

KONSTYTUOWANIE ENERGII SWOBODNEJ POWIERZCHNI WIĄZKĄ LASERA

Barbara CIECIŃSKA

Streszczenie: W ostatnich latach obróbka laserowa staje się coraz powszechniejsza, a obszary jej stosowania są bardzo zróżnicowane. Jednym z nich jest usuwanie zanieczyszczeń z powierzchni i przygotowywanie ich do dalszej obróbki. W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, jakie przeprowadzono w celu ustalenia efektów czyszczenia powierzchni stali AISI 4130 oraz X6Cr17 wiązką lasera światłowodowego. Miernikiem jakości procesu była w tym przypadku swobodna energia powierzchniowa – wielkość charakteryzująca stan energetyczny powierzchni przed operacjami technologicznymi wymagającymi znacznej adhezji.

Słowa kluczowe: laser, obróbka powierzchni, swobodna energia, adhezja

1. Zastosowanie laserów w obróbce materiałów konstrukcyjnych

Kształtowanie właściwości części maszyn może odbywać się na wiele sposobów. Obok znanych sposobów, jak np. kształtowania formującego (jak odlewanie, metalurgia proszków), plastycznego (m. in. kucia, walcowania, wyciskania, tłoczenia) i ubytkowego (obróbki ścierniej, skrawaniem, erozyjnej) wykorzystujących powszechnie znane i dostępne urządzenia technologiczne i obrabiarki, pojawia się obróbka wiązką lasera. Podział obróbki laserowej związany jest najczęściej z otrzymywanymi efektami: dwie podstawowe grupy to techniki przetopieniowe i bezprzetopieniowe [1].

1.1. Techniki obróbki laserowej związane z przetapianiem materiału

W celu zmodyfikowania właściwości warstwy wierzchniej wiązką lasera stosuje się różnorodne sposoby. Są to m.in.:

– *umacnianie przemianą, nadtapianie warstwy wierzchniej* - podczas której laser nagrzewa cienką warstwę powierzchni obrabianej (np. hartowanie powierzchniowe); w wyniku obróbki uzyskuje się strukturę drobnodispersyjną i bardziej jednorodną, pogorszeniu ulega wprawdzie chropowatość powierzchni, ale polepszają się właściwości eksploatacyjne – tribologiczne, zmęczeniowe i antykorozyjne; w taki sposób mogą być modyfikowane elementy wykonane z wielu różnorodnych materiałów: z żeliwa szarego, stali narzędziowych, w tym szybko tnących, stali nierdzewnych, łożyskowych, węglowych i niskostopowych, a także ze stopów aluminium czy czystego tytanu [1, 2].

Inny rodzaj obróbki stanowi szkliwienie. Jego celem jest uzyskanie struktury amorficznej w warstwie wierzchniej. Jest to dość trudna obróbka, gdyż nie wszystkie stopy wykazują skłonność do amorfizacji. Przy zapewnieniu dużych szybkości chłodzenia lepkość ciekłego metalu w niektórych stopach wzrasta tak, że stop nie krystalizuje. Krzepnie on w sposób nieuporządkowany, tworząc bezpostaciowy stop o cechach masy szklanej. Szkliwienie udaje się w stopach nieeutektycznych na podstawie telluru z Ag, Ga, Cu, In; na podstawie ołowiu i cyny (np. Pb-Sn, Pb-Au, Sn-Cu i in.) oraz na stopach

o składzie zbliżonym do eutektycznego z głęboką eutektyką o składzie metal-niemetal (metale I i VII grupy układu okresowego pierwiastków z niemetalami, np. Si, Ge, P, C) i metal-metal ziem rzadkich (metale Ag, Au, Cu, Al., Sn z La, Ce, Nd, Y, Gd), jak również metal-metal trudno topliwy – metale Fe, Cu, Co, Ni z Ti, Zr, Nb, Ta. Stopy amorficzne charakteryzują się znaczną wytrzymałością i twardością, przy zachowaniu plastyczności, chociaż spada ich wytrzymałość w niskich temperaturach. Odnaczają się wysoką odpornością na korozję, a niektóre z nich wykazują specjalne właściwości magnetyczne [1].

