

Tadeusz BURAKOWSKI<sup>1</sup>  
Wojciech NAPADŁEK<sup>2</sup>  
Adam WOŹNIAK<sup>2</sup>

## **ABLACYJNE TEKSTUROWANIE LASEROWE CZOPÓW WAŁKA ROZRZĄDU SILNIKA SPALINOWEGO**

W artykule przedstawiono metodykę i wyniki badań teksturowania laserowego warstwy wierzchniej czopów wałka rozrządu tłokowego silnika spalinowego, wykonanego ze stali stopowej 41Cr4. Obróbkę laserową przeprowadzono za pomocą lasera Nd: YAG o długości fali promieniowania laserowego  $\lambda=1064\text{nm}$ . Zastosowanie ablacyjnej mikroobróbki laserowej w newralgicznych strefach wałka rozrządu miało na celu wytworzenie odpowiedniej, punktowej tekstury powierzchni z mikrozasobnikami olejowymi w kształcie półczasz kulistych. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów uzyskano bardzo regularną teksturę powierzchni, co prawdopodobnie korzystnie wpłynie na procesy tribologiczne i zmniejszenie zużycia skojarzenia czop wałka rozrządu – łożysko ślizgowe.

### **1. TECHNOLOGIA ABLACYJNEJ MIKROOBRÓBKII LASEROWEJ**

Technologia ablacyjnej mikroobróbki laserowej umożliwia wytworzenie na elementach silnika zmodyfikowanych mikro- i nanostruktur w warstwie wierzchniej, poprzez oddziaływanie plazmy laserowej i wysokiego ciśnienia. Szybkozmiennne impulsy laserowe o częstotliwości repetycji np. od 1 do 500kHz, wymuszają proces ablacji laserowej, rozdrobnienie mikrostruktury oraz ultraszybkie przemiany fazowe, nie osiągalne innymi technologiami. Wyniki badań wskazują, że w warstwie wierzchniej mogą zostać wytworzone cienkie mikrowarstwy amorficzne (szkliste) o bardzo wysokich walorach technologicznych, nieosiągalne dla innych nowoczesnych technologii stosowanych w inżynierii powierzchni. Procesy modyfikacji laserowej wpływają nie tylko jakościowo na mikrostrukturę, ale także pozwalają na precyzyjne kształtowanie mikrozasobników smarowych w newralgicznych strefach węzłów tribologicznych, występujących w elementach maszyn [1],[2], w tym również w silnikach spalinowych [3-11].

<sup>1</sup> Politechnika Koszalińska, Instytutu Mechatroniki, Nanotechnologii i Techniki Próżniowej, ul. Raclawicka 15-17, 75 - 620 Koszalin, e-mail: wach@imp.edu.pl

<sup>2</sup> Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49, tel.: (0-22) 683-73-57, e-mail: wnapadlek@wat.edu.pl, awozniak@wat.edu.pl

Ablacyjne teksturowanie laserowe może być stosowane przed obróbką mechaniczną półwykańczającą (np. przed szlifowaniem) lub przed ostateczną obróbką wykańczającą, np. przed polerowaniem.

Jedną z zalet tej technologii jest bardzo mała strefa wpływu ciepła, a zatem mały wpływ obróbki na deformację elementu maszyny, a tym samym na jego naprężenia własne. Również układ mikrotekstur, tj. mikrozasobników smarowych wytworzonych na powierzchni wybranych elementów maszyn jest bardzo istotny, ponieważ wpływa decydująco na jakość i intensywność procesów tribologicznych występujących w newralgicznych węzłach tarcia.

