

Wojciech NAPADŁEK

PRÓBY ABLACYJNEGO OCZYSZCZANIA LASEROWEGO ELEMENTÓW SILNIKA TURBINOWEGO SAMOLOTU^{*)}

STRESZCZENIE *W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań doboru parametrów technologicznych ablacyjnego oczyszczania laserowego łopatek turbin, aparatów kierujących i innych elementów silnika turbinowego samolotu. W eksperymentach laboratoryjnych stosowano różne parametry: gęstość mocy promieniowania laserowego, czas trwania impulsu, częstotliwość regulacji oraz stopień przykrycia plamki laserowej. Efekty oddziaływania promieniowania laserowego z materiałem oceniano na podstawie badań fotografii powierzchni, mikrostruktury, składu chemicznego w mikroobszarach. W badaniach wykorzystano mikroskopię optyczną stereoskopową, mikroskopię elektronową skaningową (SEM) oraz mikroanalizę rentgenowską. Uzyskano bardzo dobre efekty oczyszczania z tlenków i nawarstwień osadzonych na łopatkach turbin.*

Słowa kluczowe: *ablacyjne oczyszczanie laserowe, elementy silnika turbinowego, warstwa powierzchniowa*

^{*)} *Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2007–2010 jako projekt badawczy zamawiany PBZ-MNiSW-01/I/2007.*

dr inż. Wojciech NAPADŁEK
e-mail: wnapadlek@wat.edu.pl

Wydział Mechaniczny
Wojskowa Akademia Techniczna

1. WSTĘP

Problem czystości powierzchni jest bardzo istotny, zwłaszcza we współczesnym przemyśle półprzewodników i obwodów o najwyższym stopniu integracji, w przemyśle optycznym, a także w przemysłowych procesach technologicznych kształtujących technologiczną warstwę wierzchnią w różnych elementach (np. elektroniki, telekomunikacji, medycyny, galwanotechniki, techniki motoryzacyjnej, lotnictwie i innych). Właściwe przygotowanie technologiczne powierzchni różnych materiałów (metalowych, kompozytowych, ceramicznych itp.), a szczególnie w zakresie ich czystości, ma decydujący wpływ na uzyskanie wymaganej przyczepności wytwarzanych powłok (np. galwanicznych, metalizowanych, napyłanych, wytwarzanych technikami PVD itp.). Wśród stosowanych metod wiele z nich powoduje uboczne skutki ekologiczne (metody chemiczne, piaskowanie itp.) powodując zanieczyszczenie i skażenie środowiska. Na szczęście opracowano szereg nowoczesnych metod i technologii, wykorzystujących w procesie czyszczenia, np. wiązkę elektronów czy promieniowanie laserowe (ultrafioletowe, widzialne i podczerwone), które umożliwiają czyszczenie nawet najdelikatniejszych powierzchni różnego rodzaju z ogromną precyzją i przywracają je do stanu pierwotnego, a nawet idealnego, bez uszkodzeń [1-12].

W trakcie prowadzonych od lat siedemdziesiątych badań oddziaływania promieniowania laserowego z materią zaobserwowano zjawisko zwane dzisiaj ablacją laserową [1-4]. Tradycyjne metody czyszczenia, wykorzystujące np. wodę pod wysokim ciśnieniem z dodatkiem różnego rodzaju ścierniw czy kompresy chemiczne ze szczotkowaniem, usuwają nawarstwienia w sposób mechaniczny. Konkurencyjnymi metodami stosowanymi często w procesach produkcyjnych jest usuwanie zanieczyszczeń metodami chemicznymi (np. wytrawianie) oraz za pomocą ultradźwięków. W celu oczyszczenia z dużą precyzją niewielkich powierzchni zabytkowych przedmiotów, elementów elektroniki, elementów maszyn wykonanych z różnych materiałów konstrukcyjnych, wykorzystanie promieniowania laserowego staje się niezastąpione, a w niektórych przypadkach jedynie skuteczne [6-12].

2. IDEA LASEROWEGO OCZYSZCZANIE MATERII

W procesie odrywania cząstek za pomocą strumienia fotonów, tzw. fotoodrywania, brane są pod uwagę trzy zasadnicze siły, które powodują

„przyczepianie” cząsteczki 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 [1-12].

W wyniku intensywnej absorpcji promieniowania laserowego w warstwie przypowierzchniowej (tlenki, korozja, patyna, tłuszcze, oleje, farby lakiery i inne składniki organiczne i nieorganiczne) 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 eksplozywnego 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 [1-12].

