

**Wojciech NAPADŁEK**

Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, Wydział Mechaniczny,  
Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa

**MIKROOBRÓBKA LASEROWA WARSTWY  
WIERZCHNIEJ TULEI CYLINDROWEJ  
W ASPEKCIE TRIBOLOGICZNYM****Słowa kluczowe**

Ablacja laserowa, stal 41CrAlMo7, tuleja cylindrowa, warstwa wierzchnia, mikroobróbka laserowa, tribologia.

**Streszczenie**

W pracy przedstawiono wyniki wstępnych badań laboratoryjnych oraz technologicznych przeprowadzonych na stali 41CrAlMo7 przeznaczonej do azotowania, poddanej modyfikacji laserowej. Stal ta stosowana jest do produkcji tulei cylindrowych silników spalinowych dużej mocy. Do modyfikacji warstwy wierzchniej gładzi cylindrów wykorzystano ablacyjną mikroobróbkę laserową, mającą na celu poprawę jej makro- i mikrogeometrii (oczyszczanie powierzchni i 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. Przy dobranych parametrach ablacyjnej mikroobróbki laserowej uzyskano powtarzalne tekstury geometryczne mikrozasobników oleju.

**Wprowadzenie**

W wielu aplikacjach w przypadku ograniczonego smarowania pary tribologicznej pojawia się wysokie tarcie pomiędzy współpracującymi powierzchnia-

mi. Wydajność systemu tribologicznego można poprawić poprzez wprowadzenie odpowiedniej topografii współpracujących powierzchni. Do procesów teksturowania powierzchni roboczych elementów maszyn mogą być zastosowane m.in. metody: mechaniczne (polerowanie, docieranie, szlifowanie, obróbka ultradźwiękowa) oraz wiązkowe (laserowa, elektronowa itp.). Teksturowanie za pomocą ukształtowanej wiązki laserowej budzi duże zainteresowanie, ponieważ pozwala ono na wytwarzanie topografii powierzchni na niemal wszystkich materiałach, w tym: metalach, ceramice, szkłe i kompozytach itp. Siły tarcia jak i zużycie pary tribologicznej można zmniejszyć, wprowadzając selektywnie mikrostrefy na powierzchniach współpracującej pary tribologicznej. Z jednej strony wytworzone mikrostrefy powinny działać jak pułapki na cząstki ściernie, z drugiej strony powinny one zapewnić dostawę czynnika smarnego, działając jako zbiorniki płynu smarującego. Wytworzona laserowo mikrostruktura może pozytywnie wpływać na powstawanie hydrodynamicznego filmu olejowego [1–4].

## 1. Metodyka badań

W ramach badań wstępnych podjęto próbę kształtowania specyficznej topografii powierzchni tulei cylindrowej silnika spalinowego z wykorzystaniem ablacyjnej mikroobróbki laserowej. Obiektem badań była tuleja cylindrowa wykonana ze stali stopowej 41CrAlMo7 ulepszonej cieplnie, poddanej procesowi azotowania gazowego. Tuleje te stosowane są w silnikach spalinowych dużej mocy. Modyfikacja laserowa polegała na wytworzeniu tzw. mikrozasobników olejowych w górnej strefie (tzw. strefie pierścieniowej) stalowej tulei cylindrowej. Do wytwarzania mikrozasobników olejowych zastosowano laser Nd: YAG ( $\lambda = 1064$  nm) ze specjalnym systemem ogniskowania (głowica Galvo).

Na pierwszym etapie procesu produkcyjnego warstwa wierzchnia gładzi tulei cylindrowej została poddana procesowi obróbki mechanicznej, tj. wytaczaniu oraz honowaniu wstępnemu. Tak przygotowaną tuleję poddano procesowi azotowania gazowego oraz ablacyjnej mikroobróbce laserowej w zakresie laserowego teksturowania powierzchni oraz oczyszczania ablacyjnego, jako końcowy proces technologiczny. W ramach badań dokonano doboru parametrów technologicznych mikroobróbki laserowej dla różnych gęstości mocy promieniowania emitowanego przez laser Nd: YAG ( $\lambda = 1064$  nm) oraz różnych prędkości skanowania.

