

Wojciech NAPADŁEK¹
Tadeusz BURAKOWSKI²

ZWIĘKSZANIE TRWAŁOŚCI EKSPLOATACYJNEJ ELEMENTÓW SKOJARZENIA TRZONEK ZAWORU - PROWADNICA SILNIKA SPALINOWEGO Z WYKORZYSTANIEM TECHNOLOGII LASEROWYCH

Przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych zmodyfikowanej laserowo warstwy wierzchniej otworu żeliwnej prowadnicy zaworowej silnika spalinowego, współpracującej z trzonkiem zaworu. W celu poprawy jej makro- i mikrogeometrii zastosowano ablacyjną mikroobróbkę laserową. Stosując różne parametry obróbki wytworzono charakterystyczne mikrozasobniki olejowe w górnej i dolnej strefie otworu prowadnicy. Obróbkę przeprowadzono laserem Nd: YAG (1064 nm) ze specjalnym systemem ogniskowania. Porównano topografię powierzchni ukształtowanej na drodze tradycyjnej obróbki mechanicznej; rozwiercania i honowania, oraz zmodyfikowanej w wyniku ablacyjnej mikroobróbki laserowej. W celu doboru optymalnych parametrów mikroobróbki laserowej przeprowadzono badania topografii powierzchni, analizę mikrostruktury i składu chemicznego w mikroobszarach oraz pomiary mikrotwardości.

EXPLOATIONAL BOOST DURABILITY OF ELEMENTS ASSOCIATION, VALVE SHAFT - VALVE GUIDE OF COMBUSTION ENGINE WITH LASER TECHNOLOGY

The laboratory investigations of outer layer, the hole of the cast-iron valvular runner of the combustion engine, co-operating with the handle of the valve, modified by laser and their results are presented. In the aim of the improvement her macro- and micro-geometry, ablational laser microtooling was applied. Characteristic oil microcontainers were created in the upper and bottom area of the runner hole owing to applying various parameters of the process. The processing was conducted by the laser Nd: YAG (1064 nm) with special focusing system. The topography of surface shaped by traditional mechanical process; reaming and honing, and modified in the result of laser ablation microtooling was compared. The investigation of the surface topography, analysis of microstructure and chemical composition in microfields with the microhardness measurements were conducted as the optimum laser microtooling parameters selectio.

¹ Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, 00-908 Warszawa, ul. Gen. S. Kaliskiego 2.
Tel. (0-22) 683-73-57, e-mail: wnapadlek@wat.edu.pl

² Politechnika Koszalińska

1. WARUNKI PRACY UKŁADU KINEMATYCZNEGO TRZON ZAWORU – PROWADNICA

Układ kinematyczny trzon zaworu – prowadnica zaworowa silnika spalinowego umożliwia prostoliniowy ruch zaworu. W układzie tym, elementy współpracujące przemieszczają się względem siebie ruchem posuwisto – zwrotnym i okresowo pozostają w spoczynku. Występuje tu tarcie płynne lub graniczne. W obszarze krawędzi prowadnicy gdzie występują największe naciski należy oczekiwać tarcia mieszanego. Obciążenie powierzchni na długości prowadnicy jest nierównomierne, zwłaszcza w starszej generacji układach rozrządu z dźwigienkami zaworowymi. W chwili otwierania zaworu trzon oddziałuje na prowadnicę siłą boczną nierównomiernie rozłożoną na długości prowadnicy i okresowo zmieniającą kierunek. Siła ta uwarunkowana jest właściwościami konstrukcyjnymi zaworu jak np. kształt kanałów przepływu gazu, sztywność zaworu, oddziaływanie cieplne strumienia przepływającego gazu, sztywność zaworu, oddziaływanie cieplne strumienia gazu oraz oddziaływanie podbijacza na trzonek zaworu.

W przypadku zaworu wylotowego prowadnica obciążona jest dodatkowo cieplnie strumieniem przepływających spalin o wysokiej temperaturze, a także od strumienia przekazywanego od trzonka przez grzybek. Ilość środka smarowego jest ograniczona z uwagi na wysokie temperatury i możliwość jego koksowania. Opisywany układ kinematyczny smarowany jest olejem silnikowym. Dominującym rodzajem zużycia jest proces ścierania przy tarcu mieszanim, bądź też spowodowany przez twarde cząstki ścierniwa zawarte w nagarze powstałym w wyniku oddziaływania wzajemnego oleju i produktów spalania. Dodatkowo w układzie występują korozja i zużycie cieplne. Zużycie cieplne stanowi efekt oddziaływań cieplnych na elementy układu i wywołane tym oddziaływaniem utratę właściwości warstwy wierzchniej oraz ubytek masy [1].

2. HARTOWANIE LASEROWE W INŻYNIERII PRODUKCJI ELEMENTÓW MASZYN

Aby zwiększyć trwałość elementów opisywanego układu kinematycznego w procesach produkcyjnych dąży się do poprawy konstrukcji ww. elementów w celu zwiększenia ich trwałości i niezawodności eksploatacyjnej. We współczesnych silnikach spalinowych stosuje się także nowoczesne materiały, a szczególnie nowej generacji powłoki oraz technologie inżynierii powierzchni. Zwiększają one odporność na zużycie w warunkach tarcia, zwłaszcza przy ograniczonym smarowaniu. Jedną z takich technologii jest hartowanie laserowe.

