

Wojciech NAPADŁEK*

**ZWIĘKSZENIE ODPORNOŚCI TRIBOLOGICZNEJ
WARSTWY WIERZCHNIEJ ŹELIWNYCH
TULEI CYLINDROWYCH Z WYKORZYSTANIEM
ABLACJI LASEROWEJ**

**TRIBOLOGICAL RESISTANCE INCREASE OF CAST IRON
CYLINDER BRUSH SURFACE LAYER WITH
THE APPLICATION OF LASER ABLATION TREATMENT**

Słowa kluczowe:

ablacja laserowa, żeliwo szare, tuleja cylindrowa, warstwa wierzchnia, tribologia

Key-words:

laser ablation, cast iron, cylinder brush, surface layer, tribology

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki wstępnych badań laboratoryjnych i technologicznych na żeliwie szarym poddanym modyfikacji laserowej. Do modyfikacji warstwy wierzchniej gładzi cylindrów wykorzystano mikro-

* Katedra Pojazdów Mechanicznych i Transportu, Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49, tel.: (0-22) 683-73-57, 683-70-46, kom. 664494297, e-mail: wnapadlek@wat.edu.pl

obróbkę laserową mającą na celu poprawę jej makro- i mikrogeometrii (mikrodrążenie 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

CEL PRACY

Zasadniczym celem pracy była analiza możliwości zastosowań technologicznych ablacyjnej mikroobróbki laserowej w modyfikacji warstwy wierzchniej newralgicznych stref tulei cylindrowej silnika spalinowego.

Dążono do wytworzenia nowej generacji systemu warstw wierzchnich o zwiększonej odporności na zużycie przez tarcie, a tym samym większej trwałości i niezawodności. Zakładano również poprawę warunków pracy skojarzenia tłok pierścien–tuleja cylindrowa, co wiąże się z poprawą parametrów pracy silnika, wydłużeniem okresów obsługowo-naprawczych, a przede wszystkim zmniejszeniem emisji szkodliwych związków chemicznych do atmosfery.

Aktualny stan wiedzy na temat eksploatacji silników spalinowych [L. 1–6] oraz właściwości warstw wierzchnich wytypowanych elementów silnika spalinowego pozwala na wysunięcie następujących tez:

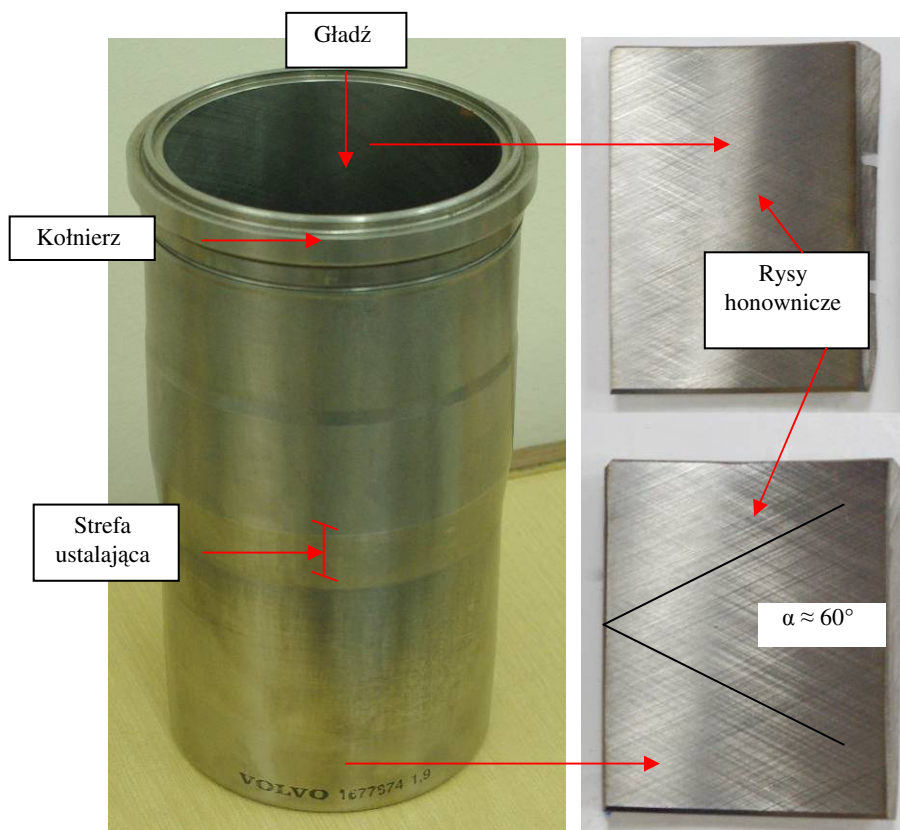
- możliwe jest usunięcie warstw tlenków, tłuszczów, pyłów oraz innych zanieczyszczeń stałych (np. mikrocząstki powbijane w materiał tulei, pochodzące z narzędzi skrawających jak SiC, Al₂O₃) z gładzi tulei cylindrowej dzięki wykorzystaniu ablacyjnej mikroobróbki laserowej,
- możliwa jest poprawa warunków współpracy skojarzenia tłok–pierścienie tłokowe–tuleja cylindrowa poprzez wykonanie mikrozasobników olejowych w górnej strefie gładzi tulei cylindrowej (strefa współpracy z pierścieniami tłokowymi), a tym samym zwiększenie odporności na zużycie przez tarcie, zwiększenie trwałości i niezawodności elementów tego skojarzenia.

