

Wojciech NAPADŁEK¹

ANALIZA MOŻLIWOŚCI OCZYSZCZANIA LASEROWEGO ELEMENTÓW NADWOZI SAMONOŚNYCH Z KOROZJI POWIERZCHNIOWEJ

Przedstawiono wybrane, wstępne wyniki ablacyjnego oczyszczania laserowego elementów nadwozi samonośnych pojazdów samochodowych, wykonanych ze stopów Fe - C. W warunkach laboratoryjnych WAT przeprowadzono dobór parametrów usuwania nawarstwień tlenkowych i innych na poszyciu nadwozi samonośnych samochodowych. Stosując różne gęstości mocy oraz różny sposób przykrycia laserowego, dobrano grupę najlepszych parametrów przy których dokonano selektywnego oczyszczania korozji powierzchniowej i innych nawarstwień. Analizę przydatności tej technologii przeprowadzono w oparciu o badania topografii powierzchni oraz analizę mikrostruktury i składu chemicznego w mikroobszarach. Proponowana technologia ma duże szanse wdrożenia w najbliższej przyszłości w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym.

THE ANALYSIS OF THE LASER CLEANING POSSIBILITIES OF MONOCOQUE ELEMENTS FROM SUPERFICIAL CORROSION

Preliminary chosen results of the laser ablation cleaning of vehicle monocoques elements, made from Fe - C alloys are presented. The parameters selection of oxides and other accumulations removing from monocoques skin was carried out in laboratory conditions in WAT. Applying the various density power and the laser covering mode, section of the best parameters was chosen, near which the selective cleaning of superficial corrosion and other accumulations was carried out. The analysis of this technology usefulness was conducted in the support of the surface topography investigations, the microstructure and chemical composition in microfields analysis. The proposed technology has large chances of motor and air industry implementation in the the near future.

1. WSTĘP

We współczesnym świecie czysta powierzchnia materiału ma bardzo istotne znaczenie, zwłaszcza w procesach technologicznych kształtujących technologiczną warstwę wierzchnią w różnych elementach (np. galwanotechniki, techniki motoryzacyjnej, lotnictwie i innych). Aby otrzymać wymaganą przyczepność nakładanych powłok (np. powłoka lakierowa) niezbędne jest bardzo dokładne przygotowanie powierzchni materiału.

¹ Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, 00-908 Warszawa, ul. Gen. S. Kaliskiego 2.
Tel. (0-22) 683-73-57, e-mail: wnapadlek@wat.edu.pl

Proces czyszczenia może być przeprowadzony różnymi metodami zapewniającymi odpowiednią wydajność procesu i czystość powierzchni. Mechaniczne lub chemiczne techniki oczyszczania, są bardzo trudne w kontrolowaniu a wiele z nich powoduje uboczne skutki ekologiczne (metody chemiczne, piaskowanie itp.), powodują zanieczyszczenia lub skażenie środowiska. Aby uzyskać pełną kontrolę procesu usuwania nawarstwień, w badaniach nad oczyszczaniem powierzchni zostało wykorzystane zjawisko ablacji laserowej. Jest to usuwanie warstw wierzchnich materiałów o kontrolowanej grubości, w wyniku absorpcji impulsowego promieniowania laserowego, szybkiego nagrzania i odparowania warstwy wierzchniej [1 – 11].

W celu oczyszczenia z dużą precyzją elementów maszyn wykonanych z różnych materiałów konstrukcyjnych, wykorzystanie promieniowania laserowego może okazać się bardzo skuteczne, efektywne, pozwalające zaoszczędzić czas realizacji procesu, np. naprawy elementów maszyn, w tym nadwozi samonośnych samochodów osobowych itp.

2. CEL PRACY

Głównym celem pracy była analiza możliwości zastosowania ablacyjnego oczyszczania laserowego w procesach technologicznych naprawy samochodów w zakresie usuwania korozji oraz przygotowania warstwy powierzchniowej elementów nadwozi samonośnych i ram do nakładania powłok ochronno – dekoracyjnych.