Szerokie zainteresowanie technologiami laserowymi w przemyśle maszynowym i motoryzacyjnym wynika z szeregu zalet tej obróbki. Do najważniejszych zaliczyć można: intensywne nagrzewanie powierzchni o dowolnie skomplikowanym kształcie skoncentrowaną wiązką laserową i możliwość precyzyjnego sterowania dawką energii, zachowanie pierwotnych wymiarów elementów obrabianych laserowo, szczególnie o wąskiej tolerancji tych wymiarów, łatwą automatyzację procesu i dużą szybkość osiągania pożądanego efektu technologicznego [2÷9]. Możliwość sterowania parametrami procesu daje szansę uzyskania określonych właściwości użytkowych obrobionych materiałów na poziomie nieosiągalnym klasycznymi metodami. Dotychczasowe badania skutków oddziaływania promieniowania laserowego na stale wykazały, że w ich warstwie

wierzchniej zachodzą zmiany struktury i składu chemicznego odmienne od występujących podczas konwencjonalnej obróbki cieplnej. Obrabiane tą metodą części uzyskują wysoką twardość, odporność na zużycie w warunkach tarcia, korozję oraz wysokie właściwości mechaniczne i zmęczeniowe. Doświadczenia własne dotyczącej laserowej obróbki cieplnej (LOC) potwierdziły, że istnieje wiele możliwości praktycznego wykorzystania laserów do powierzchniowego utwardzania elementów maszyn ze stali i żeliwa.

3. HARTOWANIE LASEROWE ŻELIWA SZAREGO NISKOSTOPOWEGO

Prowadnice zaworowe stosowane w silnikach spalinowych wykonane są z różnych materiałów konstrukcyjnych, m.in. z brązów ołowionych (np. w silnikach trakcyjnych dużej mocy), jako elementy spiekane z proszków stopowych. Najczęściej wykonuje się je z żeliwa szarego niskostopowego odlewane w sposób ciągły (np. wg technologii MAHLE Polska). Skład chemiczny żeliwa: C = 3,2÷3,9%, Si < 3%, Mn = 0,4÷1,2%, P = 0,4 ÷0,8%, S < 0,12%, Cr < 0,605. Obróbka cieplna po odlewaniu – normalizacja. Twardość 210÷270 HB. Półfabrykat prowadnicy podlega obróbce mechanicznej, wstępnej i wykańczającej. Obróbka wykańczająca otworu prowadnicy – najczęściej honowanie lub rozwiercanie – może być realizowana jako ostateczna przed lub po wciśnięciu prowadnicy do odpowiedniego gniazda znajdującego się w głowicy silnika. Honowanie stosuje się dla gotowych elementów, a rozwiercanie prowadzone jest po wmontowaniu prowadnicy w głowicę w celu uzyskania współosiowości z gniazdem zaworu oraz dla uzyskania odpowiedniego wymiaru otworu i topografii powierzchni współpracującej z trzonkiem zaworu. Jak już wcześniej wspomniano trudne warunki pracy powodują jej przedwczesne zużywanie się, zwłaszcza w dolnej i górnej strefie otworu. W ramach badań laboratoryjnych zdecydowano się przeprowadzić utwardzanie żeliwnych prowadnic w neuralgicznych strefach.

