

TECHNOLOGICAL APPLICATIONS OF LASER ABLATION IN COMBUSTION ENGINE PISTONS

Wojciech Napadłek

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

Abstract

The principles and possible applications of laser ablation technology in combustion engines pistons were described. Laser ablation removal of carbon deposits and other products of pistons using from pistons bottom was presented. The process of sequence removal of the deposits was controlled, so the pistons were not damaged. Nd: YAG laser with 10 Hz pulse work and wavelength λ - 1064 nm was applied during the process. In the laboratory experiments the deposits were removed from aluminum Ak12 and from ceramics on the basis of zirconium, sputtered on the pistons bottom as a thermal barrier (TBC). The exposition time of laser beam ranging from 10 to 20 ns was applied. Furthermore variation of such an important parameters of laser treatment like energy density, beam scanning rate, impulse covering rate was applied, resulting with a set of parameters applicable for lab and even industrial scale. After deposits removal from surface layer, many micro- and macro cracks were noticed. The cracks created a net-like pattern which was a result of cyclic heat-shock present during 400 hours long endurance test of combustion engine. The laser technique is an alternative for other methods because of its ecological reasons. It is also very precise and can be easily automated. It can be also applied in diagnosis, verification and also as a surface layer pretreatment for such a processes like thermal sputtering, or deposition of composite layers in important areas of pistons.

Keywords: laser ablation, surface layer, combustion engine piston, deposits removal

ABLACYJA LASEROWA W ZASTOSOWANIACH TECHNOLOGICZNYCH DLA TŁOKÓW SILNIKA SPALINOWEGO

Streszczenie

Opisano istotę oraz możliwości zastosowań technologicznych ablacji laserowej dla tłoków silnika spalinowego. Przedstawiono wybrane wyniki badań własnych w zakresie ablacyjnego usuwania nawarstwień, głównie w postaci nagaru na denku tłoka oraz innych osadów będących produktami eksploatacji tłoków. Usuwanie sekwencyjne nawarstwień realizowane było w sposób kontrolowany, dzięki temu nie następowało uszkodzenie podłoża tłoka. Ablacyjne oczyszczanie laserowe realizowane było przy użyciu lasera Nd: YAG o pracy impulsowej 10 Hz oraz długości promieniowania laserowego $\lambda = 1064$ nm. W eksperymentach laboratoryjnych usuwano ww. nawarstwienia osadzone na podłożu ze stopu aluminium Ak12 oraz ceramiki na bazie cyrkonu, natryskanej na denko tłoka jako bariera termiczna (TBC). Stosując czas ekspozycji wiązki laserowej ok. 10–20 ns oraz różne parametry obróbki laserowej: gęstość energii, prędkość skanowania wiązki, stopień przykrycia impulsów dobrano właściwe parametry obróbki, które mogą być stosowane nie tylko w warunkach laboratoryjnych, ale również w skali przemysłowej. Po usunięciu nawarstwień w warstwie wierzchniej barierowej powłoki ceramicznej stwierdzono bardzo liczne mikro- i makro-pęknięcia, tworzące regularną siatkę spękań, powstałą w czasie cyklicznych oddziaływań szoków cieplnych w 400-godzinnej próbie trwałościowej silnika spalinowego o ZS. Opisywana technologia laserowa stanowi alternatywę dla innych metod oczyszczania, głównie ze względów ekologicznych, dużej precyzji oraz szerokich możliwości automatyzacji procesu. Może być wykorzystywana również w procesach diagnostyki i weryfikacji, a także, jako technologia przygotowania warstwy powierzchniowej do innych procesów technologicznych, np. natryskiwania cieplnego, osadzania powłok kompozytowych w newralgicznych strefach tłoków.

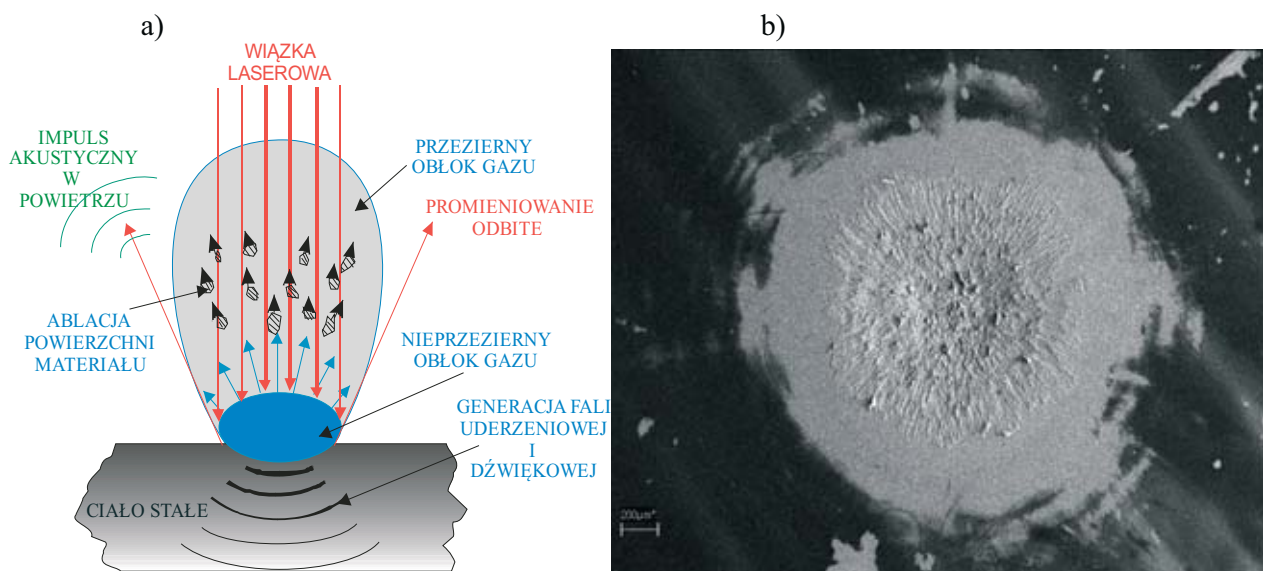
Słowa kluczowe: ablacja laserowa, warstwa powierzchniowa, tłok silnika spalinowego, usuwanie nawarstwień

