

LASER ABLATION MICROPROCESSING OF ELEMENTS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Wojciech Napadlek

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

Abstract

On the base of literature data as well as on the author's papers a review of the state-of-the art in material surface engineering using laser ablation processing is presented. A special emphasis is put on application of lasers with short and ultra-short pulses. The author's suggestions for definitions' scope and systematization of laser processing into qualitative groups are discussed. The point and capabilities for technological application of laser microprocessing of elements of internal combustion engines are shown. Selected results of the author's works devoted to ablative profiling of oil reservoirs in the upper zone of cylinder sleeves, laser removal of carbon deposits from piston heads and piston rings, cylinder sleeves, combustion chambers, and laser removal of oxides from internal combustion engine frames and heads are presented. An idea of modification and laser shock peening of selected engine elements like frames, valves, and timing gear rollers is also presented. The selection results of investigation of technological superficial layer on the valve steel x45CrSi i9-3 (H9S2) formed by duplex technology: glow discharge nitriding and modification by impulse laser treatment on described. Performed experiments on chosen elements of combustion engines pistons, piston-rings, heads, bodies, valves, cylinder liners, crank-shafts confirmed the usefulness of proposed technology.

Keywords: laser ablation microprocessing, surface layer, elements of internal combustion engine

ABLACYJNA MIKROOBRÓBKA LASEROWA ELEMENTÓW SILNIKA SPALINOWEGO

Streszczenie

Na podstawie literatury oraz prac własnych przedstawiono przegląd stanu wiedzy dotyczący powierzchniowej obróbki materiałów za pomocą ablacyjnej mikroobróbki laserowej, ze specjalnym naciskiem na zastosowanie laserów o krótkich i ultrakrótkich impulsach. Przedstawiono propozycje autora w zakresie definicji oraz usystematyzowania podziału mikroobróbki laserowej na grupy jakościowe. Opisano istotę oraz możliwości zastosowań technologicznych w elementach silników spalinowych. Przedstawiono wybrane wyniki badań własnych w zakresie: ablacyjnego kształtowania zasobników olejowych w górnej strefie tulei cylindrowej, oczyszczania laserowego z osadów (nagarów) denek tłoków i pierścieni tłokowych, tulei cylindrowych, komór spalania, usuwania tlenków z kadłubów i głowic silnika spalinowego. Przedstawiono również ideę modyfikacji oraz laserowego umacniania udarowego wybranych elementów silników jak; korpusy, zawory oraz walki rozrządu. W artykule przedstawiono także wybrane wyniki badań technologicznej warstwy wierzchniej wytworzonej na stali zaworowej X45CrSi 9-3 (H9S2) w procesie duplex, poprzez azotowanie jarzeniowe oraz impulsową modyfikację wiązką lasera. Wykonane eksperymenty na wybranych elementach silników spalinowych: tłokach, pierścieniach tłokowych, głowicach, kadłubach silników, zaworach, tulejach cylindrowych, wałach korbowych i potwierdziły przydatność proponowanej technologii.

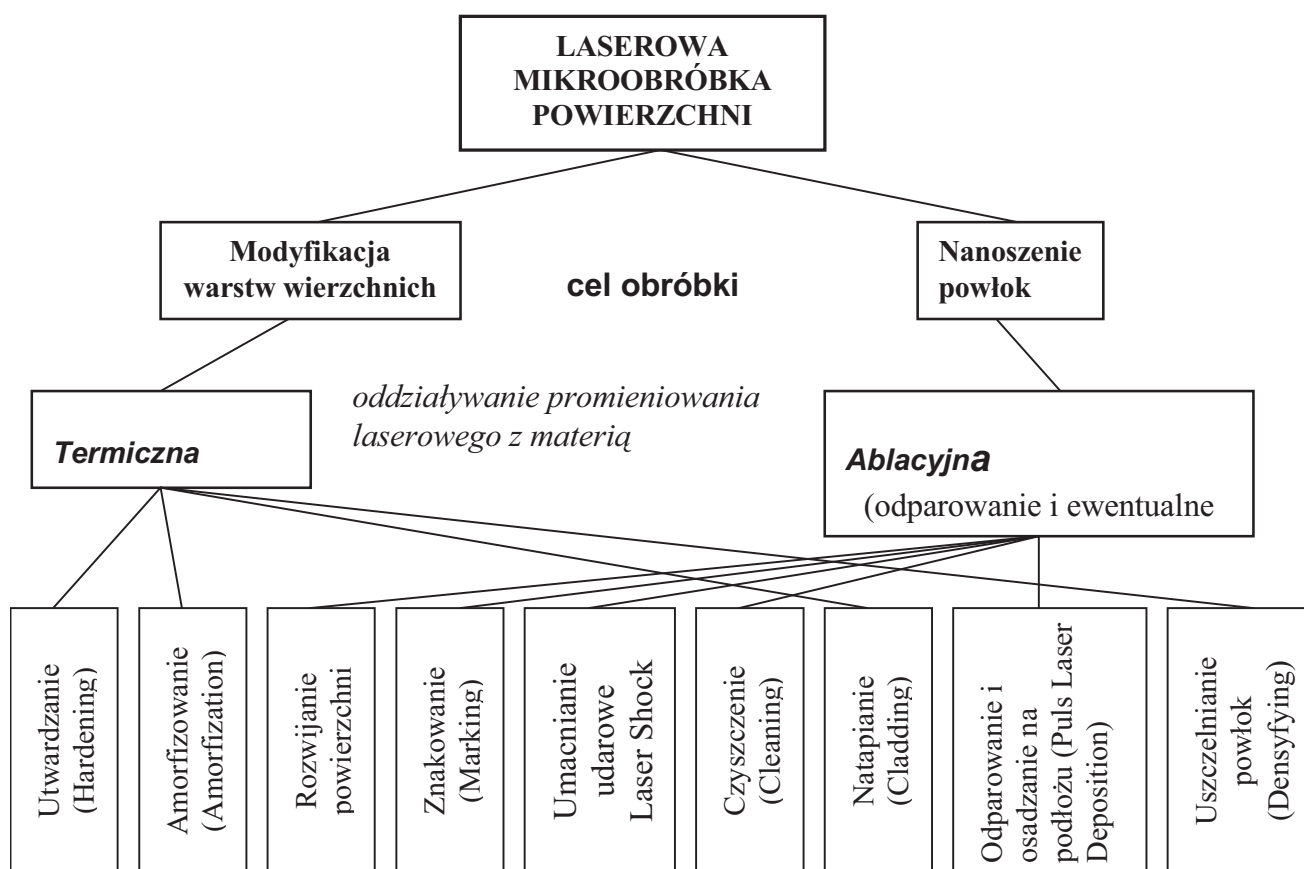
Słowa kluczowe: ablacyjna mikroobróbka laserowa, warstwa wierzchnia, elementy silnika spalinowego

1. Wprowadzenie

Obróbka laserowa – oprócz cięcia, spajania i perforowania jak wszystkie rodzaje obróbek powierzchniowych, ma za zadanie zmianę właściwości geometryczno – fizyko – chemicznych

warstw powierzchniowych z istniejących na pożądane. Te właściwości – to głównie kształtowanie (indywidualne lub łączne) [1, 2]:

- topografii (stereometrii) powierzchni; zmniejszanie lub zwiększanie chropowatości powierzchni, rzeźbienie powierzchni,
- właściwości fizycznych, głównie; zwiększenie twardości, umocnienie, ale również nadanie innych specyficznych właściwości, zwłaszcza tribologicznych, zmęczeniowych, dekoracyjnych,
- właściwości chemicznych, głównie odporności korozyjnej, ale również właściwości katalitycznych, absorpcyjnych i innych. Mikroobróbka laserowa, podobnie jak obróbka laserowa, pozwala na modyfikację i łączenie powierzchni technicznych a także ich gięcie, rozczalanie i polerowanie. Niektóre technologie obróbki laserowej mogą być realizowane również w skali makro, ale nie wszystkie i nie zawsze, zależy to od mocy lasera, a prawie zawsze od sposobu oddziaływania wiązki laserowej z obrabianym materiałem (rys. 1).