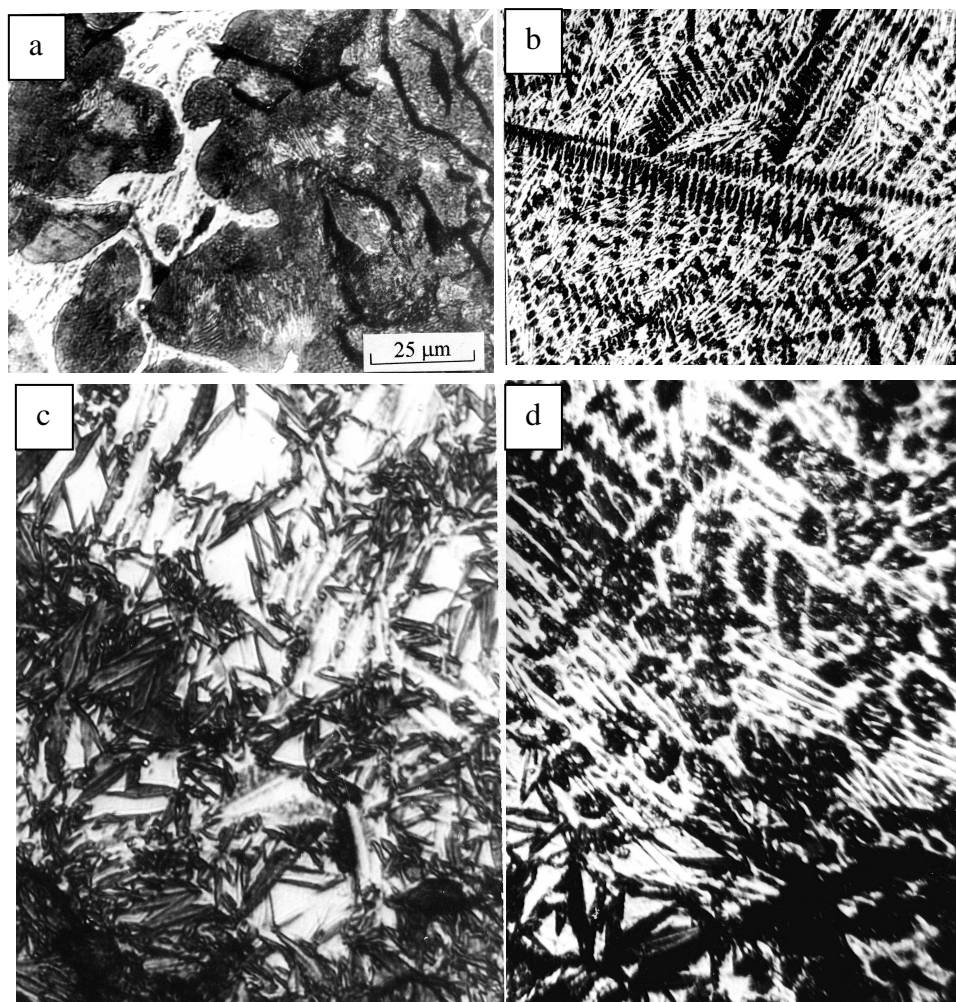
W czasie hartowania laserowego stopów żelaza z węglem na ogół wraz ze wzrostem zawartości węgla wzrasta twardość i grubość warstwy zahartowanej, przy zastosowaniu tych samych parametrów obróbki a także zmniejsza się zużycie triboologiczne. Spowodowane jest to między innymi wzrostem hartowności oraz obniżeniem temperatury austenitizacji. Wśród stopów żelaza z węglem, żeliwa należą do materiałów o dobrej hartowności (ze względu na swój skład chemiczny), ale podczas ich hartowania występują pewne zagrożenia, tj. możliwość powstawania dużych naprężeń, a w efekcie – deformacji i pęknięć. Laserowa obróbka cieplna, ze względu na lokalny charakter oddziaływania oraz bardzo duże szybkości nagrzewania i chłodzenia, wywołuje bardzo korzystne zmiany strukturalne (duża dyspersja składników struktury i przyrost twardości), mogące przyczynić się do znacznej poprawy właściwości warstwy wierzchniej żeliwa. Poza tym, zagrożenie deformacjami oraz pęknięciami podczas hartowania laserowego jest istotnie mniejsze, niż podczas klasycznej obróbki cieplnej.

Celem pracy było wykorzystanie wiązki laserowej do modyfikacji właściwości warstwy wierzchniej niskostopowego żeliwa szarego perlitycznego stosowanego w produkcji prowadnic zaworowych silników spalinowych dla osiągnięcia zmniejszenia ich zużycia tribologicznego.

W ramach badań własnych przeprowadzono analizę przemian strukturalnych podczas laserowej obróbki cieplnej żeliw oraz dokonano doboru parametrów hartowania laserowego. Zastosowano lasery technologiczne o mocy $P = 0,8$ i $2,5$ kW. Dobierając parametry hartowania laserowego uwzględniano moc wiązki laserowej P , prędkości przemieszczania (skanowania) wiązki laserowej v oraz odległości ogniska soczewki od powierzchni poddanej utwardzaniu Δf . Badania zasadnicze obejmowały analizę metalograficzną, pomiary twardości, pomiary odporności na zużycie tribologiczne wykonane na próbkach a także prowadnicach zaworowych utwardzonych laserowo przy najlepszych parametrach obróbki.

