

LASER HARDENING OF CAST IRON WAYS OF VALVES APPLIED IN COMBUSTION ENGINES

Wojciech Napadłek

Military University of Technology, Mechanical Faculty
Gen. Sylwestra Kaliskiego 2 Street, 00-908 Warsaw, Poland
tel.: +48 22 68394471; 6837357, 6837046
e-mail: wnapadlek@wat.edu.pl

Abstract

The laser hardening of low-alloyed gray cast iron applied in valve ways production was investigated in our research. 0.8 kW and 2.5 kW technological lasers were applied. In the starting research the parameters of laser hardening were chosen, including beam scanning rate v and a distance from the lens to the hardened surface Δf . The main research were focused on metallographic analysis and tribological usage resistance. These experiments were carried on samples and real laser hardened ways, treated at optimal hardening parameters. The proposals of technological laser hardening ways of valves in important areas exhibited on the biggest tribological usage were presented. The experiment and the results of 450 hours long durability test of combustion engine were also described. The metrological measurements and surface topography analysis have proved the advantages of the ways laser hardening. Significant improvement of the tribological damage resistance of the bottom area of the way, exhibited on low lubrication and cyclic heat shocks in high temperatures in combustion chamber of the engine, was obtained. These research are the basis for industrial applications in series production.

Keywords: gray cast iron, valves way, laser hardening, tribological damage

HARTOWANIE LASEROWE ŹELIWNYCH PROWADNIC ZAWOROWYCH STOSOWANYCH W SILNIKACH SPALINOWYCH

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań nad utwardzaniem laserowym żeliwa szarego niskostopowego, stosowanego w produkcji prowadnic zaworowych, będących elementami silników spalinowych. W badaniach zastosowano lasery technologiczne o mocy $P = 0,8$ i $2,5$ kW. W ramach badań wstępnych dokonano doboru parametrów hartowania laserowego z uwzględnieniem mocy wiązki laserowej P , prędkości przemieszczania (skanowania) wiązki laserowej v oraz odległości ogniska soczewki od powierzchni poddanej utwardzaniu Δf . Badania zasadnicze obejmowały analizę metalograficzną oraz pomiary odporności na zużycie tribologiczne wykonane na próbkach oraz rzeczywistych prowadnicach utwardzonych laserowo przy najlepszych parametrach obróbki laserowej. Przedstawiono propozycje technologiczne hartowania laserowego prowadnic zaworowych w newralgicznych strefach narażonych na największe zużycia tribologiczne. Opisano także przebieg oraz wyniki 450-godzinnej próby trwałościowej na silniku spalinowym o ZS. Pomiary metrologiczne oraz obserwacje topografii powierzchni przy użyciu boroskopu potwierdziły celowość prowadzenia hartowania laserowego prowadnic. Uzyskano znaczącą poprawę odporności na zużycie tribologiczne, zwłaszcza w dolnej strefie prowadnicy zaworu narażonej na ograniczone smarowanie oraz cykliczne szoki termiczne w wysokich temperaturach, występujących w komorze spalania silnika. Badania te stanowią podstawę do wdrożeń przemysłowych w produkcji seryjnej.

Słowa kluczowe: żeliwo szare niskostopowe, prowadnica zaworu, hartowanie laserowe, odporność na zużycie tribologiczne

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 przewodnicy gdzie występują największe naciski należy oczekiwać tarcia mieszanego. Obciążenie powierzchni na długości przewodnicy jest nierównomierne, zwłaszcza w starszej generacji układach rozrzędu z dźwigienkami zaworowymi. W chwili otwierania zaworu trzon oddziałuje na przewodnicę siłą boczną nierównomiernie rozłożoną na długości przewodnicy 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 oddziaływania podbijacza na trzonek zaworu.

W przypadku zaworu wylotowego przewodnica 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. Opisany układ kinematyczny smarowany jest olejem silnikowym. Dominującym rodzajem zużycia jest proces ścierania przy tarcii mieszanym, 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 osiągnięcia pożądanego efektu technologicznego [2-5].