1. Wstęp

Problem czystości powierzchni jest bardzo istotny, zwłaszcza we współczesnym przemyśle półprzewodników i obwodów o najwyższym stopniu integracji, w przemyśle optycznym, a także w przemysłowych procesach technologicznych kształtujących technologiczną warstwę wierzchnią w różnych elementach (np. elektroniki, telekomunikacji, medycyny, galwanotechniki, techniki motoryzacyjnej, lotnictwie i innych). Właściwe przygotowanie technologiczne powierzchni różnych materiałów (metalowych, kompozytowych, ceramicznych itp.), a szczególnie w zakresie ich czystości, ma decydujący wpływ na uzyskanie wymaganej adhezji wytwarzanych powłok (np. natryskiwanych cieplnie, napyłanych, wytwarzanych technikami PVD itp.). Wśród stosowanych metod wiele z nich powoduje uboczne skutki ekologiczne (metody chemiczne, piaskowanie itp.), powodując zanieczyszczenie i skażenie środowiska. Na szczęście opracowano szereg nowoczesnych metod i technologii, wykorzystujących w procesie czyszczenia np. wiązkę elektronów czy promieniowanie laserowe (ultrafioletowe, widzialne i podczerwone), które umożliwiają czyszczenie nawet najdelikatniejszych powierzchni różnego rodzaju z ogromną precyzją i przywracają je do stanu pierwotnego, a nawet idealnego, bez uszkodzeń [1-7].

2. Ablacja laserowa

Pod tym pojęciem rozumie się odparowanie warstwy wierzchniej różnego rodzaju materiałów: metali, ceramiki, tworzyw sztucznych i innych. Proces ablacji występuje w trakcie trwania impulsu laserowego, następuje oddziaływanie promieniowania laserowego (pochłanianie i rozpraszanie) z wyrzucaniem materiału (w postaci pary i cieczy - Rys. 1b). W wyniku napromienienia powierzchni materiałów za pomocą impulsu promieniowania laserowego o odpowiedniej gęstości energii w czasie (gęstości mocy), zachodzą takie zjawiska jak: absorpcja promieniowania, zjawiska cieplne lub fotochemiczne - Rys. 1 [1-7].



Rys. 1. Oddziaływanie impulsowego promieniowania laserowego z materią w pewnym momencie czasu „t” oraz po zakończeniu impulsu: a) dla gęstości mocy $q \approx 10^8\text{-}10^9 \text{ W/cm}^2$, efekty końcowe umocnienia udarowego (LSP)-wariant ze schematu przedstawionego na Rys. a dla stopu aluminium PA31(ENAW-2618A) obciążonego dwoma impulsami laserowymi, (b) – $q \approx 0,33 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$

Fig. 1. Interaction of a pulse laser radiation with matter for a certain time „t” and after laser pulse termination: a) for power density $q \approx 10^8\text{-}10^9 \text{ W/cm}^2$, b) final effects of shock strengthening (laser shock peening-LSP)-variant for scheme a) for aluminum PA31(ENAW-2618A) alloy loaded by two laser pulses (b)- $q \approx 0,33 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$

Dla odpowiednich zastosowań warstwy wierzchniej materiału powinny być znane parametry:

- *materiału*: współczynnik przewodzenia ciepła, ciepło właściwe, moduł sprężystości, granica plastyczności, współczynnik rozszerzalności cieplnej, zależność temperatury topnienia od ciśnienia, współczynnik absorpcji (odbicia) promieniowania lasera i wiele innych,
- *lasera*: długość fali promieniowania laserowego, moc (w impulsie lub średnia związana z częstotliwością repetycji impulsów), kąt rozbieżności wiązki laserowej oraz czas trwania impulsu, rozkład gęstości energii w przekroju poprzecznym wiązki laserowej,
- *geometrii oświetlenia* obrabianego materiału (wymiary plamki laserowej),
- *metody obróbki, otaczającego ośrodka*: atmosfera gazu obojętnego (np. hel), reaktywnego (np. azot pod zadaniem ciśnieniem) lub w próżni.