Z nadtapianiem warstwy wierzchniej wiąże się także zagęszczanie laserowe, polegające na przetopieniu materiału na pewną głębokość, w celu uzyskania materiału o większej gęstości. Najczęściej w wyniku zagęszczania usuwa się porowatość, defekty powierzchniowe jak rysy, rozwarstwienia, itp. Zagęszczane powierzchnie wyrobów charakteryzują się większą twardością, gładkością, wyższą odpornością na zużycie tribologiczne, zmęczeniowe, są bardziej odporne na korozję. Zagęszczanie stosuje się do uszczelniania powierzchni np. stali z węglnikami, powłok natrykiwanych cieplnie czy powłok galwanicznych [1].

Podobnie, porównując parametry obróbki, przebiega wyłazanie laserowe. W strukturze materiału zachodzą te same przemiany fazowe i strukturalne, ale głównym celem jest zmniejszenie chropowatości powierzchni i zmiana kształtu profilu nierówności. Niekiedy poprawę gładkości uzyskuje się wraz z doprowadzeniem do strefy stopionego materiału (tzw. jeziorka) dodatków, wpływających na zachowanie się materiału (wielkość zawirowań, szybkość i kierunek cyrkulacji), ale wówczas będzie to już wyłazanie stopujące [1].

– **wprowadzanie pierwiastków stopowych**, co odbywa się poprzez stopienie wprowadzanego materiału oraz materiału przedmiotu (podłoża); w rezultacie ruchów konwekcyjnych i grawitacyjnych oraz ciśnienia wiązki laserowej stopione materiały mieszają się. Przejście wiązki lasera wywołuje również efekt samohartowania się materiału podłoża w sąsiedztwie nowo powstałego stopu. W strefie przetopionej wszystkie fazy rozłożone są równomiernie (z wyjątkiem bardzo cienkiej warstwy dyfuzyjnej na granicy fazy stałej i ciekłej), zaś warstwa stopu jest metalurgicznie związana w podłożem. Tak otrzymana warstwa wierzchnia charakteryzuje się większą wytrzymałością zmęczeniową, lepszymi właściwościami tribologicznymi, antykorozyjnymi oraz mniejszą chropowatością. Do stopowania stosuje się niemetale (C, N, Si, B), metale (m. in. Co, Cr, Sn, Mn, Nb, W, Ta) oraz węgliki metali trudno topliwych, zaś do stopowania laserowego przeznacza się stale i żeliwa. Pojedynczymi pierwiastkami stopuje się je w celu polepszenia właściwości: żaroodporności i żarowytrzymałości, antykorozyjności, właściwości przeciwciernych. Stopuje się też materiały kompozycjami pierwiastków w celu uzyskania jednocześnie polepszonych różnych właściwości eksploatacyjnych [3].

– **natapianie (napawanie)** - technika wykorzystująca energię lasera do uzyskania określonych właściwości wyrobów poprzez zmianę właściwości warstwy wierzchniej, zmiana ta dokonuje się poprzez stopienie grubej warstwy materiału natapianego i na podtopieniu bardzo cienkiej warstwy podłoża. Tym sposobem kształtuje się warstwę wierzchnią o większej odporności na korozję, erozję, zużycie ścierne, kawitację, o podniesionej żaroodporności i żarowytrzymałości. Szczególne miejsce tutaj napawanie regeneracyjne, stosowane do przywrócenia pierwotnego stanu uszkodzonych elementów, gdzie nadtopionym metalem uzupełnia się szczeliny, pęknięcia, wykruszenia, odtwarza zużyte powierzchnie. Regeneracja taka pozwala również poprawić właściwości wyrobu (jest to tzw. napawanie uszlachetniające), z uwagi na możliwość nałożenia

materiału o zmodyfikowanym składzie i właściwościach w porównaniu do materiału podłoża. Napawa się m.in. stal, stopy kobaltu, stopy tytanu, stopy aluminium [4-7].

1.2. Techniki bezprzetopieniowe

Do obróbki wybranych fragmentów powierzchni stosuje się lasery w celu wyżarzania lub odpuszczania. Głównym celem **wyżarzania** jest ujednorodnienie struktury, zmniejszeniu ulegają defekty struktury, w niektórych przypadkach może zwiększać się gęstość. Z uwagi na fakt, iż plamka lasera nie jest duża, wyżarzanie laserowe stosuje się do lokalnego nagrzewania, a co za tym idzie, lokalnego obniżenia twardości, uplastycznienia, i następnego odkształcania tych miejsc albo zwiększania wytrzymałości zmęczeniowej.