Ta nowoczesna technologia hybrydowa (mikroobróbka laserowa i obróbka mechaniczna – honowanie) ma na celu wytworzenie korzystnej mikrogeometrii (topografii powierzchni) gładzi tulei cylindrowej silnika

spalinowego, uzyskanie specyficznego stanu materiału, dobrej odporności na zużycie przez tarcie oraz wysokiej odporności na szoki cieplne i erozję warstwy wierzchniej.

METODYKA BADAŃ

W ramach badań wstępnych podjęto próbę kształtowania specyficznej topografii warstwy powierzchniowej tulei cylindrowej silnika spalinowego z wykorzystaniem ablacyjnej mikroobróbki laserowej. Obiektem badań była tuleja cylindrowa (**Rys. 1**) wykonana z żeliwa szarego niskostopowego o składzie podanym w **Tabeli 1**.



Rys. 1. Tuleja cylindrowa: a – widok ogólny tulei; b – wycięte próbki z charakterystyczną siatką mikrorys po honowaniu wstępnym i wykańczającym (plateau)

Fig. 1. Cylinder brush: a – top view of the brush, b – cut out samples with characteristic micro-scratches net after initial and finishing honing (plateau)

Tabela 1. Skład chemicznego żeliwa szarego zastosowanego w procesie produkcyjnym tulei

Table 1. Chemical composition of the gray cast iron applied in the brush manufacturing process

Skład chemiczny w [%]									
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Sn	Mo
3,36	0,61	2,46	0,275	0,067	0,26	0,12	0,22	0,068	0,095

Modyfikacja laserowa polegała na wytworzeniu tzw. mikrozasobników olejowych w górnej strefie (tzw. strefie pierścieniowej) żeliwnej tulei. Do wytwarzania mikrozasobników olejowych zastosowano laser Nd: YAG ($\lambda = 10064 \text{ nm}$) ze specjalnym systemem ogniskowania (**Rys. 2**).

a)



b)



Rys. 2. Ogólny widok stanowiska do laserowego nanoszenia mikrozasobników (a) oraz laserowa obróbka tulei cylindrowej (b)

Fig. 2. General view of stand to laser drilling of micro-containers (a), as well as laser machining of cylinder (b)

Warstwa wierzchnia gładzi tulei cylindrowej została zmodyfikowana w wyniku mikroobróbki laserowej zrealizowanej na specjalistycznej hownownicy laserowej w firmie GEHRING oraz laboratoriach Wojskowej Akademii Technicznej, na nowoczesnej aparaturze badawczej i technologicznej (nowoczesne lasery Nd: YAG). Realizacja postawionego celu

badawczego na pierwszym etapie pracy obejmowała dobór parametrów technologicznych mikroobróbki laserowej dla różnych gęstości mocy promieniowania emitowanego przez laser Nd: YAG ($\lambda = 1064$ nm) oraz różnych prędkości skanowania. Analizując efekty technologiczne z wykorzystaniem podstawowych procedur laboratoryjnych (pomiar topografii powierzchni, geometrii zasobników olejowych, twardość, 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 mikrorysy pohnowniczych oraz mikrozasobników olejowych lub stref rozwiniętych mikroobróbką laserową. Analiza topografii powierzchni przeprowadzona została w WAT na profilometrze PGM -1C oraz elektronowym mikroskopie skaningowym (SEM).