## 2. Wyniki badań wstępnych

Badania wstępne przeprowadzono na próbkach oraz rzeczywistych tulejach cylindrowych. Wyjściową mikrostrukturę stali 41CrAlMo7 po ulepszeniu cieplnym stanowił bainit o wysokim stopniu dyspersji. Twardość w strefie rdze-

nia materiału wynosiła 35 HRC. Wytworzona w procesie azotowania gazowego warstwa azotowana składała się ze strefy dyfuzyjnej o grubości  $g_{r+50} = 0,3$  mm oraz warstwy azotków żelaza na powierzchni o grubości  $g_{mp} = 2$   $\mu\text{m}$ . W wyniku wykańczającej obróbki mechanicznej (honowanie wstępne) całkowicie usunięto strefę azotków żelaza. W efekcie końcowym grubość warstwy azotowanej wynosiła ok. 0,3 mm. W górnej strefie współpracy gładzi cylindra z pierścieniami tłokowymi wykonano mikrozasobniki olejowe, wykorzystując nowoczesną technologię ablacyjnej mikroobróbki laserowej, w której zastosowano laser Nd: YAG –  $\lambda = 1064$  nm,  $\tau = 100$  ns, częstotliwość repetycji 3 kHz.

### 3. Ablacyjne oczyszczanie laserowe gładzi tulei cylindrowej

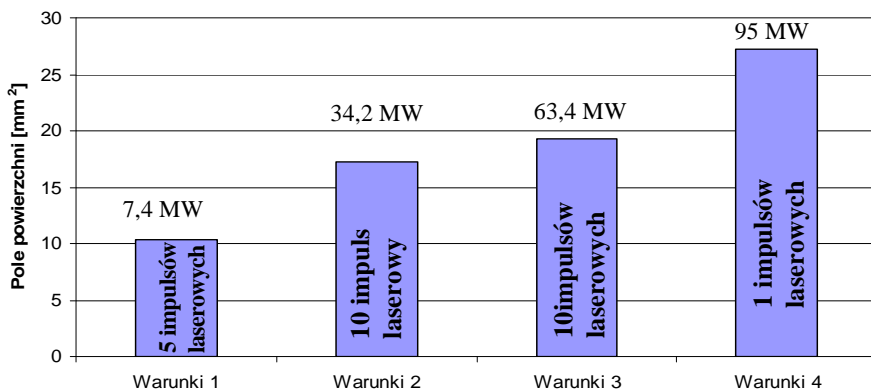
Badania zostały przeprowadzone dla przedstawionych w tabeli 1 warunków pracy lasera Nd:YAG oraz dla różnej ilości impulsów modyfikujących powierzchnię tulei cylindrowych.

Z przeprowadzonej analizy pól powierzchni oczyszczonych metodą mikroobróbki laserowej wynika, że najlepszymi warunkami pracy są warunki nr 4 (rys. 1). Wykorzystując te parametry, możemy oczyścić pole powierzchni równe ok. 27,2 mm<sup>2</sup>. Jest to wartość prawie trzykrotnie większa niż dla warunków nr 1 – 10,4 mm<sup>2</sup>. Dla warunków nr 2 i nr 3 pola powierzchni wyniosły odpowiednio: 17,2 mm<sup>2</sup> i 19,3 mm<sup>2</sup>. Wielkość pola powierzchni oczyszczonej ma duże znaczenie, jeżeli bierzemy pod uwagę aspekty ekonomiczne mikroobróbki laserowej. Im pole powierzchni mikroobróbki laserowej większe, tym większa jest szybkość całkowita obróbki, a zatem maleją też koszty procesu.

