

Wojciech NAPADŁEK<sup>1</sup>  
Leszek BAKAŁA<sup>2</sup>

### **TEKSTUROWANIE LASEROWE W PROCESACH PRZYGOTOWANIA WARSTWY WIERZCHNIEJ MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH DO KLEJENIA**

*W artykule przedstawiono istotę laserowego oczyszczania i teksturowania warstw powierzchniowych materiałów konstrukcyjnych stosowanych w produkcji elementów maszyn poddawanych lutowaniu, spawaniu lub klejeniu. Zaprezentowano niektóre wyniki badań laboratoryjnych dotyczących topografii i czystości powierzchni przed i po ablacyjnej mikroobróbce laserowej. W wyniku przeprowadzonych badań, stwierdzono występowanie szeregu zanieczyszczeń organicznych oraz nieorganicznych powstałych w wyniku produkcji elementów lub będących efektem oddziaływania środowiska, w tym czynnika ludzkiego. Po próbach laboratoryjnych oczyszczania i teksturowania laserowego uzyskano bardzo dobry efekt czystości i rozwinięcia powierzchniowego, co rokuje dobre perspektywy technologiczne w ww. procesach.*

### **LASER TEXTURING IN CONSTRUCTIONAL MATERIALS TOP LAYER PREPARATION TO GLUING PROCESSES**

*In this article laser cleaning and texturing of superficial steel layers applied in the machine elements subjected sticking, welding and soldering is presented. Some laboratory results of topography and surface purity before and after laser ablation microprocessing are presented. Occurrence of organic and inorganic dirt formed as a result of the elements production or being the effect of the human factor influence was affirmed in the result of conducted investigations. The very good effect of superficial cleanness and surface development which are good technological perspectives, was got after laser cleaning tests.*

---

<sup>1</sup> dr inż. Wojciech NAPADŁEK, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, tel. (0-22) 683-73-57, tel/fax 683-76-02, e-mail: wnapadlek@wat.edu.pl

<sup>2</sup>mgr inż. Leszek BAKAŁA, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: lbakala@wat.edu.pl

## 1. WSTĘP

Współczesna technologia rozwija się w bardzo szybkim tempie i dlatego problem czystości powierzchni jest bardzo istotnym elementem, zwłaszcza w przemyśle motoryzacyjnym. Procesy technologiczne kształtują technologiczną warstwę wierzchnią w różnych elementach (np. elektroniki, 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 podczas procesu klejenia, lutowania, spawania, itp. Wiele stosowanych metod powoduje zanieczyszczenie oraz skażenie środowiska. Promieniowanie laserowe umożliwia czyszczenie nawet najdelikatniejszych powierzchni bez istotnego wpływu na środowisko, bądź zdrowie ludzkie.

Tradycyjne metody oczyszczania, np. piaskowanie, wykorzystanie wody pod ciśnieniem z dodatkiem różnego rodzaju ścierniw usuwają nawarstwienia głównie w sposób mechaniczny. Istnieją również metody konkurencyjne, takie jak usuwanie zanieczyszczeń metodami chemicznymi (np. wytrawianie, anodowanie w kwasie siarkowym lub chromowym) lub za pomocą ultradźwięków. Są to jednak metody szkodliwe dla środowiska.

W celu efektywnego, skutecznego i mniej pracochłonnego oczyszczania z dużą precyzją i powtarzalnością wykorzystanie promieniowania laserowego staje się niezastąpione. W niektórych przypadkach jest to jedyna skuteczna metoda [1-10].

## 2. METODY PRZYGOTOWANIA WARSTWY POWIERZCHNIOWEJ MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH W PROCESACH TECHNOLOGICZNYCH KLEJENIA

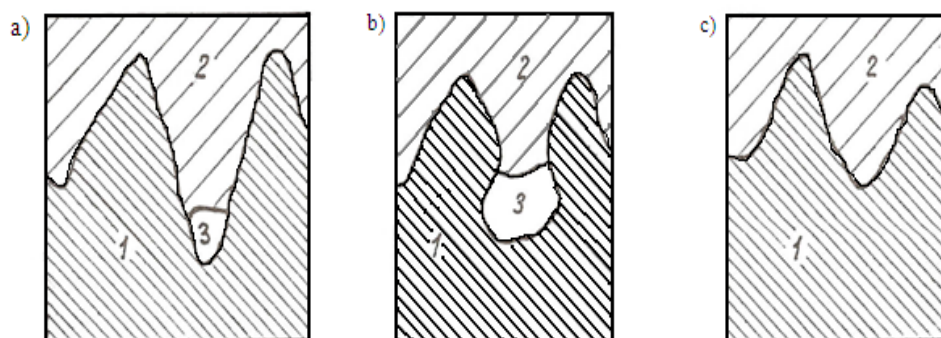
Klej jest substancją, która wprowadzona między powierzchnie przylegające dwóch przedmiotów, wykonanych z takich samych lub różnych materiałów, umożliwia trwałe ich połączenie w procesie klejenia. Kleje są zaliczane do materiałów czynnych powierzchniowo (podobnie jak farby, lakiery i detergenty), których cechą charakterystyczną jest zwiększanie adhezji.

O przyczepności finalnej (technologiczno-konstrukcyjnej) decyduje adhezja właściwa oraz mechaniczna. Adhezja właściwa to wypadkowa sił międzycząsteczkowych, sił Van der Waalsa. Adhezja mechaniczna polega na wnikanii kleju w liczne pory i nierówności (zagłębienia) powierzchni elementów łączonych i na mechanicznym zakotwiczeniu się w nich. Jest wynikiem oporu, jaki masa klejowa zestalona w porach stawia sile zewnętrznej. Jednak adhezja mechaniczna nie jest jedynym czynnikiem mającym wpływ na uzyskanie wytrzymałego połączenia, wprawdzie świadomie zwiększa się ją. Można ją zwiększyć, rozwijając powierzchnię poprzez nadanie jej odpowiedniej chropowatości elementów łączonych (rys.1).