3. WYBRANE WYNIKI BADAŃ

3.1. Cel i metodyka badań

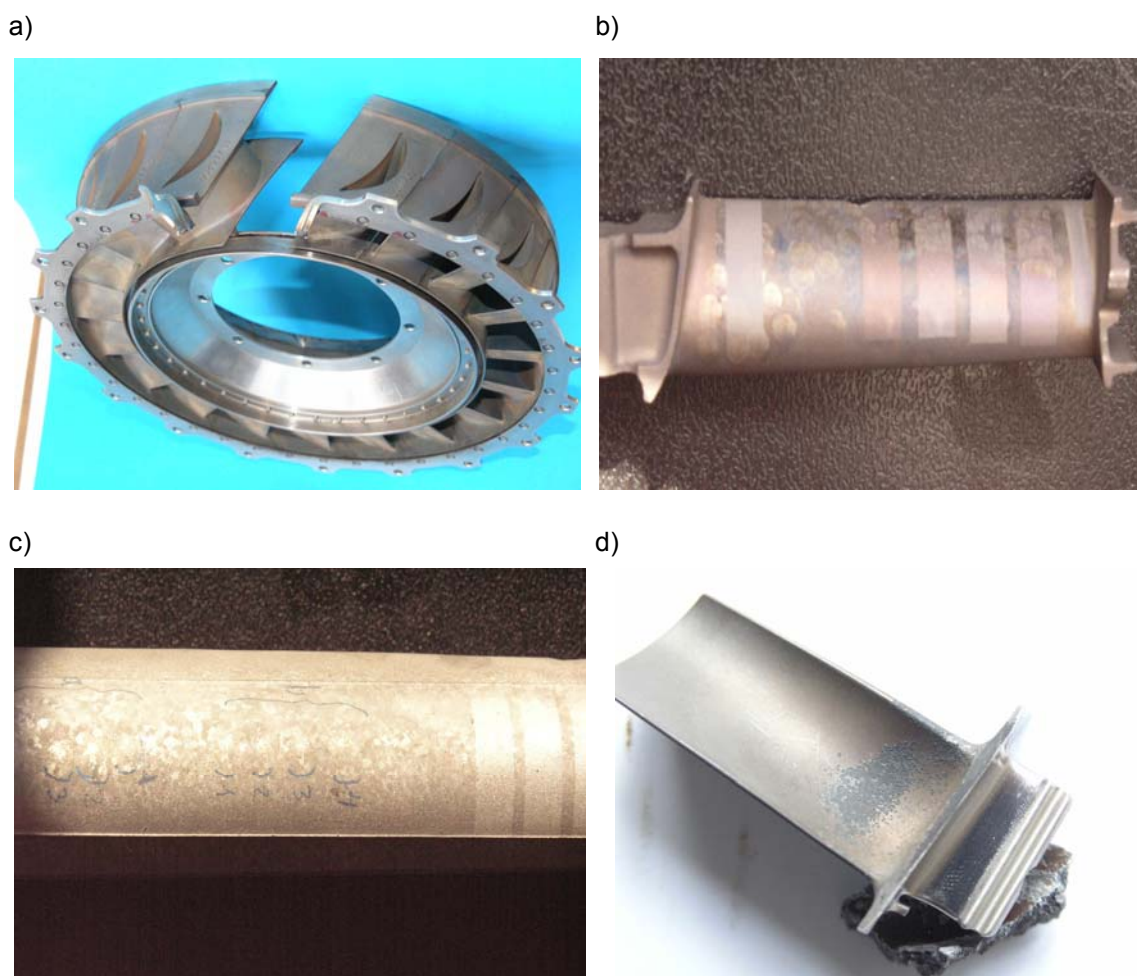
Głównym celem przeprowadzonych badań było określenie przydatności nowoczesnej technologii oczyszczania laserowego (metoda bezstykowa wykorzystująca głównie ablację laserową) wybranych stopów niklu (m.in. ŻS6K-WI – oznaczenie branżowe), stosowanych w produkcji odpowiedzialnych elementów napędów lotniczych (m.in. łopatek turbin, aparatów kierujących), dla uzyskania metalicznie czystej, wolnej od zabrudzeń i wtrąceń warstwy powierzchniowej. Zastosowana metoda powinna usunąć wszelkiego rodzaju zanieczyszczenia, jak: zabrudzenia organiczne i nieorganiczne, wtrącenia niemetaliczne, tlenki na powierzchni elementów silników lotniczych w celu przygotowania ich powierzchni do nanoszenia technologicznych powłok ochronnych (TBC_S) natryskanych cieplnie, wytwarzanych metodą CVD lub innymi. Efektem końcowym planowanych prac będzie zwiększenie czystości metalicznej i rozwinięcie warstw powierzchniowych, co w istotny sposób wpływa na skuteczność adhezji nowoczesnych powłok technologicznych. Unikatowe własności promieniowania laserowego powodują, że obróbka laserowa może być ograniczona do dokładnie wybranego obszaru, bez konieczności maskowania (ochrona obszarów przed napromienieniem). 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 (CO₂, 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.