Tab. 1. Warunki pracy lasera Nd:YAG

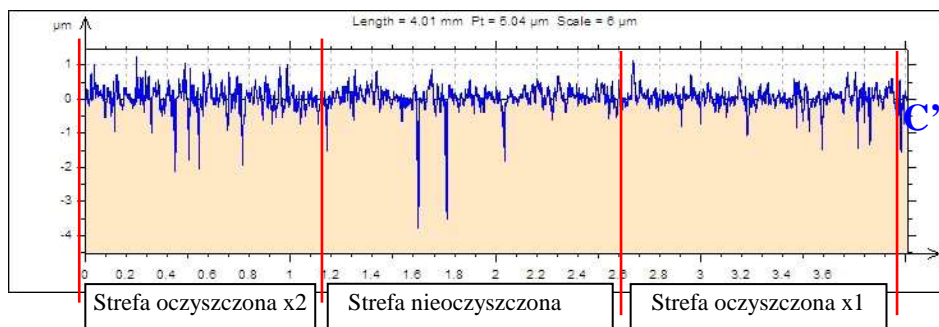
Lp.	Moc impulsu $P_{imp}$ [MW]	Gęstość mocy promieniowania $q$ [MW/cm <sup>2</sup> ]
Warunki nr 1	7,4	14,7
Warunki nr 2	34,2	68,1
Warunki nr 3	63,4	126,3
Warunki nr 4	95,0	189,2

Analizując uzyskane wyniki badań topografii powierzchni oczyszczonej wiązką lasera przy zastosowanych parametrach jak w wariancie 4 (tab. 1, rys. 1), można stwierdzić, że z powierzchni badanej próbki została usunięta warstwa tlenków, tłuszczów i innych zanieczyszczeń organicznych o grubości ok. 1–2  $\mu\text{m}$  (rys. 2).



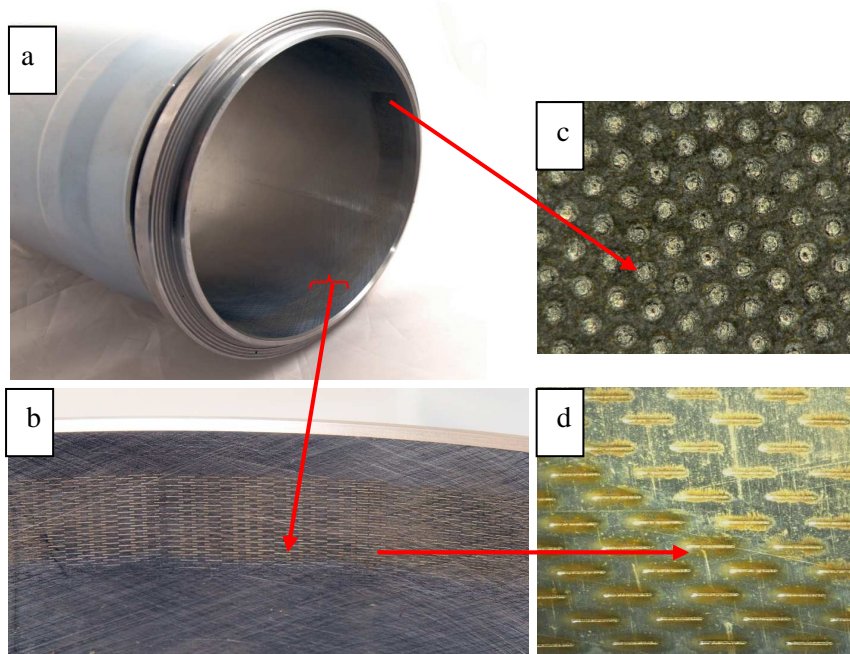
Rys. 1. Wpływ warunków mikroobróbki laserowej na pole powierzchni oczyszczonej gładzi tulei cylindrowej