3. Istota laserowego oczyszczania powierzchni

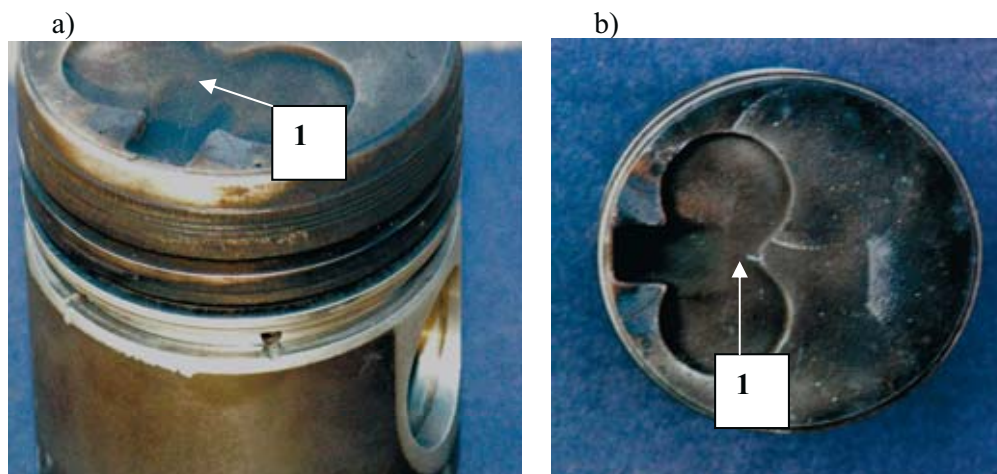
W procesie odrywania cząstek za pomocą strumienia fotonów, tzw. fotoodrywania, brane są pod uwagę trzy zasadnicze siły, które powodują „przyczepianie” cząsteczek do powierzchni; siła *van der Waalsa*, siła kapilarna (wywołana siłami cząsteczek) oraz siła elektrostatyczna. Siła *van der Waalsa* jest siłą oddziaływań międzycząsteczkowych. Przy zmniejszaniu odległości pojawiają się gwałtownie rosnące siły odpychania, jeśli natomiast odległość ta nieco wzrośnie - pojawiają się z kolei siły przyciągania cząsteczek do podłoża. Do pokonania stosunkowo dużych sił przylegania cząsteczek do podłoża bez uszkodzenia powierzchni można zastosować czyszczenie wiązką laserową z wykorzystaniem reakcji fotomechanicznej.

W wyniku intensywnej absorpcji promieniowania laserowego w warstwie przypowierzchniowej (tlenki, korozja, patyna, tłuszcze, oleje, farby lakiery i inne organiczne i nieorganiczne składniki) pojawia się jako jej skutek silny i gwałtowny wzrost temperatury. Powstaje plazma, od której w wyniku konwekcji i elektronowego przewodnictwa cieplnego następuje transport energii do wnętrza materiału, gdzie promieniowanie laserowe już nie dociera. Powstaje granica zwana frontem ablacji, na której występują silne gradienty gęstości i temperatury plazmy. Front ablacji oddziela więc dwa obszary, w których kierunki ruchu materii są przeciwne. Z obszaru bliższego zewnętrznej powierzchni następuje „ucieczka” nagrzanego materiału w kierunku prostopadłym do oświetlanej powierzchni. W obszarze drugim ruch materii jest skierowany w głąb podłoża. Występuje tu wąski obszar słabo tylko podgrzanej materii, zagęszczonej przez falę uderzeniową, propagującą się w wyniku prawa zachowania pędu, jako reakcja układu na bardzo szybkie odparowanie materii z powierzchni. Jeśli zanieczyszczająca warstwa jest bardzo cienka, fala uderzeniowa po odbiciu się od powierzchni podłoża warstwy granicznej (międzyfazowej) zmienia kierunek propagacji, zwielokrotniając efekt wyrzucania zanieczyszczających cząsteczek. W przypadku, gdy usuwana warstwa jest gruba, wystąpi przejście fali uderzeniowej w falę dźwiękową powodującą drgania litego podłoża w miejscu oświetlanym i zwielokrotnienie efektu czyszczenia. Po usunięciu narosłej warstwy, oryginalna powierzchnia jest chroniona automatycznie przed wszelkimi dalszymi uszkodzeniami, ponieważ nie istnieje już granica ośrodków - faz: fala uderzeniowa już się nie odbija, lecz jest pochłaniana przez podłoże. Głębokość frontu ablacji zależy przede wszystkim od długości fali promieniowania laserowego i waha się od 0,3 do 1 mikrometra. Oznacza to, że jesteśmy w stanie w sposób kontrolowany zdejmować jedną warstwę po drugiej. Oczywiście, proces ten zachodzi pod warunkiem odpowiedniego doboru parametrów promieniowania laserowego. Interesujące jest to, że jesteśmy w stanie w sposób płynny regulować parametrami wiązki laserowej, tzn. czasem trwania impulsu, szczytową gęstością mocy i częstotliwością repetycji impulsów. Dostarczona moc powinna być na tyle duża, aby w sposób natychmiastowy - gwałtowny - wytworzyć szybki przepływ ciepła do cząstki lub materiału podłoża, który jest wymagany do eksplozyjnego odparowania cząstek lub cienkich warstw, i na tyle niska, aby nie przekroczyć progu uszkodzenia powierzchni samego podłoża. Oczyszczanie powierzchni z zalegających na niej cząsteczek, nawarstwień obcych może zachodzić w środowisku mokrym lub suchym.