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 przewodnicy podlega obróbce mechanicznej, wstępnej i wykańczającej. Obróbka wykańczająca otworu

przewodnicy - najczęściej honowanie lub rozwiercanie - może być realizowana jako ostateczna przed lub po wciśnięciu przewodnicy do odpowiedniego gniazda znajdującego się w głowicy silnika. Honowanie stosuje się dla gotowych elementów, a rozwiercanie prowadzone jest po wmontowaniu przewodnicy 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 przewodnic w newralgicznych strefach.

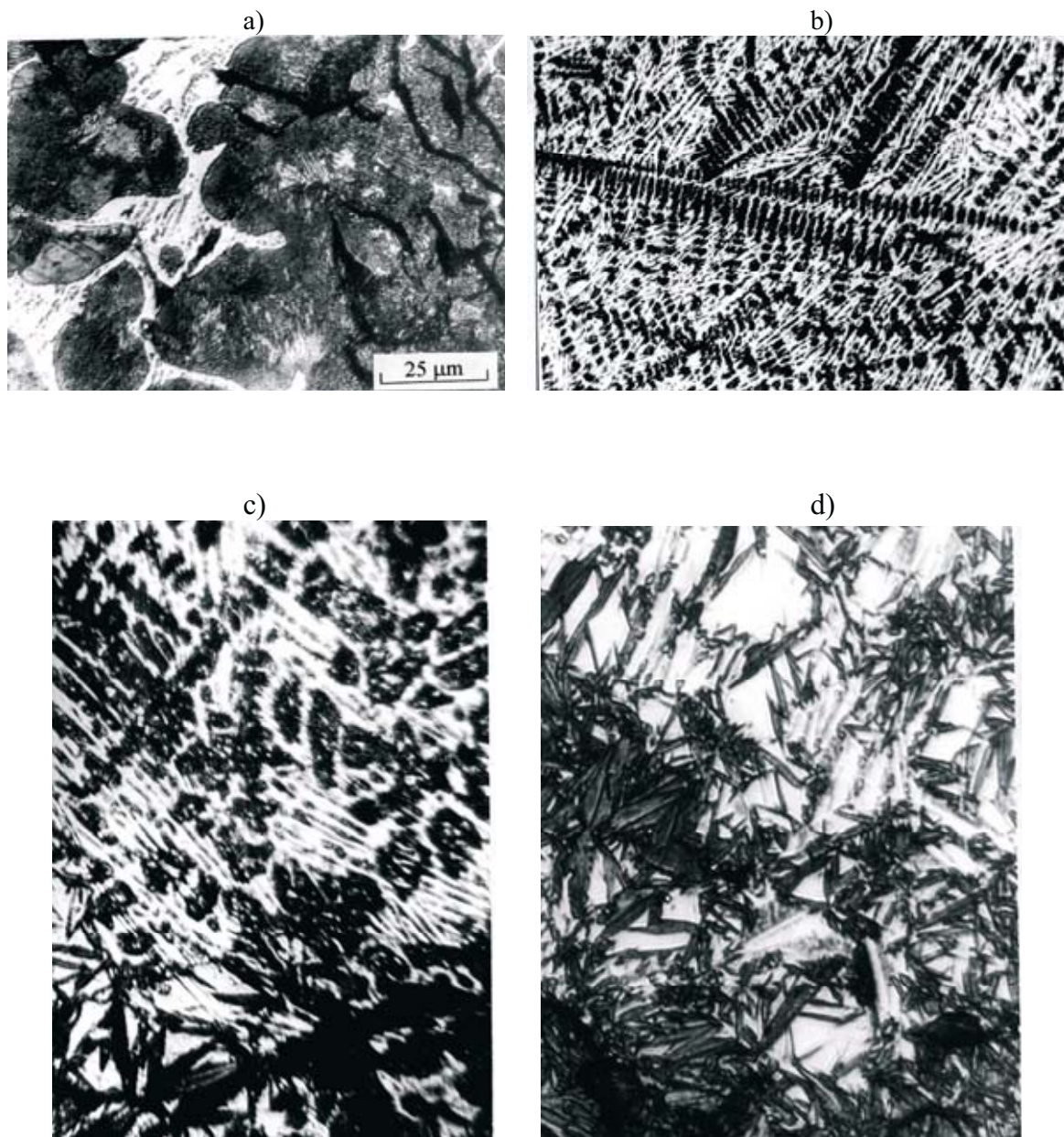
W czasie hartowania laserowego stopów żelaza z węglem na ogół wraz ze wzrostem zawartości węgla wzrasta twardość i grubość warstwy zahartowanej, przy zastosowaniu tych samych parametrów obróbki a także zmniejsza się zużycie tribologiczne. Spowodowane jest to między innymi wzrostem hartowności oraz obniżeniem 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 przewodnic zaworowych silników spalinowych dla osiągnięcia zmniejszenia ich zużycia tribologicznego.