Rys. 1. Rodzaje laserowej mikroobróbki powierzchni
Fig. 1. Areas of laser surface micro-treatment

2. Oddziaływanie impulsowego promieniowania laserowego z materiałem

Rozróżnia się oddziaływanie fotonów wiązki laserowej z materiałem:

- termiczne: polegające na szybkim wzroście temperatury powierzchni aż do jej przetopienia (rys. 2a),
- ablacyjne: polegające na bardzo szybkim wzroście temperatury powierzchni aż do odparowania materiału i wytworzenia fali uderzeniowej oddziałującej mechanicznie na materiał (rys. 2b).

Obecnie coraz częściej znajdują zastosowanie lasery impulsowe o czasach trwania pojedynczego impulsu rzędu dziesiątek pikosekund i setek femtosekund. Z punktu widzenia mikroobróbki, krótsze impulsy laserowe dają zdecydowanie lepszą jakość procesu obróbki (np.

drażenia czy znakowania). Promieniowanie laserowe jest absorbowane przez elektrony swobodne w warstwie wierzchniej („naskórkowej”). Czas relaksacji elektronów swobodnych (między kolejnymi zderzeniami) jest rzędu pojedynczych pikosekund. Ważną wielkością jest głębokość optycznej penetracji światła: $\delta \sim 1/\alpha$, na jakiej absorbowana jest niemal cała energia impulsu laserowego, gdzie: α – współczynnik absorpcji (dla metali jest rzędu 10^6 cm^{-1}). Oznacza to, że w czasie np. 1 ps, energia lasera nagrzewa orientacyjnie 10 nm warstwę metalu. Ciepło to dyfunduje z tej cienkiej warstewki naskórkowej w głąb metalu. Głębokość dyfuzji ciepła określana jest z kolei ze znanego wyrażenia wynikającego z rozwiązania najprostszego równania przewodnictwa ciepła: $d = \sqrt{\kappa \cdot \tau_L}$, gdzie: κ – dyfuzyjność cieplna, τ_L – czas dyfuzji (czas trwania impulsu laserowego). Dla stali $\tau_L = 1 \text{ ps}$, $d = 10 \text{ nm}$. Przekształcenie laserowej energii w ciepło zabiera więc 1 ps, absorpcja ciepła zachodzi w cienkiej 10 nm warstwie naskórkowej, a głębokość dyfuzji ciepła dla 1 ps wynosi również 10 nm.

Porównując powyższe zgrubne oszacowania można powiedzieć, że impuls można uważać za ultrakrótki, gdy głębokość dyfuzji ciepła w trakcie impulsu jest tego samego rzędu lub mniejsza niż głębokość penetracji optycznej (grubość warstwy naskórkowej). Głębokość penetracji optycznej zależy od materiału i długości fali emitowanej przez laser.

Cechy charakterystyczne oddziaływania piko- i subpikosekundowych impulsów promieniowania laserowego z dowolnym materiałem w procesie mikroobróbki, to:

- wysokie natężenie pola elektrycznego,
- jonizacja dowolnego materiału,
- jedno- lub wielofotonowa absorpcja.

Obrabiany materiał usuwany jest za pomocą wytworzonej plazmy laserowej, a cechą charakterystyczną takiego procesu jest:

- praktyczny brak oddziaływania z powstałą plazmą,
- brak strefy wpływu ciepła (SWC),
- brak gładkich nadtopionych krawędzi,
- brak „zadziorów-rąbków”, np. podczas procesu cięcia.

Dla promieniowania nadfioletowego, zwłaszcza o długości fali $\lambda < 200 \text{ nm}$ (absorbowanego przez powietrze) występuje „płytką” penetracja materiału przez promieniowanie, a dla materiałów słabo absorbujących można uzyskać lepszą kontrolę głębokości i jakości krawędzi.

3. Ablacja laserowa

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

Pożądanym jest mały współczynnik odbicia promieniowania, a odpowiednio duże wzbudzenie powierzchni wymaga wiązek laserowych o dużych natężeniach i małej głębokości absorpcji promieniowania laserowego. Proces ablacji materiału podzielić można na kilka etapów:

- zdeponowana energia (w objętości) osiąga wartość progową procesu ablacji,
- odparowanie warstwy wierzchniej materiału może zachodzić na drodze termicznej (pirolitycznej) lub fotolitycznej (dla promieniowania z obszaru nadfioletu),
- powstały obłok plazmy składa się z: fragmentów cząsteczek materiału elektronów/jonów oraz produktów reakcji,
- obłok plazmy powoduje pochłanianie i rozproszenie padającego impulsu promieniowania laserowego,

- wygenerowana fala dźwiękowa (w głąb materiału) po odbiciu od granicy faz może powodować zwiększenie produktów reakcji.

Grubość odparowanej warstwy wierzchniej (głębokość ablacji) zależy od:

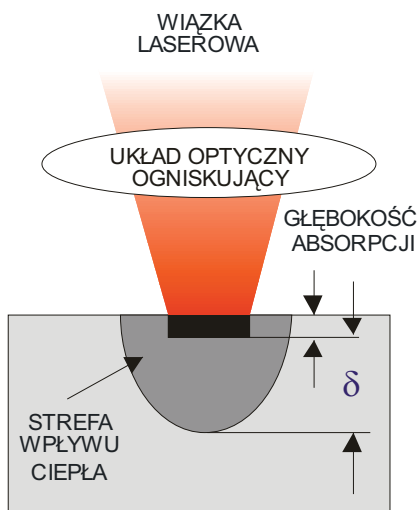
- parametrów materiału: *optycznych* – głębokości absorpcji promieniowania lasera; *termicznych* – współczynnika przewodzenia ciepła, współczynnika dyfuzji temperatury i ciepła parowania,
- parametrów wiązki laserowej: długości fali promieniowania lasera (występuje silna zależność współczynnika absorpcji materiału od długości fali), gęstości energii i czasu trwania impulsu laserowego.