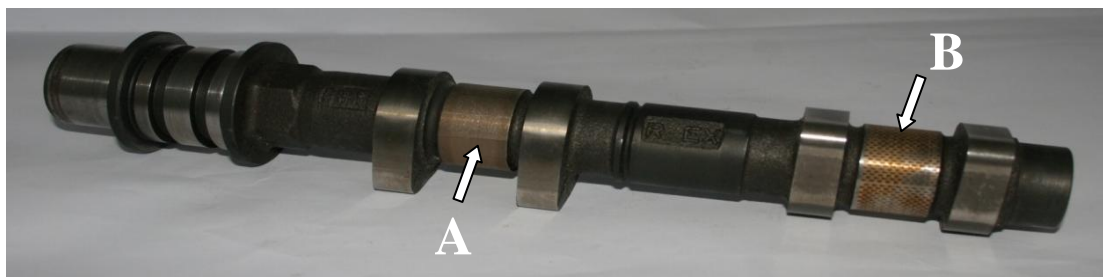
Zastosowanie technologii ablacyjnej mikroobróbki laserowej w newralgicznych strefach węzłów tarcia pozwala na gromadzenie środka smarnego (np. oleju silnikowego), skuteczniejsze rozdzielanie par trących, a tym samym istotne zmniejszenie sił tarcia, zwiększenie trwałości i niezawodności wielu elementów maszyn oraz na zwiększenie ich sprawności technicznej. Zastosowanie tej technologii w wielu węzłach tarcia występujących w silniku spalinowym wydaje się być racjonalne i celowe, dlatego też autorzy artykułu od wielu lat stosują tą technologię z dużym powodzeniem, zarówno w badaniach stosowanych jak również w aplikacjach technologicznych, do wdrożeń przemysłowych włącznie. W ostatnim okresie w ramach realizowanych przez autorów projektów badawczych [9],[10] uzyskano obiecujące wyniki technologiczne dla elementów silnika spalinowego pracujących w ruchu posuwisto-zwrotnym, np. tłoki, pierścienie tłokowe, zawory, popychacze. Aktualnie, w ramach realizowanego projektu badawczego, modyfikacji laserowej poddawane są elementy węzłów pracujących w ruchu obrotowym, tj. skojarzenia czopów wałów korbowych i rozrządu - łożyska ślizgowe [11]. Elementy te pracują przy dużych i zmiennych obciążeniach, co powoduje przyspieszone zużywanie się par tribologicznych. Aby zmniejszyć intensywność zużywania się czopów wałka rozrządu oraz współpracujących z nimi łożysk ślizgowych, autorzy zaproponowali zastosowanie ablacyjnego teksturowania w strefie powierzchniowej czopów wałka rozrządu silnika spalinowego. Wyniki badań wstępnych przedstawiono w dalszej części artykułu.

## 2. OBIEKT I METODYKA BADAŃ

Obiektem ablacyjnego teksturowania laserowego oraz badań laboratoryjnych były czopy wałka rozrządu silnika spalinowego SUBARU BOXER 2,5 DOHC, który został wykonany ze stali konstrukcyjnej wyższej jakości do ulepszenia cieplnego 41Cr4 (rys. 1).

W celu uzyskania dużej efektywności procesu wytwarzania mikrozasobników smarowych, uwzględniono wcześniejsze wyniki badań własnych. Aby warstwa wierzchnia (WW) po teksturowaniu laserowym cechowała się dużą odpornością na zużycie w warunkach tarcia, korzystne wydaje się wytworzenie zasobników olejowych o głębokości  $5\div 15\mu\text{m}$ , tj. z minimalnym naddatkiem na obróbkę mechaniczną wykańczającą, która usuwa powstałe wypłyvky przyległe do zasobników.

Aby uzyskać założony kształt geometryczny mikrozasobników smarowych na podstawie analizy dostępnej literatury oraz wcześniejszych badań własnych, założono dwa rodzaje ww. mikrozasobników, tj. w kształcie mikroczasz oraz mikrokanalów. W badaniach

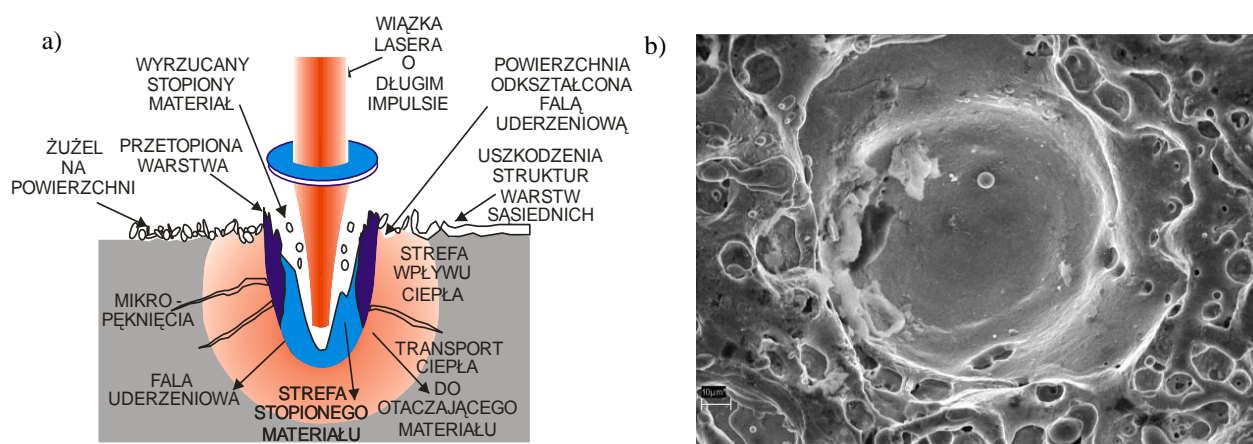


Rys. 1. Wałek rozrządu silnika spalinowego SUBARU BOXER 2,5 DOHC z czopami (A, B) teksturowanymi laserowo  
Fig. 1. The camshaft of the SUBARU BOXER engine 2.5 DOHC with pin (A, B) laser-textured