Na profilogramie chropowatości 2D wykonanym na gładzi stalowej tulei cylindrowej oczyszczonej laserowo jedno- oraz dwukrotnie przy dobranych parametrach (wariant 4 z tab. 1) można zauważyć wyraźnie wzrost chropowatości, spowodowanej nadtopieniami powierzchni przy dwukrotnym oczyszczaniu. Między strefą oczyszczoną jednokrotnie oraz strefą nieczyszczoną laserowo nie zaobserwowano większych różnic w chropowatości powierzchni. Uzyskanie większej chropowatości po oczyszczaniu laserowym może być korzystne, ponieważ mikronierówności tworzą „naturalne” zasobniki oleju na powierzchni tulei cylindrowej.



Rys. 2. Profilogram chropowatości 2D wycinka stalowej tulei cylindrowej po oczyszczaniu laserowym: A – strefa oczyszczona jednokrotnie, B – strefa oczyszczona dwukrotnie

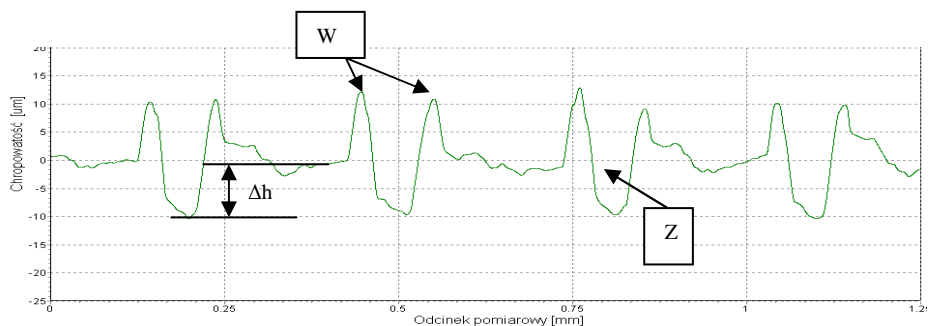
Mikroobróbka laserowa tulei cylindrowej dotyczy strefy pierścieniowej, tj. strefy współpracy pierścieni tłokowych z gładzią cylindra przy górnym martwym położeniu tłoka (GMP). Wstępny dobór parametrów mikroobróbki laserowej przeprowadzono na próbkach wykonanych ze stali 41CrAlMo7, ulepszonej cieplnie oraz wycinkach z rzeczywistej tulei cylindrowej wykonanej z ww. stali ulepszonej cieplnie oraz azotowanej gazowo. Po dobraniu najlepszych parametrów mikroobróbki laserowej wykonano modyfikację laserową na rzeczywistym obiekcie badań, tj. tulei cylindrowej. Wykorzystując nowoczesną optykę laserową, wytworzono dwa charakterystyczne układy mikrozasobników oleju, tj. mikrozaszce (rys. 3a, c) oraz mikrokanaly (rys. 3b, d).



Rys. 3. Efekty teksturowania laserowego górnej strefy gładzi tulei cylindrowej: a) widok tulei cylindrowej z wytworzonymi zasobnikami olejowymi; b, c, d) widok tekstury gładzi tulei zmodyfikowanej laserowo

Charakterystyczny profil chropowatości powierzchni  $R_a$  gładzi tulei cylindrowej po teksturowaniu laserowym przedstawiono na rys. 4.

Głębokość mikrozasobników olejowych wynosi średnio  $10 \mu\text{m}$ , a wysokość wypływek powstałych w procesie ablacyjnej mikroobróbki laserowej (teksturowania powierzchni) wynosi średnio ok.  $10 \mu\text{m}$ .



Rys. 4. Profil chropowatości  $R_a$  tutei stalowej 41CrAlMo7 po teksturowaniu laserowym w wariancie 25% przykrycia powierzchni: W – wypływka, Z – zasobnik,  $\Delta h$  – głębokość zasobnika

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono propozycję hybrydowej metody obróbki powierzchniowej zwiększającej trwałość tutei cylindrycznych wykonanej ze stali 41CrAlMo7. Zaproponowana metoda hybrydowa obejmuje procesy: azotowanie gazowe, mechaniczną obróbkę ścierną (honowanie) oraz mikroobróbkę laserową.