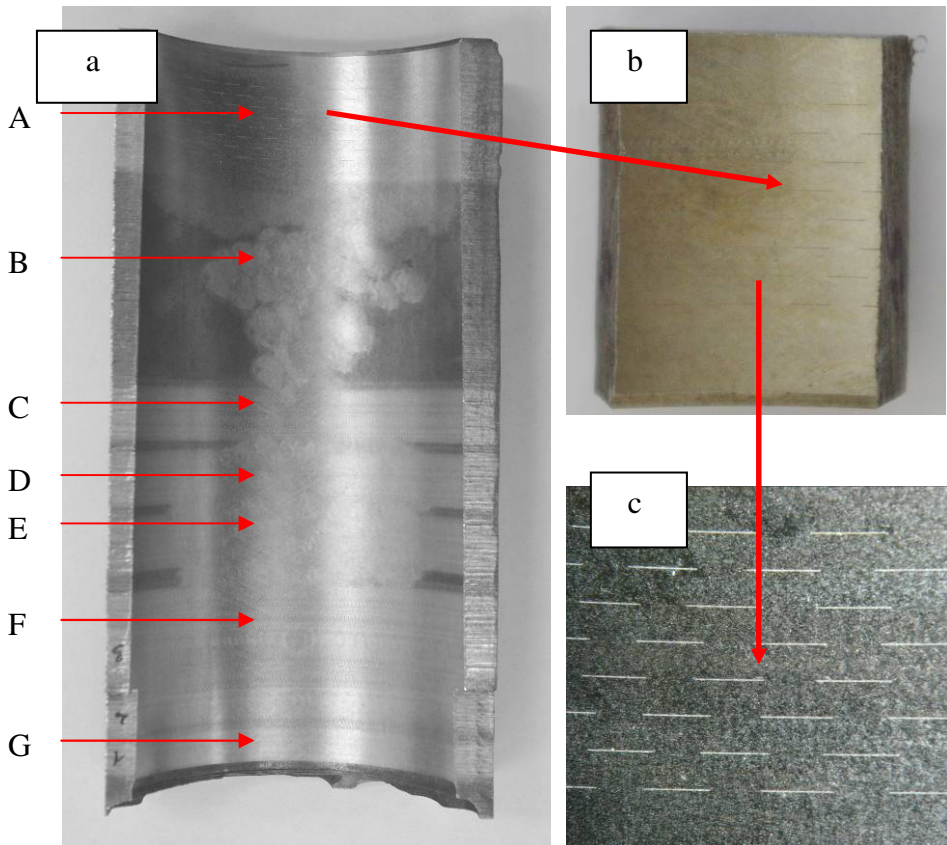
We wstępnych badaniach laboratoryjnych zaplanowano wytworzenie na próbkach różnych systemów mikrokieszeni olejowych (różne głębokości, rozmieszczenie i położenie kątowe), a także zmodyfikowanych laserowo stref o wysokich właściwościach tribologicznych, które w najbliższej przyszłości zostaną zweryfikowane w badaniach 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.

W najbliższej przyszłości przeprowadzona zostanie analiza zwilżalności na wytworzonych systemach areologicznych, badania naprężeń własnych. Przeprowadzone zostaną również wielowariantowe badania tribologiczne. Eksperymenty te pozwolą na wytypowanie najlepszych wariantów technologicznych modyfikacji laserowej połączonej na badanym materiale – żeliwie szarym niskostopowym.

WYNIKI BADAŃ WSTĘPNYCH

Badania wstępne przeprowadzono na próbkach oraz rzeczywistych tulejach cylindrowych wykonanych z żeliwa szarego niskostopowego o charakterystycznym rozetkowym układzie płatków grafitu (**Rys. 7**).

Wycinek cylindra wykonany z żeliwa szarego niskostopowego przedstawiono na **Rys. 3**. W górnej strefie współpracy gładzi cylindra z pierścieniami tłokowymi metodą mikroobróbki laserowej wykonano mikrozasobniki olejowe, za pomocą lasera Laser Nd:YAG – $\lambda = 1064$ nm, $\tau = 0,15$ ms, częstotliwość repetycji 50 Hz.