laboratoryjnych, realizowanych w Wojskowej Akademii Technicznej zastosowano lasery: Nd:YAG i Nb:YAG iterbowy, włóknowy o długości fali promieniowania  $\lambda = 1064\text{nm}$  oraz laser Nd: YAG pompowany diodowo o  $\lambda = 532\text{nm}$ . Z dotychczasowych doświadczeń autorów tej pracy wynika, że aby wystąpiło zjawisko tzw. „zimnej ablacji” należy zastosować bardzo dużą gęstość mocy (MW/GW) oraz bardzo krótki czas naświetlania (ekspozycji promieniowania), np. piko- lub femtosekundowy. W takich warunkach, warstwa wierzchnia modyfikowanego materiału konstrukcyjnego w wyniku naświetlania kwantami promieniowania laserowego, praktycznie przechodzi w stan pary (zjawisko sublimacji). Stosując bardzo dużą gęstość mocy oraz dłuższy czas naświetlania promieniowaniem laserowym warstwy wierzchniej wybranego materiału konstrukcyjnego, np. od pojedynczych nanosekund do milisekund, nie uzyska się „zimnej ablacji”, lecz „ablację z efektem termicznym”. W tym procesie w wyniku oddziaływania promieniowania laserowego następuje zjawisko absorpcji, następnie powstaje plazma laserowa z jednoczesnym nagrzewaniem materiału, potem jego topnienie i częściowe odparowanie. Generowana jest także fala ciśnienia, która powoduje m.in. ekstruzję ciekłego materiału wokół wytwarzanego mikrozasobnika smarowego (rys. 2).

W procesie doboru parametrów do ablacyjnego teksturowania laserowego WW modyfikowanego materiału konstrukcyjnego należy właściwie dobrać: rodzaj oraz gęstość mocy promieniowania, kształt impulsu, modowość wiązki, czas ekspozycji promieniowania, odpowiednią częstotliwość repetycji oraz stereometrię teksturowania, czyli stopień przykrycia powierzchni przez impulsy laserowe lub wiązkę o działaniu ciągłym.

Projektując proces technologiczny ablacyjnego teksturowania laserowego należy jednoznacznie założyć, czy proces ten ma być ostateczny, czy też nastąpi po nim powierzchniowa obróbka wykańczająca, np. szlifowanie, polerowanie. Jeśli zakładamy wariant pierwszy, to powinniśmy zastosować bardzo nowoczesne lasery np. ekscimerowe piko- lub femtosekundowe z bardzo nowoczesną i precyzyjną optyką Galvo. W opisywanym procesie nie powinny występować mikrowypływkę wokół wytworzonych mikrozasobników. Jeśli zastosujemy pierwszą harmoniczną impulsowego promieniowania laserowego  $\lambda = 1064\text{nm}$  oraz dłuższy czas naświetlania np. od kilku do kilkudziesięciu i więcej nanosekund, to niestety praktycznie zawsze wystąpi wokół mikrozasobnika również mikrowypływka. Jej wysokość może wynosić od kilku dziesiątych do nawet kilkudziesięciu i więcej mikrometrów.



