

**Barbara CIECIŃSKA**

Politechnika Rzeszowska

## **OCENA SKUTECZNOŚCI CZYSZCZENIA WIĄZKĄ LASERA POWIERZCHNI PRZED KLEJENIEM**

W procesach technologicznych wytwarzania różnych elementów często wymagana jest duża czystość warstwy wierzchniej ze względu na lepszą przyczepność adhezyjną. Często stosowane są w tym celu: trawienie, obróbka ścierno-erozyjna, metody ultradźwiękowe i inne. Skutkiem ubocznym tych operacji jest jednak narażenie środowiska na oddziaływanie szkodliwych substancji lub zapylenie mikrocząstkami. W opracowaniu przedstawiono wyniki wstępnych badań nad zastosowaniem innej metody przygotowania powierzchni w operacjach klejenia, jaką może być obróbka wiązką lasera. Uzyskane wyniki wskazują, że czyszczenie laserowe jest efektywne i może być uznane za rozwiązanie alternatywne. Wymaga ono jednak dokładnych analiz samego procesu, jak i wpływu czyszczenia na parametry eksploatacyjne połączeń w odniesieniu do konkretnych materiałów i zastosowanych klejów.

### **Wprowadzenie**

Klejenie jest przykładem operacji technologicznej, na której jakość decydujący wpływ ma obróbka poprzedzająca. Podstawowym wymaganiem przed naniesieniem warstwy kleju jest odpowiednie przygotowanie powierzchni, tak aby zapewnić właściwe warunki do zaistnienia zjawiska adhezji. Aby siły wiązań atomów kleju z atomami podłoża były maksymalne, należy usunąć wszelkie zanieczyszczenia – drobiny metalu, pyły, warstwy korozji oraz tłuste warstwy, jak smary, silikony i inne. Oczyszczona powierzchnia może być następnie poddana dodatkowej obróbce w celu jej rozwinięcia i tym samym zwiększenia powierzchni oddziaływania kleju. Stosowane jest wówczas chropowacenie ręczne (np. papierem ściernym) albo mechaniczne (szlifowanie czy piaskowanie). W przypadku stopów metali częstym zabiegiem jest trawienie chemiczne, dzięki któremu można usunąć warstwy tlenków luźno związanych z podłożem, jednak naraża się zarówno pracowników, jak i środowisko naturalne na negatywny wpływ kąpieli trawiących. Pojawia się też problem postępowania z pozostałymi po obróbce zanieczyszczonymi roztworami.

Z uwagi na uciążliwość chemiczną, a także możliwe znaczne zapylenie lub pracochłonność wielu obróbek przygotowawczych poszukuje się innych rozwiązań technologicznych, pozwalających równie efektywnie przygotować powierzchnie elementów konstrukcji przed klejeniem.

## Czyszczenie powierzchni wiązką lasera

Do usuwania zbędnych zanieczyszczeń z powierzchni różnych materiałów można zastosować wiązkę lasera impulsowego.

Prace autorów [1] i [2] pokazują, że można efektywnie usuwać wieloletnie zanieczyszczenia z elewacji budynków, rzeźb, malowideł w sposób kontrolowany. Metoda jest skuteczna w odniesieniu do powłok malarskich, różnych nawarstwień wynikających z zanieczyszczonego środowiska, korozji, poprawiając ich wygląd i estetykę. Dodatkowym atutem jest możliwość odkrycia ewentualnych pęknięć, rys lub rozwarstwień czy ubytków. Ze względu na to, że promień lasera wnika na niewielką głębokość ciała stałego, powoduje jego nagrzewanie się i prowadzi do desorpcji par, gazów lub zanieczyszczeń z jego powierzchni, czyszczenie laserowe powierzchni w ostatnich latach znalazło szerokie zastosowanie w pracach konserwatorskich dzieł sztuki [3].

Promieniem lasera czyszczono też powierzchniowe warstwy żeliwa szarego z korozji, zatłuszczeń i pyłów, z dobrym skutkiem. Przyszłościowe wydaje się laserowe oczyszczanie aluminium i jego stopów, co może zastąpić dotychczas powszechne piaskowanie lub trawienie [1, 2].

Proces czyszczenia laserowego jest powtarzalny i możliwy do kontroli, natomiast wymaga prac badawczych nad doбором parametrów technologicznych, dających pożądane efekty w odniesieniu do konkretnych materiałów i technologii.