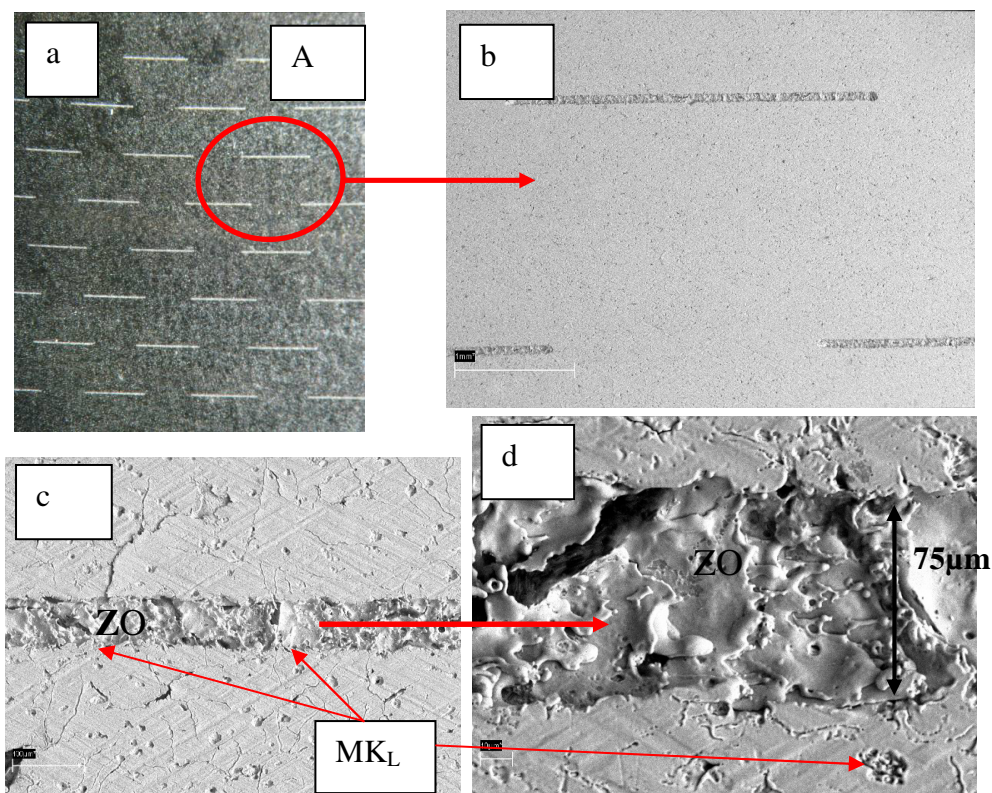


Rys. 3. Wycinek cylindra tutei: a – widoczne strefy oczyszczania laserowego(A-G) oraz strefa z mikrozasobnikami olejowymi (A; a, b, c) wytworzonymi w wyniku ablacyjnej mikroobróbki laserowej; A-G – strefy oczyszczone laserowo przy różnych parametrach gęstości mocy ($q = 7 \cdot 10^7 \div 33 \cdot 10^7$ W/cm²) oraz różnych prędkości skanowania ($V = 200 \div 500$ mm/min); Laser Nd:YAG: $\lambda = 1064$ nm, $\tau = 0,15$ ms, częstotliwość repetycji 50 Hz

Fig. 3. A piece of cylinder brush: a – well seen areas after laser cleaning (A-G) and area with oil micro-containers (A; a, b, c) manufactured with laser micro-treatment: A-G laser cleaned areas with various parameters of power density ($q = 7 \cdot 10^7 \div 33 \cdot 10^7$ W/cm²) and various scanning velocities ($V = 200 \div 500$ mm/min); Laser Nd:YAG: $\lambda = 1064$ nm, $\tau = 0,15$ ms, repetition frequency 50 Hz