W celu oczyszczenia warstwy powierzchniowej żarowytrzymałego stopu na bazie niklu ŻS6K-WI z zanieczyszczeń poodlewniczych, tlenków oraz osadów organicznych i nieorganicznych, przeprowadzono laboratoryjne badania porównawcze usuwania ww. osadów, stosując technikę oczyszczania warstwy powierzchniowej przy wykorzystaniu lasera impulsowego Nd:YAG.

W badaniach stosowano długość fali promieniowania $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$. W czasie eksperymentów stosowano różne gęstości energii, tj. od $0,5 - 10 \text{ J/cm}^2$. Czas ekspozycji impulsu wynosił ok. 10 ns.

W badaniach wykorzystano również laser Nd: YAG iterbowy włóknowy nowej generacji. W eksperymentach stosowano pojedyncze impulsy laserowe oraz oczyszczanie wieloimpulsowe z różnym stopniem przykrycia kolejnych impulsów. Efekt taki uzyskano dzięki zautomatyzowanemu stanowisku (stół $x - y$ współpracujący z laserem) oraz na stanowisku laserowym z głowicą Galvo.

Do obserwacji oczyszczonej warstwy wierzchniej zastosowano nowoczesny zestaw mikroskopii stereoskopowej z możliwością cyfrowej rejestracji zapisu. Wykorzystano również skaningową mikroskopię elektronową (SEM) oraz mikroanalizę rentgenowską składu chemicznego warstwy powierzchniowej przed i po oczyszczeniu laserowym. Na rysunku 1 przedstawiono wybrane elementy silnika turbinowego po oczyszczaniu laserowym.



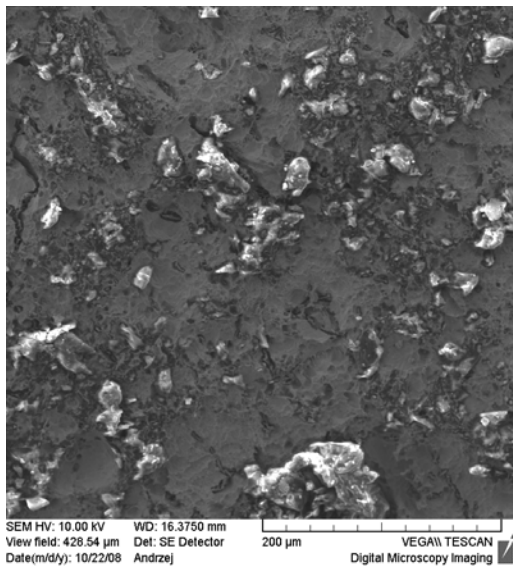
Rys. 1. Elementy silnika turbinowego samolotu będące obiektami badań:

a) turbina z łopatkami przed oczyszczeniem; b, c) łopatki turbiny oczyszczone laserowo w warunkach laboratoryjnych, d) łopatka turbiny z powłoką aluminioków po eksploatacji

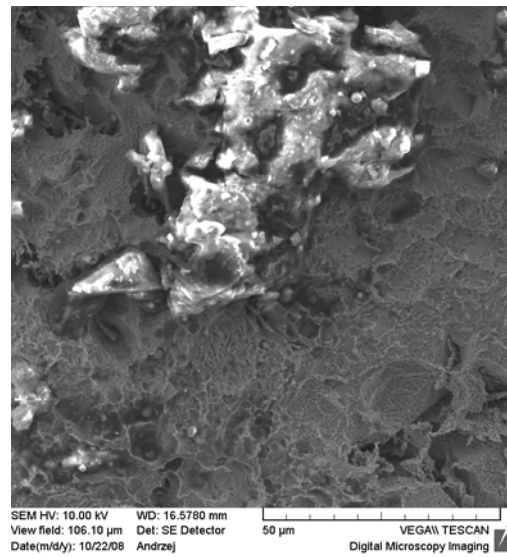
3.2. Wyniki badań

Topografię zanieczyszczoną warstwy powierzchniowej łopatkę odlanej z żarowytrzymałego stopu na bazie niklu ŻS6K-WI przedstawiono na rysunku 2. Efekty oczyszczania laserowego ww. warstwy przedstawiono na rysunkach 3–5. W wyniku ablacji laserowej usunięto zanieczyszczenia i osady powstałe w procesie odlewania oraz w wyniku oddziaływania czynnika ludzkiego (rys. 1–6).