W ramach badań laboratoryjnych przeprowadzono ablacyjne oczyszczanie laserowe na próbkach blach wykonanych ze stopów Fe – C, pobranych ze skorodowanych elementów konstrukcyjnych nadwozi samonośnych samochodów.

Dotychczasowe badania wykazały, że stosując oczyszczanie laserowe można:

- usuwać różnorodne powłoki oraz poszczególne warstwy tych powłok z powierzchni materiałów za pomocą ablacji laserowej,
- usuwać warstwy nugarów, tlenków, olejów, smarów, korozji oraz innych zanieczyszczeń z elementów nadwozi samonośnych,
- wykonywać proces oczyszczania bezinwazyjnego bez lub z minimalnym wpływem na stan warstwy powierzchniowej oczyszczanego materiału/elementu maszyny,
- usuwać nawarstwienia z miejsc trudnodostępnych.

3. METODY OCZYSZCZANIA

3.1 Możliwości zastosowania oczyszczania laserowego we współczesnych procesach naprawy elementów samochodów

Proces czyszczenia może być przeprowadzony różnymi metodami zapewniającymi odpowiednią wydajność procesu i czystość powierzchni. Powierzchnie wykonane z różnych materiałów konstrukcyjnych, w tym stalowych, mogą być oczyszczane następującymi metodami [1]: ręczno – mechanicznymi, mechanicznymi, cieplnymi, chemicznymi, bezstykowymi.

Pod pojęciem zanieczyszczeń powierzchni przyjmuje się nie tylko cząstki zaadsorbowane, nawarstwienia i inne cząstki materialne, ale również warstwy powstałe w wyniku procesów obróbki cieplnej, przeróbki plastycznej, czy obróbek mechanicznych, oraz warstwy korozyjne, które oddzielają rdzeń elementu metalowego od otoczenia.

W dzisiejszych czasach konstrukcje samochodów są bardzo skomplikowane. Elementy konstrukcyjne zaprojektowane są w najmniejszych szczegółach. Bardzo duży nacisk jest wywierany na właściwości i strukturę warstwy wierzchniej materiału. Prawidłowe zaprojektowanie struktury warstwy wierzchniej pozwala na prawidłowe działanie mechanizmów pod wpływem szczególnie silnych obciążeń dynamicznych oraz narażonych na zużycie. Podczas naprawy pojazdów stosując różne sposoby czyszczenia powierzchni materiałów takie jak mechaniczne, fizyczne bądź chemiczne, można naruszyć zaprojektowaną warstwę wierzchnią poprzez zmianę składu chemicznego lub uszkodzenie mechaniczne (zmiana wymiaru, zmiana chropowatości powierzchni). Szczególny nacisk na czystość powierzchni wywierany jest podczas napraw lakierniczych. Bez starannego i dokładnego przygotowania powierzchni pod fabryczną lub renowacyjną powłoką lakierowaną nie uzyskamy wymaganej przyczepności ww. powłoki lub systemów powłok ochronno – dekoracyjnych, stosowanych m.in. w elementach nadwozi samonośnych i ram pojazdów samochodowych. Szczególnie w technologii lakierów wodorozcieńczalnych ten aspekt jest szczególnie istotny. Za przygotowanie danej powierzchni możemy uważać samo jej umycie odpowiednimi środkami, jak też wyszlifowanie, na przykład pod nałożenie masy szpachlowej. Czynności te są bardzo pracochłonne i wymagają szeregu czynności przygotowawczych. Zastosowanie czyszczenia laserowego pozwala nam w znacznym stopniu zredukować ten czas do minimum, przy jednoczesnym zachowaniu wymaganej czystości oraz chropowatości powierzchni wpływających decydująco na adhezję.