Mikrozasobniki olejowe

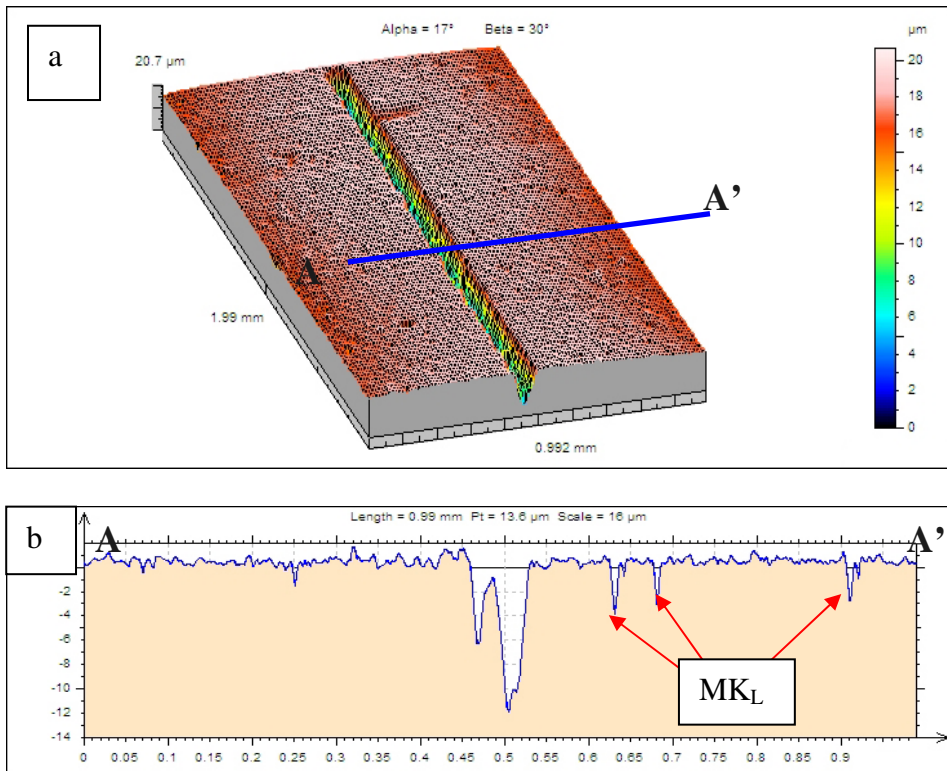
Na gładzi cylindra tulei firma GEHRING wykonała mikrozasobniki olejowe jak na **Rys. 3, 4, 5 [L. 2]**. Mikrozasobniki mają za zadanie gromadzenie mikrofilmów olejowych skutecznie rozdzielających elementy skojarzenia T-P-C. Skutkiem tego ma być zdecydowane zmniejszenie oporów tarcia tego skojarzenia oraz zużycia warstwy powierzchniowej elementów skojarzenia T-P-C. Taką obróbkę wykonuje się przeważnie odniesieniu jedynie do pewnych stref gładzi cylindra, tj. współpracującej



Rys. 4. Mikrozasobniki olejowe wykonane w górnej strefie gładzi cylindra tulei: a – widok ogólny (system cegiełkowy), b – powiększony obszar A, c, d – topografia powierzchni zasobnika olejowego (Zo), MK_L – mikrokomory uzyskane w wyniku ablacji laserowej

Fig. 4. Oil micro-containers manufactured in the upper area of the cylinder brush anvil face: a – general top view (brick-like system), b – magnified A area, c, d – oil containers surface topography (Zo), MK_L – micro-chambers obtained by laser ablation

z górnym pierścieniem uszczelniającym lub najczęściej ze strefą współpracy segmentów pierścieni uszczelniających i zgarniających w ich górnym martwym położeniu (GMP). Ze względu na najgorsze warunki pracy tej strefy, zaletą tego układu będzie również znacznie podwyższona odporność na zacieranie elementów ww. zespołu.



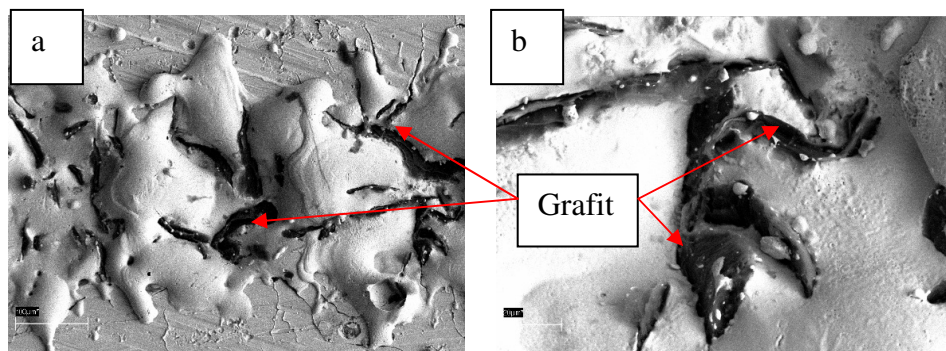
Rys. 5. Charakterystyczny mikrozasobnik olejowy (Zo) wytworzony w wyniku ablacyjnej mikroobróbki laserowej na gładzi cylindra samochodu: a – profilogram 3D, widok z góry, b – profilogram 2D, przekrój poprzeczny, MK_L – mikrokomory uzyskane w wyniku ablacji laserowej