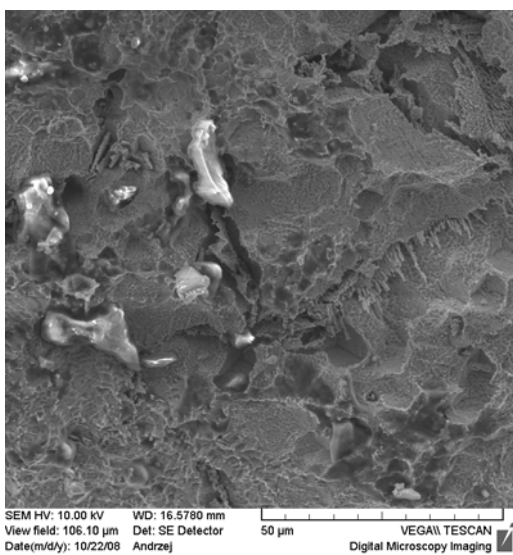
a)



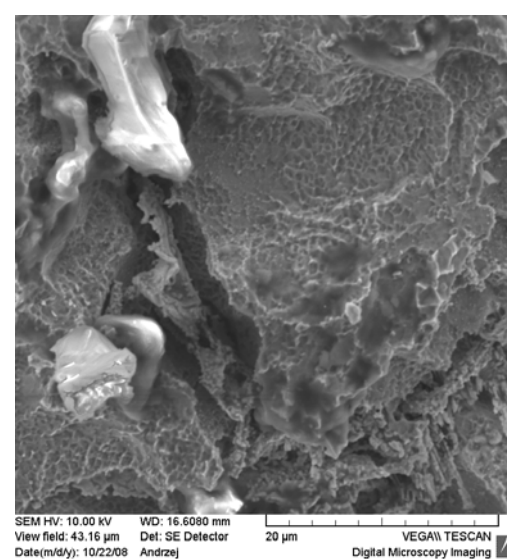
b)



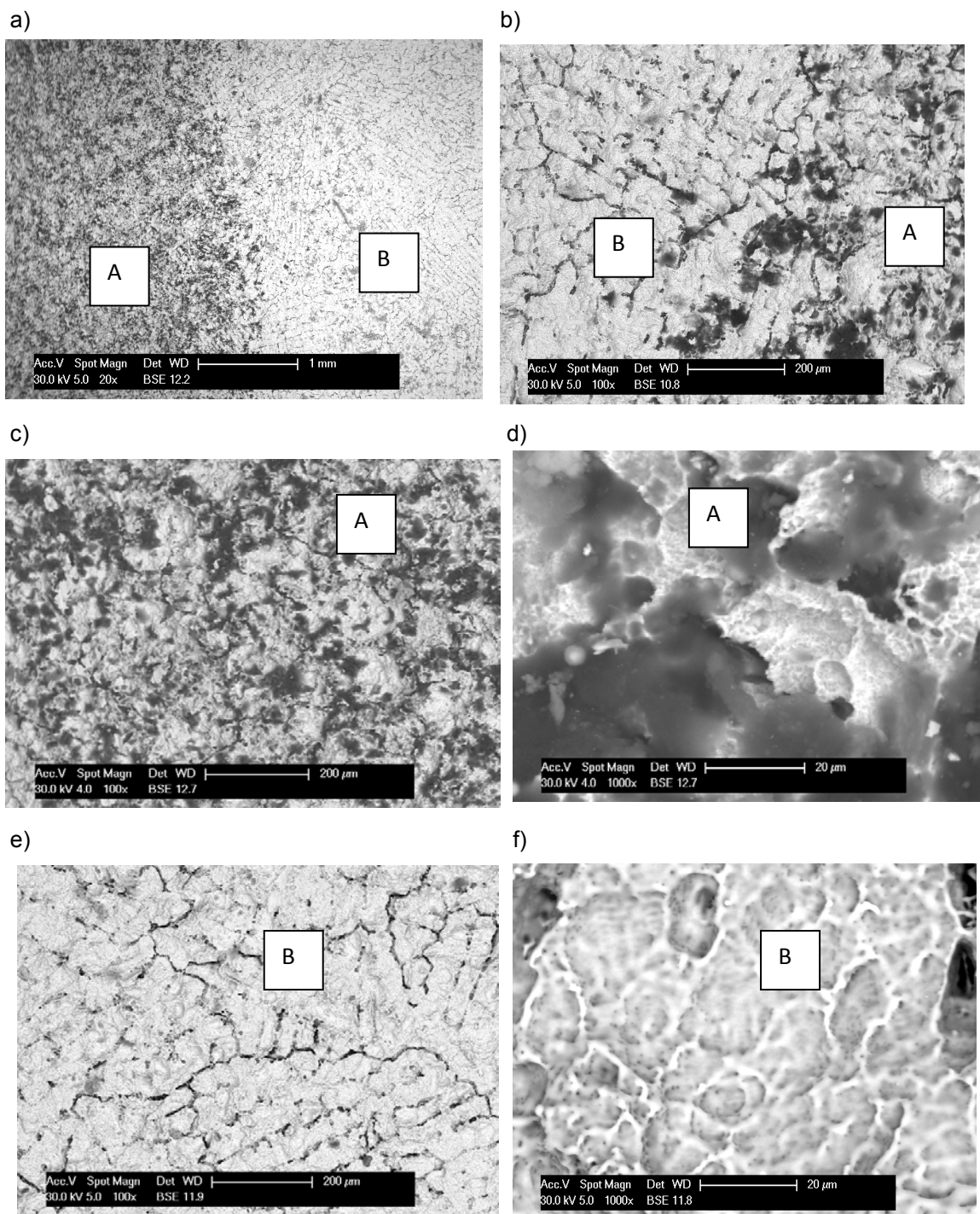
c)