## Eksperymentalna ocena jakości czyszczenia powierzchni

Czyszczenie laserowe połączone z rozwinięciem powierzchni pozwala uzyskać warstwę powierzchniową o dużej przyczepności o charakterze adhezyjnym, co ma kluczowe znaczenie w klejeniu [4].

W badaniach eksperymentalnych sprawdzono zatem efekty czyszczenia powierzchni stali X6Cr17 przed klejeniem wiązką lasera impulsowego Nd:YAG o długości fali  $\lambda = 1,07 \mu\text{m}$  i gęstości energii  $Q = 7 \div 33 \text{ J/cm}^2$ .

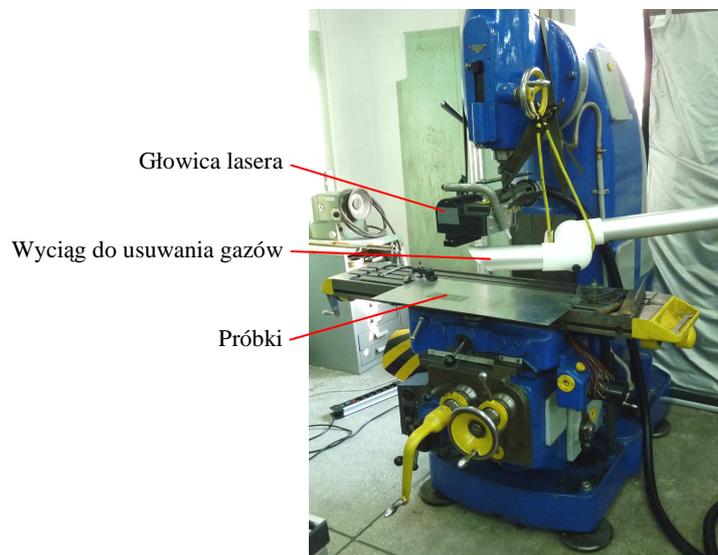
W eksperymencie wykorzystano mobilną głowicę laserową o mocy 500 W zamocowaną w uchwycie specjalnym wrzeczona frezarki pionowej (rys. 1.), co pozwoliło sterować nie tylko parametrami samego lasera, ale również prędkością przesuwu stołu obrabiarki (z ułożonymi na nim próbkami), a zatem i wiązki lasera względem czyszczonej powierzchni.

Do przeprowadzenia eksperymentu przygotowano próbki o wymiarach  $25 \pm 0,5 \times 100 \text{ mm}$  z blachy o grubości 1 mm, z których wykonano połączenia klejowe z pojedynczą zakładką klejem epoksydowym Araldit 2014-1. W celach porównawczych wykonano połączenia z powierzchnią przed klejeniem:

- a) umytą z zanieczyszczeń i odtłuszczoną acetonem w myjce ultradźwiękowej (wariant A),

- b) schropowaoną ręcznie papierem ściernym P80 i umytą z zanieczyszczeń acetonem w myjce ultradźwiękowej (wariant P),
- c) schropowaoną mechanicznie elektrokorundem 95A i umytą z zanieczyszczeń acetonem w myjce ultradźwiękowej (wariant E),
- d) oczyszczoną z zabrudzeń i zatłuszczeń wiązką lasera (z 50% wykorzystaniem mocy, impulsem o częstotliwości 2 kHz, z szybkością skanowania 2000 mm/sek.) w trzech wariantach prędkości przesuwu wiązki względem powierzchni
  - 35 mm/min (wariant L1),
  - 115 mm/min (wariant L2),
  - 170 mm/min (wariant L3).

We wszystkich wariantach próbki po myciu suszono ok. 10 min w powietrzu, w temperaturze otoczenia ok. 22°C. Próbki klejono bezpośrednio po wysuszeniu, przy wilgotności ok. 40%, ze stałym dociskiem.



Rys. 1. Fotografia frezarki pionowej z zamocowaną głowicą laserową  
Fig. 1. The photograph of vertical milling machine with a fixed laser head

W eksperymencie jako miarę efektywności czyszczenia powierzchni wiązką lasera przyjęto wartość swobodnej energii powierzchniowej (SEP).