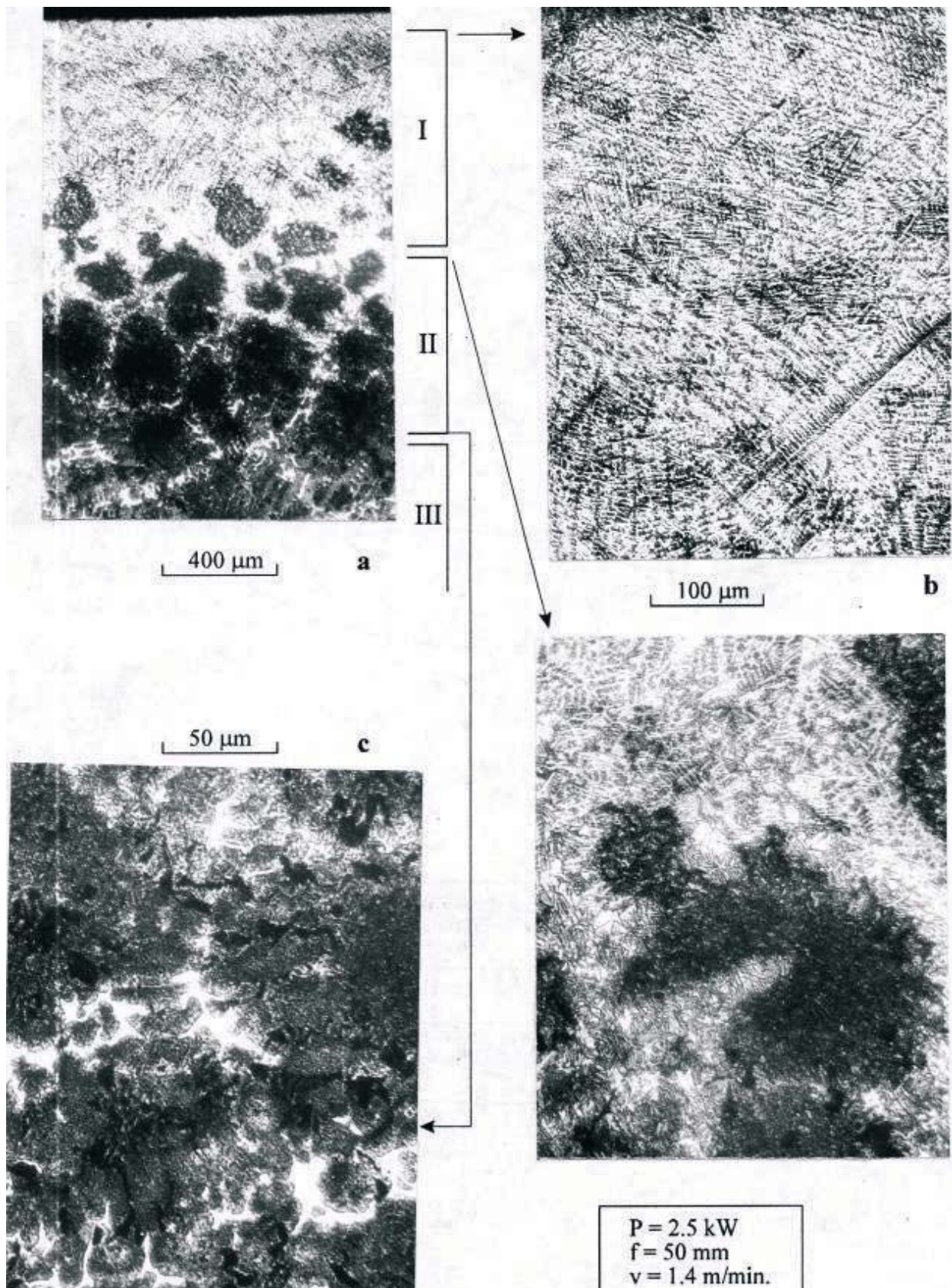
W ramach badań własnych przeprowadzono analizę przemian strukturalnych podczas laserowej obróbki cieplnej żeliw oraz dokonano doboru parametrów hartowania laserowego. Zastosowano lasery technologiczne o mocy $P = 0,8$ i $2,5$ kW. Dobierając parametry hartowania laserowego uwzględniano moc wiązki laserowej 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 przewodnicach 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 wydzieleń 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 ($Ra = 10-15 \mu m$) 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 $Ra = 15-25 \mu m$. 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 ledeburyticzna (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 austenityzacji. Zachowują się w niej nierozpuszczone wydzielenia eutektyki fosforowej, jak też płatki grafitu. Powstający po austenityzacji osnowy żeliwa w tej strefie martenzyt cechuje się wysoką dyspersją (Rys. 1c, d). 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