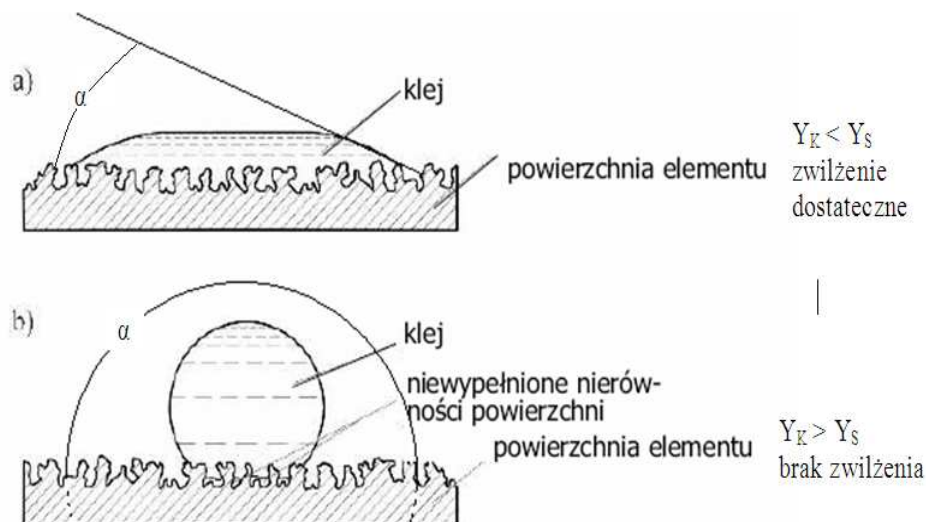
Rys.1. Schemat ideowy adhezji mechanicznej w procesie klejenia [14]

Należy podkreślić, że istnieje pewna optymalna wartość chropowatości, której przekroczenie spowoduje powstanie między podłożem a warstwą klejową zbyt dużej odległości dla oddziaływania sił międzycząsteczkowych i w efekcie obniżenie wytrzymałości złącza klejonego. Ponieważ zakres oddziaływania sił międzycząsteczkowych jest znacznie mniejszy niż chropowatości mechanicznie obróbnionych powierzchni, dlatego klej musi wnikać w chropowatości i całkowicie zwilżyć powierzchnię. Wnikanie kleju w pory, powstałe podczas obróbki powierzchniowej (rys.2.) zależy od postaci mikroporów, tj. od kąta ich rozwarcia, głębokości, długości lub szerokości oraz od napięcia powierzchniowego i lepkości kleju. Zbyt duża gęstość wąskich porów jest przeszkodą w ich wypełnianiu klejem o dużej lepkości i dużym napięciu powierzchniowym. Osadza się on wtedy tylko na wierzchołkach nierówności.



Rys.2 Zwilżenie powierzchni elementów klejowych: a,c – dobre; b – złe; 1-element klejony, 2-klej, 3-mikropory [14]

Efekt sklejania nie może zatem opierać się tylko na adhezji mechanicznej. Oprócz niej ważne są inne właściwości spoiwa i klejonych powierzchni, określane mianem adhezji specyficznej.



Rys. 3. Zmiana kąta zwilżenia  $\alpha$  od napięcia powierzchniowego kleju i łączonej części:  $Y_K$  – napięcie powierzchniowe kleju;  $Y_S$  – napięcie powierzchniowe łączonej części

Adhezja właściwa polega na wiązaniu warstwy klejowej z podłożem w wyniku silnego oddziaływania międzycząsteczkowego między klejem a podłożem, co przejawia się zwilżeniem powierzchni przez klej. Klej zwilża wystarczająco powierzchnię ciała stałego tylko wówczas, gdy jego napięcie powierzchniowe  $Y_K$  (rys.3) jest przynajmniej równe, a lepiej - mniejsze od napięcia powierzchniowego części  $Y_S$  [14].

Istnieje wiele teorii próbujących wyjaśnić zjawisko adhezji właściwej, a także określić warunki, w jakich można uzyskać dużą wytrzymałość złączy adhezyjnych. Podstawowa teoria oddziaływań cząsteczkowych (zwana teorią fizyczno-chemiczną) uznaje zjawisko adhezji za rezultat oddziaływania sił międzycząsteczkowych (Van der Waalsa, dyspersyjnych, dipolowych czy indukcyjnych) występujących między cząsteczkami kleju i łączonych materiałów.

Do pozostałych teorii adhezji zaliczane są:

- teoria elektrostatyczna – wiązania powstają w wyniku przepływu strumienia elektronów między dwoma ciałami w bezpośrednim kontakcie,
- teoria dyfuzyjna – zakładająca wzajemną dyfuzję cząsteczek dwóch materiałów, wynikającą z różnicy potencjałów termodynamicznych,
- teoria chemiczna – zakładająca występowanie między klejem a materiałem łączonym adsorpcji chemicznej dzięki grupom funkcyjnym zdolnym do tworzenia wiązań chemicznych,
- pozostałe teorie – słabej warstwy granicznej, termodynamiczna, utleniania.

Znaczny wpływ na wartość adhezji kleju wywiera czystość powierzchni, a w szczególności pozbawienie jej pyłów, gazów oraz tłuszczów. Nawet śladowe ilości olejów, smarów, tłuszczów czy wilgoć utrudniają klejenie. Ze względu na ich dużą polarność bardzo dobrze przylegają do powierzchni, lecz jednocześnie wykazują małą kohezję i powodują rozwarstwianie złączy w płaszczyźnie błony smaru. Można temu zapobiec, bardzo starannie odtłuszczając powierzchnię (metodami chemicznymi lub fizykochemicznymi).