Z kolei **odpuszczanie**, polegające na nagrzaniu do określonej temperatury i ochłodzenie, stosuje się w celu poprawy ciągliwości i zmniejszenia kruchości. Ze względu na wspomniane lokalne oddziaływanie, obróbka taka ma szereg zalet: przemiany fazowe i strukturalne zachodzą w podobny sposób jak podczas obróbki w piecu, ale węgliki są bardziej drobnoziarniste, materiał ma wyższą twardość, wytrzymałość, udarność. Właściwości te można regulować poprzez zmianę parametrów pracy lasera. Ponadto miejscowo usuwa się naprężenia, np. hartownicze [1].

Bez przetopienia warstwy wierzchniej przeprowadza się także **hartowanie**, stosowane w celu otrzymania określonej struktury, przebiega ono w wyższych temperaturach z uwagi na znacznie większe prędkości nagrzewania i chłodzenia; ale struktura ta może być zróżnicowana, albo różne mogą być udziały innych faz szczątkowych. Generalnie w zahartowanych laserowo materiałach wzrasta wytrzymałość zmęczeniowa, udarność, ciągliwość, odporność na korozję i zużycie ściernie, otrzymuje się równomierny rozkład twardości oraz lepszą gładkość powierzchni, charakter zmian zależy od rodzaju materiału oraz zabiegów poprzedzających tę obróbkę [3, 8].

Innym sposobem obróbki powierzchni jest laserowe **czyszczenie**, podczas którego wykorzystywane jest zjawisko ablacji (zw. również odparowywaniem ablacyjnym, desorpcją lub trawieniem laserowym). Polega ono na odparowaniu warstwy wierzchniej po osiągnięciu wartości progowej energii. W wyniku oddziaływania impulsu energia zostaje pochłonięta, warstwa wierzchnia nadtopiona, a materiał ze stopionej strefy gwałtownie odparowany i wyrzucony w postaci plazmy – fragmentów cząsteczek materiału oraz produktów reakcji [3, 9]. Sposób ten znalazł szerokie zastosowanie m. in. do usuwania zanieczyszczeń – z powodzeniem usuwa się warstwy różnorodnych osadów organicznych i nieorganicznych z powierzchni malowanych, betonowych, metalowych; zwłaszcza, że w niektórych przypadkach zastosowanie lasera pozwala wyeliminować powszechnie dotąd stosowane substancje chemiczne, krytykowane niejednokrotnie z uwagi na tendencje prośrodowiskowe. Przykładem obszaru stosowania ablacji jest renowacja zabytkowych obiektów i dzieł sztuki, gdzie zachowanie powierzchni bez zniszczenia ma pierwszorzędne znaczenie. Lasery pozwoliły na selektywne usuwanie niekiedy bardzo starych nawarstwień o niejednorodnej, często losowej strukturze i grubości, a także zastąpiły z powodzeniem szkodliwe dla człowieka i środowiska chemikalia [10].

1.3. Inne sposoby wykorzystania energii lasera

Wymienione wcześniej sposoby wykorzystania energii emitowanej przez lasery nie wyczerpują obszarów zastosowań. Samo zjawisko ablacji wykorzystywane jest także do nanoszenia par materiałów na podłoże (proces zwany LAPVD – z ang. laser *assisted*

physical vapour disposition – laserowe osadzanie powłok z fazy gazowej), wówczas wytwarza się różnego rodzaju powłoki cienkie i twarde lub o specjalnych właściwościach (podobnych lub porównywalnych z PVD i CVD); do odparowywania i wybuchowego umacniania powierzchni w wyniku powstałej fali uderzeniowej [1, 9].

Lasery stosuje się do cięcia i wycinania elementów z blach - rozdzielanie materiału jest wynikiem miejscowego stopienia i odparowania metalu za pomocą wiązki lasera o określonej energii. Obróbka ta cieszy się zainteresowaniem z uwagi na kilka jej szczególnych cech: oddziaływanie cieplne na materiał jest ograniczone, można uzyskiwać znaczne prędkości cięcia, przy czym jego jakość jest wysoka (na ogół krawędzie nie wymagają dodatkowej obróbki skrawaniem). Może być z powodzeniem zautomatyzowana oraz zastosowana do wytwarzania wyrobów wycinanych o skomplikowanych kształtach. Ponadto wiązką lasera materiały spawa się, grzewie, znakuje, wierci i drąży otwory [11-13].