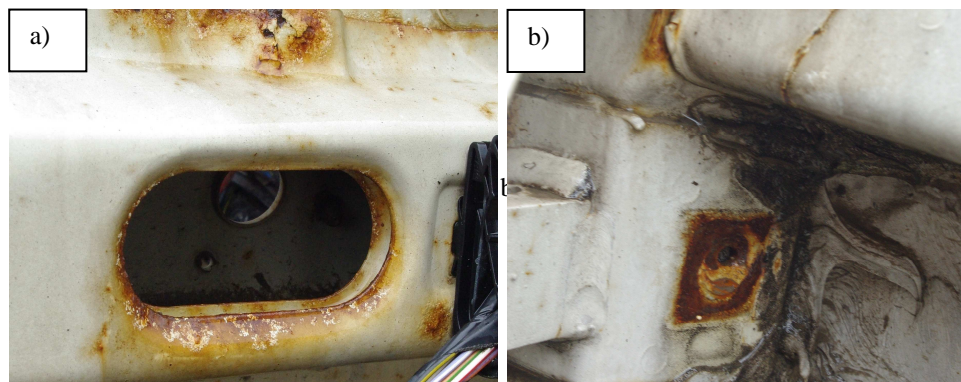
3.1.1 Ablacyjne usuwanie korozji z elementów nadwozi samonośnych samochodów

Bardzo ważnym elementem przygotowania podłoża pod powłoki jest usunięcie korozji (tlenków metali - rys. 1) w trudnodostępnych strefach. Laserowe czyszczenie pozwala usunąć zanieczyszczenia z bardzo dużą precyzją i wydajnością. Wpływ na to ma zdolność tlenków do szybkiej absorpcji promieniowania laserowego. Niektóre technologie, takie jak klejenie, wymagają bardzo dokładnego czyszczenia powierzchni oraz bardzo niskiego profilu chropowatości. Możliwość regulacji parametrów impulsów promieniowania laserowego, zwłaszcza gęstości mocy, częstotliwości repetycji, stopnia przykrycia impulsów, pozwalają użytkownikowi precyzyjnie zaprogramować strefy selektywnego oddziaływania na materię, oraz końcowy efekt modyfikacji laserowej warstwy powierzchniowej (np. czyszczenia laserowego).

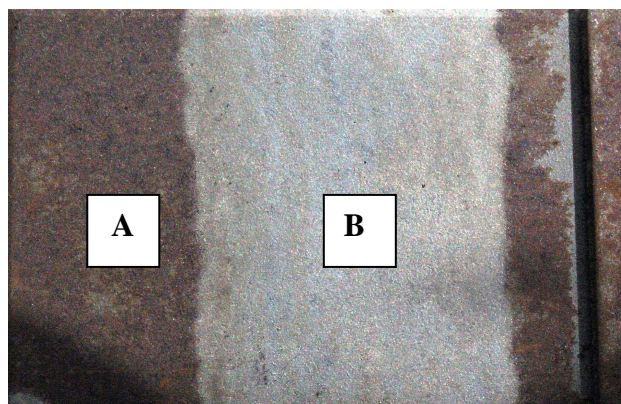
W zależności od wybranego poziomu energii, laser może usunąć same tlenki metali, inne nawarstwienia oraz dodatkowo utworzyć nowy profil chropowatości powierzchni. Dzięki temu można zaoszczędzić czas oraz koszty czyszczenia. Zwiększa to efektywność operacji i przyspiesza czynności naprawy danego elementu. Powierzchnia blachy stalowej stosowanej w konstrukcji nadwozi samonośnych, oczyszczona laserowo z korozji, cechuje się wysoką czystością. W warstwie powierzchniowej mogą wystąpić tylko lokalne strefy nadtopień (rys. 2).

W przypadku intensywnej korozji czynność czyszczenia należy powtórzyć wielokrotnie. W celu zintensyfikowania procesu czyszczenia można zastosować laser Nd:YAG. Czyszczenie warstwy powierzchniowej materiałów konstrukcyjnych lub np. skorodowanych blach nadwozi samochodów może być w pełni monitorowane, tj. umożliwi kontrolowanie podstawowych parametrów promieniowania laserowego oraz efektów czyszczenia, jak również zapewni powtarzalność procesu. Aby nie uszkodzić

podłoża można stosować małe gęstości energii lub gęstość tą można zwiększyć w celu uzyskania rozwinięcia powierzchni. Aby doprowadzić oczyszczany materiał lub element do stanu, w którym będzie się on charakteryzował bardzo dużą czystością powierzchniową, należy poddać powierzchnię materiału wielokrotnemu naświetleniom w sposób powtarzalny i kontrolowany.