Rys. 1. Lokalizacja stref powstałych w wyniku laserowej obróbki cieplnej żeliwa szarego (z przetopieniem):
 a) materiał wyjściowy (rdzeń); b) d - strefa przetopiona i zahartowana
 Fig. 1. The localisation of zones originated as a results of laser heat treatment with remelting of grey iron:
 a) material without laser heat treatment (the core), b) d - remelted and hardened zone



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

Fig. 2. The microstructure of grey iron in the characteristics zones by laser heat treatment (without remelting): I - hardened zone (rewhiting), II - heat affected zone (laser heat treatment), III - material without laser heat treatment (the core)

przetopionej jest nieco niższa (rzędu 550 HV0.1). 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 austenizacja 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 austenizacja (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 mikropeknięcia).

4. Dobór parametrów technologicznych hartowania laserowego przewodnic zaworu

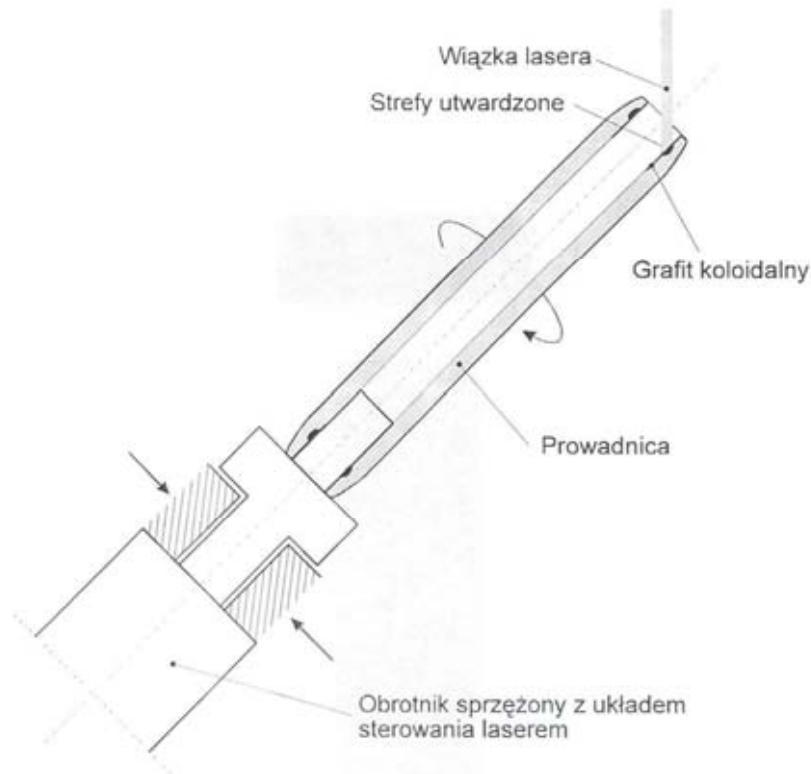
W drugim etapie badań podjęto eksperymenty technologiczne na rzeczywistych przewodnicach zaworu stosowanych w silnikach o zapłonie samoczynnym (ZS) typu T359E. Oryginalne przewodnice wykonane produkcyjnie wg technologii MAHLE Polska z otworem honowanym na wymiar półwykańczający poddano laserowej obróbce cieplnej - hartowaniu.