d)



Rys. 2. Charakterystyczna topografia warstwy powierzchniowej żarowytrzymałego stopu niklu ŻS6K-WI stosowanego w produkcji łopatek turbin silników samolotów – materiał po odlaniu



Rys. 3. Charakterystyczne strefy warstwy powierzchniowej żarowytrzymałego stopu niklu ŻS6K-W1 po odlaniu i ablacyjnym oczyszczaniu laserowym:

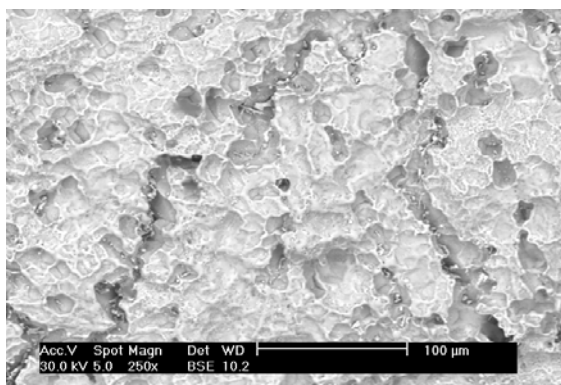
A – strefa przed oczyszczeniem, B – strefa po oczyszczeniu

W artykule przedstawiono wybrane, charakterystyczne wyniki badań. Zgodnie z przyjętą metodyką badań wykonano kilkadziesiąt prób technologicznych oczyszczania ww. materiału dostarczonego w postaci odlanego ele-

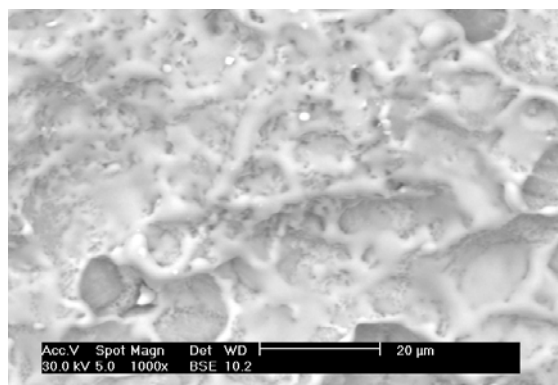
mentu, tj. łopatki turbiny. Stosując różne gęstości energii i stopień przykrycia osiągnięto bardzo dobre efekty technologiczne. Poprawność procesu oceniano zgodnie z metodyką, głównie przy użyciu skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) oraz mikroanalizy rentgenowskiej. W wyniku oczyszczania laserowego, dzięki zjawisku ablacji laserowej zostały usunięte tlenki oraz zanieczyszczenia typu organicznego i nieorganicznego, powstałe w wyniku procesu odlewania oraz oddziaływania czynnika ludzkiego (m.in. związki C, Na, Si, Cl, K, Ca, Fe) – rysunek 6.

Stosując odpowiednią gęstość energii promieniowania laserowego (do 1 J/cm^2) nie stwierdzono ubocznych skutków nadtopień i rozwijania powierzchni. Przy większych gęstościach energii efekt ten wyraźnie narastał (rys. 4b). Powstające nadtopienia mogą mieć prawdopodobnie negatywny wpływ na odporność zmęczeniową materiału łopatki w podwyższonych temperaturach.

a)



b)