Wreszcie lasery stanowią podstawę nowoczesnych metod kształtowania przyrostowego – są to znane i rozwijane techniki szybkiego prototypowania (z ang. *rapid prototyping*), w których wiązką lasera stapia się warstwowo proszki materiałów tworząc geometrię zdefiniowaną w systemach CAD. Uznanie znalazły techniki *selective laser melting*, stereolitografia, selektywne spiekanie laserowe piasków formierskich m.in. metodą *direct croning proces*, czy przestrzenne sklejanie proszków metodą *three dimensional printing* [2, 14].

2. Energia powierzchniowa i jej znaczenie

W produkcji wielu wyrobów pojawiają się operacje technologiczne polegające na nakładaniu różnego rodzaju powłok na wcześniej przygotowane powierzchnie. Może to być malowanie, lakierowanie, klejenie, uszczelnianie, zabezpieczanie powłokami antykorozyjnymi, ale również operacje nakładania smarów, czy produkcja nieprzemakalnych tkanin. Podczas nakładania powłok powierzchnie są zwilżane powłoką-cieczą, między zwilżaną powierzchnią wyrobu-ciała stałego a styczną do menisku cieczy zwilżającej (wyprowadzonej w punkcie styku zetknięcia cieczy z powierzchnią ciała stałego) tworzy się tzw. kąt zwilżania (zw. też kątem granicznym) θ . Jego wartość zależy od równowagi sił kohezyjnych przyciągania między cząsteczkami cieczy, sił przyciągania cząsteczek cieczy przez ciało stałe, sił przyciągania tych cząstek cieczy, które nie mają styczności z ciałem stałym, ale znajdują się w zasięgu oddziaływań międzycząsteczkowych, oraz sił grawitacji [15].

Połączenie się dwóch powierzchni różnych ciał – co w naszym przypadku oznaczać może połączenie powłoki z ciałem stałym - zwane jest adhezją i w wyżej wymienionych procesach wytwórczych ma fundamentalne znaczenie [16].

Wielu badaczy właściwości adhezyjne określa przy pomocy swobodnej energii powierzchniowej (dalej SEP) [np. 16, 17, 18] i jest to charakterystyczna wielkość właściwa każdemu ciału. Wartość SEP można wyznaczać różnymi metodami. Jedną z nich jest metoda Owens-Wendta oparta o pomiar kąta zwilżania θ wykonany przy użyciu cieczy o znanej energii swobodnej [17]. 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: γ_S – swobodna energia powierzchniowa materiału,
 γ_S^p – składowa polarna SEP materiału,
 γ_S^d – składowa dyspersyjna SEP materiału.

Swobodna energia cieczy γ_L , podobnie jak γ_S , złożona jest z dwóch składowych, polarnej i dyspersyjnej (γ_L^p i γ_L^d). Wyraża się wzorem, uwzględniającym składowe energii materiału γ_S^p i γ_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: θ – 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 γ_S materiału [17]. Ta właśnie metoda wyznaczenia SEP została wykorzystana w badaniach eksperymentalnych, opisanych w pkt. 3.

Ze względu na zjawisko adhezji przygotowanie powierzchni odgrywa istotną rolę w zapewnieniu właściwej przyczepności powłoki i jej trwałości podczas eksploatacji. Stąd, zanim właściwa powłoka zostanie naniesiona na podłoże, jest ono poddawane różnorodnym zabiegom:

- czyszczenia w celu usunięcia pyłów, niepotrzebnych smarów, mikroorganizmów, pęcherzyków gazów, korozji, niepotrzebnej ochrony przed korozją – niejednokrotnie używa się do tego celu kwaśnych lub alkalicznych kąpiei o określonym składzie chemicznym;
- obróbki specjalnej mającej na celu „rozwiniecie” powierzchni – pozwala ona na zwiększenie jej aktywności fizykochemicznej oraz zwiększenie sił wiązań adhezyjnych pomiędzy podłożem a powłoką. Wykonuje się wówczas obróbkę mechaniczną – np. ścierną, strumieniowo-ścierną, piaskowanie, szrotkowanie – która w efekcie daje określoną strukturę geometryczną powierzchni (określona chropowatość nie jest jednak gwarantem najkorzystniejszej SEP, najczęściej pożądana jest struktura o $R_m = 7-25 \mu m$). Obróbka mechaniczna może być jednak niekiedy złym rozwiązaniem ze względu na konstytuujące się nadmierne naprężenia ściskające w warstwie wierzchniej. Rozwiniecie powierzchni uzyskuje się też poprzez chemiczne trawienie – wówczas w kąpielach trawiących o określonym składzie i temperaturze po określonym czasie otrzymuje się powierzchnie o dużej aktywności fizykochemicznej (np. w zakładach lotniczych dla stopów aluminium stosuje się alodynowanie, zapewniające wysoką przyczepność i trwałość powłok oraz połączeń klejonych; podobne efekty daje obróbka elektrochemiczna – anodowe utlenianie) [18].

