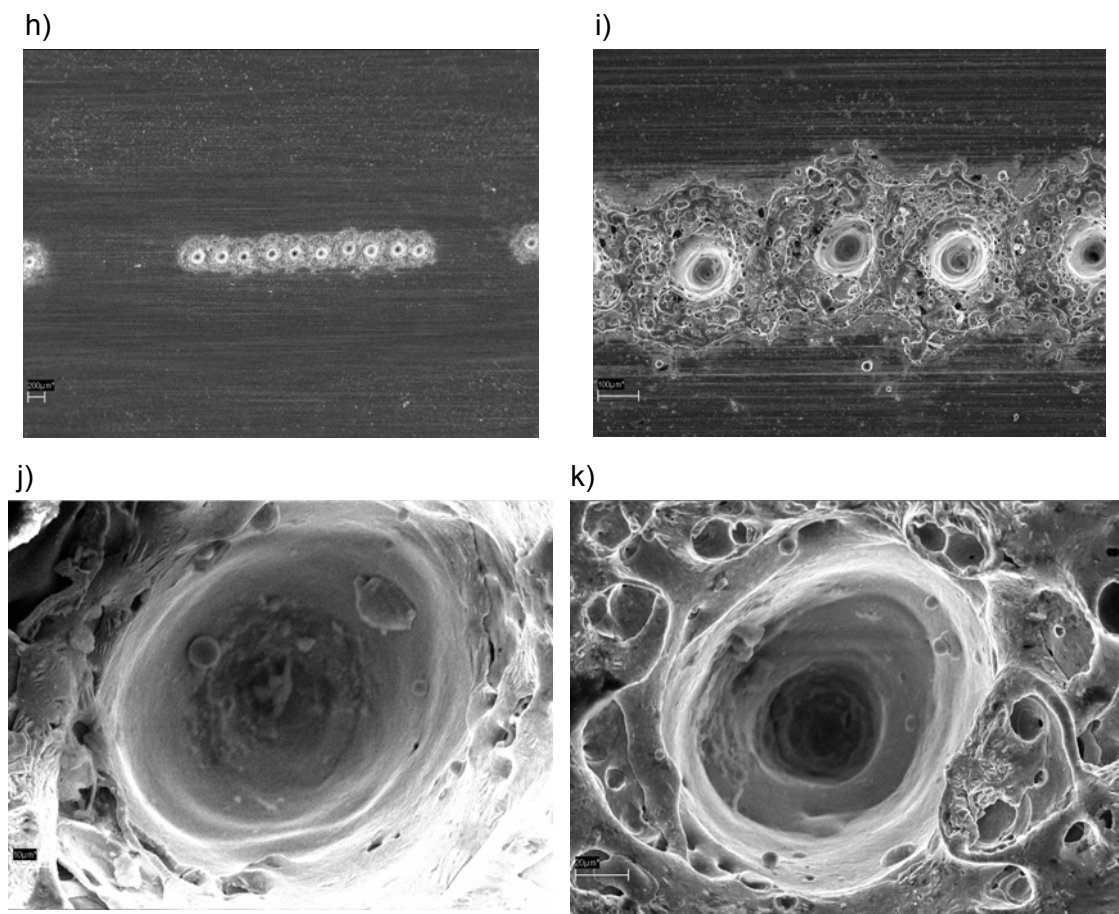


f)



g)





**Rys. 7. Widok charakterystycznych mikrozasobników olejowych wytworzonych na drodze mikroobróbki laserowej dla różnych parametrów obróbki oraz przy różnych ich rozmieszczeniach: a) widok zasobnika oleju wytworzonego wg technologii firmy GEHRING (z rys. 5a, b, e oraz 6e, f); b–k) widok mikrozasobników oleju w różnych wariantach technologicznych (różne gęstości mocy i układy geometryczne)**