Z wykorzystaniem mikroobróbki laserowej opracowano parametry technologiczne wytwarzania mikrozasobników olejowych o różnym kształcie i objętości na powierzchni elementów ze stali 41CrAlMo7.

1. W wyniku laboratoryjnych badań przeprowadzonych na próbkach oraz wycinkach z rzeczywistej tutei cylindrycznej wykonanej ze stali 41CrAlMo7, uzyskano korzystne parametry geometryczne zasobników olejowych dla dwóch wariantów przykrycia powierzchni, tj. 25% i 50%: głębokość mikrozasobników olejowych wynosiła średnio ok. 10  $\mu\text{m}$ , średnica zasobników mierzona na powierzchni – 70÷80  $\mu\text{m}$ , wysokość wypływek – ok. 10  $\mu\text{m}$ , mikrotwardość w strefie wypływki – ok. 1300 HV0,1.
2. W drugim wariancie teksturowania laserowego optymalnym wydaje się wytworzenie mikrokanalów olejowych o długości ok. 1 mm, głębokości ok. 7 ÷ 12  $\mu\text{m}$  i szerokości 70  $\mu\text{m}$ . Zaproponowany wariant przykrycia warstwy wierzchniej zasobnikami 25% wydaje się optymalny w zastosowaniach technologicznych dla tutei cylindrycznej silnika.
3. Proponowany wariant obróbki hybrydowej to azotowanie (np. gazowe, gazowe regulowane, jarzeniowe) + mikroobróbka laserowa w zakresie oczyszczenia oraz wytwarzania mikrozasobników olejowych (półczaszki kuliste, mikrokanaly).
4. Aby zweryfikować przydatność wytworzonych tekstur powierzchniowych (układów geometrycznych zasobników), w najbliższym czasie zostanie prze-

prowadzony cykl badań tribologicznych w warunkach laboratoryjnych oraz na rzeczywistych elementach silnika z wytworzonymi zasobnikami olejowymi w konwencjonalnej próbie hamownianej lub w próbie tzw. „zimnych rozruchów.

### **Bibliografia**

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.: Analysis of possibilities for laser processing of upper layer topography shaping of steel glow nitrided cylinder sleeves. Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 13, No. 4/2006.
3. Napadłek W.: Zastosowanie ablacji laserowej dla zwiększenia trwałości tribologicznej elementów skojarzenia T-P-C silnika spalinowego. 13TH International Conference Computer Systems Aided Science, Industry And Transport „Transcomp 2009”, Radom 2009.
4. Napadłek W.: Zwiększenie odporności tribologicznej warstwy wierzchniej żeliwnych tulei cylindrowych z wykorzystaniem ablacji laserowej. Tribologia ISSN 0208-7774 Nr 5/2009, s. 147–159.

Recenzent:  
**Jerzy SMOLIK**

### **Laser micromachining the cylinder liner surface layer in the tribological aspect**

#### **Key words**

Laser ablation, steel 41CrAlMo7, cylinder liner, surface layer, laser micromachining, tribology.

#### **Summary**

The paper presents preliminary results of laboratory tests and technology carried out on steel nitriding 41CrAlMo7 intended to modify the laser-treated. This steel is used to production cylinder liners for internal combustion engines high power. To modify the surface layer cylinder walls used ablative laser micromachining, aimed at improving its macro-and microgeometry (surface cleaning and micrdrilling oil micro-cointainers in the upper sleeve area with Nd:

YAG laser with a special focusing system). Comparative research has been subjected to surface topography formed by conventional machining and modified by laser micromachining. By selected parameters of laser ablation micromachining obtained regular geometric texture oil micro- container.