4. Badania własne - ekologiczne oczyszczanie laserowe produktów spalania osadzonych na denkach i płaszczu tłoków silnika spalinowego

Ablacyjne oczyszczanie laserowe jest nowatorską, ekologiczną i precyzyjną technologią, mającą zastosowanie w selektywnym usuwaniu nano- i mikrowarstw powierzchniowych. Technologia ta ma bardzo szerokie perspektywy w inżynierii powierzchni materiałów oraz elementów maszyn i różnych konstrukcji (budowlanych, kadłubów statków itp.). Z dużym powodzeniem od wielu lat technologia ta stosowana jest w praktyce w laboratoriach WAT, zarówno do oczyszczania dzieł sztuki (obrazy, rzeźby itp.) [2], jak również w technice (m.in. w motoryzacji, lotnictwie, przemyśle zbrojeniowym) [3-7]. Jedną z wielu zastosowanych aplikacji technologicznych dotyczy usuwania produktów spalania mieszanki paliwowo-powietrznej z denek tłoków oraz nawarstwień na płaszczu tłoka. W celu zwiększenia stopnia adiabatyzacji silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym (ZS) typu 4CT90 na jego denkach tłoków wytworzono m.in. termoizolacyjne ceramiczne powłoki barierowe TBC (Thermal Barrier Coating) na bazie proszków firmy Sulcer-Metco: F 6010 ($\text{Al}_2\text{O}_3 + 20\% \text{ZrO}_2 + 8\% \text{Y}_2\text{O}_3$) oraz F 6011 ($\text{Al}_2\text{O}_3 + 40\% \text{ZrO}_2 + 8\% \text{Y}_2\text{O}_3$). Natryśnięto je cieplnie metodą plazmową. Jako materiał podkładowy, pomiędzy materiałem tłoka a warstwą TBC zastosowano powłokę adhezyjno-relaksacyjną z materiału Amdry 997 (23% Co, 20% Cr, 8,5% Al, 4% Ta, 0,6% Y, reszta Ni). Tak przygotowane tłoki z ww. powłokami zamontowano do silnika spalinowego, który na stanowisku hamownianym został poddany cyklicznym obciążeniom termicznym oraz zmiennym amplitudom ciśnień w 450-godzinnej próbie trwałościowej.

W wyniku procesów spalania mieszanki paliwowo powietrznej dostarczanej do cylindrów na powierzchni powłoki barierowej osadziła się warstwa produktów spalania (tzw. nagar). Powłoka TBC spełnia nie tylko funkcję termoizolacyjną, ale także ochronną przed działaniem erozji produktów spalania. Proces ablacyjnego oczyszczania laserowego ma zastosowanie w szczególnych przypadkach, np. w celu przeprowadzenia oceny jakości wytworzonej powłoki lub w czasie wykonywania okresowych napraw głównych silników, szczególnie dużej mocy (montowanych w czołgach, transporterach opancerzonych, okrętach itp.). Oczyszczanie to może być realizowane z dużą łatwością np. po zdemontowaniu tłoków silnika. Oczyszczaniem laserowym można zastąpić tzw. „pestkowanie” medium pestek owoców (wiśni, czereśni itp.), lub nieekologiczne oczyszczanie chemiczne. Pod pojęciem „ekologiczne oczyszczanie laserowe” rozumie się proces technologiczny, w którym następuje usunięcie produktów spalania (nagaru) oraz odessanie ich do specjalnych zasobników. Produkty te mogą być następnie zneutralizowane.



Rys. 2. Tłok silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym (ZS) 4CT90 po próbie hamownianej: a) widok tłoka z powłoką barierową, b) widok denka tłoka z komorą spalania; 1 - termoizolacyjna powłoka barierowa TBC ($\text{Al}_2\text{O}_3 + 40\% \text{ZrO}_2 + 8\% \text{Y}_2\text{O}_3$)