Jej wartość wyznaczono metodą Owensa-Wendta opartą na pomiarze kąta zwilżania  $\theta$  wykonanym przy użyciu cieczy o znanej energii swobodnej [5]. W metodzie tej przyjmuje się, że swobodna energia powierzchniowa badanego materiału ma dwie składowe – polarną i dyspersyjną:

$$\gamma_s = \gamma_s^p + \gamma_s^d \quad (1)$$

gdzie:  $\gamma_s$  – swobodna energia powierzchniowa materiału,  
 $\gamma_s^p$  – składowa polarna SEP materiału,  
 $\gamma_s^d$  – składowa dyspersyjna SEP materiału.

Swobodna energia cieczy  $\gamma_L$ , podobnie jak  $\gamma_s$ , złożona jest z dwóch składowych, polarnej i dyspersyjnej ( $\gamma_L^p$  i  $\gamma_L^d$ ). Wyraża się wzorem uwzględniającym składowe energii materiału  $\gamma_s^p$  i  $\gamma_s^d$ :

$$\gamma_L(1 + \cos\theta/2) = (\gamma_s^p \gamma_L^p)^{0,5} + (\gamma_s^d \gamma_L^d)^{0,5} \quad (2)$$

gdzie:  $\theta$  – kąt zwilżania powierzchni wybraną cieczą.

Wówczas, stosując dwie ciecze pomiarowe o znanych wartościach energii powierzchniowej oraz rozwiązując układ równań:

$$(\gamma_L^d)^{0,5} + 1,53 (\gamma_s^p)^{0,5} = 7,8 (1 + \cos \theta_1) \quad (3)$$

$$(\gamma_L^d)^{0,5} + 0,22 (\gamma_s^p)^{0,5} = 3,65 (1 + \cos \theta_2) \quad (4)$$

można wyznaczyć poszukiwaną  $\gamma_s$  materiału [5].

Aby wyznaczyć  $\gamma_s$  badanej stali po obróbce laserowej, dokonano pomiarów kąta zwilżania  $\theta_1$  – używając wody ( $\gamma_L = 72,8 \text{ mJ/m}^2$ ,  $\gamma_L^p = 51 \text{ mJ/m}^2$ ,  $\gamma_L^d = 21,8 \text{ mJ/m}^2$ ), i  $\theta_2$  – używając diiodometanu ( $\gamma_L = 50,8 \text{ mJ/m}^2$ ,  $\gamma_L^p = 2,3 \text{ mJ/m}^2$ ,  $\gamma_L^d = 48,5 \text{ mJ/m}^2$ ). Wykorzystano w tym celu goniometr PG-3 z oprogramowaniem pozwalającym wyznaczyć wartość SEP.

W tabeli 1. podano wartości swobodnej energii powierzchniowej po obróbce powierzchni wykonanej według podanych wcześniej wariantów.

Tabela 1. Wartości swobodnej energii powierzchniowej (SEP)

Table 1. The values of surface free energy (SFE)

Wariant obróbki	A	P	E	L1	L2	L3
Wartość SEP, $\text{mJ/m}^2$	58,8	54,8	<b>60,1</b>	65,9	76,8	<b>76,9</b>

W celu uzupełnienia eksperymentu oprócz pomiarów kąta zwilżania wykonano próby wytrzymałości statycznej połączeń na ścinanie. Pomiar siły niszczącej wykonano na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 3382. Wyniki obliczonej wytrzymałości statycznej podano w tab. 2.

Tabela 2. Wartości wytrzymałości statycznej na ścinanie

Table 2. The values of static shear strength

Wariant obróbki	A	P	E	L1	L2	L3
Wytrzymałość statyczna na ścinanie $R_t$ , MPa	12,47	<u>19,13</u>	<b>22,62</b>	<u>19,94</u>	<u>19,92</u>	<b>21,80</b>
Długość zakładki $d = 12,5$ mm, liczba powtórzeń $n = 5$ , $R_t = P_{t-sr}/A_0$ , MPa, gdzie pole powierzchni zakładki $A_0 = 312,5$ mm <sup>2</sup> , $P_{t-sr}$ – średnia wartość siły niszczącej, N						

## Podsumowanie i wnioski

Oczyszczone różnymi metodami powierzchnie charakteryzują się odmienną energią powierzchniową, która jest miernikiem możliwości klejenia takich powierzchni. Uzyskane w eksperymencie wyniki wskazują na to, że czyszczenie wiązką lasera może wyraźnie podwyższyć SEP – z  $54,8 \div 60,1$  mJ/m<sup>2</sup> nawet do  $76,9$  mJ/m<sup>2</sup>.