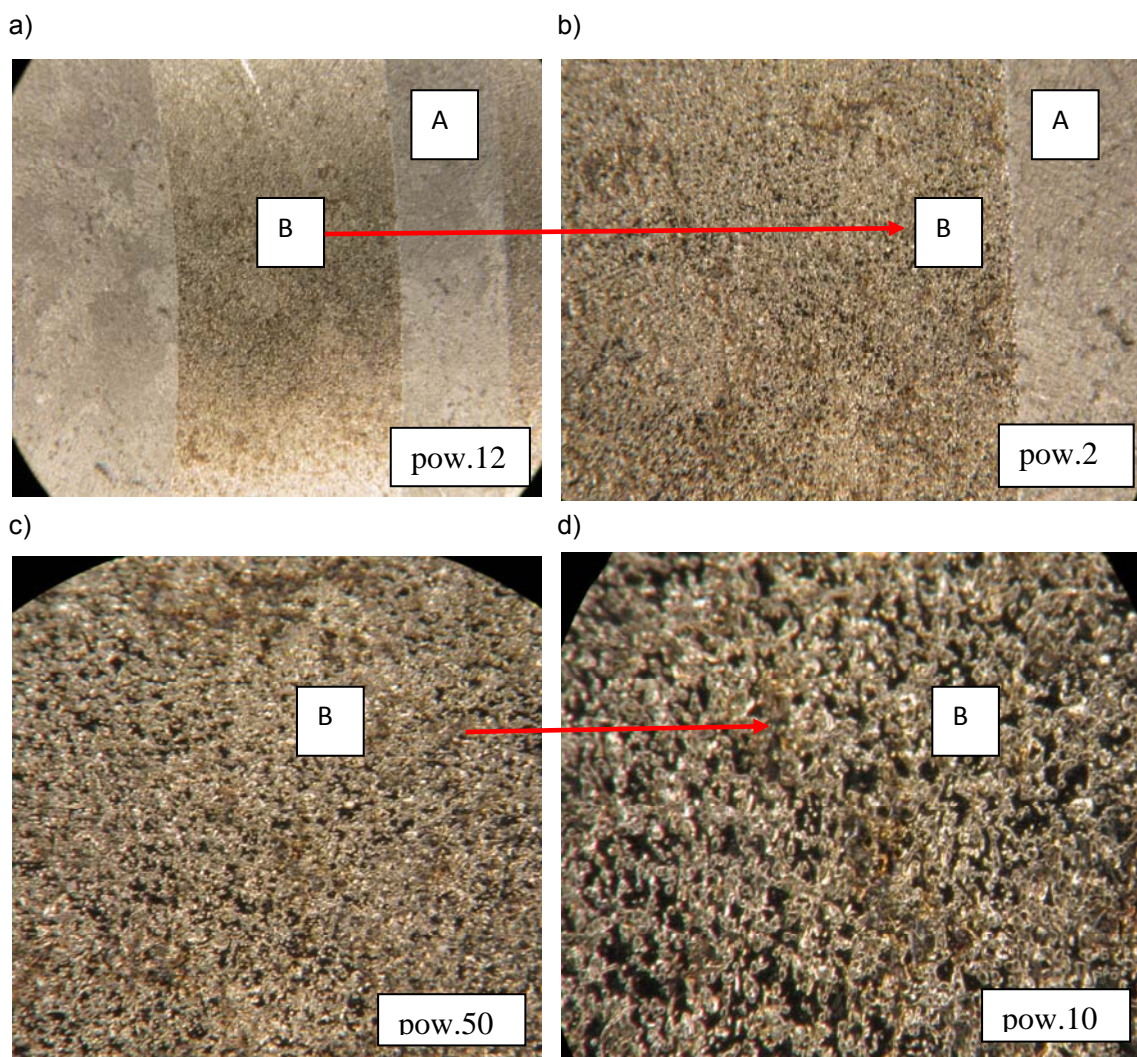


Rys. 4. Charakterystyczne strefy warstwy powierzchniowej żarowytrzymałego stopu niklu ŻS6K-WI po odlaniu i ablacyjnym oczyszczaniu laserowym – widoczne mikronadtopienia

Efekty oczyszczania warstwy powierzchniowej łopatek turbiny silnika odrzutowego przy użyciu impulsowego promieniowania lasera iterbowego włóknowego Nd: YAG o mocy 30 W z głowicą Galvo, przedstawiono na rysunku 5. Stosując różne gęstości mocy oraz różny stopień przykrycia następujących po sobie impulsów laserowych, uzyskano pozytywny efekt technologiczny, tj. usunięto zanieczyszczenia występujące w warstwie powierzchniowej nie powodując znacznych nadtopień materiału łopatki.