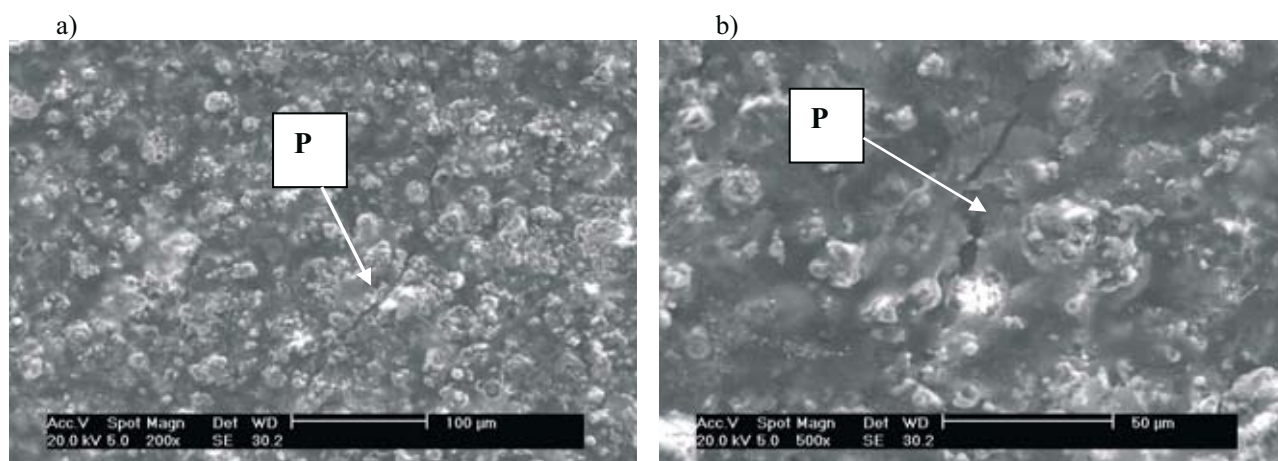
Fig. 2. A piston of combustion engine with self-ignition 4CT90 after engine test; a) Piston with barrier layer, b) Pistons bottom with combustion chamber; 1-thermal insulation barrier layer TBC ($\text{Al}_2\text{O}_3 + 40\% \text{ZrO}_2 + 8\% \text{Y}_2\text{O}_3$)

Proces oczyszczania prowadzono w warunkach laboratoryjnych WAT na tłokach zdemontowanych z silnika poddanego wcześniej stanowiskowej próbie hamownianej w warunkach szoków cieplnych (Rys. 2).

Wykorzystując do obserwacji powierzchni denek tłoków mikroskopię stereoskopową oraz elektronową mikroskopię skaningową (SEM/SE/BSE) z mikroanalizą rentgenowską stwierdzono, że powłoka barierowa pokryta jest warstwą nagaru z widocznymi licznymi mikro- i makropęknięciami (Rys. 3).

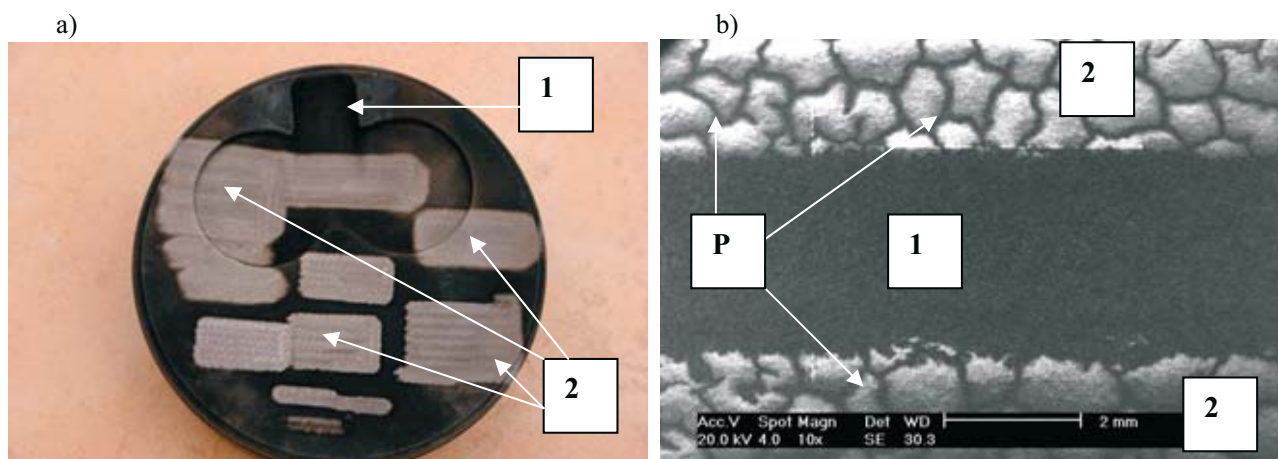
W badaniach laboratoryjnych w zakresie oczyszczania laserowego powłok barierowych TBC zrealizowanych w WAT, wykorzystano specjalistyczne stanowisko w skład którego wchodzi: laser impulsowy na ciele stałym Nd: YAG, Renoma Laser 2 z Q-modulacją i przetwarzaniem częstotliwości emitującego promieniowanie o długościach fal: $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$; $\lambda = 0,532 \mu\text{m}$, $\lambda = 0,355 \mu\text{m}$ i $\lambda = 0,266 \mu\text{m}$, zintegrowany z pracą lasera automatyczny stół przemieszczający się w osiach x-y w przedziale prędkości 0,2-2 m/min.