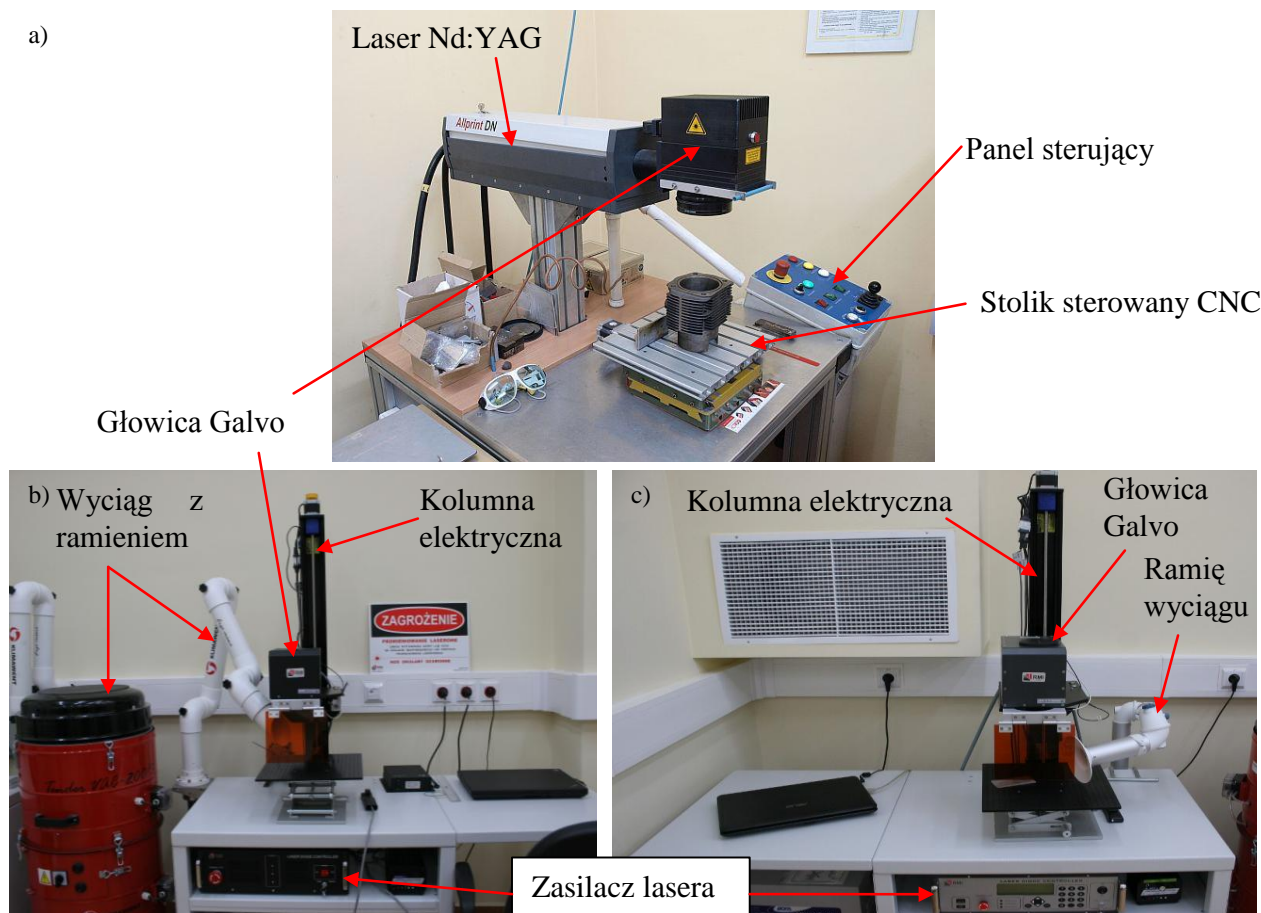
Rys. 2. Ablacyjna mikroobróbka materiału za pomocą długich impulsów laserowych ( $10^{-6} \div 10^{-8}$ s): a) schemat poglądowy, b) wyniki badań własnych – wykonywanie mikrozasobników olejowych w tulei cylindrowej (stal 41CrAlMo7 azotowana jarzeniowo) [3]

Fig. 2. Laser ablation micro-treatment of material by using long laser impulses ( $10^{-6} \div 10^{-8}$ s): a) demonstrative scheme, b) results of our investigations – making of oil micromagnets in cylinder liner (41CrAlMo7 steel after glow discharge nitriding) [3]

Projektując proces technologiczny wytwarzania wałka rozrządu z wykorzystaniem modyfikacji laserowej na powierzchni czopów należy tak dobrać parametry procesu ablacyjnego tekstuowania laserowego, aby w procesie powierzchniowej obróbki wykańczającej przez szlifowanie lub polerowanie usunąć powstałe mikrowypłytki, pozostawiając jednocześnie właściwy kształt geometryczny (głębokość, szerokość) mikrozasobnika smarowego. W wariantcie pierwszym mikroobróbki możliwe jest wytworzenie głębszych mikrozasobników, a więc w zakresie od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów, co pozwala na zastosowanie szlifowania wykańczającego. Stosując mniejszą długość fali promieniowania, np. druga harmoniczna, tj.  $\lambda = 532\text{nm}$ , efektywność procesów tekstowania laserowego materiałów konstrukcyjnych obniża się. Oddziaływanie promieniowania laserowego w tym wariantcie występuje tylko w strefie przypowierzchniowej na bardzo małej głębokości, w zakresie od setnych części mikrometra do pojedynczych mikrometrów. Tak więc zastosowanie drugiego wariantu byłoby możliwe także przed zastosowaniem obróbki powierzchniowej wykańczającej. Aby usunąć powstałe w procesie ablacji laserowej niewielkie mikrowypłytki należy zastosować polerowanie wykańczające.

### 3. STANOWISKA DO ABLACYJNEJ MIKROOBRÓBKII LASEROWEJ

Ablacyjna mikroobróbka laserowa warstwy wierzchniej stali 41Cr4 została przeprowadzona w dwóch etapach, tj. na próbkach oraz na rzeczywistych czopach wałka rozrządu silnika spalinowego. Wykorzystując laser Nd:YAG starszej generacji przeznaczony do tekstowania (rys. 3a) oraz nowoczesne wcześniej wymienione lasery (rys. 3b, 3c) przeprowadzono wstępny dobór parametrów obróbki.