Siłę adhezji można znacznie zwiększyć, usuwając mechanicznie, chemicznie lub elektrochemicznie obce warstwy powierzchniowe, a także tworząc (w razie konieczności) metodą obróbki mechanicznej, nowe aktywne warstwy powierzchniowe [13].

Dobre przygotowanie powierzchni do klejenia jest decydującym warunkiem uzyskania wytrzymałego złącza. Ten początkowy etap procesu technologicznego klejenia musi zapewnić:

- usunięcie wszystkich zanieczyszczeń powierzchniowych (brudów, pyłów, luźno związanych warstw korozyjnych oraz tłuszczów),
- uzyskanie właściwego rozwinięcia powierzchni,
- uzyskanie dobrego uaktywnienia powierzchni.

Powierzchnię można oczyścić mechanicznie lub chemicznie. Smary należy usunąć rozpuszczalnikami organicznymi bądź też stosując wypalanie płomieniowe. Uzyskanie jednak całkowitej czystości, wymaganej w klejeniu elementów, jest często bardzo trudne. Dotyczy to szczególnie łączenia elementów stalowych, wrażliwych na działanie korozji. Na przyspieszone działanie korozji mogą wpływać niewłaściwie przeprowadzone zabiegi przygotowawcze, takie jak: płukanie elementów w zanieczyszczonej wodzie, niewłaściwe suszenie, nadmiernie rozwinięta powierzchnia itp.

Skuteczność stosowania klejenia zależy od stanu przygotowania powierzchni naprawianych elementów. Wszystkie powierzchnie powinny być chropowate, metalicznie czyste i chemicznie odtłuszczone, dlatego zanieczyszczenia takie jak olej, korozja, stara farba muszą być dokładnie usunięte. Aby uzyskać dobre połączenie adhezyjne, powierzchnia elementu naprawianego powinna być schropowana. Dużą wytrzymałość złącza zapewnia przygotowanie powierzchni przez ich wytrawianie (kwasy). Metoda ta jest jednak mało przydatna w regeneracji [13].

### **2.1. Odtłuszczanie powierzchni przed klejeniem.**

Aby uzyskać jak najlepsze połączenie klejowe konieczne jest całkowite usunięcie oleju, tłuszczu, kurzu i innych brudnych pozostałości z obu klejonych powierzchni. Najbardziej nadają się do tego rozpuszczalniki, które wyparowują i nie pozostawiają osadu.

Wodne środki myjące na bazie zasadowej lub kwasowej prawie zawsze zawierają dodatki antykorozyjne. Pozostając na oczyszczonych powierzchniach mogą one zredukować adhezję kleju lub zapobiegać jego utwardzeniu. Jeśli mają być stosowane takie systemy myjące, należy uprzednio sprawdzić ich wpływ na klej. W każdym jednak wypadku powierzchnie klejone muszą być umyte i wytarte.

Jeśli w produkcji wielkoseryjnej stosuje się specjalną kąpiel odtłuszczającą,

należy przedtem usunąć zgrubne zanieczyszczenia, aby nie zabrudziły one kąpeli czyszczącej. Bardzo często stosuje się oczyszczanie oparami. W takim przypadku podgrzewa się rozpuszczalnik do temperatury wrzenia, aby go odparować. Kiedy opary zmywacza zetkną się z zimnym detalem, skraplają się na jego powierzchniach. Osiedla na nich płynna powłoka usuwa resztki brudu i tłuszczu. Odtłuszczanie takie często przeprowadza się w całkowicie zamkniętych urządzeniach. W wielu przypadkach dla przygotowania powierzchni wystarcza zmywacz o szybkim działaniu. Usuwa on oleje, tłuszcze, cząsteczki brudu i inne zanieczyszczenia. Przy stosowaniu do czyszczenia rozpuszczalników można wspomagać odtłuszczanie chemiczne obróbką mechaniczną (czyszczenie ściernicami, szczotkami), co zagwarantuje całkowite usunięcie niepożądanych zanieczyszczeń na powierzchniach.

## 2.2 Przygotowanie mechaniczne

Zabrudzone powierzchnie metalowe są często pokryte warstwą tlenków, których nie można usunąć przez odtłuszczanie. W tych przypadkach konieczna jest mechaniczna obróbka powierzchni. Obróbka mechaniczna na ogół dobrze schropowaca, lecz nie zapewnia dobrego uaktywnienia powierzchni. Czyni to tylko częściowo. W trakcie piaskowania w miejscach wyrwania ziaren metalu zostają odsłonięte aktywne centra nowo utworzonej powierzchni. Mogą one oddziaływać na cząsteczki kleju, jeśli ten, w dostatecznie krótkim czasie po tej operacji zostanie naniesiony na powierzchnię metalu. W przeciwnym razie centra mogą wychwycić z otoczenia drobinę pyłu czy kurzu i zneutralizować w ten sposób swą aktywność adhezyjną.

## 2.3 Wytrawianie

Do wytrawiania powierzchni używa się relatywnie agresywnych chemikaliów. W zależności od powierzchni stosuje się produkty bardzo kwaśne albo silnie zasadowe. Dzięki reaktywnym grupom chemicznym wytrawianie powoduje perforację powierzchni, co ułatwia mechaniczne zakotwiczenie się kleju.

Skutki tego działania są różne, zależnie od rodzaju materiału powierzchni. Stosowanie tej metody w przemyśle jest ograniczone, ponieważ rozwiązania dotyczące wytrawiania stają się coraz bardziej kosztowne.