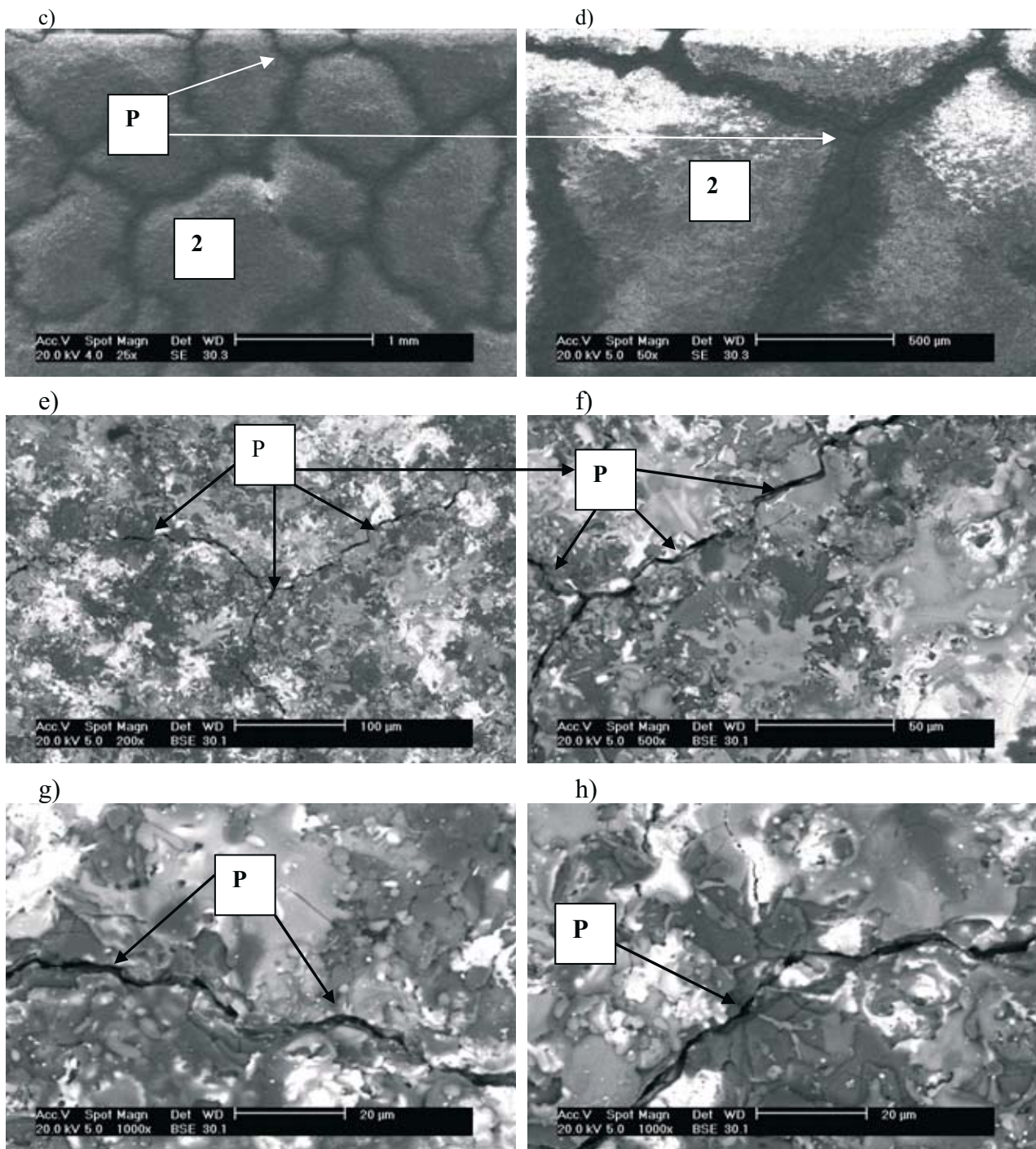
Stosując różne gęstości energii od 0,2 do 4 J/cm², prędkości skanowania w zakresie 0,2-1,5 m/min, różne stopnie przykrycia (0,25-0,75%) przy stałej repetycji impulsów laserowych 10Hz, przeprowadzono wielowariantowe oczyszczanie laserowe powłoki TBC (Rys. 4a).



Rys. 3. Topografia powierzchni termoizolacyjnej powłoki barierowej TBC ($\text{Al}_2\text{O}_3 + 40\% \text{ZrO}_2 + 8\% \text{Y}_2\text{O}_3$) na denku tłoka silnika 4CT90 po próbie na stanowisku hamownianym - obecność nagaru po spalaniu mieszanki paliwowo-powietrznej z licznymi mikro- i makropęknięciami powłoki; P-pęknięcia, skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM/ SE)

Fig. 3. Topography of thermal insulation barrier layer ($\text{Al}_2\text{O}_3 + 40\% \text{ZrO}_2 + 8\% \text{Y}_2\text{O}_3$) at the pistons bottom of 4CT90 engine after engine test. Presence of carbon deposits after fuel-air mixture combustion with numerous micro and macro cracks of the layer; P-cracks, Scanning Electron Microscope (SEM/SE)