Rys. 3. Stanowiska wykorzystywane w procesach ablacyjnego teksturowania laserowego:

- a) stanowisko wyposażone w laser Nd:YAG z głowicą Galvo o długości fali promieniowania  $\lambda=1064\text{nm}$ ,
- b) stanowisko wyposażone w laser iterbowy, włóknowy z głowicą Galvo o długości fali promieniowania  $\lambda=1064\text{nm}$ ,
- c) stanowisko wyposażone w laser diodowy o długości fali promieniowania  $\lambda=532\text{nm}$

Fig. 3. Positions used in the processes of ablative laser texturing:

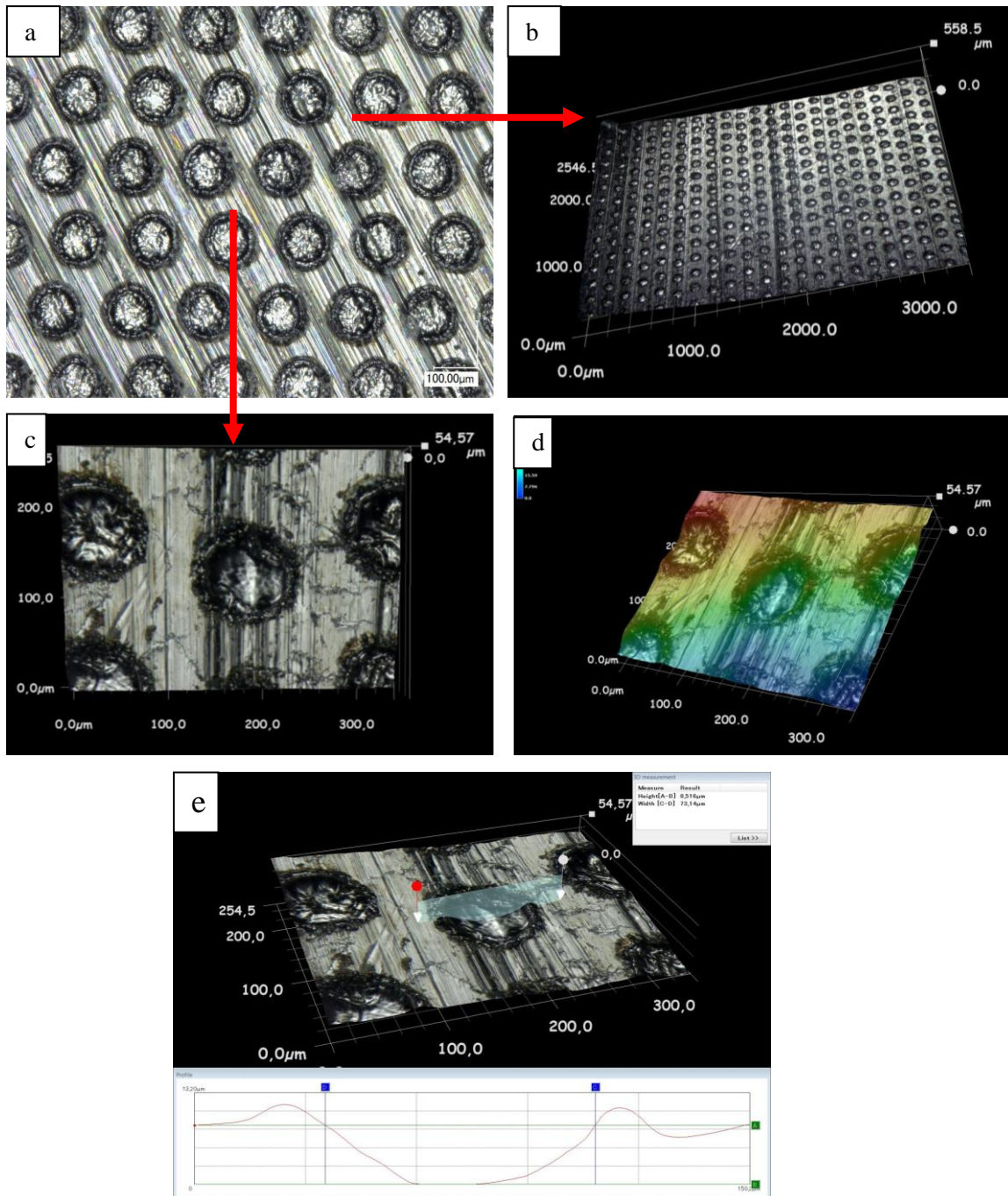
- a) position with Nd:YAG laser with Galvo head with the wavelength  $\lambda = 1064\text{nm}$ , b) position with ytterbium fiber laser with Galvo head with the wavelength  $\lambda = 1064\text{nm}$ , c) position with a diode laser with the wavelength  $\lambda = 532\text{nm}$

#### 4. WYNIKI BADAŃ

Realizując teksturowanie laserowe w strefie powierzchni roboczej czopów wałka rozrządu (rys. 1) oczekuje się poprawy warunków smarowania w strefie współpracy z łożyskiem ślizgowym. Wytworzony w strefie mikrozasobników smarowych film olejowy ma na celu utrzymanie smarowania płynnego, co pozwoli skutecznie rozdzielić współpracujące elementy pary tribologicznej czop – łożysko ślizgowe. Mikrowypływkę powstałe w wyniku ablacji laserowej oraz ekstruzji ciekłego materiału wałka rozrządu należy usunąć przez szlifowanie lub dla bardzo małych wypływek poprzez polerowanie.