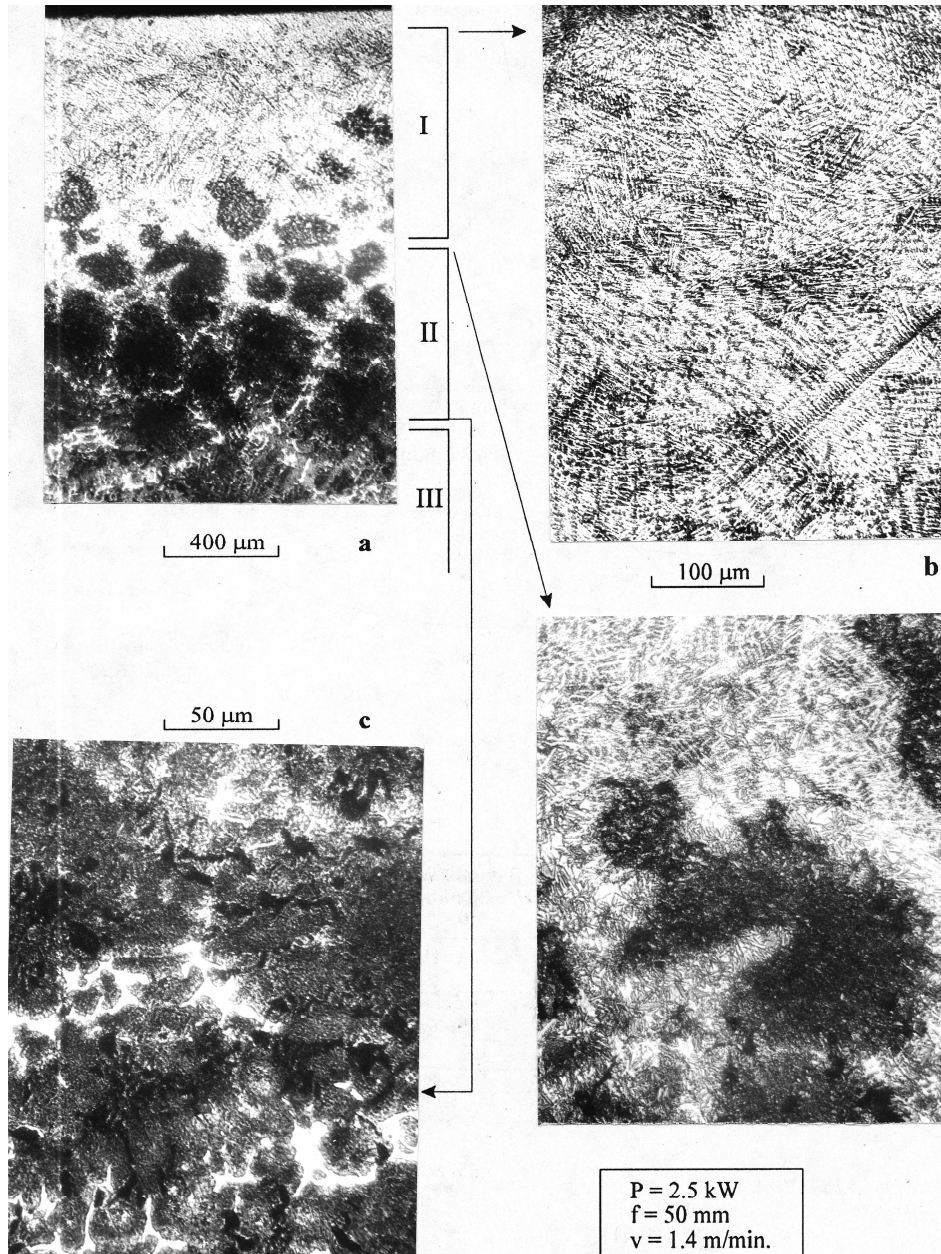
Wyjściowa struktura badanego żeliwa szarego perlitycznego niskostopowego cechowała się bardzo wysoką dyspersją płytek ferrytu i cementytu w osnowie oraz znacznym rozdrobnieniem płatków grafitu. W strukturze występowała także duża ilość wydzieleni eutektyki fosforowej tworzących, w związku z segregacją fosforu, formę budowy szkieletowej widocznej dobrze przy mniejszych powiększeniach (rys.1a). W pierwszym etapie badań przeprowadzono obróbkę laserową (przy $P = 0,8$ kW) na próbkach piaskowanych ($Ra = 10 - 15 \mu\text{m}$) i pokrytych sadzą. Analizując rozkłady twardości na powierzchni próbek piaskowanych lub pokrytych sadzą stwierdzono, że są one bardziej jednorodne w przypadku próbek piaskowanych. Dla małych prędkości $v = 0,37$ i $0,52$ m/min oraz $\Delta f = 14 - 24$ mm, uzyskano twardość około 850 HV5. Jednakże zaobserwowano przetopienia i pęknięcia w warstwie wierzchniej (WW). Dla prędkości większych od $v = 0,52$ m/min twardość osiągnęła wartość poniżej 800 HV5 i warstwa wierzchnia nie miała pęknięć. Najbardziej jednorodny rozkład twardości uzyskano przy prędkościach skanowania $v = 1.0$ m/min dla $\Delta f = 14 - 26$ mm. W wyniku piaskowania chropowatość próbek zawierała się w przedziale $Ra = 15 - 25 \mu\text{m}$. Chropowatość taka jest zbyt duża i dlatego też w dalszych badaniach próbki nie były piaskowane, lecz pokrywane sadzą. Maksymalną twardość, około 1000 HV5, uzyskano dla prędkości $v = 0,37$ i $0,52$ m/min i $\Delta f = 14 - 16$ mm oraz $\Delta f = 22 - 24$ mm. Przy $\Delta f = 14 - 16$ mm występowały głębokie przetopienia.

Badania struktury żeliwa po napromienieniu wiązką lasera potwierdzają wszystkie prawidłowości omówione w części wstępnej. W tych warunkach powstaje strefa przetopiona i zahartowana, o głębokości nie przekraczającej 0,7 mm. W strefie przetopionej powstaje bardzo dyspersyjna struktura ledeburytyczna (rys.1b). W pobliżu granicy ze strefą laserowego hartowania można obserwować wyodrębnione obszary wysokowęglowego martenzytu płytkowego, obok którego występuje duża ilość austenitu szczątkowego (rys. 1c, d). Natomiast strefa laserowej obróbki cieplnej jest strefą niepełnej austenitizacji. Zachowują się w niej nierozpuszczone wydzielenia eutektyki fosforowej, jak też płatki grafitu. Powstający po austenitizacji osnowy żeliwa w tej strefie martenzyt cechuje się wysoką dyspersją (rys. 1c, d).