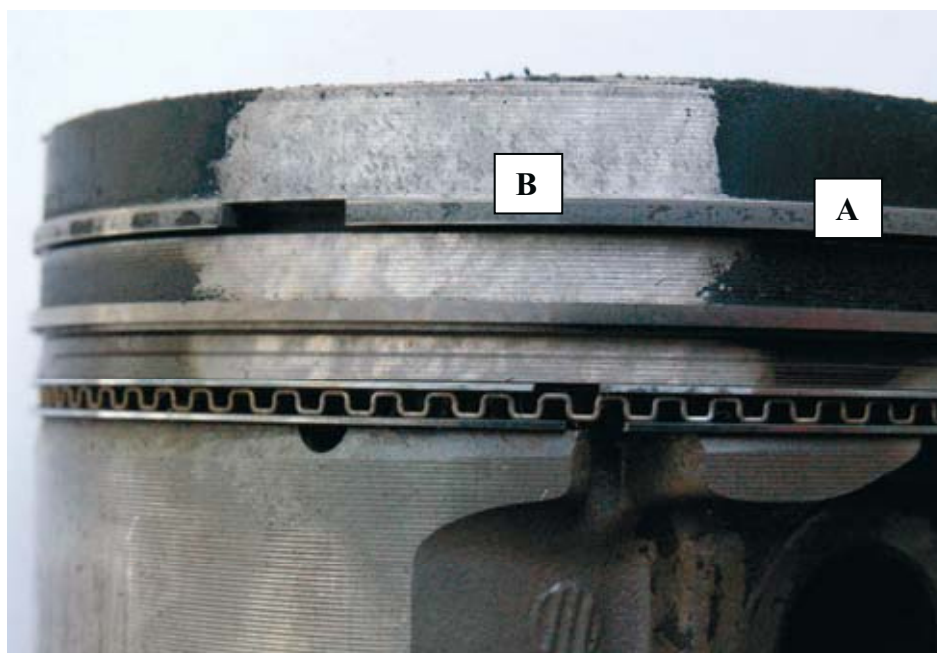




Rys. 4. Topografia powierzchni termoizolacyjnej powłoki barierowej TBC ($Al_2O_3 + 40\% ZrO_2 + 8\% Y_2O_3$) na denku tłoka silnika 4CT90 po próbie na stanowisku hamownianym i oczyszczeniu laserowym z warstwy nagaru: a) widok denka tłoka z obszarami oczyszczonymi laserowo przy różnych parametrach obróbki, b) fragment topografii powłoki ceramicznej z widocznymi obszarami przed i po oczyszczeniu - widoczna regularna siatka mikropęknięć w strefie oczyszczonej, c-h) charakterystyczne mikroobszary powłoki barierowej oczyszczonej laserowo; 1 - strefy powłoki pokrytej nagarem będącym produktem spalania mieszanki paliwowo-powietrznej, 2 - strefy powłoki oczyszczonej laserowo z nagaru, P-mikro- i makropęknięcia, jako efekt szoków termicznych i wyzwala się naprężeń własnych, SEM (b-d - SE, e-h - BSE)

Fig. 4. Topography of thermal insulation barrier layer ($Al_2O_3 + 40\% ZrO_2 + 8\% Y_2O_3$) at the pistons bottom of 4CT90 engine after engine test and laser ablation cleaning: a) A pistons bottom with laser cleaned areas at various treatment parameters, b) a piece of topography ceramic layer with noticeable areas before and after laser ablation cleaning-regular net of cracks in cleaned area, c-h) characteristic micro areas of laser cleaned barrier layer; 1 - areas covered by carbon deposits (a product of fuel-air mixture combustion), 2 - laser cleaned areas, P-micro and macro cracks as an heat shocks and internal stresses liberation effects, SEM (b-d -SE, e-h - BSE)

W ramach badań laboratoryjnych podjęto również próby technologiczne oczyszczania laserowego strefy pierścieniowej oraz płaszcza tłoka (Rys. 5). Przeprowadzona analiza topografii powierzchni tłoka potwierdziła również korzystny wpływ efektu ablacji laserowej. Powstałe w wyniku procesów eksploatacji nawarstwienia (m.in. nagar) zostały usunięte, bez uszkodzenia materiału rodzimego tłoka. Ze względu na dużą precyzję, możliwość sekwencyjnego oddziaływania i automatyzacji procesu, ta nowoczesna i ekologiczna technologia, dzięki ww. zaletom może już w niedługim czasie zastąpić inne, tradycyjne metody oczyszczania mechanicznego jak pestkowanie i piaskowanie, stosowane dla bardzo wielu elementów maszyn, w tym elementów silników spalinowych.



Rys. 5. Przykłady technologicznego zastosowania ablacyjnego oczyszczania laserowego z widocznymi charakterystycznymi strefami warstwy wierzchniej tłoka silnika spalinowego po oczyszczeniu wiązką lasera impulsowego Nd: YAG o gęstości energii 2 J/cm^2 , czasie trwania impulsu 10 ns ; A - warstwa powierzchniowa nie oczyszczona, B - warstwa powierzchniowa po oczyszczeniu

Fig. 5. Examples of technological applications of laser ablation cleaning with noticeable surface layer areas of combustion engine piston after cleaning with impulse laser beam. Nd: YAG with energy density 2 J/cm^2 , and pulse duration 10 ns ; A - surface layer without cleaning, B - surface layer after the cleaning process

5. Podsumowanie

Istnieje wiele technologii usuwania i czyszczenia powierzchni, ale niewiele z nich spełnia wymogi ekonomiczne i ochrony środowiska. Laserowa obróbka powierzchni spełnia lub przewyższa wymagania stawiane przez elektronikę, przemysł nuklearny, kosmiczny i inżynierię lądową. Nowoczesne lasery impulsowe (nano-, piko- i femtosekundowe) posiadają wiele zalet, m.in.: pracują w zakresie średnich mocy z możliwością pracy impulsowej z Q-modulacją na różne długości fali, posiadają zdolności do sprzężenia z materiałem obiektu i dostarczania wiązki laserowej światłowodem.