Niektóre ciecze, jak farby i kleje z rozpuszczalnikami wodnymi mają większą swobodną energię powierzchniową niż powierzchnia tworzywa, na które są nanoszone. Wówczas konieczne jest zwiększanie SEP podłoża [17].

3. Badania eksperymentalne energii powierzchniowa kształtowanej laserem

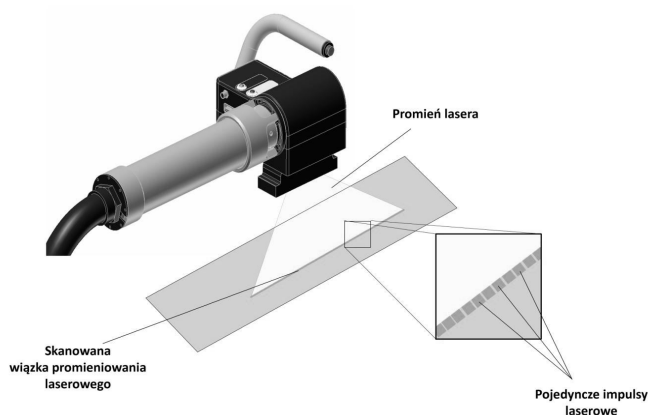
W badaniach eksperymentalnych wykorzystano mobilny system laserowy SLCR FL500-N, o standardowej wydajności przemysłowej pojedynczego pulsowania 30mJ przy 16,6 kHz, regulowanej częstotliwości pulsowania w zakresie 2 do 25 kHz oraz o maksymalnej mocy stałej 500W.

W badaniach próbki przygotowano ze stali stopowej AISI 4130 oraz stali nierdzewnej X6Cr17. Próbki oczyszczono wiązką lasera o stałych, założonych parametrach pracy w trzech wariantach prędkości przesuwu wiązki względem powierzchni próbki (rys. 1):

I wariant – 30 mm/min.

II wariant – 110 mm/min.

III wariant – 170 mm/min.



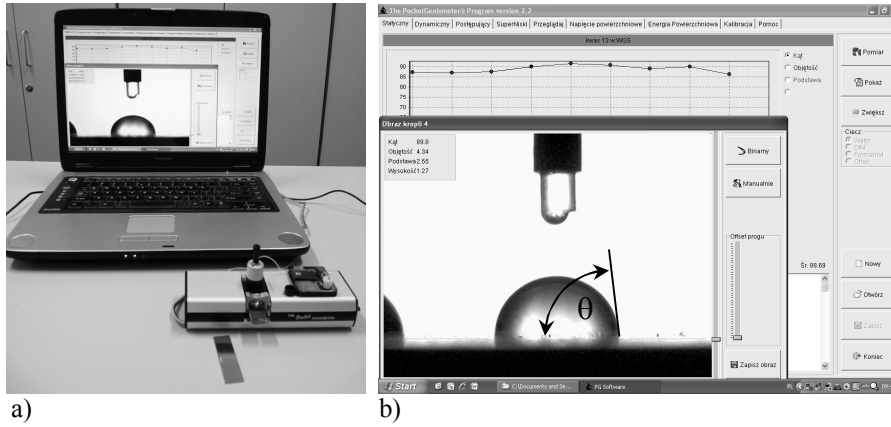
Rys. 1. Ilustracja procesu czyszczenia laserowego

Aby wyznaczyć γ_S badanych stali po obróbce laserowej dokonano pomiarów kąta zwilżania θ_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 θ_2 używając diiodometanu ($\gamma_L = 50,8 \text{ mJ/m}^2$, $\gamma_L^p = 2,3 \text{ mJ/m}^2$, $\gamma_L^d = 48,5 \text{ mJ/m}^2$). W tym celu wykorzystano goniometr PG-3 z oprogramowaniem pozwalającym wyznaczyć wartość SEP (rys. 2), zaś pomiary wykonano bezpośrednio po obróbce oraz po upływie 24 godzin, w celu określenia trwałości efektu aktywacji powierzchni.