Dla elementów stalowych stosuje się trawienie w czasie 3 ÷ 4 min w kąpeli o składzie [11-14]:

- kwas siarkowy stężony 10 części objętości,
- kwas azotowy stężony 10 części objętości,
- woda destylowana 80 części objętości.

## 3. LASEROWE OCZYSZCZANIE I TEKSTUROWANIE WARSTWY POWIERZCHNIOWEJ

Laserowe oczyszczanie i teksturowanie warstwy powierzchniowej materiałów konstrukcyjnych i elementów maszyn oparte jest na zjawisku ablacji laserowej. Ablacja

laserowa jest to odparowanie warstwy wierzchniej różnego rodzaju materiałów: metali, ceramik, tworzyw sztucznych i innych. Proces ablacji występuje w trakcie trwania impulsu laserowego. W wyniku oddziaływania promieniowania laserowego na warstwę powierzchniową materiałów konstrukcyjnych następuje pochłanianie i rozpraszanie promieniowania z wyrzucaniem materiału w postaci pary i cieczy. W wyniku napromienienia powierzchni materiałów za pomocą impulsu promieniowania laserowego zachodzą takie zjawiska jak: absorpcja promieniowania, zjawiska cieplne lub fotochemiczne. Szczegółowy opis procesu ablacji przedstawiono w pracach [8].

W procesie fotodrywania brane są pod uwagę trzy zasadnicze siły, które powodują przyczepianie cząsteczki do powierzchni: siła kapilarna, siła Van der Waalsa oraz siła elektrostatyczna. Do pokonania sił przylegania cząsteczek do podłoża bez uszkodzenia powierzchni coraz częściej stosuje się czyszczenie wiązką laserową z wykorzystaniem reakcji fotomechanicznej.

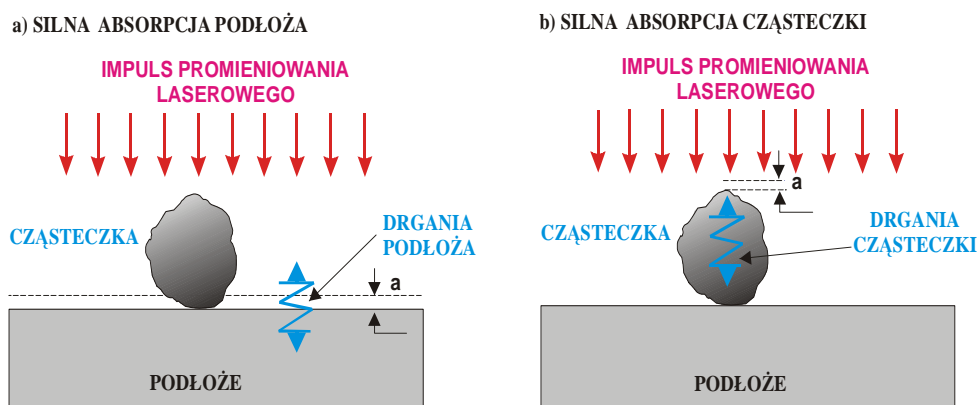
W wyniku intensywnej absorpcji promieniowania laserowego w warstwie przypowierzchniowej, w której mogą występować zanieczyszczenia (tlenki, korozja, patyna, tłuszcze, oleje, farby, lakiery i inne organiczne i nieorganiczne składniki), jako jej skutek pojawia się silny i gwałtowny wzrost temperatury. Transport energii do wnętrza materiału, gdzie promieniowanie laserowe nie dociera, następuje poprzez powstającą plazmę w wyniku konwekcji i elektronowego przewodnictwa cieplnego. Powstaje w wyniku tego granica zwana frontem ablacji, na której występują silne gradienty gęstości i temperatury plazmy. Front ablacji oddziela dwa obszary, w których kierunki ruchu materii są przeciwne. Z obszaru znajdującego się bliżej powierzchni zewnętrznej następuje „ucieczka” nagrzanego materiału w kierunku prostopadłym do oświetlanej powierzchni, natomiast w obszarze drugim ruch materii jest skierowany w głąb podłoża. Jeśli zanieczyszczona warstwa jest bardzo cienka, fala uderzeniowa po odbiciu się od powierzchni podłoża warstwy granicznej (międzyfazowej) zmienia kierunek propagacji, zwielfokrotniając 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 powoduje zwielfokrotnienie efektu czyszczenia. Po usunięciu warstwy zanieczyszczonej, lita powierzchnia jest automatycznie chroniona przed wszelkimi dalszymi uszkodzeniami, w związku z tym, że nie istnieje już granica ośrodków faz; fala uderzeniowa nie jest już odbijana lecz pochłaniania przez podłoże.

Oczywiście jesteśmy w stanie kontrolować zdejmowanie jednej warstwy po drugiej, gdyż głębokość frontu ablacji zależy przede wszystkim od długości fali promieniowania laserowego i waha się od 0,3 do 1 mikrometra. Należy również pamiętać o odpowiednim doborze parametrów promieniowania laserowego. Dodatkowym atutem jest to, iż możemy w sposób płynny regulować parametrami wiązki laserowej, tzn. czasem trwania impulsu, szczytową gęstością mocy i częstotliwością repetycji. Ważnym elementem jest fakt, że dostarczona moc powinna być na tyle duża, aby w sposób gwałtowny wytworzyć szybki przepływ ciepła do cząstki lub podłoża materiału i na tyle niska by nie przekroczyć progu uszkodzenia powierzchni samego materiału. Czyszczenie warstwy powierzchniowej może zachodzić w środowisku mokrym lub też suchym [1-10].