O ile technologie laserowe oparte o nagrzewanie i przetapianie wykorzystują lasery ciągłego działania (przede wszystkim lasery CO₂, oraz coraz częściej lasery Nd: YAG pobudzone laserami półprzewodnikowymi), to w procesach ablacyjnej mikroobróbki laserowej, wykorzystuje się głównie lasery impulsowe (np. Nd: YAG i ekscymerowe).

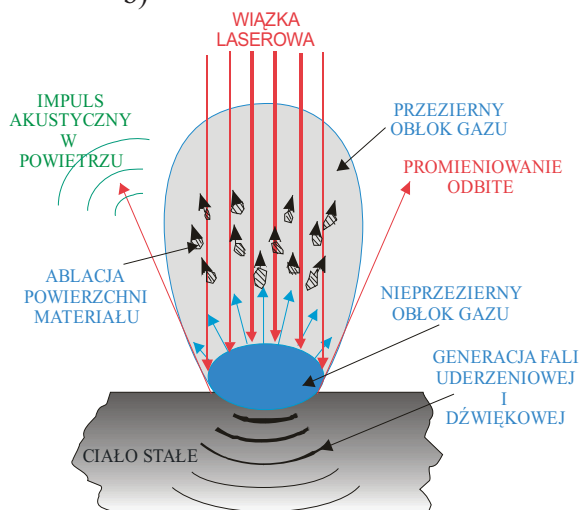
W przeciwieństwie do tradycyjnych metod obróbki cieplnej, w których szybkość zmian temperatury nie przekracza tysiąca kelwinów na sekundę, za pomocą lasera można osiągnąć szybkość zmian nawet rzędu 10¹⁰ K/s. Tak duża szybkość zmian temperatury (np. podczas chłodzenia) pozwala wytwarzać nieznane dotychczas stany materii, np. metale w postaci szklistej.

Przykłady wybranych badań własnych przedstawia rys. 2c-f. Stosując odpowiednio dobraną gęstość mocy realizowano umacnianie udarowe (rys. 2c,d) stopu aluminium PA31, a także modyfikację stali zaworowej azotowanej jarzeniowo, polegającą na wielokrotnym oddziaływaniu krótkimi impulsami laserowymi dużej mocy na jej warstwę powierzchniową (rys. 2e,f).

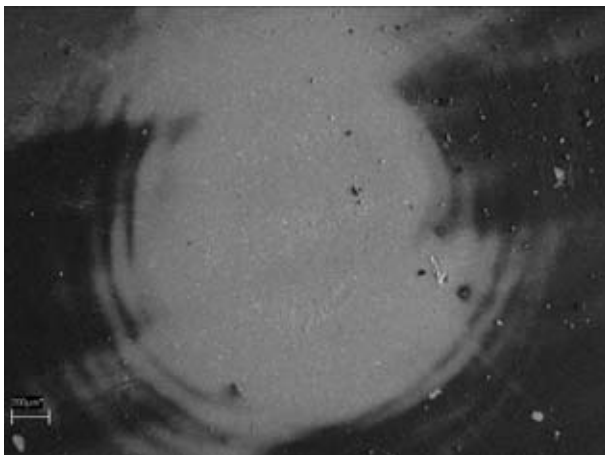
a)



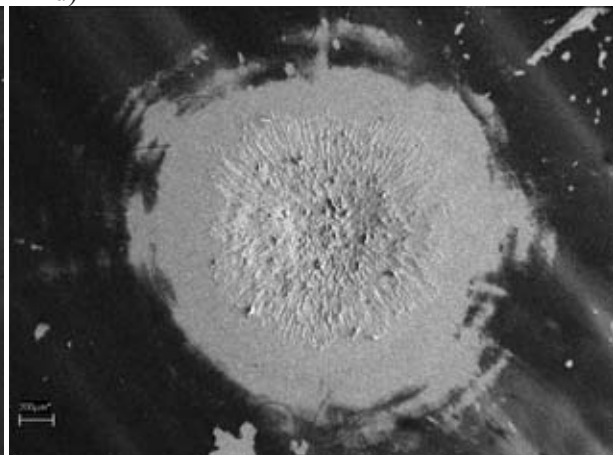
b)

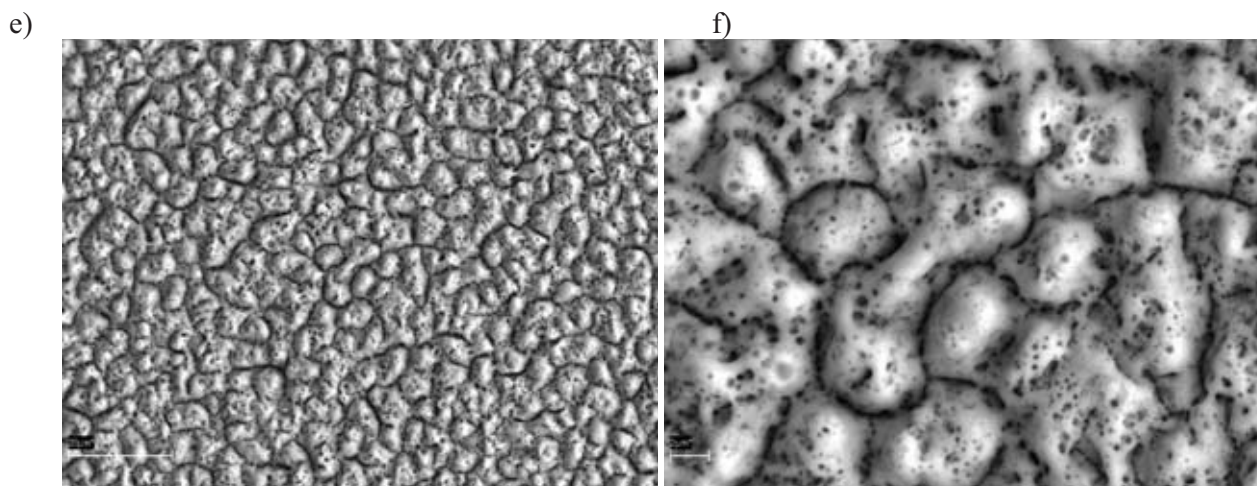


c)



d)

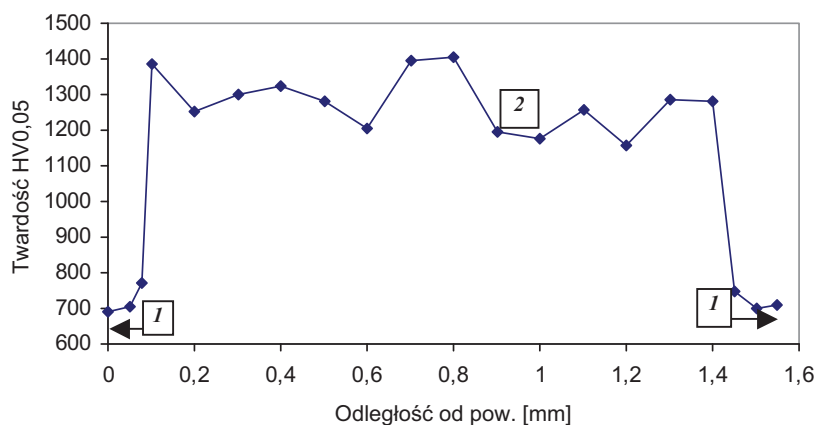




Rys. 2. Oddziaływanie impulsowego promieniowania laserowego z materią w pewnym momencie czasu „t” oraz po zakończeniu impulsu: a) – dla gęstości mocy $q \leq 10^3 - 10^5 \text{ W/cm}^2$; b) – dla gęstości mocy $q \approx 10^8 - 10^9 \text{ W/cm}^2$, c, d – efekty końcowe umocnienia udarowego (LSP) – wariant ze schematu przedstawionego na rys. b dla stopu aluminium PA31 obciążonego jednym impulsem (c) oraz dwoma impulsami laserowymi (d), e, f – modyfikacja laserowa stali zaworowej azotowanej jarzeniowo – strefa środkowa – wyniki badań własnych