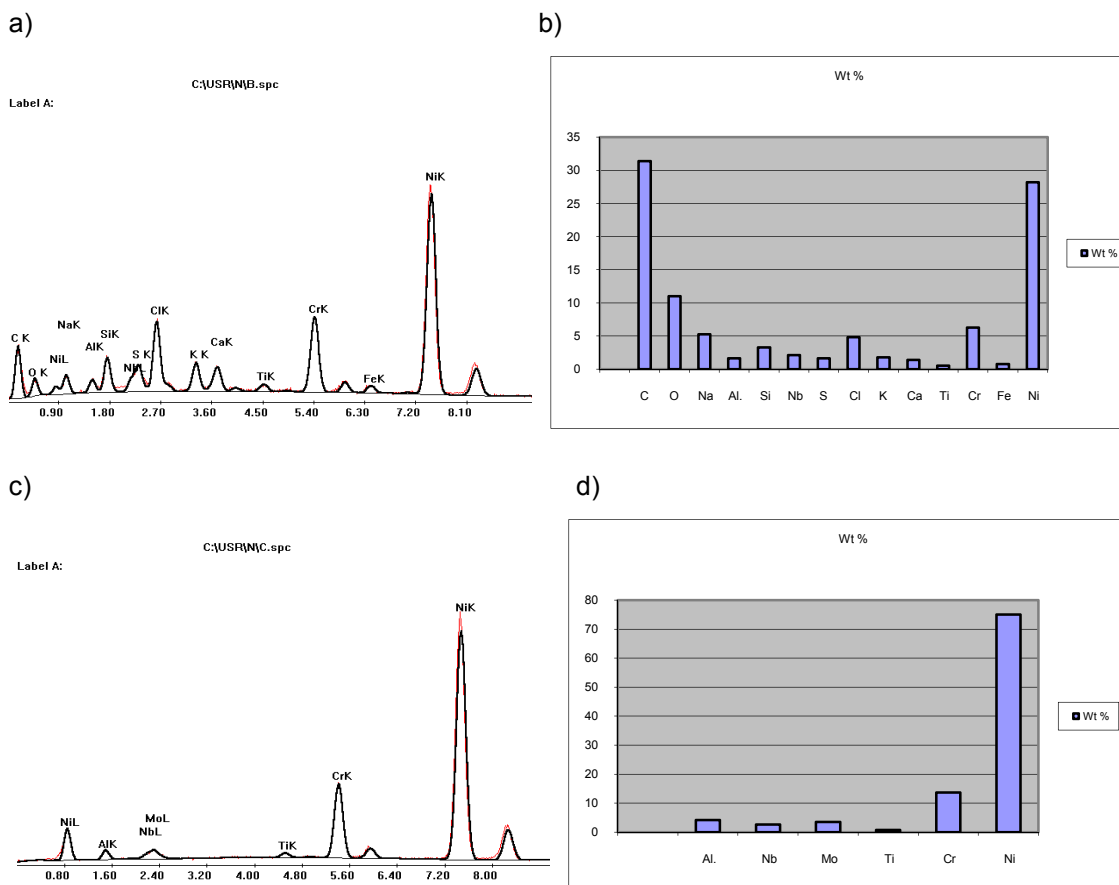
Przy dużych gęstościach mocy wystąpiły niewielkie nadtopienia warstwy powierzchniowej wynikające z efektu termicznego oddziałującej plazmy laserowej. Aby wyeliminować ten uboczny efekt, należy podjąć próby oczyszczania

warstwy wierzchniej łopatek, np. przy mniejszej gęstości mocy, zastosować mniejsze długości promieniowania (np. 532 nm, 355 nm) i/lub krótsze czasy ekspozycji (np. pikosekundowe). Na podstawie literatury oraz własnych doświadczeń autorskich należy mieć również nadzieję, że zastosowanie promieniowania lasera CO₂ TEA może być najlepszym rozwiązaniem technologicznym i nie spowoduje nadtopień warstwy powierzchniowej oczyszczanego stopu na bazie niklu ŻS6K-WI.



Rys. 5. Łopátka turbiny silnika odrzutowego wykonana (odlana) ze stopu na bazie niklu ŻS6K-WI oczyszczona laserowo:

A – powierzchnia nieoczyszczona; B – powierzchnia oczyszczona impulsowym promieniowaniem lasera Nd: YAG przy gęstości mocy $q = 1,53 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$ i prędkości skanowania $v = 5 \text{ m/s}$



Rys. 6. Wyniki badań składu chemicznego w charakterystycznych mikroobszarach warstwy powierzchniowej stopu niklu ŻS6K-WI: a, b) – w stanie po odlaniu; c, d) - w stanie po odlaniu i oczyszczeniu laserowym

3. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wstępne ablacyjnego oczyszczania laserowego odlanych łopatek turbiny silnika lotniczego wykonanych z żarowytrzymałego stopu na bazie niklu ŻS6K-WI, potwierdziły skuteczność tej metody. Warstwa powierzchniowa tego stopu zawierała szereg zanieczyszczeń typu organicznego i nieorganicznego, wynikających z samego procesu odlewania, jak również z efektów oddziaływania czynnika ludzkiego.