Rys. 1. Charakterystyczne strefy samochodu Ford Escort, utrudniające proces usuwania korozji, metodą mechaniczną: a) skorodowane otwory w lewym przednim wzmocnieniu, b) miejsce łączenia profili w lewym przednim słupku

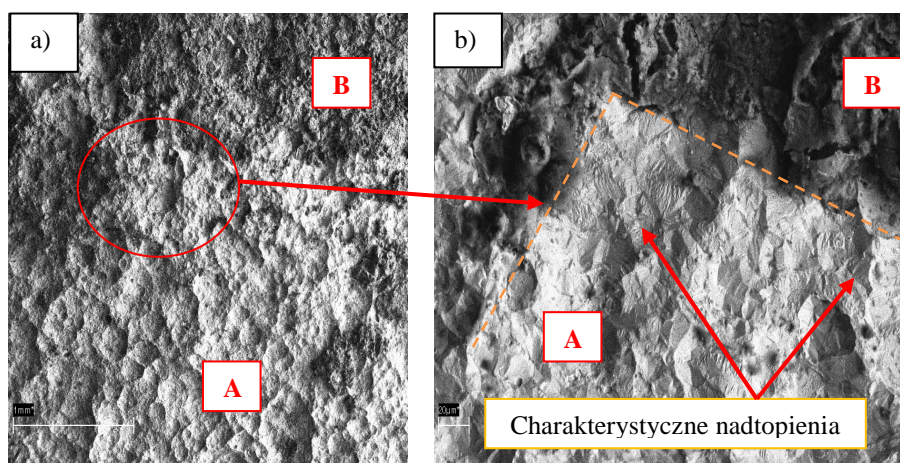


Rys.2. Powierzchnia blachy wyciętej z nadwozia samonośnego samochodu, pokryta korozją o różnej intensywności oraz lokalnie oczyszczona promieniowaniem lasera Nd: YAG o gęstości energii $q = 5 \text{ J/cm}^2$, czasie trwania impulsu ok. 10 ns, częstotliwości repetycji 10 Hz: A – powierzchnia pokryta korozją; B – powierzchnia oczyszczona laserowo

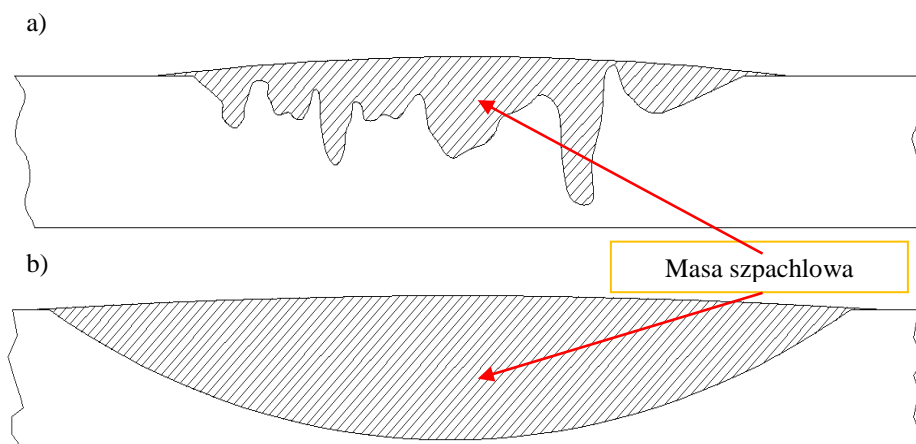
3.2 Analiza topografii powierzchni oczyszczonej z korozji wżerowej