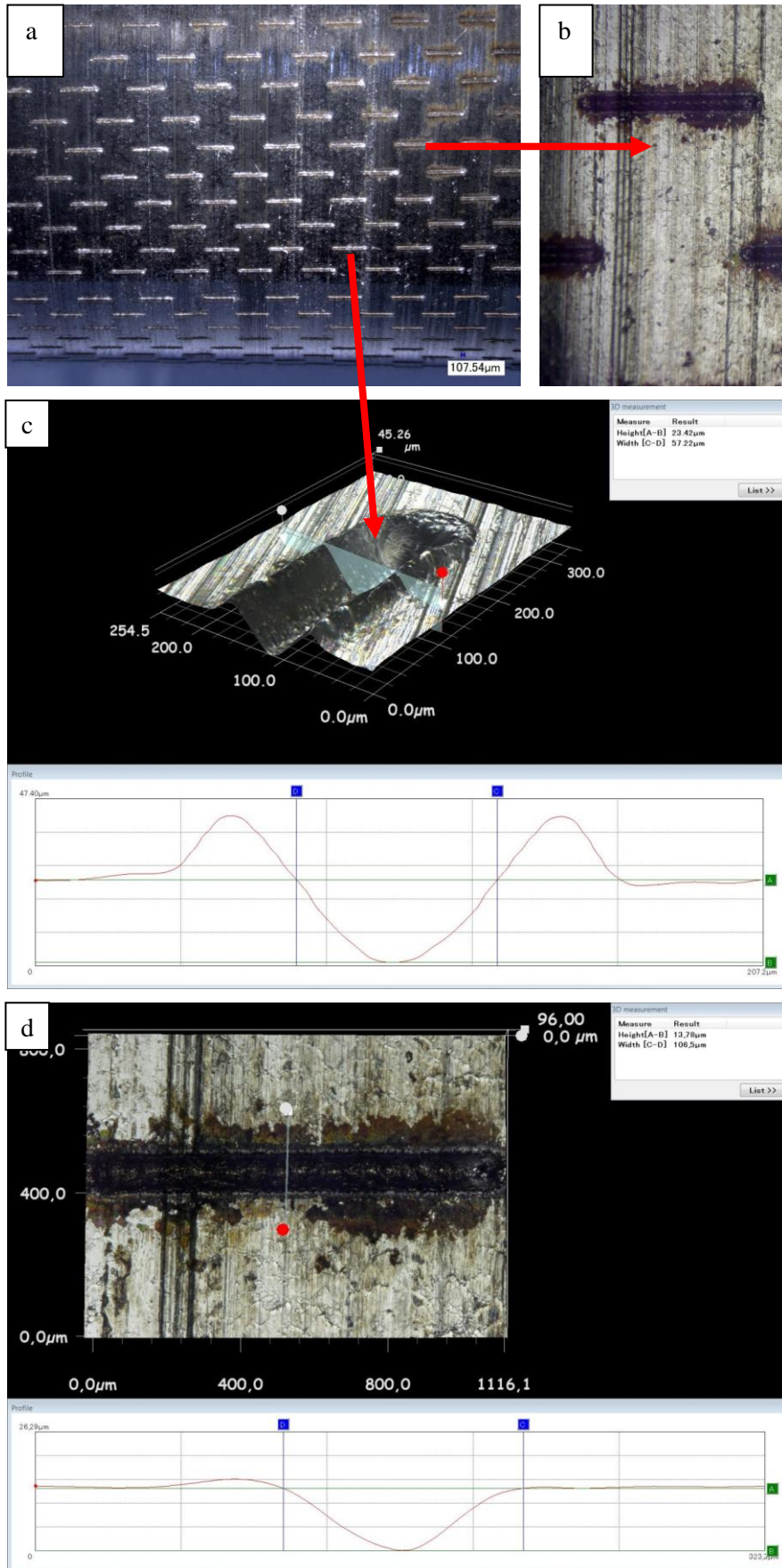
Ze względu na ograniczoną objętość artykułu przedstawiono tylko wybrane wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzone przy wykorzystaniu lasera Nd:YAG. Zastosowane w badaniach dwa warianty mikroobróbki laserowej pozwoliły na wytworzenie

mikrozasobników smarowych w kształcie mikrozasz (rys. 4) oraz mikrokanalów (rys. 5). Uzyskane efekty technologiczne należy uznać za pozytywne. Wysokość powstałych mikrowypływek wokół zasobników wynosiła od kilku do kilkunastu mikrometrów, co wymusza stosowanie powierzchniowej obróbki mechanicznej, np. szlifowania.