Fig. 5. Characteristic oil micro-container (Zo) manufactured with laser ablation micro-treatment on the anvil face of vehicles cylinder a – 3D profile image, top view, b – 2D profile image, cross section, MK_L – micro-chambers obtained by laser ablation application

Powierzchnia cylindra tulei (**Rys. 3, 4**) została dodatkowo oczyszczona laserowo. W wyniku ablacji laserowej wytworzone zostały mikrokomory (MK_L), w których może gromadzić się olej. Poniżej na **Rys. 6** przedstawiono mikrozasobniki olejowe w kształcie wklęsłych czasz wy-

konane na wycinku żeliwnej tulei cylindrowej w Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. Na zdjęciach pokazano docelowy kształt zasobników, który uzyskiwany jest po usunięciu wyływek, w procesie honowania wykańczającego, po mikroobróbce laserowej (**Rys. 4c, d**).

Z uzyskanych wyników badań topografii powierzchni możemy określić głębokość oraz szerokość pojedynczego mikrozasobnika olejowego. Wynoszą one: głębokość ok. 0,012 mm, szerokość ok. 0,070 mm. Biorąc długość mikrozasobnika wynoszącą ok. 3 mm, możemy obliczyć objętość mikrofilmu olejowego, mogącą się w nim zgromadzić. Wynosi ona 0,00252 mm³. Biorąc pod uwagę, że rozpatrujemy skalę mikro, jest to wielkość bardzo duża i może mieć znaczący wpływ na warunki pracy skojarzenia T-P-C.



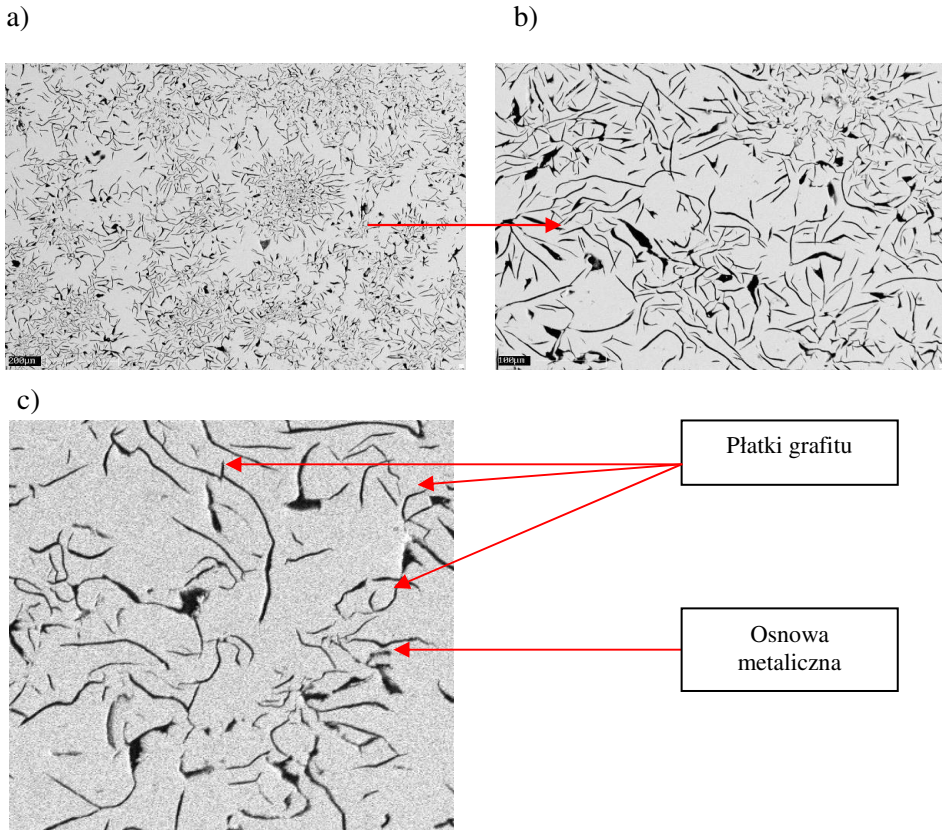
Rys. 6. Mikrozasobniki olejowe wykonane na gładzi żeliwnej tulei cylindrowej w Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej – odsłonięte płatki grafitu podczas mikroobróbki laserowej laserem Nd: YAG

Fig. 6. Oil micro-containers on the cast iron anvil face of cylinder brush manufactured in Optoelectronics Institute in the Military University of Technology – exposed graphite flakes during laser treatment of the grey cast iron with Nd:YAG laser