- **Czyszczenie suche**

Czyszczenie suche można wykonywać na dwa sposoby (rys. 4): poprzez dobranie długości fali silnie absorbowanej tylko przez podłoże lub poprzez silne absorbowanie

promienia laserowego tylko przez cząsteczkę. W pierwszym przypadku pod wpływem temperatury następuje termiczne rozszerzenie podłoża (gwałtowny wzrost grubości). Efektem tego procesu jest zjawisko odrywania cząsteczki. Przyspieszenie wzrostu grubości podłoża może osiągać wartości 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. 4. Ilustracja ekstremalnych przypadków usuwania „na sucho” mikrocząsteczek z podłoża

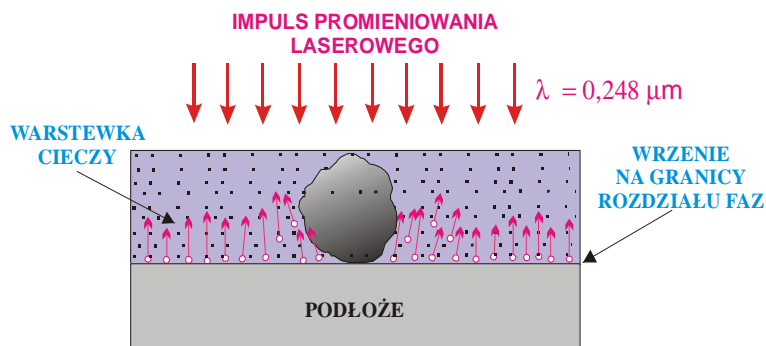
- **Czyszczenie mokre**

Czyszczenie mokre odbywa się poprzez wprowadzenie do procesu oczyszczania cienkiej warstwy cieczy (woda lub roztworu wodnego z innymi cieczami organicznymi lub nieorganicznymi), którą rozprowadza się tuż przed przybyciem impulsu promieniowania laserowego (rys. 5).

Pod wpływem szybkiej ablacji cieczy powstają duże, krótkotrwałe siły 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.

Metodę tę opracowano i rozwinięto ze względu na najwyższą sprawność czyszczenia laserem różnych zanieczyszczeń i podłoży.





Rys. 5. Ilustracja ekstremalnych przypadków laserowego czyszczenia powierzchni „na mokro” - silna absorpcja podłoża

Zastosowana metoda oczyszczania warstwy powierzchniowej powinna usunąć wszelkiego rodzaju zanieczyszczenia, jak: zabrudzenia organiczne i nieorganiczne, wtrącenia niemetaliczne, tlenki na powierzchni elementów w celu przygotowania ich powierzchni do ww. procesów. Efektem końcowym planowanych prac będzie zwiększenie czystości technologicznej. Unikatowe własności promieniowania laserowego powodują, że obróbka ta może być realizowana w sposób selektywny w precyzyjnie wybranym obszarze, zwłaszcza w nowoczesnych systemach wyposażonych w automatykę przemysłową i sterowanie. Można obrabiać powierzchnie trudno dostępne oraz o dużej krzywiznie. Ponieważ metody laserowe są bezkontaktowe, możliwe jest ich zastosowanie również do obróbki materiałów toksycznych lub promieniotwórczych. Odmienne charakterystyki plazmy (temperatura, ciśnienie, czas trwania i skład chemiczny) wytwarzanej przez takie urządzenia jak lasery ( $\text{CO}_2$ , Nd: YAG, ArF), powodują, że wyniki obróbki są w każdej metodzie inne, co podkreśla uniwersalność proponowanego zakresu prac i determinuje obszary możliwych zastosowań każdej z metod [5-8].

#### 4. CEL I METODYKA BADAŃ

Głównym celem przeprowadzonych badań wstępnych było określenie przydatności nowoczesnej technologii oczyszczania laserowego stali kwasoodpornej 0H18N9 (wg PN-71/H-86020), poddawanych procesom technologicznym klejenia, dla uzyskania metalicznie czystej, wolnej od zabrudzeń i wtrąceń w warstwie powierzchniowej.

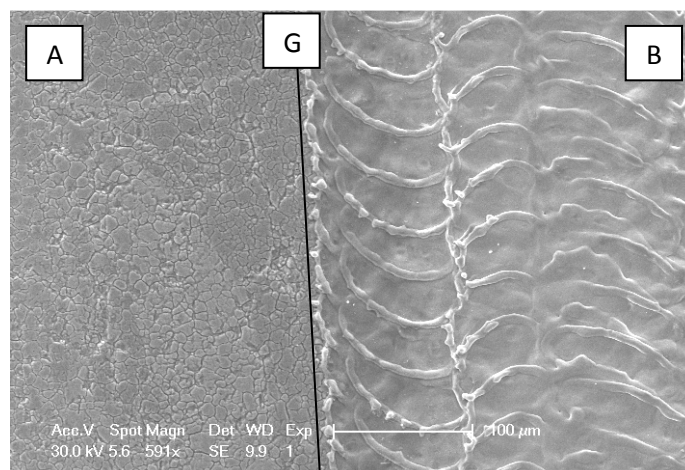
Głównym celem przeprowadzonych badań laboratoryjnych było oczyszczanie warstwy powierzchniowej z tlenków, osadów organicznych i nieorganicznych oraz teksturowanie warstwy powierzchniowej ww. stali. Stal ma szerokie zastosowanie technologiczne w przemyśle lotniczym, samochodowym oraz spożywczym. Elementy wykonane ze stali łączone są ze sobą w procesach lutowania, zgrzewania, spawania oraz klejenia. W procesie oczyszczania laserowego zastosowano specjalistyczny laser impulsowy Nd: YAG oraz laser iterbowy fibrowy. W badaniach stosowano długości promieniowania laserowego  $\lambda = 1064 \mu\text{m}$ . W artykule przedstawiono wybrane wstępne wyniki z badań laboratoryjnych. Do obserwacji oczyszczonej warstwy powierzchniowej zastosowano elektronową mikroskopię skaningową (SEM) oraz video mikroskop Keyence VHX1000.