Fig. 2. Pulse laser-matter interaction in transient time momentum “t” and after laser pulse termination: a) power density $q \leq 10^3 - 10^5 \text{ W/cm}^2$; b) power density $q \approx 10^8 - 10^9 \text{ W/cm}^2$; c, d) – final results of laser shock hardening (LSP) obtained using scheme b) for aluminium alloy PA31 loaded by one laser pulse and (c) and two laser pulses (d); e, f) – laser modification of nitrided by glow discharge valve steel – central zone results of own research

W wyniku tej modyfikacji laserowej zachodziły procesy ultraszybkiego nagrzewania, topnienia, odparowania oraz krystalizacji azotowanej warstwy wierzchniej. Powstały wielofazowe struktury drobnoziarniste o budowie sferycznej (rys. 2e,f) charakteryzujących się wysoką twardością 1200 - 1400 HV0,5 (rys. 3).



Rys. 3. Rozkład twardości w strefie azotowania wewnętrznego stali X45CrSi9-3 po modyfikacji impulsową wiązką laserową: 1 – strefa azotowania jarzeniowego z fazami $\epsilon + \gamma'$, 2 – strefa po modyfikacji laserowej

Fig. 3. The order of hardness in the zone of internal nitriding X45CrSi9-3 steel after laser impulse beam treatment: 1 – zone glow discharge nitriding of phases $\epsilon + \gamma'$, 2 – zone after laser beam treatment

4. Istota laserowego oczyszczania powierzchni

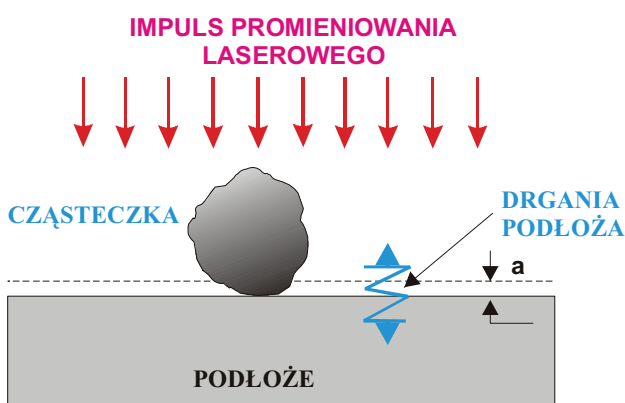
W procesie odrywania cząstek za pomocą strumienia fotonów, tzw. fotoodrywania, brane są pod uwagę trzy zasadnicze siły, które powodują „przyczepianie” cząsteczek do powierzchni; siła *van der Waalsa*, siła kapilarna (wywołana siłami cząsteczek) oraz siła elektrostatyczna. Siła *van der Waalsa* jest siłą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

przylegania cząsteczek do podłoża bez uszkodzenia powierzchni można zastosować czyszczenie wiązką laserową z wykorzystaniem reakcji fotomechanicznej [1,2].

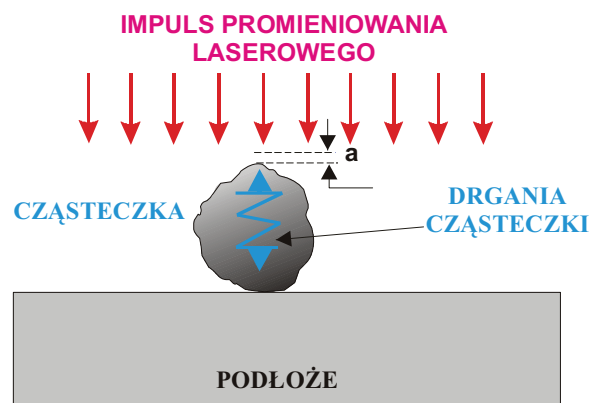
W wyniku intensywnej absorpcji promieniowania laserowego w warstwie przypowierzchniowej (tlenki, korozja, patyna, tłuszcze, oleje, farby lakiery i inne organiczne i nieorganiczne składniki) pojawia się jako jej skutek silny i gwałtowny wzrost temperatury. Powstaje plazma, od której w wyniku konwekcji 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.

Przy czyszczeniu suchym można wyróżnić dwa skrajne przypadki (rys. 4). W wariacie pierwszym dobiera się długość fali silnie absorbowaną tylko przez podłoże (rys. 4a). W drugim, promieniowanie laserowe jest silnie absorbowane jedynie przez cząsteczkę (rys. 4b).