Dla porównania wyznaczono energię swobodną dla próbek przygotowanych piaskowaniem, i uzyskano następujące wyniki:

- dla AISI 4130 - $\gamma_S = 31,9 \text{ mJ/m}^2$,
- dla X6Cr17 - $\gamma_S = 34,6 \text{ mJ/m}^2$.

Wyniki pomiarów zasadniczych przedstawiono w tab. 1 i tab. 2.:



a) b)

Rys. 2. Pomiar kąta zwilżania: a) widok stanowiska pomiarowego; b) widok okna programu z interpretacją kąta zwilżania

Tab. 1. Zestawienie wyników pomiarów kąta zwilżania i wyznaczonej SEP dla AISI 4130

AISI 4130			
Wariant obróbki	Wielkość	Wynik uzyskany zaraz po obróbce	Wynik uzyskany zaraz po upływie 24 godz.
I	θ_1 [°]	75,6	79,7
	θ_2 [°]	33,2	37,4
	γ_s^d [mJ/m ²]	43,1	41,3
	γ_s^p [mJ/m ²]	9,8	8,4
	γ_s [mJ/m ²]	53,0	49,7
II	θ_1 [°]	99,0	93,7
	θ_2 [°]	30,6	32,5
	γ_s^d [mJ/m ²]	44,2	43,4
	γ_s^p [mJ/m ²]	0,8	2,6
	γ_s [mJ/m ²]	45,0	46,1
III	θ_1 [°]	100,3	101,8
	θ_2 [°]	30,6	28,1
	γ_s^d [mJ/m ²]	44,2	45,0
	γ_s^p [mJ/m ²]	0,4	0,1
	γ_s [mJ/m ²]	44,5	45,1

Tab. 2. Zestawienie wyników pomiarów kąta zwilżania i wyznaczonej SEP dla stali nierdzewnej X6Cr17

Stal X6Cr17			
Wariant obróbki	Wielkość	Wynik uzyskany zaraz po obróbce	Wynik uzyskany zaraz po upływie 24 godz.
I	θ_1 [°]	34,1	40,6
	θ_2 [°]	36,6	27,4
	γ_s^d [mJ/m ²]	41,7	45,4
	γ_s^p [mJ/m ²]	30,2	26,2
	γ_s [mJ/m ²]	71,9	71,6
II	θ_1 [°]	66,0	73,4
	θ_2 [°]	34,6	37,7
	γ_s^d [mJ/m ²]	42,5	41,2
	γ_s^p [mJ/m ²]	14,3	11,1
	γ_s [mJ/m ²]	56,9	52,3
III	θ_1 [°]	86,3	86,7
	θ_2 [°]	36,8	39,5
	γ_s^d [mJ/m ²]	41,6	40,4
	γ_s^p [mJ/m ²]	5,6	5,7
	γ_s [mJ/m ²]	47,2	46,0

Gdzie oznaczono przez:

- θ_1 – kąt zwilżania wodą,
- θ_2 – kąt zwilżania diiodometanem,
- γ_s^d – składową dyspersyjną SEP badanej stali,
- γ_s^p – składową polarną SEP badanej stali,
- γ_s – SEP badanej stali.

4. Wnioski

Ze względu na wysoką cenę lasery znajdują zastosowanie w procesach produkcyjnych, gdzie ich wykorzystanie będzie ekonomicznie i technologicznie uzasadnione. Jednak, pomimo wysokich kosztów chętnie rozważa się ich stosowanie ze względu na szereg zalet: dokładną regulację mocy, emitowanie energii o dużej gęstości precyzyjnie do założonego miejsca, możliwość obróbki elementów o skomplikowanych kształtach i w trudno dostępnych miejscach, możliwość uniknięcia deformacji kształtu lub utraty właściwości elementu wywołanych nagrzewaniem, możliwość obróbki w powietrzu bez atmosfer ochronnych. Działaniu wiązki lasera mogą być poddawane materiały konstrukcyjne zróżnicowane pod względem składu chemicznego i właściwości.