Rys.1. Lokalizacja stref powstałych w wyniku laserowej obróbki cieplnej żeliwa szarego (z przetopieniem): a – materiał wyjściowy (rdzeń); b - d – strefa przetopiona i zahartowana

Identyfikację składników strukturalnych ułatwiają wyniki wybiórczych pomiarów mikrotwardości poszczególnych faz. Potwierdza się tu prawidłowość, że najwyższą twardość przekraczającą 600 HV_{0,1} osiągają, obszary o strukturze martenzytycznej, natomiast mikrotwardość strefy przetopionej jest nieco niższa (rzędu 550 HV_{0,1}).



Rys.2. Mikrostruktura żeliwa szarego w charakterystycznych strefach laserowej obróbki cieplnej (bez przetopienia): I – strefa utwardzenia (odbielenia), II – strefa wpływu laserowej obróbki cieplnej, III – materiał rodzimy przed laserową obróbką cieplną

W celu określenia głębokości stref utwardzonych dokonano pomiarów mikrotwardości od powierzchni w głąb warstwy utwardzonej (dla różnych P , v i Δf). Są to w większości przypadków typowe, dla żeliwa po obróbce laserowej z nadtopieniem warstwy wierzchniej, krzywe wskazujące niższą twardość w strefie przypowierzchniowej i maksimum twardości w rozciągającej się pod strefą przetopioną, strefie zahartowanej. Generalnie należy stwierdzić, że uzyskana dla badanego żeliwa maksymalna twardość nie przekracza 600 HV0,1 oraz że strefa utwardzona jest płytka (powrót do twardości wyjściowej jest rejestrowany na głębokości poniżej 1 mm).

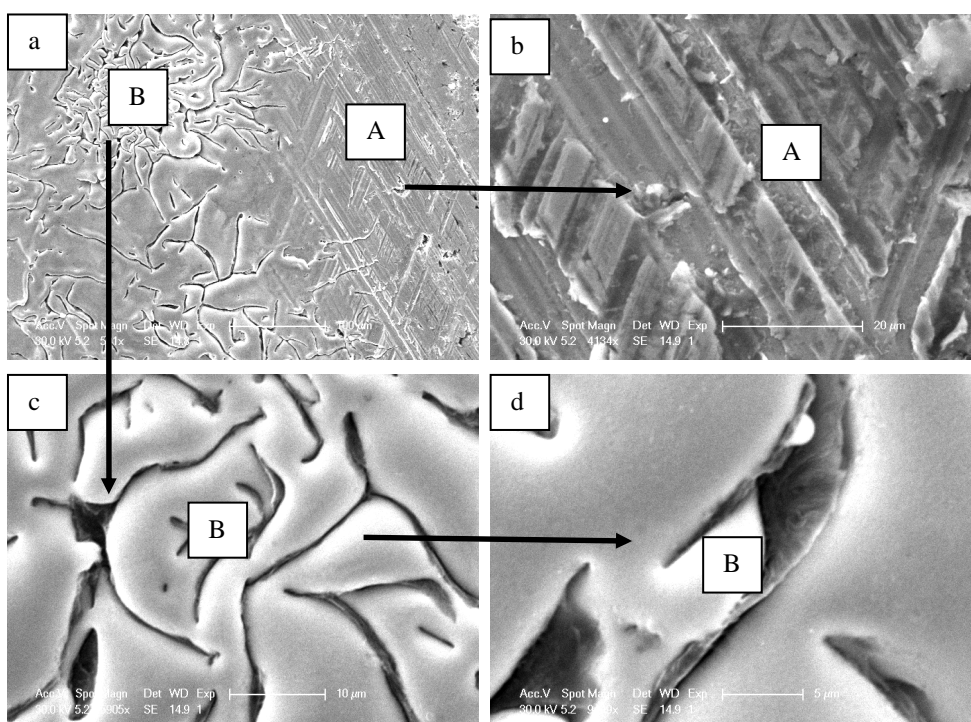
W celu uniknięcia niekorzystnych nadtopień warstwy wierzchniej żeliwa zmniejszono gęstość mocy wiązki laserowej poprzez zwiększenie odległości Δf . Uzyskano efekty strukturalne podobne jak przy mocy lasera 0,8 kW z tym, że oczywiście rozmiary strefy utwardzonej, a przede wszystkim szerokość ścieżki uległy zwiększeniu. Osiągnięto głębokość strefy do 0,8 mm, a szerokość do 7 mm (rys. 2a). Strefa utwardzona wykazuje wysoką dyspersję budowy dendrytycznej (rys. 2b). W strefie wpływu laserowej obróbki cieplnej austenitizacja podczas nagrzewania laserowego nie narusza formy wydzieleni eutektyki fosforowej i płatków grafitu (rys. 2a, d). Na granicy stref utwardzenia i wpływu laserowej obróbki cieplnej, w wąskim obszarze, w którym nastąpiła pełna austenitizacja (rys. 2, c), występuje martenzyt płytkowy z austenitem szczątkowym. Twardość obszarów o strukturze martenzytycznej przekracza 600 HV0,1, a strefy utwardzonej jest zbliżona do ok. 500 HV0,1 dla prędkości skanowania 1,4 m/min. Średnia twardość strefy wpływu laserowej obróbki cieplnej wynosi dla tych wariantów obróbki ok. 450 HV0,1. Ze względu na uzyskane zbyt małe wymiary geometryczne stref utwardzonych (głębokość około 0,7 mm i szerokość około 2,2 mm), w drugim etapie badań przeprowadzono obróbkę laserową przy mocy $P = 2$ i 2,5 kW. Największą twardość (920 – 1000 HV5) uzyskano dla $v = 0,5 - 1,0$ m/min i $\Delta f = 50 - 70$ mm (dla obydwu mocy lasera), jednak przy tych parametrach wystąpiły także przetopienia. Potwierdzają to również wyniki pomiarów chropowatości. Na podstawie rozkładów twardości stwierdzono, że najbardziej ustabilizowany rozkład twardości (800 - 820 HV5) uzyskano dla $P = 2,5$ kW i $v = 0,8 - 1,4$ m/min. Ponadto, przy prędkościach $v = 1,2 - 1,5$ m/min i $\Delta f = 50 - 70$ mm zaobserwowano jedynie lokalne nadtopienia (bez mikropęknięcia).