Charakterystyczne efekty oczyszczania laserowego stali przy dobranych najlepszych parametrach przedstawione są na rys.6.

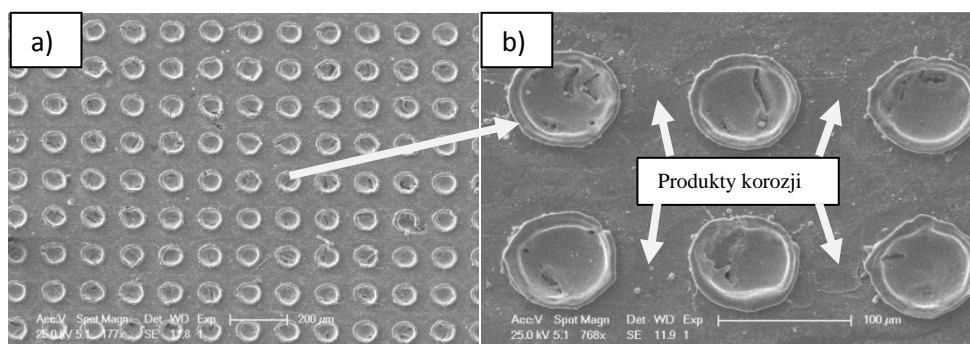
Stosując dobraną gęstość energii ok.  $1\text{J}/\text{cm}^2$ , przy czasie trwania impulsu ok. 10 ns uzyskano najlepsze efekty oczyszczania powierzchniowego bez wyraźnych śladów mikronadtopień powierzchniowych. Aby równomiernie oczyścić powierzchnię modyfikowaną laserowo stali 0H18N9 wykorzystano zmotoryzowane stanowisko, w skład którego wchodził: laser Nd:YAG, stół x-y sterowany numerycznie, stacja komputerowa z oprogramowaniem. Zmieniając prędkość przemieszczania  $V$  w zakresie 0,5-3 m/min, stosowano stopień pokrycia wiązki laserowej (zachodzenie na siebie kolejnych stref naświetlanych laserowo) ok. 10% przy stałej repetycji 10Hz.

W wyniku usunięcia warstwy tlenków i innych zanieczyszczeń odsonięta została charakterystyczna dla tej stali ziarnista budowa mikrostruktury austenitycznej o wysokiej czystości. Daje to wysokie szanse na uzyskanie wysokiej adhezji np. tworzywa klejowego, dobrej zwilżalności i dyfuzji lutu oraz gwarantuje stabilność procesu spawania.

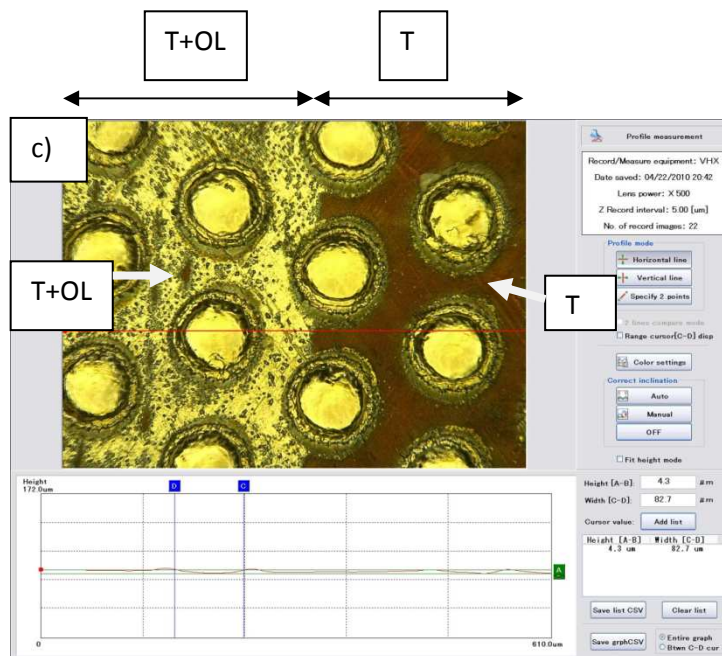
Stosując oczyszczanie i teksturuwanie powierzchni z wykorzystaniem mikroobróbki laserowej oraz automatyki sterującej (np. stoły sterowane CNC, roboty, głowice Galvo) można precyzyjnie oczyścić trudnodostępne strefy elementów maszyn oraz uzyskać oczekiwane rozwinięcie powierzchni, głównie jej chropowatość. Wstępne próby teksturowania laserowego przeprowadzono na stali 0H18N9. Uzyskiwano zróżnicowane efekty, tj. od lokalnych mikronadtopień ( $R_a = 2,5\text{-}5\mu\text{m}$ ) do bardzo dużego rozwinięcia powierzchni o wysokiej chropowatości dochodzącej nawet do  $15\text{-}25\mu\text{m}$  (rys.6). Oczywiście możliwe jest także uzyskanie jeszcze większej chropowatości, np. w procesach przygotowania powierzchni do klejenia ale wymaga to optymalizacji parametrów obróbki laserowej, wykonania pomiarów chropowatości powierzchni, badań właściwości mechanicznych, np. złącz klejowych itp. W drugim wariantcie technologicznym zastosowano teksturuwanie laserowe powierzchni modyfikowanej stali poprzez wytworzenie mikrozasobników (czasze kuliste) (rys.7) lub mikrokanalów uzyskano interesujące wyniki. W wyniku selektywnego oczyszczania laserowego, stosując różne parametry obróbki (gęstości energii, stopień przykrycia) uzyskano zarówno bardzo dobry efekt czystości powierzchniowej, jak również stwierdzono pewne zagrożenia wynikające z powstających nadtopień warstwy powierzchniowej. Nadtopienia te wpływają na rozwinięcie powierzchni, co znacznie poprawia adhezję mechaniczną, np. powłok klejowych. Aby właściwie dobrać topografię powierzchni, w najbliższej przyszłości planuje się przeprowadzić szereg eksperymentów w zakresie teksturowania laserowego warstwy powierzchniowej, dążąc do dobrania optymalnych parametrów mikroobróbki laserowej oraz odpowiednich układów geometrycznych powierzchni ( $R_a$ ,  $R_z$ , falistość i inne). Przeprowadzone zostaną również próby badań na ścinanie, odrywanie na próbkach klejonych w warunkach laboratoryjnych. Pozwoli to na dobranie najlepszych wariantów ablacyjnej mikroobróbki laserowej zastosowanej do oczyszczania i teksturowania warstwy powierzchniowej stali.