## 6. PODSUMOWANIE

Ablacyjna mikroobróbka laserowa daje bardzo duże możliwości w zakresie wytworzenia w newralgicznej strefie (górną strefą tulei cylindrowej) zmodyfikowanych mikro- i nanostruktur w warstwie powierzchniowej, poprzez oddziaływanie plazmy laserowej i wysokiego ciśnienia. Szybkozmiennne impulsy laserowe o częstotliwości repetycji ok. 5–20 Hz wymuszają proces ablacji laserowej, rozdrobnienie struktury oraz ultraszybkie przemiany fazowe nie osiągalne innymi technologiami. Wyniki badań wstępnych wskazują, że w warstwie wierzchniej mogą zostać wytworzone cienkie mikrowarstwy amorficzne (szkliste) – o bardzo

wysokich walorach technologicznych, bardzo konkurencyjne dla innych nowoczesnych technologii stosowanych w inżynierii powierzchni. Procesy modyfikacji laserowej wpływają nie tylko jakościowo na strukturę, ale także pozwalają na precyzyjne kształtowanie mikrozasobników olejowych w newralgicznych strefach.

Technologia ta może być stosowana jako ostateczna lub jako półwykańczająca, np. przed honowaniem wykańczającym na plateau. Istotną zaletą tej nowatorskiej technologii jest bardzo mała strefa wpływu ciepła, co zapewne w minimalnym stopniu wpłynie na stan deformacji tulei, a zarazem na naprężenia własne. Z technologicznego punktu widzenia, równie istotny jest układ mikrozasobników olejowych wytworzonych na gładzi tulei cylindrowej, który wpływa decydująco na procesy tribologiczne.

Wyniki wstępnych eksperymentów laboratoryjnych zostaną praktycznie wykorzystane do ustalenia przydatności i opracowania podstaw nowoczesnej technologii mikroobróbki laserowej, mającej zastosowanie w wytwarzaniu nowej generacji systemów areologicznych w górnej strefie warstwy powierzchniowej gładzi tulei cylindrowych. Zastosowanie tej technologii, zwłaszcza w silnikach spalinowych mocno obciążonych cieplnie, pozwoli na zwiększenie ich trwałości i niezawodności, a także przyczyni się do zmniejszenia emisji toksycznych związków chemicznych do atmosfery. Może również nastąpić wzrost sprawności silnika spalinowego. Ma to szczególnie duże znaczenie technologiczne, zwłaszcza w produkcji newralgicznych elementów silników trakcyjnych dużej mocy, pracujących przy ich dużym wytężeniu, w bardzo trudnych warunkach klimatycznych (np. stosowanych w silnikach spalinowych pojazdów samochodowych, pojazdów specjalnych oraz lotniczych silnikach tłokowych).

## LITERATURA

1. Burakowski T., Wierzchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. WNT, Warszawa, 1995.
2. Włodarski J. K.: Tłokowe silniki spalinowe – procesy tribologiczne. WKŁ, Warszawa, 1982.
3. [www.gehring.de](http://www.gehring.de)
4. Fujimoto H., Furuhashi S., Goto T.: Measurement of Cylinder Bore Deformation by means of a Turning Piston with a Gap Sensor during Engine Operation. ISME International Journal, Series II, Vol. 34, No.3, 1991.
5. Halsband M.: Messung und Optimierung der Reibungsverluste der Kolbengruppe, Teil 1 und 2. MTZ 1994, 55, 11, MTZ 1995, 56.
6. Klink U.: Laserowe honowanie gładzi cylindrów, Symposium Naukowo-Techniczne pt. „Technika laserowa w inżynierii powierzchni materiałów”. WAT, Warszawa, 1997, str. 55–59.
7. Kozaczewski W.: Konstrukcja złożeń tłok – cylinder silników spalinowych, WKiŁ, Warszawa, 1987.