Badania mikrostruktury

Zamieszczone na **Rys. 7, 8** obrazy mikrostruktury żeliwa szarego tulei cylindrowej VOLVO wskazują na jej niejednorodność i znaczne zróżnicowanie w poszczególnych mikroobszarach. Obserwowano występowanie znacznej ilości drobnych wydzielań grafitu zwartego, czasami drobno-płytkowego, rozmieszczonego w sposób międzydendrytyczny lub rozetkowy. Wielkość wydzielań grafitu należy oceniać w przedziale

15÷30 μm , znaczna ilość wydzielań grafitu ma poniżej 15 μm . Można znaleźć również obszary o wielkości wydzielań w granicach 30÷60 μm .

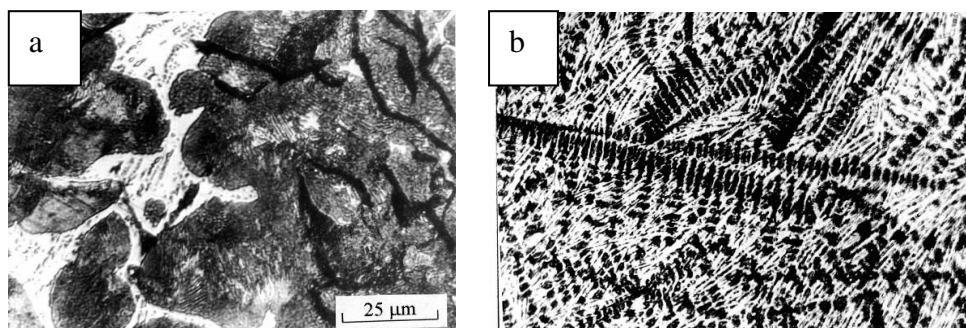


Rys. 7. Mikrostruktura tulei cylindrowej – żeliwo szare niskostopowe z charakterystycznym układem płatków grafitu

Fig 7. Characteristic system of the graphite flakes in gray cast iron with low content of alloying elements applied in cylinder brush production

Wyjściowa struktura badanego żeliwa szarego perlitycznego cechowała się bardzo wysoką dyspersją płytek ferrytu i cementytu w osnowie oraz znacznym rozdrobnieniem płatków grafitu. W strukturze występowała także duża ilość wydzielań eutektyki fosforowej tworzących, w związku z segregacją fosforu, formę budowy szkieletowej widocznej dobrze przy mniejszych powiększeniach. Badania struktury żeliwa po napromienieniu wiązką lasera pokazują, że w tych warunkach powstaje

strefa przetopiona i zahartowana, o głębokości nieprzekraczającej 0,7 mm. W strefie przetopionej powstaje bardzo dyspersyjna struktura ledeburytyczna. W pobliżu granicy ze strefą oddziaływania lasera można obserwować wyodrębnione obszary wysokowęglowego martenzytu płytowego, obok którego występuje duża ilość austenitu szczątkowego. Natomiast strefa laserowej obróbki cieplnej jest strefą niepełnej austenityzacji. Zachowują się w niej nierozpuszczone wydzielienia eutektyki fosforowej, jak też płatki grafitu. Powstający po austenityzacji osnowy żeliwa w tej strefie martenzyt cechuje się wysoką dyspersją.



Rys. 8. Lokalizacja stref powstałych w wyniku laserowej obróbki cieplnej żeliwa szarego (z przetopieniem): a – materiał wyjściowy (rdzeń); b – strefa przetopiona i zahartowana

Fig. 8. Placing of the areas obtained after grey cast iron laser treatment (with melting) a – starting material (core), b – melted and hardened area

Badania mikrotwardości

Badania mikrotwardości na powierzchni próbek, na których zostały wykonane mikrozasobniki olejowe obrazują wpływ mikroobróbki laserowej na stan warstwy wierzchniej badanych próbek. Badania zostały wykonane w kilku punktach: na powierzchni, na którą praca lasera nie miała wpływu oraz w odległościach od zasobników olejowych równych 15 i 30 μm . Badania przeprowadzano przy sile obciążającej równej 1 N. Pomiarów powtarzano kilkakrotnie dla każdego punktu pomiarowego.