a) SILNA ABSORPCJA PODŁOŻA



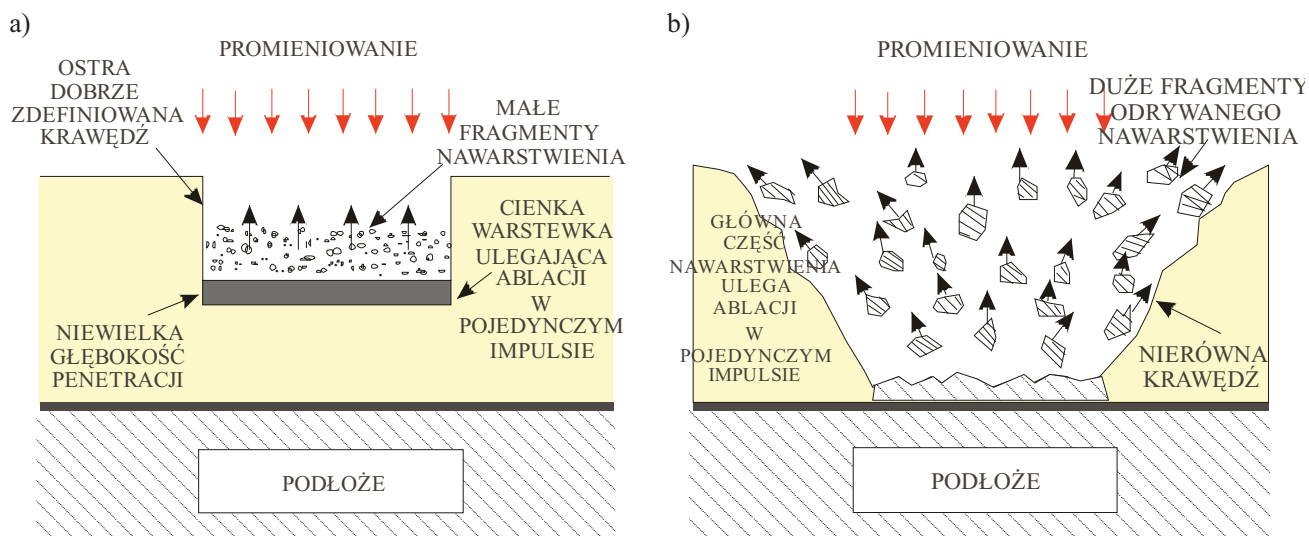
b) SILNA ABSORPCJA CZĄSTECZKI



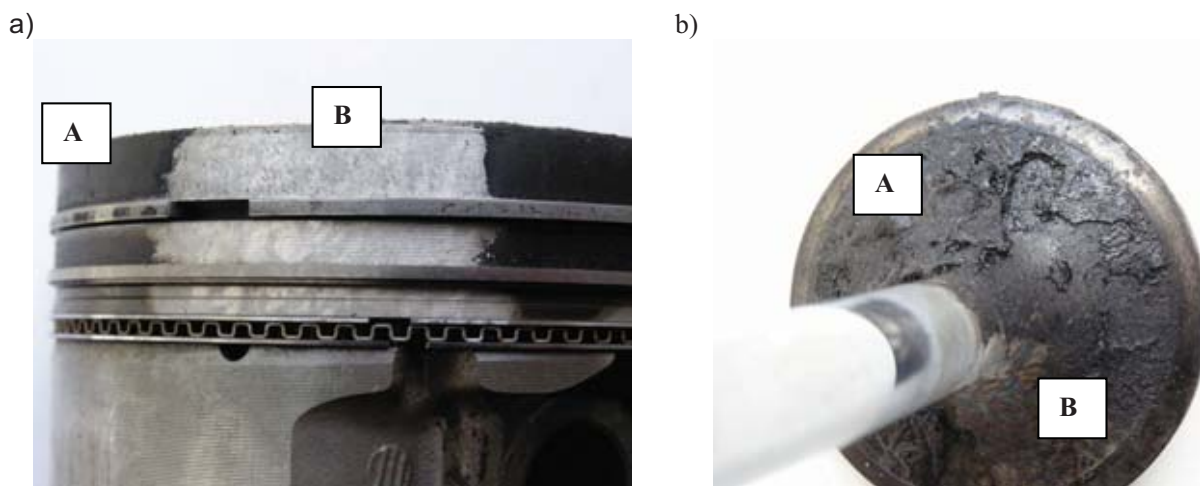
Rys. 4. Ilustracja ekstremalnych przypadków usuwania „na sucho” mikrocząsteczek z podłoży
Fig. 4. An illustration of extreme cases for „dry” removal of microparticles from substrates

W pierwszym przypadku zjawisko odrywania cząsteczki wyjaśnia się gwałtownym wzrostem grubości podłoża spowodowanym jego termicznym rozszerzeniem w wyniku absorpcji padającego promieniowania (zmiana środka masy). Pomimo iż przyrost grubości podłoża może być bardzo mały, poniżej mikrometra, to zachodzi on tak szybko, że odpowiadające mu przyspieszenie może osiągnąć wartość nawet rzędu 10^7 g. Ogromne przyspieszenie prowadzące do usuwania cząsteczek z powierzchni można również uzyskać w przypadku silnej absorpcji promieniowania przez samą cząsteczkę (rys. 4b).

Idee usuwania nawarstwień za pomocą promieniowania laserowego o różnej długości fal promieniowania laserowego przedstawiono na rys. 5. Przykłady zastosowań technologicznych oczyszczania elementów silnika spalinowego (tłok, pierścienie tłokowe, zawór) z produktów spalania przedstawiono na rys. 6.



Rys. 5. Ilustracja usuwania nawarstwień w postaci powłok naniesionych na warstwę wierzchnią metodą ablacji laserowej dla skrajnie różnych długości fal promieniowania laserowego: a) $\lambda = 0,193 \mu\text{m}$ i b) $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$
 Fig. 5. Illustration of laser ablation removal of encrustation covering original material top layers for extreme different laser radiation wavelengths: a) $\lambda = 0.193 \mu\text{m}$ and b) $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$

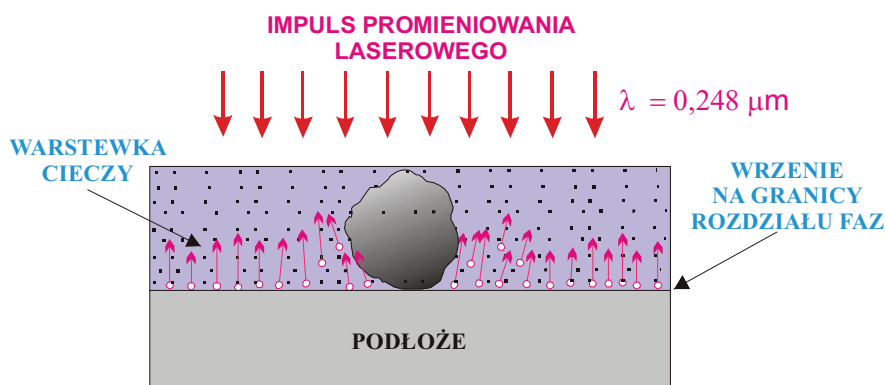


Rys. 6. Przykłady technologicznego zastosowania ablacyjnego oczyszczania laserowego elementów maszyn z widocznymi charakterystycznymi strefami warstwy wierzchniej tłoka, pierścieni tłokowych, zaworu; Nd:YAG o gęstości energii 2 J/cm^2 , czas trwania impulsu 10 ns; A – warstwa powierzchniowa nie oczyszczona, B – warstwa powierzchniowa po oczyszczeniu

Fig. 6. Examples of technological application of laser ablation cleaning of welded support of machine elements; engine piston, piston rings, engine valves and; Nd:YAG with energy density 2 J/cm^2 and pulse duration 10 ns; A – before cleaning, B – after cleaning

Czyszczenie laserem może być również wydajne w wyniku wprowadzenia cieniutkiej warstewki cieczy, którą rozprowadza się na zabrudzonej powierzchni tuż przed przybyciem impulsu promieniowania laserowego. W szczególności tą cienką warstewką może być warstewka wody lub roztworu wodnego z innymi cieczami organicznymi lub nieorganicznymi. Szybka ablacja warstewki cieczy powoduje wytworzenie ogromnych krótkotrwałych sił, które pokonują siły adhezji na granicy cząsteczka-podłoże, powodując odrywanie cząsteczki.

Ablacja cienkiej warstewki cieczy może być spowodowana selektywnym grzaniem przez promieniowanie laserowe, np. grzanie tylko podłoża, grzanie tylko cienkiej warstewki cieczy, oraz grzanie mieszane zarówno cząsteczki jak i warstewki cieczy. Jedną z tych metod zilustrowano na rys.7. Metodę tę opracowano i rozwinięto ze względu na najwyższą sprawność czyszczenia laserem różnych zanieczyszczeń i podłoży.