8. Kozaczewski W.: Nowe metody obróbki gładzi cylindrów. Mechanika z. 6-m/2004, Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, KONMOT–AUTOPROGRES 2004, Silniki Spalinowe t. 1., str. 383–394, Kraków, 2004.
9. MAHLE Recommendation for the Specification of Cast Iron Cylinder Bore Surface, Informacja Techniczna MAHLE GmbH.
10. Marczak J.: Analiza i usuwanie nawarstwień obcych z różnych materiałów metodą ablacji laserowej. Wydawnictwo BEL Studio Sp. z o. o., 2004.
11. Napadłek W., Przetakiewicz W., Bojar Z., Raczkowski D., Kalita W.: Hartowanie laserowe wybranych części silnika wykonanych z żeliwa. Przegląd Mechaniczny 7–8, str. 15–20, 1995.
12. Napadłek W., Przetakiewicz W.: Wpływ obróbki laserowej na właściwości wybranych elementów silnika spalinowego. Inżynieria Materiałowa nr 5(130)/2002, str. 547–553.
13. Napadłek W., Bogdanowicz Z., Kowalczyk S.: Kształtowanie technologicznej warstwy wierzchniej tulei cylindrowych stosowanych w silnikach spalinowych, Czasopismo Techniczne Mechanika, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, z. 6-m/2004, KONMOT–AUTOPROGRES 2004, Silniki Spalinowe T. 2, str. 582–592.
14. Napadłek W., Marczak, Kubicki, Ostrowski, Szudrowicz M.: Czyszczenie i umacnianie warstwy powierzchniowej materiałów konstrukcyjnych falą uderzeniową generowaną laserem impulsowym. Materiały VII Międzynarodowego Sympozjum IPM pt.: „Doskonalenie konstrukcji oraz metod eksploatacji pojazdów mechanicznych”, Warszawa – Rynia, 11–13 grudnia 2002, str. 194–203.
15. Niewczas A.: Trwałość zespołu tłok – pierścienie tłokowe – cylinder silnika spalinowego. WNT, Warszawa, 1998.
16. Przetakiewicz W., Napadłek W., Bogdanowicz Z.: Laserowe hartowanie tulei cylindrowych silnika spalinowego, XX Jesienna Szkoła Tribologiczna pt. „Tribologia a inżynieria powierzchni”, Spała 12–15 września 1995, str. 9–18.

*Rękopis dostarczono dnia 04.04.2008 r.*

**Opiniował: prof. Jacek Sosnowski**

TECHNOLOGICAL APPLICATIONS OF LASER  
MICRO-MACHINING TO MODIFICATION OF SURFACE  
LAYER OF COMBUSTION ENGINE CYLINDER LINER

NAPADŁEK, BOGDANOWICZ, WOŹNIAK,  
MARCZAK, RYCYK

**ABSTRACT** *Results of preliminary laboratory and technology tests of 38HMJ glow nitrided steel after laser modification are presented in the paper. To modification of surface layer of cylinder liner was used laser micro-machining in order to improving its macro- and micro-geometry (micro-drilling of oil containers in the top zone of the liner by Nd:YAG laser with special focusing system). To comparison investigations was putted surface topography of surface shaped*



*on the way traditional machining as well as modified one as result of laser micro-machining. The preliminary investigations of modified cylinder bearing surface of cylinder liners were included: selection of the best parameters of laser micro-machining, investigations of surface topography, investigations of structure, hardness as well as chemical constitution in micro-zones.*

**Dr inż. Wojciech Napadłek** jest autorem lub współautorem kilkudziesięciu publikacji naukowych z dziedziny budowy maszyn, a w szczególności pojazdów mechanicznych. Specjalizuje się w inżynierii produkcji oraz technologii napraw pojazdów mechanicznych. Szczególne zainteresowania naukowe to inżynieria powierzchni wykorzystująca nowoczesne technologie wiązkowe (laserowe i plazmowe), zarówno w skali makro-, mikro- oraz nanotechnologii. Jest współtwórcą kilku wdrożeń przemysłowych z tej dziedziny. Bierze udział w wielu projektach badawczych i celowych. Obecnie zajmuje się oddziaływaniem promieniowania laserowego z materiałem w zakresie spawania, napawania, czyszczenia laserowego oraz umacniania warstwy wierzchniej materiałów z wykorzystaniem fal uderzeniowych generowanych impulsem laserowym.