W ramach badań laboratoryjnych przeprowadzono także ablacyjną mikroobróbkę laserową, tj. oczyszczanie połączone z mikronadtapianiami warstwy powierzchniowej (gładzi) przewodnicy. Eksperymenty te prowadzono w celu uzyskania specyficznej topografii warstwy powierzchniowej z mikrozasobnikami oleju. W zasobnikach tych gromadzić powinien się czynnik smarowy – olej silnikowy (rys. 3), rozdzielający warstwę powierzchniową pary tribologicznej; prowadnica zaworu – trzonek zaworu. Taki wariant technologiczny pozwoli na zmniejszenie współczynnika tarcia oraz wpłynie korzystnie na sumaryczne zużycie elementów ww. pary tribologicznej. Powierzchnię o wysokiej czystości, wolną od zanieczyszczeń, tłuszczów i tlenków bez lub z mikronadtopieniami uzyskuje się w wyniku skoncentrowania wiązki laserowej na małej powierzchni o małej gęstości energii 0,5 - 5 J/cm². Dzięki grafitowi występującemu w budowie żeliwa, absorpcyjność promieniowania laserowego jest duża, co zwiększa sprawność procesu.

W ramach badań wstępnych podjęto próbę wykorzystaniem ablacyjnej mikroobróbki laserowej, w pierwszym etapie na próbkach z żeliwa szarego a w drugim etapie na rzeczywistych przewodnicach zaworu silnika spalinowego. Realizacja postawionego celu

badawczego w pierwszym etapie pracy obejmowała dobór parametrów technologicznych mikroobróbki laserowej dla różnych gęstości mocy impulsowego promieniowania emitowanego przez laser Nd: YAG ($\lambda = 1064 \text{ nm}$) 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.

Zwiększając gęstość energii w impulsie laserowym (ok. $2 - 10 \text{ J/cm}^2$), przy czasie trwania impulsu 10 ns , częstotliwości repetycji $10 - 100 \text{ kHz}$, 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 $800 - 1200 \text{ HV } 0,1$. W wyniku ablacji laserowej płátky grafitu, często przysłonięte w wyniku wytaczania i honowania mechanicznego, uległy odsłonięciu oraz częściowemu odparowaniu, co w efekcie końcowym pozwoliło na wytworzenie się dodatkowych mikrozasobników olejowych (rys. 3). Jest to bardzo obiecujący efekt technologiczny.



Rys. 3. Widok topografii powierzchni gładzi prowadnicy zaworu silnika spalinowego po modyfikacji laserowej – mikrooczyszczanie połączone z mikronadtapianiem: laser Nd: YAG, ($\lambda = 1064 \text{ nm}$), $E = 5 \text{ J/cm}^2$, czas trwania impulsu 10 ns , częstotliwość repetycji 10 Hz ; A – strefa przed modyfikacją, B – strefa po modyfikacji laserowej

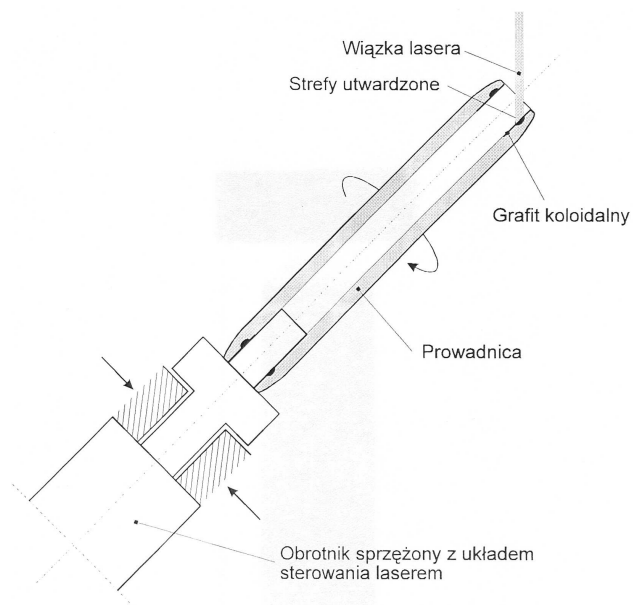
W najbliższej przyszłości przeprowadzona zostanie analiza zwilżalności na wytworzonych systemach areologicznych, badania naprężeń własnych. Przeprowadzone zostaną również wielowariantowe badania tribologiczne. Eksperymenty te pozwolą na wytypowanie najlepszych wariantów technologicznych modyfikacji laserowej żeliwa szarego niskostopowego w celu wykorzystania tej technologii w produkcji prowadnic.