Rys. 7. Ilustracja ekstremalnych przypadków laserowego czyszczenia powierzchni „na mokro” - silna absorpcja podłoża

Fig. 7. An illustration of extreme cases for „wet” laser surface cleaning – strong absorption by the substrate

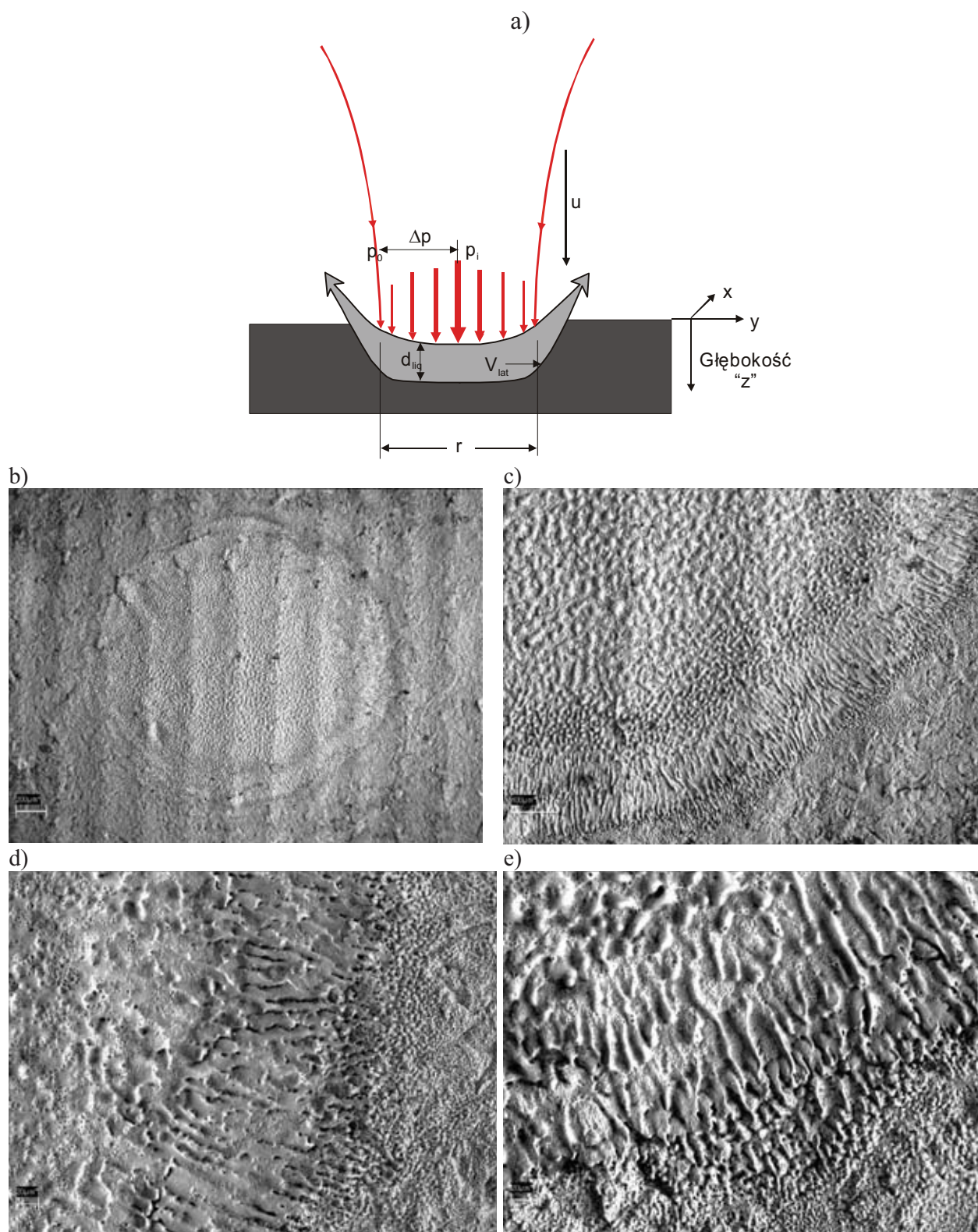
W ramach badań własnych przeprowadzono również z powodzeniem szereg badań laboratoryjnych – technologicznych mikroczyszczenia laserowego różnych materiałów, a także elementów silnika spalinowego np. tulei cylindrowych, głowic, kadłubów w zakresie usuwania nagaru, kamienia kotłowego, ognisk korozji oraz pozostałości osadów oleju itp.

4. Mikroobróbka za pomocą krótkich impulsów laserowych – modyfikacja i umacnianie powierzchni (Laser Shock Peening – LSP)

W celu bardzo precyzyjnego usuwania nawarstwień z różnych materiałów i elementów maszyn wykorzystuje się krótkie impulsy laserowe, głównie nano-, piko- i femtosekundowe oraz odpowiednie gęstości promieniowania laserowego w zakresie od dziesiątych części do kilkunastu J/cm^2 . Aby zrealizować modyfikację lub umocnienie warstwy wierzchniej należy stosować znacznie większe gęstości energii do kilkudziesięciu, a nawet do $300 J/cm^2$. Schemat ideowy oraz przykład modyfikacji laserowej stali 38HMJ azotowanej jarzeniowo przedstawiono na rys. 8.

Stal ta stosowana jest w produkcji tulei cylindrowych silników trakcyjnych dużej mocy oraz w tłokowych silnikach lotniczych. Modyfikacja laserowa, zwłaszcza w górnej strefie pierścieniowej może korzystnie wpłynąć na właściwości tribologiczne, a tym samym na zwiększenie trwałości eksploatacyjnej silników spalinowych. Przy dużych gęstości energii generują się fale uderzeniowe powodujące odkształcenie plastyczne materiału oraz umocnienie warstwy wierzchniej.

Za pomocą impulsów laserowych o wysokiej gęstości energii (od 0.5 do $300 J/cm^2$) i o czasie trwania rzędu dziesiątek nanosekund można generować fale uderzeniowe w różnych materiałach i wytwarzać w ten sposób naprężenia ściskające w ich warstwie wierzchniej. Amplituda impulsu ciśnienia może osiągać wartości w zakresie od 0.1 do $10 GPa$. Laserowe umacnianie udarowe warstwy wierzchniej materiałów konstrukcyjnych stosowane jest głównie do zwiększenia wytrzymałości mechanicznej i zmęczeniowej, odporności na zużycie, erozję, korozję, kawitację itp.