Z uzyskanych wyników badań widać, że twardość zwiększa się drastycznie wraz ze zbliżaniem się do strefy oddziaływania wiązki laserowej osiągając 1210 HV_{0,1}. Jednocześnie można określić strefę wpływu ciepła wiązki laserowej. Wynosi ona ok. 30 μm , ponieważ po przekroczeniu tej odległości wartość twardości stabilizuje się na poziomie średnio 656 HV_{0,1}.

Tabela 2. Wyniki pomiarów mikrotwardości w strefie powierzchniowej od krawędzi mikrozasobnika (obszary przyciemnione określają strefę wpływu ciepła)

Table 2. Results of micro-hardness measurements in the surface area from microcontainers edge (darkened areas corresponds to the heat influence area)

Odległość od mikrozasobnika olejowego Δl			
15 μm	20 μm	30 μm	70 μm
1210 HV0,1	787 HV0,1	663 HV0,1	656HV0,1
100 μm	120 μm	150 μm	200 μm
648 HV0,1	478 HV0,1	327 HV0,1	273 HV0,1
250 μm	270 μm	300 μm	350 μm
268 HV0,1	262 HV0,1	271 HV0,1	273 HV0,1

WNIOSKI

Na podstawie wyników badań przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy można wysunąć następujące wnioski końcowe:

1. W wyniku analizy literatury, badań przeprowadzonych przez firmę GEHRING, jak również pracowników Wydziału Mechanicznego WAT stwierdzono, że wykonanie w newralgicznej strefie gładzi tulei cylindrowej (strefa pierścieniowa) systemu mikrozasobników olejowych z wykorzystaniem ablacyjnej mikroobróbki laserowej pozwala przypuszczać, że nastąpi poprawa warunków pracy silnika, obniżenie emisji szkodliwych związków chemicznych oraz zmniejszenie zużycia oleju smarującego.
2. 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).
3. Stosując ablacyjną mikroobróbkę laserową przy odpowiednio dobranych parametrach, możliwe jest wytworzenie na powierzchni tulei cylindrowej mikrozasobników olejowych o różnym kształcie i układzie, co pozwala na poprawienie warunków współpracy skojarzenia tłok–pierścienie tłokowe–tuleja cylindrowa poprzez wytworzenie mikrofilmu olejowego, który skutecznie rozdzieli elementy skojarzenia T-P-C, zwłaszcza w warunkach dużego obciążenia cieplnego. Pozwoli to na znaczne zmniejszenie zużycia tribologicznego współpracujących elementów.

4. Mikroobróbka laserowa zapewnia bardzo małą strefę wpływu ciepła, tj. ok. 30 μm przy wytwarzaniu mikrokanałów i mikrokomór olejowych. W strefie przetopienia w wyniku szybkiej krystalizacji uzyskano żeliwo białe (ledeburyt) o mikrotwardości ok. 1200 HV_{0,1}. Poniżej tej strefy występuje strefa zahartowana (martenzyt). Tak mała strefa wpływu ciepła pozwala na uniknięcie znacznych deformacji oraz w niewielkim stopniu zmianę naprężeń własnych.

LITERATURA

1. Włodarski J. K.: Tłokowe silniki spalinowe – procesy tribologiczne, WKŁ, Warszawa 1982.
2. www.gehring.de
3. Klink U.: Laserowe honowanie gładzi cylindrów, Sympozjum Naukowo-Techniczne pt. „Technika laserowa w inżynierii powierzchni materiałów”, WAT, Warszawa 1997, s. 55–59.
4. Kozaczewski W.: Nowe metody obróbki gładzi cylindrów, Mechanika z. 6-m/2004, Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, KONMOT- AUTOPROGRES 2004, Silniki Spalinowe t. 1, Kraków 2004, s. 383–394.
5. MAHLE Recommendation for the Specification of Cast Iron Cylinder Bore Surface, Informacja Techniczna MAHLE GmbH.
6. 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, s. 582–592.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2007–2010 jako projekt badawczy rozwojowy R15-0025-04/2008.

Recenzent:
Bogdan ANTOSZEWSKI

Summary

Results of preliminary laboratory and technology tests of cast iron after laser modification are presented in the paper. In order to improve macro- and micro-geometry of the upper layer of cylinder

sliding surface, a laser processing has been used for its modification (hollowing of oil micro-reservoirs in the upper zone of the sleeve using Nd:YAG laser with a special focusing system). A comparison of surface topographies modified using traditional mechanical methods with laser processed ones was made. Preliminary tests included a selection of optimum parameters of laser processing, investigations of surface topography, structural, hardness, and chemical composition in micro-volumes.