4. DOBÓR PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH HARTOWANIA LASEROWEGO PROWADNIC ZAWORU

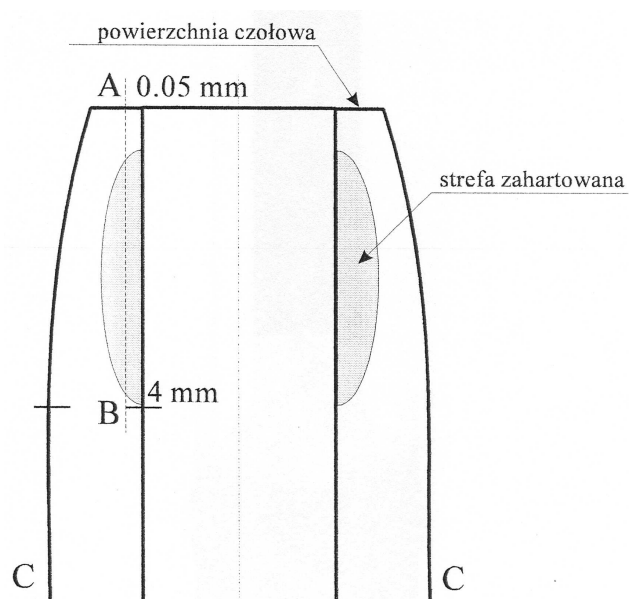
W drugim etapie badań podjęto eksperymenty technologiczne na rzeczywistych prowadnicach zaworu stosowanych w silnikach o zapłonie samoczynnym (ZS) typu T359E. Oryginalne prowadnice wykonane produkcyjnie wg technologii MAHLE Polska z otworem honowanym na wymiar półwykańczający poddano laserowej obróbce cieplnej - hartowaniu. Na specjalnie zbudowanym stanowisku (rys. 4) przeprowadzono dobór parametrów LOC. W celu zwiększenia absorpcyjności, przed naświetlaniem laserowym, prowadnice w newralgicznych strefach zostały pokryte grafitem koloidalnym. Ze względu na małe wymiary otworu prowadnicy oraz potencjalne zagrożenia wystąpienia deformacji w strefach hartowania laserowego stosując dobraną wcześniej gęstość mocy promieniowania laserowego zmniejszono moc lasera do $P = 1$ kW oraz parametr Δf . Stosując różne czasy naświetlania, przy dobranej gęstości mocy, zahartowano materiał prowadnic w newralgicznych ich strefach, tj. na obydwu końcach w odległości ok. 2 mm od powierzchni czołowej (rys. 4 i 5).

Naświetlanie wykonano pod kątem 30° do osi obracającej się prowadnicy. Wewnętrzną (roboczą) powierzchnię prowadnicy pokryto absorbentem - grafitem koloidalnym. W wyniku hartowania uzyskano strefy utwardzenia o różnych szerokościach, głębokościach i strukturach. Stosując różne czasy naświetlania (a w efekcie różne prędkości skanowania) uzyskano zróżnicowane efekty utwardzenia warstwy wierzchniej, przedstawione w postaci wykresów na Rys. 6. W efekcie końcowym stwierdzono, że najlepsze rezultaty, tj. o odpowiedniej dendrytycznej mikrostrukturze ledeburytycznej i wysokim stopniu dyspersji, wysokiej mikrotwardości bez nadtopień warstwy wierzchniej, uzyskuje się stosując następujące parametry LOC: $P = 1$ kW, $\Delta f = 25$ mm, $t = 3s/4$ obr. prowadnicy.