**Dr hab. inż. Zdzisław Bogdanowicz, prof. nadzw. WAT,** jest Dziekanem Wydziału Mechanicznego Wojskowej Akademii Technicznej W dorobku naukowym prof. ma ponad 120 artykułów i referatów na konferencjach krajowych i zagranicznych. Był kierownikiem 4 grantów z MNiSW oraz ponad 20 prac zleconych z przemysłu. W ostatnich latach wiele uwagi poświęca nowoczesnym technologiom laserowym mającym zastosowanie w inżynierii powierzchni. Prowadzi współpracę z wieloma instytucjami, takimi jak: WSiMR Politechniki Warszawskiej, Katedra Spawalnictwa Politechniki Śląskiej, WSK Kalisz, PZL „Wola”, firma Paradowscy AMP oraz innymi. Jest członkiem European Structural Integrity Society,

Międzysekcyjnego Zespołu Zmęczenia i Mechaniki Pęknięcia Materiałów i Konstrukcji Komitetu Budowy Maszyn PAN oraz Międzysekcyjnego Zespołu Inżynierii Powierzchni Komitetu Budowy Maszyn PAN.

**Dr inż. Adam Woźniak** – specjalność naukowa: ceramiczne warstwy ochronne. Prowadzi badania w zakresie:

- technologii modyfikacji warstwy wierzchniej elementów tłokowych silników spalinowych z wykorzystaniem nowoczesnych technologii inżynierii powierzchni,
- technologii wytwarzania systemów warstw wierzchnich i powłok na elementach części maszyn narażonych na szoki cieplne i zużycie tribologiczne,
- wykorzystania pokryć ceramicznych i kompozytowych do kształtowania właściwości użytkowych elementów silników spalinowych pod kątem adiabatyzacji komory spalania.

Bierze udział w projekcie badawczym. Jest autorem lub współautorem 24 publikacji naukowo-technicznych z dyscypliny naukowej „budowa i eksploatacja maszyn”.



**Dr hab. inż. Jan Marczak, prof. WAT**, studia ukończył w Wojskowej Akademii Technicznej w 1973 r. w zakresie elektroniki kwantowej i ciała stałego. Od 2005 r. na etacie prof. WAT kontynuuje i rozwija budowę laserów impulsowych dużej mocy do diagnostyki i badań ablacji warstw wierzchnich różnych materiałów. Wprowadził technologię ablacji laserowej do bezpiecznego usuwania nawarstwień z dzieł sztuki i obiektów zabytkowych w architekturze. Był lub jest członkiem zespołów, które otrzymały nagrody Dyrektora Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy, Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Ministra Kultury i Dziedzictwa Narodowego, Rektora WAT oraz Dyrektora Instytutu Optoelektroniki. Jest rzeczoznawcą Ministra Kultury i Dziedzictwa Narodowego.

**Mgr inż. Antoni RYCYK** jest absolwentem Wydziału Chemii i Fizyki Technicznej Wojskowej Akademii Technicznej o specjalności Elektronika Kwantowa i Fizyka Ciała Stałego. Obecnie st. specjalista n-t w Instytucie Optoelektroniki WAT. Zajmuje się zagadnieniami kształtowania parametrów czasowo-przestrzennych impulsów promieniowania laserów dużej mocy, wybranymi aspektami oddziaływania promieniowania spójnego z materią oraz konstrukcjami urządzeń laserowych do celów specjalnych. Współautor około 30 artykułów i komunikatów, opublikowanych w naukowych czasopismach polskich i zagranicznych, a ponadto współtwórca 4 świadectw autorskich o dokonaniu wynalazku oraz 2 świadectw o dokonaniu wzoru użytkowego.