Rys. 8. Ablacyjna mikroobróbka laserowa za pomocą krótkich Q – impulsów ($10^{-8} - 10^{-10}$ s): a) - ilustracja oddziaływania „tłoka” na stopiony materiał, b-e) - wyniki badań własnych – impulsowa modyfikacja laserowa stali 38HMJ azotowanej jarzeniowo - 30 impulsów laserowych
 Fig. 8. Laser ablation micro-treatment using short Q -switched pulses ($10^{-8} - 10^{-10}$ s): a) – illustration of “laser piston” interaction with melted material; b) - e) – results of our experiments – pulse laser modification of nitrided by glow discharge 38HMJ steel (30 laser pulses)

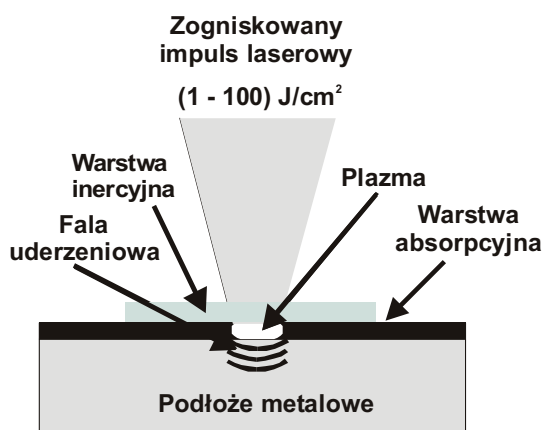
Te metody mogą przynieść znaczną poprawę właściwości obrabianych części. Jednak niefachowo użyte, dają skutek odwrotny – znaczne pogorszenie. Wymagają one bowiem głębszej

wiedzy z wielu dziedzin fizyki i techniki, dotyczących oddziaływania promieniowania laserowego z materiałem, propagacji fal uderzeniowych.

Umacnianie materiałów konstrukcyjnych falą uderzeniową generowaną impulsowym laserowym (w niniejszej pracy na oznaczenie tej metody używany będzie skrót LSP – Laser Shock Peening) jest najnowocześniejszą technologią inżynierii powierzchni stosowaną do udarowego umacniania warstwy wierzchniej różnych materiałów (stopów żelaza, aluminium, tytanu itp.) [3,4].

Technologia ta pozwala m.in. na uzyskanie naprężeń ściskających o wartości ok. 1 GPa (i większych) na głębokości do 1 mm, podczas gdy mechaniczne nagniatanie czy kulowanie pozwala wytworzyć naprężenia ściskające o niższych wartościach, tj. 0.5 – 1 GPa w cieńszej warstwie (do 0,25 mm). Podczas oddziaływania promieniowania laserowego z materiałem występuje szereg złożonych zjawisk fizycznych jak: absorpcja promieniowania, nagrzewanie materii, przewodnictwo cieplne, generacja impulsu ciśnienia lub naprężeń sprężystych i ewentualnie fal uderzeniowych, topnienie ciał stałych, dyfuzja lub rozpuszczanie materii pochodzącej z ziaren krystalicznych o różnym składzie prowadzące do utworzenia ośrodka jednorodnego, parowanie cieczy lub sublimacja ciał stałych, emisja promieniowania elektromagnetycznego, jonizacja materii czyli generacja plazmy, ablacja materii.

Stosując odpowiednią gęstość mocy, warstwy absorpcyjne oraz inercyjne doprowadza się do ablacji laserowej cienkiej warstwy wierzchniej obrabianego materiału oraz generuje się m.in. wysoki impuls ciśnienia – tzw. falę uderzeniową (rys. 9).



Ilustracja laserowego utwardzania powierzchni

Rys. 9. Schemat umacniania warstwy wierzchniej materiałów konstrukcyjnych falą uderzeniową generowaną impulsem laserowym oddziaływującym na warstwę inercyjną i absorpcyjną [4]

Fig. 9. A scheme of laser processing of a sample surface with the use of a shockwave induced by laser pulse. Inertial and absorbing layers are shown [4]

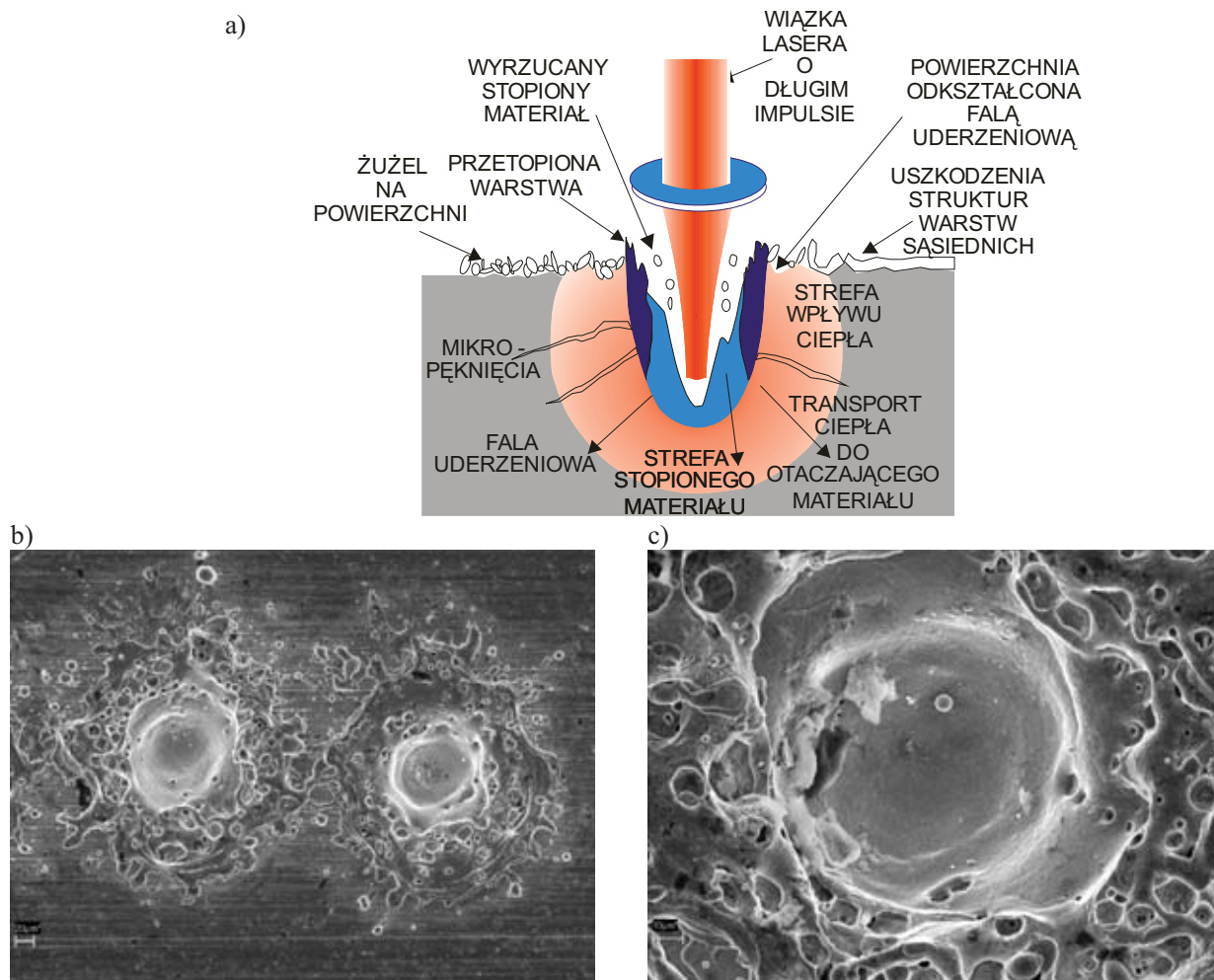
Technologia ta odpowiednio dobrana pozwala na udarowe umacnianie newralgicznych stref elementów maszyn, np. strefy mocno wyłożone mechanicznie i zmęczeniowo wałów korbowych, rozrządu, korbowodów, zaworów, łopatek turbin silników lotniczych itp.