Badając powierzchnię próbki wykonanej ze stopu Fe – C (wycinek z blachy nadwozia samochodu osobowego), oczyszczoną z intensywnej korozji wieloimpulsowym

promieniowaniem laserowym o gęstości mocy $q=3,06 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$, poddanej oddziaływaniu 20. impulsów/cm², zauważa się wyraźną różnicę pomiędzy powierzchnią z której korozja została usunięta a powierzchnią zanieczyszczoną (rys. 3a, b). W wyniku oczyszczania laserowego produkty korozji zostały prawie całkowicie usunięte. Czysta powierzchnia charakteryzuje się dużymi nierównościami, które są efektem niszczącego działania korozji (rys. 3b). Dzięki zastosowaniu oczyszczania laserowego w celu usunięcia intensywnej korozji, można skutecznie usunąć nawarstwienia tlenkowe (tlenki żelaza i inne), jednak trudno jest uniknąć efektu mikronadtopień warstwy powierzchniowej. Mimo tych ubocznych skutków oddziaływania promieniowania laserowego długości fali $\lambda = 1064 \text{ nm}$, uzyskuje się powierzchnie metalu o wysokiej czystości. W przypadku zastosowania obróbki mechanicznej, mającej na celu usunięcie korozji, została by zdjęta bardzo duża objętość materiału. Skutkiem tego typu operacji jest znaczne zmniejszenie przekroju krytycznego, a tym samym osłabienie wytrzymałości mechanicznej i zmęczeniowej materiału i konstrukcji skorodowanego elementu nadwozia samonośnego lub ramy. Jest to również związane ze znacznym zwiększeniem zużytej w naprawie masy szpachlowej, co niekorzystnie wpływa na jakość naprawy blacharsko lakierniczej (rys. 4).

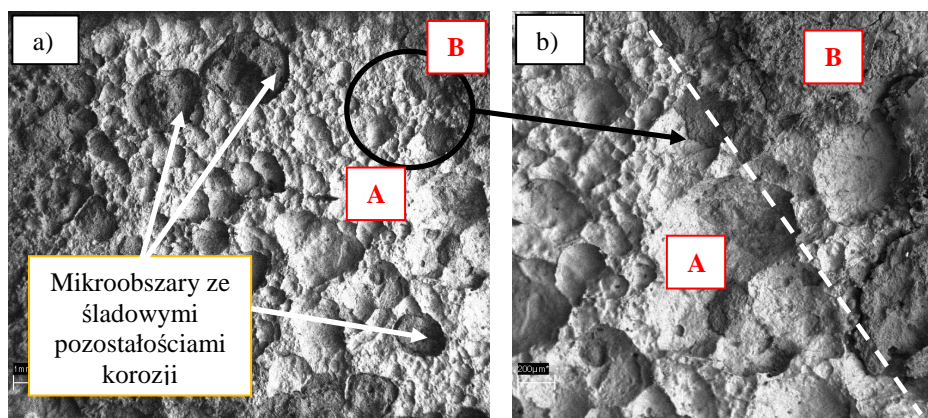


Rys. 3. Powierzchnia próbki wykonanej z blachy stalowej stosowanej w budowie nadwozi samochodów osobowych, oczyszczonej z korozji wżerowej impulsowym promieniowaniem laserowym o gęstości mocy $q=3,06 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$, stopień przykrycia 20. imp/cm²: a) granica strefy oczyszczonej i pokrytej korozją - widok ogólny, b) charakterystyczna strefa z rys. a z zaznaczoną granicą oczyszczenia, widoczne charakterystyczne nadtopienia na oczyszczonej powierzchni, powstałe w wyniku działania impulsów laserowych; A-powierzchnia oczyszczona, B - powierzchnia nieoczyszczona, pokryta korozją wżerową