Na specjalnie zbudowanym stanowisku (Rys. 3) przeprowadzono dobór parametrów LOC. W celu zwiększenia absorpcyjności, przed naświetlaniem laserowym przewodnice w newralgicznych strefach zostały pokryte grafitem koloidalnym. Ze względu na małe wymiary otworu przewodnicy oraz potencjalne zagrożenia wystąpienia deformacji w strefach hartowania laserowego stosując dobrana 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 przewodnic w newralgicznych ich strefach, tj. na obydwu końcach w odległości ok. 2 mm od powierzchni czołowej (Rys. 3 i 4).

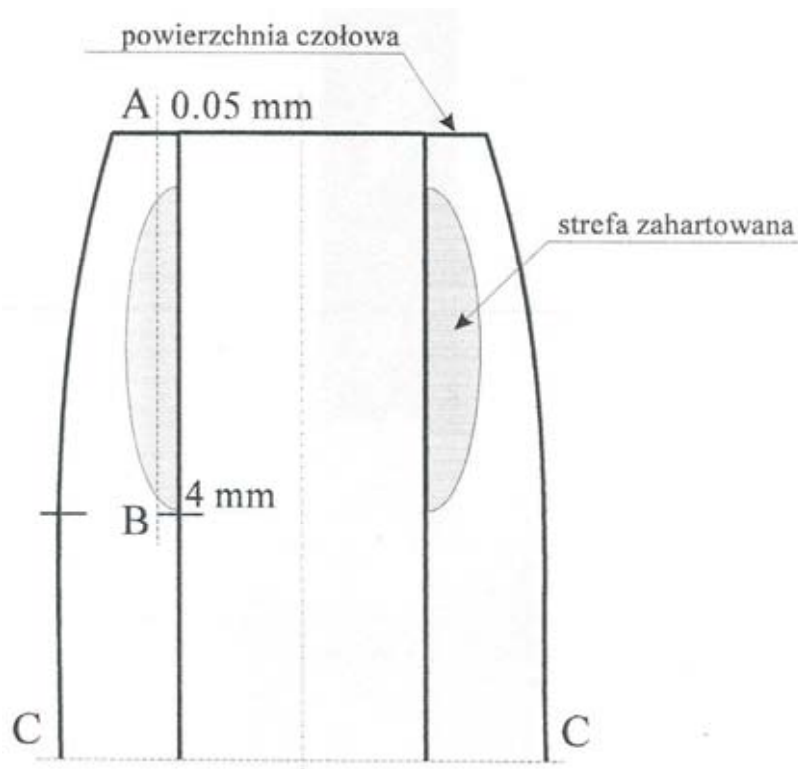
Naświetlanie wykonano pod kątem 30° do osi obracającej się przewodnicy. Wewnętrzną (roboczą) powierzchnię przewodnicy pokryto absorbentem - grafitem koloidalnym. W wyniku hartowania uzyskano strefy utwardzenia o różnych szerokościach, głębokościach i strukturach. Stosując różne czasy naświetlania (a w efekcie różne prędkości skanowania) uzyskano zróżnicowane efekty utwardzenia warstwy wierzchniej, przedstawione w postaci wykresów na Rys. 5.