Ponadto w chwili, gdy wiele substancji chemicznych uważa się za szkodliwe dla środowiska i człowieka, obróbka laserowa (pod warunkiem stosowania filtrów przemysłowych) pozwala toksyczne substancje wyeliminować. Wyniki badań eksperymentalnych wskazują, że taka możliwość istnieje także w przypadku operacji wykonywanych przed nakładaniem powłok: wartość swobodnej energii powierzchniowej była wyższa niż po tradycyjnie stosowanym piaskowaniu. Co więcej efekt oczyszczenia i aktywacji powierzchni w przyjętym zakresie parametrów okazał się stabilny. Oprócz faktu wyeliminowania chemikaliów ze względów środowiskowych, możliwa jest także

oszczędność substancji (używanych do przemywania, trawienia, płukania), energii (podczas suszenia), materiałów ściernych w operacjach chropowacenia powierzchni. W eksperymencie fakt ten widoczny był szczególnie w przypadku stali X6Cr17, której powierzchnia w stanie dostawy jest niemal lustrzana i charakteryzuje się wysoką gładkością. Jednocześnie wyższa energia powierzchniowa determinuje lepszą przyczepność powłoki (lakieru, kleju), a tym samym wpływa na przedłużenie okresu eksploatacji gotowego wyrobu.

Z uwagi na to, że efekt obróbki można uznać za trwały, w produkcji możliwe jest planowanie operacji wymagających czasu – ustawiania, pozycjonowania, transportu.

Należy jednak pamiętać, że uzyskane wyniki i związane z nimi korzyści dotyczą badanych materiałów w określonym eksperymencie przedziale parametrów technologicznych. W przypadku konieczności obróbki laserem innych powierzchni, niezbędne jest wykonanie badań wstępnych, określających przydatność ablacji laserowej w konkretnym przypadku.

Literatura

1. Burakowski T., Wierchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. WNT, Warszawa 1995
2. Oczko K., Kawalec A.: Kształtowanie metali lekkich. PWN, Warszawa 2012
3. Dobrzański L.A., Dobrzańska-Danikiewicz A.D.: Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich. <http://www.openaccesslibrary.com/vol05/5.pdf> (z dn. 3.01.2013)
4. http://www.pg.gda.pl/mech/kim/Skrypt/Inz_pow_roz5.pdf (z dn. 2.01.2014)
5. <http://www.e-autonaprawa.pl/artykuly/2240/technologie-napawania.html> (z dn. 2.01.2014)
6. <http://www.megamold.pl/index.php?id=2> (z dn. 2.01.2014)
7. Blicharski M.: Inżynieria powierzchni. WNT, Warszawa 2009
8. Radziejewska J.: Laserowa modyfikacja warstwy wierzchniej wspomagana nagniataniem. Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa 2011
9. Burakowski T., Marczak J., Napadłek W.: Istota ablacyjnego czyszczenia laserowego materiałów. Prace Instytutu Elektrotechniki WAT, z. 228, Warszawa 2006
10. Marczak J.: Analiza i usuwanie nawarstwień obcych z różnych materiałów metodą ablacji laserowej. WAT, Warszawa 2004
11. Singh R.: Laser cutting. <http://www.me.iitb.ac.in/~ramesh/ME677/lasercutting.pdf> (z dn. 2.01.2014)
12. http://www.investa.pl/oferta/u/8/9/5/89593c0b1699fc83545466727ca70079/katalog_LASER_M.pdf (z dn. 2.01.2014)
13. Löffler N., Shannon G.: Marking, ablating, cleaning, cutting and even micro welding! Laser Technik Journal, WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, Weinheim, No 4/2012
14. Budzik G.: Synteza i analiza metod projektowania i wytwarzania prototypów elementów o skomplikowanych kształtach na przykładzie wirników turbosprężarek. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007
15. Hebda M.: Procesy tarcia, smarowania i zużywania maszyn. Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Warszawa 2007
16. Dutkiewicz E. T.: Fizykochemia powierzchni. WNT, Warszawa 1998
17. Żenkiewicz M.: Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych. WNT, Warszawa 2000

18. Rudawska A., Kuczmaszewski J.: Klejenie blach ocynkowanych. Wydawnictwa Uczelniane, Politechnika Lubelska, Lublin 2005

Dr inż. Barbara Ciecińska
Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji
Politechnika Rzeszowska
35-959 Rzeszów, al. Powstańców Warszawy 12
tel.: (0-17) 865 14 48
e-mail: bcktmio@prz.edu.pl

Badania eksperymentalne zostały wykonane przy współpracy z Ośrodkiem Naukowo-Konserwatorskim „Pracownia Konserwacji Zabytków” Sp. z o.o., 61-612 Poznań, ul. Rubież 46