Ze wzrostem wartości SEP nie obserwowano natomiast tak wyraźnego wzrostu wytrzymałości statycznej połączeń na ścinanie. Jednak wartości  $R_t$  po obróbce laserowej porównywalne (wariant P z wariantami L1 i L2) bądź zbliżone (wariant E i wariant L3) do wartości uzyskanych po obróbce ścierną pozwalają twierdzić, że ten rodzaj przygotowania powierzchni przed klejeniem jest skuteczny dla wybranego materiału i kleju.

Zasadne jest zatem kontynuowanie badań eksperymentalnych nad zastosowaniem technologii laserowej w klejeniu, w szczególności ustalenie optymalnych parametrów pracy lasera oraz zależności pomiędzy właściwościami modyfikowanej w ten sposób powierzchni a wynikową wytrzymałością sklejonnych połączeń w odniesieniu do różnych gatunków materiałów oraz klejów o odmiennych właściwościach.

Ze względu na to, że obróbka laserowa wykazuje szczególne cechy w porównaniu z innymi rodzajami obróbek, staje się alternatywą do tradycyjnych sposobów przygotowania powierzchni: wiązka laserowa nie podlega zużyciu jako narzędzie, może być koncentrowana za pomocą optyki obróbkowej na powierzchni obrabianego przedmiotu w celu osiągnięcia wymaganej gęstości mocy do wywołania określonego oddziaływania. Ponadto, czyszczenie laserowe pozwala uniknąć kontaktu z chemikaliami i zmniejszyć emisję pyłów. Podczas pracy z laserem należy jednak zwracać szczególną uwagę na zasady bhp (stosować okulary ochronne i przemysłowe filtry gazów odlotowych).

Dodatkową zaletą wykorzystania mobilnej głowicy laserowej jest łatwość jej montażu – w eksperymencie wykorzystano typową obrabiarkę, sama obróbka zaś przebiegała w powietrzu bez atmosfery ochronnej. Problemem pozostaje jednak wysoka cena tych urządzeń i związana z tym ich mała dostępność.

## Bibliografia

1. Burakowski T., Marczak J., Napadłek W., Istota ablacyjnego czyszczenia laserowego materiałów, Prace Instytutu Elektrotechniki WAT, z. 228, s. 125-135, Warszawa 2006.
2. Burakowski T., Kubicki J., Marczak J., Napadłek W., Technologiczne możliwości zastosowania ablacyjnego oczyszczania laserowego materiałów, Prace Instytutu Elektrotechniki WAT, z. 228, s. 137-146, Warszawa 2006.
3. Marczak J., Analiza i usuwanie nawarstwień obcych z różnych materiałów metodą ablacji laserowej, WAT, Warszawa 2004.
4. Wiącek Z., Badania wpływu stanu powierzchni metali lekkich na jakość połączeń adhezyjnych, Prace Naukowe Politechniki Lubelskiej, 168, Mechanika 40, s. 51-57, Lublin 1987.
5. Żenkiewicz M., Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych, WNT, Warszawa 2000.

## THE ASSESSMENT OF EFFECTIVENESS OF LASER BEAM SURFACE CLEANING BEFORE ADHESIVE BONDING

### Summary

The manufacturing processes of different elements often requires a large clean surface layer due to the better grip adhesion. Are often used for this purpose: etching, abrasive-erosion machining, ultrasonic and other methods. A side effect of these operations is, however, the impact of environmental exposure to harmful substances or dust microparticles.

The paper presents the results of preliminary studies using a different method of surface preparation for bonding operations, which may be a laser beam machining. The results show that laser cleaning is effective and may be considered as an alternative. However, it requires careful analysis of the process itself and the impact of cleaning on the performance calls for specific materials and adhesives used.

### Podziękowanie

Autorka składa podziękowanie pracownikom Ośrodka Naukowo-Konserwatorskiego – Pracowni Konserwacji Zabytków Sp. z o.o. w Poznaniu za umożliwienie wykonania badań eksperymentalnych z wykorzystaniem mobilnej głowicy laserowej.

*Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.*

*Złożono w redakcji w październiku 2011 r.*