W ramach realizowanych badań własnych podjęto próby umocnienia newralgicznych stref karteru, zaworu wylotowego silnika lotniczego a także wału korbowego i wałka rozrządu silnika trakcyjnego. Uzyskano obiecujące wyniki. Po dopracowaniu technologii LSP istnieje realna szansa na wdrożenie przemysłowe.

5. Mikroobróbka za pomocą długich impulsów laserowych

Do długich impulsów laserowych zaliczamy impulsy o czasie trwania kilku mikrosekund i więcej (nawet do kilkuset milisekund). Zależnie od zastosowanej gęstości mocy może być

realizowana obróbka cieplna w stanie stałym lub z przetopieniem (np. hartowanie, mikronadtapianie, szkliwienie), gięcie, spawanie, mikrodrażenie, platerowanie. Schemat ideowy ablacyjnej (ubytkowej) mikroobróbki laserowej przedstawiono na rys. 10. Materiał poddany obróbce laserowej przechodzi w stan ciekły oraz częściowo w stan „pary” a stopiony materiał usuwany jest w wyniku działania ciśnienia odrzutu. Występuje efekt „korony” wokół obszaru oddziaływania impulsowego promieniowania laserowego.



Rys. 10. Ablacyjna mikroobróbka materiału za pomocą długich impulsów laserowych (10^{-6} – 10^{-8} s): a – schemat poglądowy, b,c – wyniki badań własnych – wykonywanie mikrozasobników olejowych w tulei cylindrowej (stal 38HMJ azotowana jarzeniowo)

Fig. 10. Laser ablation micro-treatment using long laser pulses (10^{-6} ÷ 10^{-8} s): – demonstrative scheme; b), c) – results of our investigations – realization of oil microcontainers in cylindrical sleeve (nitrided) by glow discharge 38HMJ steel

6. Podsumowanie

Oddziaływanie promieniowania laserowego z materiałem jest od kilkadziesiąt lat intensywnie rozwijaną dziedziną nauki, praktycznie od początku i równoległe z pracami nad nowopowstającymi urządzeniami laserowymi. Problematyka związana z oddziaływaniem promieniowania laserowego z materiałem istotnie komplikuje się w funkcji wzrostu gęstości mocy impulsów laserowych.

W zależności od gęstości energii, długości fali promieniowania i czasu trwania impulsu laserowego zmienia się mechanizm oddziaływania wiązki laserowej z materiałem, a tym samym proces technologiczny, ze względu na zmianę właściwości fizyko-chemicznych materiału obrabianego.

Przy stosunkowo niewielkich gęstościach mocy impulsów ($q \leq 10^3$ - 10^5 W/cm²) mamy do czynienia jedynie ze zjawiskami klasycznego pochłaniania promieniowania i nagrzewania ośrodka

bez efektów topnienia ciał lub ich parowania. Pochłanianie promieniowania następuje w warstwie przypowierzchniowej ciała, a w jego głąb ciepło przekazywane jest klasycznym mechanizmem przewodnictwa cieplnego.

Przy wyższych gęstościach mocy impulsów ($q \approx 10^6 - 10^7 \text{ W/cm}^2$) zachodzi topnienie lub odparowanie powierzchni ciał. Impuls ciśnienia warstwy poddanej ablacji jest przy tych gęstościach mocy jeszcze stosunkowo niewielki i nie wpływa istotnie na stan obrabianego materiału. Jednak dla tych wartości gęstości mocy oraz przy stosunkowo długich impulsach w materiałach można już drążyć dość głębokie otwory. Większe gęstości mocy ($q \approx 10^8 - 10^9 \text{ W/cm}^2$) impulsów wywołują zwykle utworzenie z odparowanej warstwy obłoku, który może oddziaływać z padającym promieniowaniem i częściowo je pochłaniać, ekranując przed promieniowaniem dalsze partie materiału, w którym pod wpływem ciśnienia obłoku plazmy generowane są fale uderzeniowe. Przy gęstościach mocy rzędu $q \approx 10^9 - 10^{10} \text{ W/cm}^2$ istotną staje się jonizacja napromieniowanego ośrodka, który w tym stanie stanowi tzw. plazmę niskotemperaturową. Dalsze zwiększanie gęstości mocy impulsów ($q > 10^{11} \text{ W/cm}^2$ - ich oddziaływanie z materią możliwe jest tylko w warunkach wysokiej próżni) powoduje wytwarzanie na powierzchni ciał stałych coraz gorętszej plazmy, która w skrajnych przypadkach może osiągnąć parametry charakterystyczne dla kontrolowanej syntezy termojądrowej.

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 oraz przemysł motoryzacyjny. Trzy typy najczęściej używanych laserów oferują charakterystyczne dla siebie zalety w postaci średnich mocy, pracy impulsowej, długości fali, zdolności do sprzężenia z materiałem obiektu i dostarczania światłowodem. Systemy takie mogą pracować w otoczeniu mokrym i suchym i pracują optymalnie gdy na powierzchni przepływa ciecz usuwająca zanieczyszczenia. Cząstki zanieczyszczeń są najczęściej 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. Usunąć można warstwy farby, tlenków, cienkie warstwy podkładu i inne warstwy organiczne/nieorganiczne. Najważniejsze jest pełne rozpoznanie oddziaływań lasera z materiałem w opracowaniu prawidłowych parametrów procesu. Pomocą w określeniu jakie zjawisko przeważa (obróbka cieplna, topienie, odparowanie) jest znajomość absorpcji energii, transferu ciepła i współczynnika odbicia.

Wykonane w ramach badań własnych eksperymenty technologiczne na wybranych elementach silników spalinowych: tłokach, pierścieniach tłokowych, głowicach, kadłubach silników, zaworach, tulejach cylindrowych, wałach korbowych i innych potwierdziły przydatność technologii mikro-obróbki laserowej w zakresie oczyszczania, mikrodrążenia oraz modyfikacji powierzchniowej.

Literatura

- [1] Steen, W. M., *Laser material processing – an overview*, Journal of optics A: PURE AND APPLIED OPTICS 5, pp.3-7, 2003.
- [2] Meijer, J., *Laser beam machining (LBM), state of the art and new opportunities*, Journal of Materials Processing Technology 149, pp. 2-17, 2004.
- [3] Marczak, J., Napadłek, W., Sarzyński, A., *Modyfikacja właściwości warstwy wierzchniej aluminium za pomocą laserowej fali uderzeniowej*, Inżynieria Materiałowa nr 5(147), str. 622- 624, Katowice, 2005.
- [4] Napadłek, W., Sarzyński, A., Marczak, J., *Analiza procesów zachodzących na stopach aluminium podczas ablacji laserowej*, Przegląd Spawalnictwa nr 5-6, s. 64 - 67, 2006.
- [5] *The paper was performed within N508 054 32/3758 project financed by the Ministry of Science and High Education.*