W efekcie końcowym stwierdzono, że najlepsze rezultaty, tj. o odpowiedniej dendrytycznej mikrostrukturze ledeburytycznej i wysokim stopniu dyspersji, wysokiej mikrotwardości bez

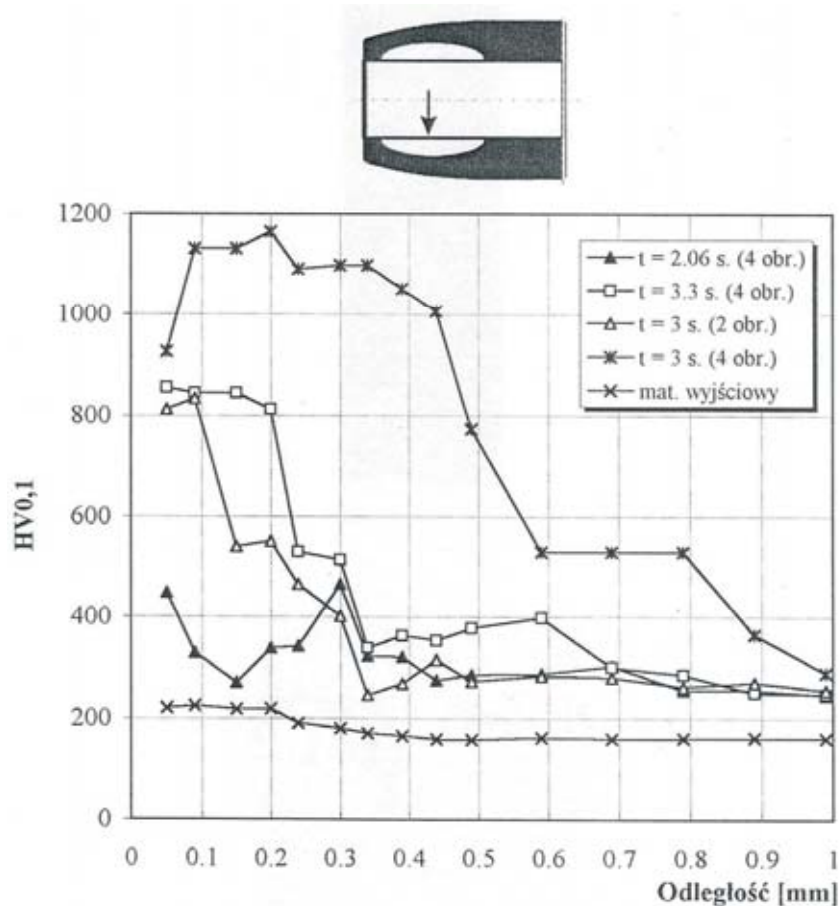
nadtopień warstwy wierzchniej, uzyskuje się stosując następujące parametry LOC: $P = 1$ kW, $\Delta f = 25$ mm, $t = 3s/4$ obr. przewodnicy. Stwierdzono, że tak przeprowadzone hartowanie laserowe powoduje zdecydowany przyrost mikrotwardości w obszarze zahartowanym po LOC, tj. przyrost z 200 do ok. 800 HV_{0,1}.