W wyniku selektywnego oczyszczania laserowego, stosując różne parametry obróbki (gęstości energii, stopień przykrycia) uzyskano zarówno bardzo dobry efekt czystości powierzchniowej, pozwalający na wytwarzanie powłok i barier ochronnych (np. aluminidkowych, TBC_S itp.), jak również stwierdzono pewne zagrożenia wynikające z powstających nadtopień warstwy powierzch-

niowej. Nadtopienia te wpływają na rozwinięcie powierzchni, co znacznie poprawia adhezję mechaniczną, np. powłok barierowych, ale może również wpłynąć negatywnie na wytrzymałość zmęczeniową łopatek turbin pracujących w warunkach wysokich obciążeń cieplno – mechanicznych. 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 oczyszczania laserowego, dzięki zjawisku ablacji laserowej zostały usunięte tlenki oraz zanieczyszczenia typu organicznego i nieorganicznego powstałe w wyniku procesu odlewania oraz oddziaływania czynnika ludzkiego (m.in. związki C, Na, Si, Cl, K, Ca, Fe). Stosując odpowiednią gęstość energii promieniowania laserowego (do kilku J/cm^2) nie stwierdzono ubocznych skutków nadtopień i rozwijania powierzchni. Przy większych gęstościach energii efekt ten wyraźnie narastał. Aby wyeliminować ten efekt należy podjąć próby oczyszczania materiałów przy mniejszej gęstości mocy, zastosować mniejsze długości promieniowania (np. 532 nm, 355 nm) oraz krótsze czasy ekspozycji (np. pikosekundowe). Na podstawie literatury oraz własnych doświadczeń należy mieć nadzieję, że zastosowanie promieniowania lasera CO₂ TEA może być najlepszym rozwiązaniem technologicznym i nie spowoduje nadtopień warstwy powierzchniowej oczyszczanych łopatek turbiny i innych elementów silnika samolotu odrzutowego odlanych z żaroodpornego stopu na bazie niklu ŻS6K-WI.

LITERATURA

1. Schawlow A.L.: Lasers. Science, Vol. 149, 13-22, 1965.
2. Анисимов С.И, Имас Я.А. Романов Г.С, Хоъыко Ю.В.: Действие излучения ъолшой мощности на мееталлы. М Наука, Москва, 1970.
3. Anisimov S.I, Luk'yanchuk B.S.: Selected problems of laser ablation theory. Uspekhi Fizičeskich Nauk, 172, No.3 (2002), 301-333.
4. Asmus J.F.: Interdisciplinary Science Review, Vol.12 (No.2), 171-179, 1987.
5. Chłodziński J., Dubik A., Kaliski S., Marczak J., Niedzielski W., Owsik J.: Picosecond Diagnostics of Rapidly Changing Process, Bulletin De L'Academie Polonaise Des Sciences – Seri des Sciences Techniques, Vol. XXV, No. 8, 101, 1977.
6. Marczak J.: Odnawianie dzieł sztuki za pomocą promieniowania laserowego, Przegląd Mechaniczny, z. 15-16/97, s. 37-40.
7. Marczak J.: Analiza i usuwanie nawarstwień obcych z różnych materiałów metodą ablacji laserowej. 2004.
8. Marczak J., Napadłek W., Sarzyński A.: Modyfikacja właściwości warstwy wierzchniej aluminium za pomocą laserowej fali uderzeniowej. Inżynieria Materiałowa Nr 5(147), 622-624, Katowice, 2005.

9. Burakowski T., Napadłek W., Marczak J.: Ablacyjna mikroobróbka laserowa w areologii. Inżynieria Materiałowa Nr 5 (153), rok XXVII, 882-889, wrzesień – październik 2006.
10. Napadłek W., Sarzyński A., Marczak J.: Analiza procesów zachodzących podczas ablacji laserowej na stopach aluminium. Przegląd Spawalnictwa Nr 5-6, 64-67, 2006.
11. Burakowski T., Napadłek W., Marczak J.: Ablative laser cleaning in areology – up-to-date condition and prospect. Inżynieria Materiałowa Nr 3-4 (157-158), Rok XXVIII, 618-621, maj – sierpień 2007.
12. Burakowski T., Napadłek W., Marczak J.: Ablative laser cleaning of constructional materials and machine elements – selected examples. Inżynieria Materiałowa Nr 3-4 (157-158), Rok XXVIII, 622-626, maj – sierpień 2007.

Rękopis dostarczono dnia 04.05.2010 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Maciej Rafałowski

THE EFFORTS OF LASER ABLATIONAL CLEANING OF JET AIRPLANE TURBIN ENGINE ELEMENTS

Wojciech NAPADŁEK

ABSTRACT *In the article presents chosen results of selection best technological parameters of ablational of laser cleaning turbine blades and turbin engine elements are presented in this article. Various parameters: laser radiation power density, impulse duration, the frequency control and the laser spot lap stage were applied in laboratory experiments. Laser radiation influence effects were estimated on the surface photo, microstructure, chemical composition in microzones investigation basis. The stereoscopic microscopy, electron scanning microscopy (SEM) and the X-ray analysis were used in investigations. Very good cleaning effects from oxides, accumulations of turbine blades.*