Rys. 4. Charakterystyczne układy geometryczne mikrozasobników olejowych w kształcie czasz wytworzonych na powierzchni roboczej sworznia z wykorzystaniem ablacyjnej mikroobróbki laserowej: laser Nd:YAG, długość fali promieniowania  $\lambda=1064\text{nm}$

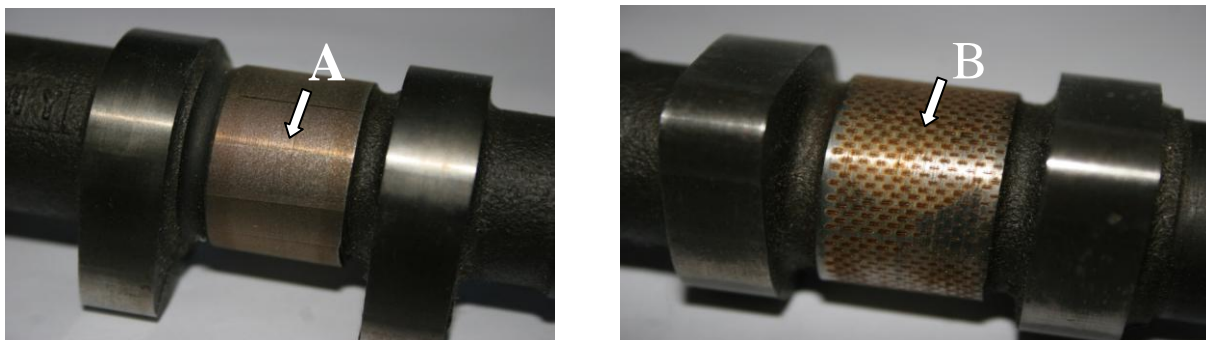
Fig. 4. The characteristic geometric layouts of oil microtrays produced in the shape of the bowls on the work surface using a pin ablation micromachining: Nd:YAG laser, wavelength  $\lambda = 1064\text{nm}$



Rys. 5. Charakterystyczne układy geometryczne mikrozasobników olejowych w kształcie rowków wytworzonych na powierzchni roboczej czopa wałka rozrządu: laser Nd:YAG, długość fali promieniowania  $\lambda=1064\text{nm}$

Fig. 5. The characteristic geometric layouts of oil microtrays in the shape of the grooves formed on the surface of the camshaft journal work: Nd:YAG laser, wavelength  $\lambda = 1064\text{nm}$

Dobre parametry technologiczne mikroobróbki laserowej zastosowano na rzeczywistych czopach wałka rozrządu (rys. 6).



Rys. 6. Widok wałka rozrządu silnika Subaru BOXER 2,5 DOHC z czopami teksturowanymi laserowo: a) widok fragmentu wału rozrządu z czopem po ablacyjnym teksturowaniu laserowym – zasobniki w kształcie mikroczasz (A), b) widok fragmentu wału rozrządu z czopem po ablacyjnym teksturowaniu laserowym – zasobniki w kształcie mikrokanalów (B)

Fig. 6. View of the engine camshaft 2.5 DOHC Subaru BOXER with laser textured pivots: a) view of the portion of the camshaft valve after ablation laser texturing - trays in the shape of microbowl (A), b) view of the portion of the camshaft valve after ablation laser texturing - trays in the shape of microchannels (B)

## 5. WNIOSKI

W rezultacie przeprowadzonych badań sformułowano szereg wniosków, z których najistotniejsze przytoczono poniżej:

1. W wyniku laboratoryjnych badań próbek oraz wycinków z rzeczywistego wałka rozrządu silnika spalinowego Subaru BOXER 2,5 DOHC, uzyskano korzystne parametry geometryczne mikrozasobników olejowych na powierzchni czopa wału rozrządu:
  - głębokość mikrozasobników –  $8 \div 25 \mu\text{m}$ ,
  - średnica zasobników –  $70 \div 110 \mu\text{m}$ ,
  - wysokość wypływek –  $3 \div 15 \mu\text{m}$ ,
  - maksymalna twardość w strefie wypływki –  $780 \div 867 \mu\text{HV}_{100}$ .
2. Aby warstwa wierzchnia po teksturowaniu laserowym wałka rozrządu cechowała się dużą odpornością na zużycie w warunkach tarcia, optymalne wydaje się wytworzenie zasobników olejowych w kształcie półczasz kulistych o średnicy  $70 \div 100 \mu\text{m}$ , o głębokości w przedziale od  $5 \div 15 \mu\text{m}$ , z minimalnym naddatkiem na obróbkę wykańczającą, która usuwa powstałe wypływki przyległe do zasobników.
3. Wariant zasobników oleju w kształcie mikrokanalów wydaje się również technologicznie przydatny. Długość i rozstaw mikrorowków w układzie cegiełkowym wydają się korzystne w wymiarze ok. 1mm. Powstałe w procesie teksturowania mikrowypływki należy usunąć poprzez obróbkę mechaniczną wykańczającą, np. honowanie lub szlifowanie.