Rys. 3. Schemat stanowiska do hartowania laserowego prowadnic zaworowych
Fig. 3. A scheme of valve ways laser hardening test stand



Rys. 4. Przekrój końca prowadnicy zaworowej z widoczną lokalizacją strefy zahartowanej laserowo
Fig. 4. An intersection of valve ways end with noticeable hardened area



Rys. 5. 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

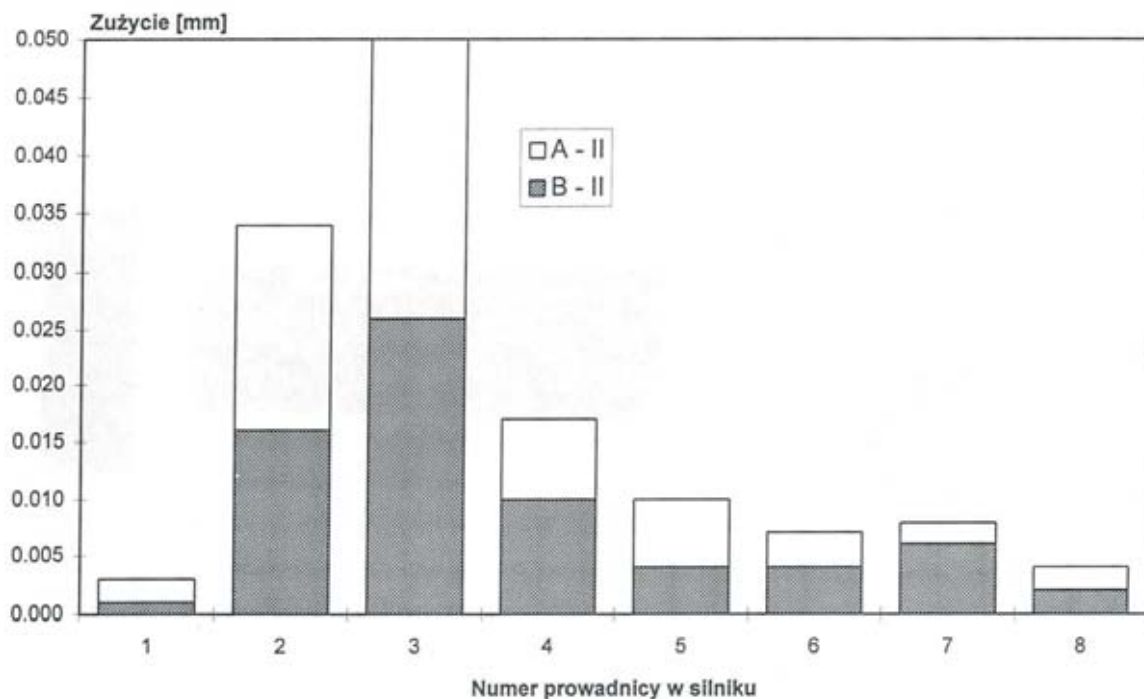
Fig. 5. Distributions of microhardness in the intersection of laser hardened valve way as a function of exposure time conditions: $P = 1\text{ kW}$, $\Delta f = 25\text{ mm}$, laser beam incidence $\alpha = 30^\circ$, absorbent - colloidal graphite

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 spalinyowego, lub w drugim wariancie, 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).

W trzecim etapie badań przeprowadzono 450-godzinną próbę niezawodności na silniku wysokoprężnym T359E. Głównym celem tych badań była ocena niezawodności i wielkości zużycia elementów układu rozrządu, w tym prowadnic zaworowych współpracujących kinematycznie z trzonkami zaworów. Przygotowane prowadnice w trzech wariantach: z otworem wykonanym na gotowo po honowaniu wykańczającym, bez hartowania laserowego (wg technologii MAHLE Polska), prowadnice hartowane laserowo w newralgicznych strefach (opis jak wyżej), prowadnice z otworem wykonanym na półwykańczająco, rozwiercane na wymiar nominalny po wciśnięciu do gniazd głowicy silnika. Przed i po próbie trwałościowej wykonano pomiary mikrometryczne średnicówką z dokładnością pomiaru $1\text{ }\mu\text{m}$. Pomiary zrealizowano na dwóch poziomach (płaszczyznach) I i II oraz dwóch kierunkach (A-A, B-B) - Rys. 6. Dodatkowo przeprowadzono obserwacje powierzchni wewnętrznej otworu prowadnicy przy wykorzystaniu sondy optycznej (boroskopu serii 5).