Rys. 6. Charakterystyczna topografia warstwy powierzchniowej stali kwasoodpornej 0H18N9 przed i po oczyszczeniu promieniowaniem laserowym: A – strefa przed oczyszczaniem laserowym, B – strefa po oczyszczeniu laserowym, G – granica oczyszczania laserowego z mikronadtopieniem



Rys. 7. Charakterystyczna topografia warstwy powierzchniowej stali 0H18N9 teksturowaniu laserowym i wykonaniu mikrozasobników: a), b) widok mikrozasobników zwiększających adhezję mechaniczną kleju – stopień przykrycia ok. 25%



Rys. 8. Charakterystyczna granica stref stali 0H18N9 po teksturowaniu i strefowym oczyszczaniu laserowym wraz z profilografem powierzchni, T- strefa po ablacyjnym teksturowaniu laserowym z widocznymi produktami korozji; T+OL – strefa po teksturowaniu i oczyszczaniu laserowym

## 5. PODSUMOWANIE WNIOSKI

Istnieje wiele technologii usuwania i czyszczenia powierzchni, ale niewiele z nich spełnia wymogi ekonomiczne i ochrony środowiska. Laserowa obróbka powierzchni w tym ablacyjne oczyszczanie laserowe spełnia lub przewyższa wymagania stawiane przez elektronikę, przemysł nuklearny, kosmiczny i inżynierię lądową. 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 laserowe stosowane do oczyszczania i teksturowania warstwy powierzchniowej mogą pracować w otoczeniu mokrym i suchym i pracują optymalnie, gdy na powierzchni przepływa ciecz usuwająca zanieczyszczenia. Cząstki zanieczyszczeń są najczęściej związane z powierzchnią wiązaniami kowalencyjnymi, elektrostatycznymi, jonowymi lub Van der Waalsa.

Do usunięcia ściśle przylegających warstw wymagana jest ablacja laserowa. Ablację osiąga się poprzez ultra szybki 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, topnienie, odparowanie) jest znajomość absorpcji energii, transferu ciepła i współczynnika odbicia. Metoda ablacyjnego laserowego (bezstykowego) oczyszczania warstw powierzchniowych różnych materiałów konstrukcyjnych i kompozytów ma ogromną przewagę nad metodami stosowanymi dotychczas. Jest ona bardzo skuteczna, a ponadto bezkontaktowa, uniwersalna i bezpieczna dla ludzi i otaczającego środowiska.

Przeprowadzone badania wstępne ablacyjnego oczyszczania laserowego potwierdziły skuteczność tej metody. Warstwa powierzchniowa stali 0h18N9 zawierała szereg zanieczyszczeń typu organicznego i nieorganicznego, głównie tlenków żelaza, chromu i niklu, wynikających z samego procesu walcowania jak również z efektów oddziaływania czynnika ludzkiego. Istotny wpływ ma przeprowadzone badania miało również środowisko zewnętrzne. Idealnym rozwiązaniem byłoby przeprowadzenie oczyszczania laserowego w próżni lecz jest to metoda bardzo kosztowna. Zazwyczaj stosuje się osłony gazów obojętnych, (np. Ar, He,) w celu uzyskania warstwy zabezpieczającej przed korozją powierzchniową.

W wyniku selektywnego oczyszczania laserowego, stosując różne parametry obróbki (gęstości energii, stopień przykrycia) uzyskano zarówno bardzo dobry efekt czystości powierzchniowej, jak również stwierdzono pewne zagrożenia wynikające z powstających nadtopień warstwy powierzchniowej. Nadtopienia te wpływają na rozwinięcie powierzchni, co znacznie poprawia adhezję mechaniczną, np. powłok klejowych, ale może również wpłynąć negatywnie na wytrzymałość zmęczeniową oczyszczanych elementów. Tak więc przy doborze parametrów oczyszczania laserowego należy unikać efektów nadtopień warstwy powierzchniowej, szczególnie w elementach pracujących przy zmiennych obciążeniach mechanicznych i szokach cieplnych.