Cząstki zanieczyszczeń występujące w warstwach powierzchniowych materiałów stosowanych w budowie elementów i maszyn najczęściej są związane z powierzchnią siłami kowalencyjnymi, elektrostatycznymi, jonowymi lub Van der Waalsa. Do usunięcia ściśle przylegających warstw wymagana jest ablacja laserowa. Ablację osiąga się poprzez szok termiczny, topnienie i odparowanie. Metodą tą można usunąć warstwy farby, tlenków, cienkie warstwy podkładu i inne warstwy organiczne/nieorganiczne.

Laserowe systemy stosowane do oczyszczania mogą pracować w otoczeniu mokrym i suchym. Pracują one optymalnie, gdy na powierzchni przepływa ciecz usuwająca zanieczyszczenia lub usunięte cząstki są odsysane odkurzaczami przemysłowymi. Najważniejsze w procesie oczyszczania jest pełne rozpoznanie oddziaływań lasera z materiałem, co istotnie pomaga w opracowaniu prawidłowych parametrów procesu. Pomocą w określeniu jakie zjawisko przeważa (obróbka cieplna, topienie, odparowanie) jest znajomość absorpcji energii, transferu ciepła i współczynnika odbicia. W procesie oczyszczania istotne znaczenie ma długość promieniowania laserowego, modowość wiązki, gęstość energii promieniowania, czas ekspozycji wiązki, rodzaj pracy lasera (ciągła, impulsowa), częstotliwość repetycji, prędkość skanowania wiązką, układ geometryczny stref oczyszczanych oraz stopień automatyzacji procesu.

Przedstawione aplikacje technologiczne oczyszczania laserowego termoizolacyjnych powłok barierowych TBC ($\text{Al}_2\text{O}_3 + 40\% \text{ZrO}_2 + 8\% \text{Y}_2\text{O}_3$) wytworzonych na denkach tłoków silnika 4CT90, poprzez natryskiwanym cieplne metodą plazmową przyniosły oczekiwane rezultaty. Głównym celem oczyszczania było usunięcie nagaru będącego produktem spalania mieszanki paliwowo-powietrznej w silniku spalinowym w czasie trwania próby na stanowisku hamownianym. Stosując różne parametry wiązki laserowej oraz różne układy geometryczne oczyszczania, dobrano optymalne parametry obróbki, przy których uzyskano czystą powierzchnię powłoki, bez śladów nagaru. Oczyszczanie laserowe nie spowodowało mikronadtopień ceramicznej powłoki barierowej oraz uwidocznilo bardzo regularną siatkę mikro- i makropęknięć, będących efektem szoków termicznych i wyzwalała się naprężenia własnych w czasie pracy w silniku spalinowym. Ta ekologiczna, bardzo precyzyjna i wydajna technologia może znaleźć zastosowanie w szerokim zakresie w inżynierii powierzchni materiałów (w tym ceramicznych) oraz elementach maszyn występujących w wielu dziedzinach przemysłu, zwłaszcza w lotnictwie, motoryzacji, przemyśle zbrojeniowym, chemicznym i innych.

Autor artykułu dziękuje mgr. inż. Antoniemu Rycykowi z IO WAT za pomoc w ablacyjnej mikroobróbce laserowej warstwy wierzchniej ceramicznych powłok barierowych, osadzonych na tłokach silników spalinowych.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2007-2010 jako projekt badawczy N508 054 32/375.

Literatura

- [1] Burakowski, T., Wierzchoń, T., *Inżynieria powierzchni metali*, WNT, Warszawa 1995.
- [2] Marczak, J., *Analiza i usuwanie nawarstwień obcych z różnych materiałów metodą ablacji laserowej*, ISBN: 83-88442-94-5, 2004.
- [3] Marczak, J., Napadłek, W., Sarzyński, A., *Modyfikacja właściwości warstwy wierzchniej aluminium za pomocą laserowej fali uderzeniowej*, Inżynieria Materiałowa Nr 5(147), s. 622-624, Katowice 2005.
- [4] Napadłek, W., Sarzyński, A., Marczak, J., *Analiza procesów zachodzących podczas ablacji laserowej na stopach aluminium*, Przegląd Spawalnictwa Nr 5-6, s. 64-67, 2006.
- [5] Burakowski, T., Marczak, J., Napadłek, W., *Istota ablacyjnego oczyszczania laserowego materiałów*, Prace Instytutu Elektrotechniki, LIII, Zeszyt 228'06, s. 125-135, 2006.
- [6] Burakowski, T., Napadłek, W., Marczak, J., *Ablacyjna mikroobróbka laserowa w areologii*, Inżynieria Materiałowa, Nr 5 (153), Rok XXVII, s. 882-889, wrzesień-październik 2006.
- [7] Burakowski, T., Kubicki, J., Marczak, J., Napadłek, W., *Technologiczne możliwości zastosowania ablacyjnego oczyszczania laserowego materiałów*, Prace Instytutu Elektrotechniki, LIII, Zeszyt 228'06, s. 137-146, 2006.