Rys. 6. Schemat prowadnicy zaworu z zaznaczonymi obszarami pomiarowymi oraz strefami zahartowanymi laserowo
 Fig. 6. Scheme of valve way with spotted measurement areas and laser hardened areas



Rys. 7. Zużycie prowadnic zaworowych na poziomie II pomiaru w dwóch kierunkach A i B: 1, 4 - prowadnice rozwiercane, 2, 3 - prowadnice honowane, 5-8 - prowadnice hartowane laserowo

Fig. 7. Valve ways usage at second level of measurements in two directions: A and B: 1, 4 - reamed ways, 2, 3 - honed ways, 5-8 - laser hardened ways

Po zakończeniu 450-godzinnej próby trwałościowej na rzeczywistym silniku T359E wykonano pomiary oraz przeprowadzono obserwacje zgodnie z przyjętą metodyką. Stwierdzono, że na pierwszym poziomie pomiarowym (I) w kierunkach „A” i „B” zużycie otworów zawierało się w przedziale 0,002-0,006 mm i było porównywalne dla wszystkich wariantów. Nieco mniejsze zużycie stwierdzono dla prowadnic hartowanych laserowo (zużycie mniejsze o ok. 0,002 mm), co potwierdza słuszność obranego wariantu technologicznego.

Znacznie większe zużycie otworów prowadnic stwierdzono na drugim (II) poziomie pomiarowym, zarówno w kierunku A jak i B. (Rys. 7). Największe zużycie otworu prowadnic zaworowych wystąpiły dla oryginalnych prowadnic wykonanych produkcyjnie bez utwardzenia (Rys. 7, ozn. 2 i 3 po honowaniu). Wystąpiły tam zużycia od 0,015 do 0,026 mm, prawdopodobnie ze względu na występowanie zbyt płytkich zasobników olejowych po honowaniu. Nieco lepsze wyniki uzyskano dla prowadnic wciśniętych do gniazd głowicy i rozwierczanych na wymiar nominalny - prowadnice oznaczone nr. 1 i 4 (Rys. 7). Najlepszy rezultat uzyskano dla prowadnic hartowanych laserowo (ozn. 5-8 - Rys. 7). W tym wariacie zużycie dla czterech prowadnic zawierało się w przedziale od 0,002 do 0,006 mm w każdym kierunku pomiarowym. Obserwacje topografii powierzchni przeprowadzone przy użyciu boroskopu potwierdziły korzystny wpływ hartowania laserowego. W strefie zaharowanej, zwłaszcza w dolnym obszarze prowadnicy zaobserwowano wyraźne ślady mikrorys pohnowniczych, zarówno w strefie zahartowanej, jak i pozostałym obszarze otworu. Świadczy to o istotnym pozytywnym wpływie tzw. „pierścienia hartowniczego” na podwyższenie odporności tribologicznej w warunkach tarcia i ograniczonego smarowania skojarzenia prowadnica - trzonek zaworu.

Przeprowadzone pomiary zużycia trzonek zaworów w analogicznych strefach jak dla prowadnic potwierdziły podobny mechanizm. Stwierdzono o ok. 30-80% mniejsze zużycie trzonek współpracujących z prowadnicami hartowanymi laserowo w porównaniu z pozostałymi wariantami bez utwardzenia (po honowaniu lub po rozwiercaniu).

5. Podsumowanie

Próby zastosowania hartowania laserowego do zwiększenia trwałości warstwy wierzchniej otworu 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 HV0,1.

Korzystny wpływ hartowania laserowego prowadnic 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 prowadnicy jak i trzonka zaworu w porównaniu z wariantami konwencjonalnymi stosowanymi przez producentów prowadnic 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 32/375.

Literatura

- [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] Schwager, K. D., Scholtes, B., Mordike, B. L., Macherauch, E., *Residual stress states in laser-hardened plain carbon steels*. ICRS, The Third International Conference on Residual Stresses, ss. 858-863, Tokushima Japan, July 24-26, 1991.