W wyniku przeprowadzonych badań nasunęły się następujące wnioski szczegółowe:

1. W wyniku oddziaływania promieniowania laserowego o średnicy wiązki ok. 70  $\mu\text{m}$  (czas ekspozycji ok. 110 ns, różna gęstość mocy) na warstwę wierzchnią stali kwasoodpornej 0H18N9, uzyskano zróżnicowane efekty rozwinięcia powierzchni, od lokalnych mikronadtopień ( $R_a = 2,5 - 5 \mu\text{m}$ ), do bardzo płytkiego nadtopienia z wyraźnymi efektami ekstruzji materiału modyfikowanej stali ( $R_a = 15 - 25 \mu\text{m}$ ).
2. Stosując nowoczesny układ optyczny z głowicą Galvo, wytworzono powtarzalną teksturę, mogącą znaleźć zastosowanie w rozwijaniu powierzchni, nie tylko stali kwasoodpornej, ale również innych materiałów i elementów maszyn przed procesami klejenia. Dzięki wysokiej precyzji oraz powtarzalności procesu można rozwinać powierzchnię w sposób kontrolowany, włącznie z wytworzeniem różnych tekstur powierzchni (mikroczaśce, mikrokanały itp.), mających za zadanie zwiększenie powierzchni czynnej, poprzez wytworzenie mikrokomór jako zasobników kleju łączącego się z podłożem. Tak wytworzona tekstura pozwala znacząco zwiększyć adhezję mechaniczną, co w istotny sposób wpływa na zwiększenie wytrzymałości mechanicznej złącza klejowego (zwłaszcza odporności na ścinanie).
3. W drugim wariantcie mikrotekstutowania laserowego, powodującego wytworzenie zasobników w postaci mikroczaś lub mikrokanałów, poprzez lokalne oddziaływanie skoncentrowanej wiązki laserowej o dużej gęstości mocy, nastąpiło nagrzewanie, topnienie oraz ekstruzja roztopionego materiału. W wyniku ekstruzji ciekłego materiału w bardzo krótkim czasie (od kilku do kilkunastu mikrosekund), wyrzucane

mikrocząstki poddane zostały oddziaływaniu tlenu atmosferycznego. Na ich powierzchni wytworzona została cieniutka warstewka tlenków żelaza. Opadające na powierzchnię teksturowanej stali mikrokrople z ww. warstewką tlenków, utworzyły kilkunastomikrometrową powłokę w kolorze ceglastym. Powłoka ta zbudowana była z ww. mikrokropli, które łączyły się lokalnie, tworząc szczelną mikrowarstewkę skryształizowanego materiału z tlenkami żelaza. Powłoka ta prawdopodobnie jest bardzo podatna na dalszą korozję atmosferyczną, dlatego przed procesem klejenia należy ją całkowicie usunąć poprzez np. szlifowanie, piaskowanie lub ablacyjne oczyszczanie laserowe.

4. Próba oczyszczania laserowego wytworzonej mikropowłoki z tlenkami żelazaowodła się częściowo. W wyniku oddziaływania promieniowania laserowego na ww. powłokę tlenkową, usunięto znaczną część osadzonej ablacyjnie mikrowarstwy z powłoką tlenków żelaza. Impulsowe oddziaływanie plazmy laserowej spowodowało topnienie mikrowarstwy, częściowe jej odparowanie a wytworzone ciśnienie spowodowało rozdrobnienie oraz koagulację ciekłego metalu w mikrokrople lub skupiska mikrokropli, zespolonych z warstwą wierzchnią stali 0H18N9. Mikrokrople te dobrze przylegają do podłoża, tworząc regularną teksturę rozwijającą powierzchnie, co w istotny sposób może wpłynąć na poprawę adhezji kompozytu klejowego, a co za tym idzie zwiększenie wytrzymałości złącza klejowego.
5. Aby zweryfikować przydatność teksturowania i oczyszczania laserowego w najbliższym czasie planuje się przeprowadzenie laboratoryjnych badań w zakresie określenia właściwości mechanicznych, m.in. odporności na ścinanie i odrywanie złączy klejowych wytworzonych na stali 0H18N9.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Burakowski T., Wierzchoń T., *Inżynieria powierzchni metali*, WNT, Warszawa 1995.
- [2] Schawlow A. L., *Lasers Science*, Vol. 149, pp.13-22. (1965).
- [3] Anisimov S.I, Luk'yanchuk B.S., *Selected problems of laser ablation theory*, Uspekhi Fizičeskich Institut Nauk, 172, No.3 (2002), 301-333.
- [4] Asmus J.F, *Interdisciplinary Science Review*, Vol.12(No.2), 1987, pp.171-179.
- [5] Marczak J., *Analiza i usuwanie nawarstwień obcych z różnych materiałów metodą ablacji laserowej*, ISBN: 83-88442-94-5 (2004).
- [6] 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.
- [7] Napadłek W., Sarzyński A., Marczak J. *Analiza procesów zachodzących podczas ablacji laserowej na stopach aluminium*, *Przegląd Spawalnictwa* nr 5 – 6 (2006), 64 – 67.
- [8] Burakowski T., Marczak J., Napadłek W., *Istota ablacyjnego oczyszczania laserowego materiałów*, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, LIII, Zeszyt 228'06 (2006), 125 – 135.
- [9] Burakowski T, Napadłek W., Marczak J., *Ablacyjna mikroobróbka laserowa w areologii*, *Inżynieria Materiałowa* nr 5 (153), rok XXVII, wrzesień – październik, 2006, 882 – 889.

- [10] Burakowski T., Kubicki J., Marczak J., Napadłek W., *Technologiczne możliwości zastosowania ablacyjnego oczyszczania laserowego materiałów*, Prace Instytutu Elektrotechniki, LIII, Zeszyt 228'06, (2006), 137 - 146.
- [11] <http://ptim.simp.pl/ptim/content/view/118/54/>
- [12] Wielgołaski W., *Wszystko o klejeniu, uszczelnianiu i antykorozji - poradnik serwisowy*.
- [13] Nowacki J., Chudziński M., Zmitrowicz P., *Lutowanie w budowie maszyn*.
- [14] Jasiulek P., *Łączenie tworzyw sztucznych metodami spawania, zgrzewania, klejenia i laminowania*.