4. Zweryfikowanie zaproponowanych układów geometrycznych mikrozasobników olejowych wymaga przeprowadzenia cyklu badań tribologicznych w warunkach laboratoryjnych oraz rzeczywistych wałków rozrządu z wytworzonymi mikrozasobnikami, zamontowanych do silnika spalinowego w konwencjonalnej próbie hamownianej lub w próbie tzw. „zimnych rozruchów”, które rozstrzygną o przydatności analizowanych wariantów technologicznych.

#### LITERATURA

- [1] MARIAN V., 2002, *Lubrication of textured surface*, International Conference, Universitaria Ropet 2002, Mechanical Engineering, Petrosani, 2.
- [2] SOVEJA A., JOUWARD J. M., GREVEY D., 2007, *Metal surface laser texturing multiphysics modeling of a single impact effect*, Excerpt from the proceedings of the COMSOL Users Conference, Grenoble.
- [3] NAPADŁEK W., 2007, *Laser ablation microprocessing of elements of internal combustion engine*, Journal of Kones Powertrain and Transport, 14/4, 273-284.
- [4] NAPADŁEK W., 2011, *Laser percussive strengthening of the aluminum alloys*, Journal of KONES Powertrain and Transport, Warsaw, 18/1, 372-384.
- [5] NAPADŁEK W., WOŹNIAK A., 2011, *Teksturowanie laserowe wałka rozrządu silnika spalinowego*, Logistyka, 6, 2987-2996.
- [6] NAPADŁEK W., BURAKOWSKI T., 2011, *Wybrane przykłady powierzchniowego teksturowania laserowego*, Inżynieria Materiałowa, 4/182, 633-636.
- [7] BURAKOWSKI T., NAPADŁEK W., 2011, *Rodzaje powierzchniowego teksturowania laserowego*. Inżynieria Materiałowa, 4/182, 356-358.
- [8] NAPADŁEK W., PRZETAKIEWICZ W., 2011, *Laserowe teksturowanie płaszcza tłoka silnika spalinowego*, Inżynieria Materiałowa, 4/182, 637-640.
- [9] NAPADŁEK W., 2011, *Kształtowanie technologicznej warstwy wierzchniej pierścieni tłokowych silnika spalinowego*, Inżynieria Materiałowa, 4/182, 628-632.
- [10] NAPADŁEK W., BURAKOWSKI T., WOŹNIAK A. i inni, 2011, *Opracowanie technologii ablacyjnej mikro- i nanoobróbki laserowej dla przemysłu lotniczego i motoryzacji*, Projekt badawczy rozwojowy nr N R15 0025 04, NCBiR, WAT, Warszawa.
- [11] NAPADŁEK W., BURAKOWSKI T., WOŹNIAK A. i inni, 2011, *Badania możliwości wykorzystania ablacyjnej mikroobróbki laserowej w procesach kształtowania właściwości użytkowych elementów silników spalinowych narażonych na szoki cieplne i zużycie tribologiczne*, Projekt badawczy nr N50805432/3758, MNiSW, WAT, Warszawa.
- [12] NAPADŁEK W., WOŹNIAK A., BURAKOWSKI T., i inni, 2011, *Opracowanie podstaw technologii teksturowania laserowego elementów silnika spalinowego dla zwiększenia ich odporności na zużycie w warunkach tarcia*, Projekt badawczy własny Nr 5102/B/T02, 40, WAT, Warszawa.

#### ABLATIVE LASER TEXTURING OF THE CAMSHAFT PIN OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE

The methodology and results of investigations of ablative laser texturing of surface camshaft pin of internal combustion engine (alloy steel 41Cr4) in article were introduced. Laser processing was conducted with laser Nd:YAG about wavelength laser radiation  $\lambda = 1064$  nm. The use ablation of laser micromachining in neurlgic zones of roll of distribution had in view the producing from micromagazines the suitable texture of surface oil in shape the spherical oil microchannels. The very regular texture of surface, what in result of conducted experiments was got, probably profitably the suppository of roll of distribution will influence on tribological processes the and decrease the waste of association - slide bearing.