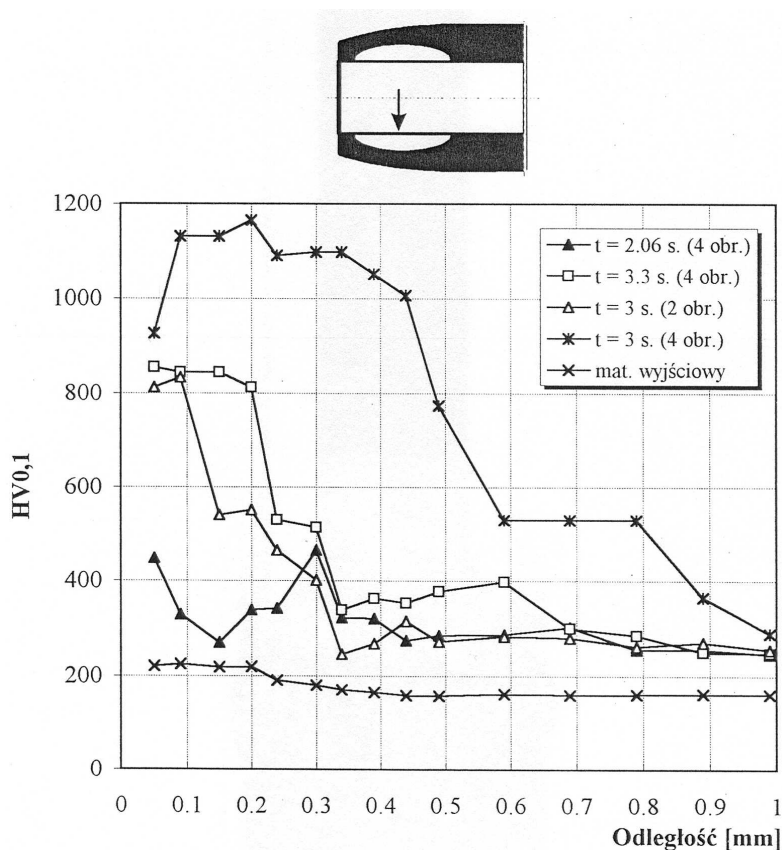
Stwierdzono, że tak przeprowadzone hartowanie laserowe powoduje zdecydowany przyrost mikrotwardości w obszarze zahartowanym po LOC, tj. przyrost z 200 do ok. 800 HV_{0,1}. Głębokość strefy utwardzonej nie przekraczała 0,35 mm, a szerokość 3 mm. Uzyskano struktury nie odbiegające od uzyskanych przy wstępnym doborze parametrów hartowania laserowego (pkt. 3). Po hartowaniu laserowym powierzchnię prowadnicy współpracującą z trzonkiem zaworu poddano wykańczającej obróbce mechanicznej przez honowanie wykańczające. Operację tę można przeprowadzić na specjalnej honownicy jeszcze przed wciśnięciem jej do gniazda głowicy silnika spalinowego, lub w drugim wariantcie, już po wciśnięciu. Wariant drugi wymaga zakupu specjalistycznej maszyny z oprzyrządowaniem, dlatego racjonalnym wydaje się stosowanie pierwszej opcji (hartowanie laserowe – honowanie – wciskanie gotowej prowadnicy do gniazda głowicy silnika).



Rys. 4. Schemat stanowiska do hartowania laserowego prowadnic zaworowych



Rys. 5. Przekrój końca prowadnicy zaworowej z widoczną lokalizacją strefy zahartowanej laserowo



Rys. 6. Rozkłady mikrotwardości w przekroju poprzecznym prowadnicy zaworowej hartowanej laserowo ($P = 1\text{ kW}$, $\Delta f = 25\text{ mm}$, kąt padania wiązki laserowej $\alpha = 30^\circ$, absorbent grafit koloidalny) w zależności od czasu naświetlania

5. PODSUMOWANIE

Próby zastosowania hartowania laserowego oraz ablacyjnej mikroobróbki laserowej do zwiększenia trwałości warstwy wierzchniej gładzi żeliwnej prowadnicy zaworu silnika spalinowego T359E zakończyły się powodzeniem. Przy dobranych parametrach obróbki laserowej uzyskano dendrytyczną strukturę ledeburytyczną o wysokim stopniu dyspersji i mikrotwardości ok. 800 – 1200 HV_{0,1}.

Korzystny wpływ hartowania laserowego przewodnic zaworowych w newralgicznych strefach, zwłaszcza w dolnej strefie narażonej na działanie wysokiej temperatury, przy ograniczonym smarowaniu, przełożył się na pomyślnie przeprowadzone próby trwałościowe na rzeczywistym silniku w 450 - godzinnej próbie niezawodności. Próby te wykazały mniejsze o ok. 30 – 80% zużycie, zarówno otworu przewodnicy jak i trzonka zaworu w porównaniu z wariantami konwencjonalnymi stosowanymi przez producentów przewodnic zaworowych, co stanowi dobrą przesłankę do podjęcia dalszych badań eksploatacyjnych.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2007 – 2010 jako projekt badawczy N508 054 32/3758.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Włodarski J.K., *Tłokowe silniki spalinowe – procesy tribologiczne*, WKŁ, Warszawa 1982.
- [2] Burakowski T., Wierzchoń T., *Inżynieria powierzchni metali*, WNT, Warszawa 1995.
- [3] Kusiński J., *Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej*, Wydawnictwo Naukowe “Akapit”, Kraków 2000.
- [4] Burakowski T., Wierzchoń T., *Inżynieria powierzchni metali*, WNT, Warszawa 1995.
- [5] Schawlow A. L., *Lasers Science*, Vol. 149, s.13-22. (1965).
- [6] Anisimov S.I, Luk’yanchuk B.S., *Selected problems of laser ablation theory*, Uspekhi Fizičeskich Institut Nauk, 172, No.3 (2002), s. 301-333.
- [7] Napadłek W., Sarzyński A., Marczak J. *Analiza procesów zachodzących podczas ablacji laserowej na stopach aluminium*, Przegląd Spawalnictwa nr 5–6 (2006), s. 64 – 67.
- [8] Burakowski T, Napadłek W., Marczak J., *Ablacyjna mikroobróbka laserowa w areologii*, Inżynieria Materiałowa nr 5 (153), rok XXVII, wrzesień – październik, 2006, s. 882 – 889.
- [9] Burakowski T., Kubicki J., Marczak J., Napadłek W., *Technologiczne możliwości zastosowania ablacyjnego oczyszczania laserowego materiałów*, Prace Instytutu Elektrotechniki, LIII, Zeszyt 228’06, (2006), s. 137 - 146.