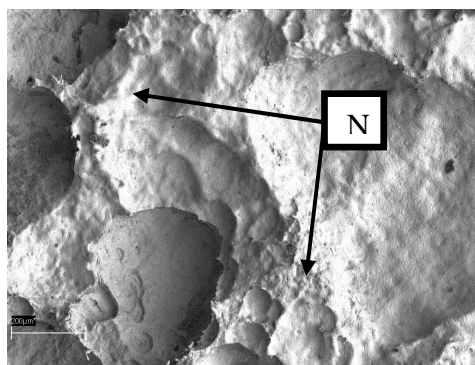
Rys.4. Schemat poglądowy obrazujący różnice w procesach oczyszczania blachy nadwozia samonośnego samochodu z korozji oraz regeneracji ubytków korozyjnych masą szpachlową: a) efekty oczyszczania materiału z korozji metodą ablacji laserowej, b) efekty oczyszczania materiału z korozji metodą mechaniczną, np. szlifowaniem

Ablacyjne oczyszczanie laserowe pozwala uzyskać bardzo wysoką czystość metaliczną materiału, zbliżoną do stanu przed naprawą oraz istotnie wpływa na zminimalizowanie ilości materiałów stosowanych do naprawy samochodów (np. szpachli itp.).



Rys. 5. Powierzchnia stalowej próbki pobranej z nadwozia samonośnego samochodu, oczyszczonej z korozji wżerowej impulsami laserowymi o gęstości mocy $q=3,06 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$ i czasie naświetlania 7 ns, 50. impulsów laserowych: a) mikroobszar oczyszczony laserowo z widocznymi nielicznymi strefami z których korozja nie została usunięta, b) mikroobszar z rys. a z wyraźną granicą oczyszczenia; A - powierzchnia oczyszczona laserowo, B - powierzchnia nieoczyszczona, pokryta korozją wżerową

Analizując powierzchnię próbki oczyszczonej z korozji wżerowej (rys. 5), przy zastosowanej gęstości mocy $q=3,06 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$, czasie ekspozycji promieniowania laserowego 7 ns, naświetlanej 50. impulsami laserowymi, można zaobserwować, że w wyniku ablacji laserowej korozja nie została całkowicie usunięta. Zmodyfikowana warstwa powierzchniowa stali naświetlana impulsowym promieniowaniem laserowym charakteryzuje się licznymi mikronadtopieniami powstałymi w wyniku wieloimpulsowego działania promieniowania o dużej gęstości (rys. 6).

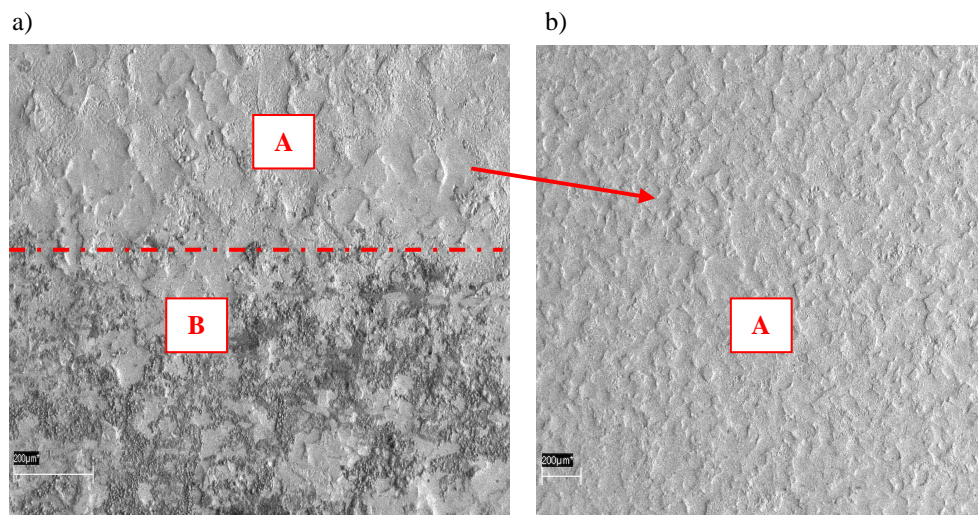


Rys.6. Charakterystyczna strefa blachy stalowej nadwozia samochodu, oczyszczona laserowo z intensywnej korozji wżerowej - widoczne mikronadtopienia powstałe w wyniku oddziaływania impulsu laserowego przy parametrach; gęstość mocy promieniowania $q=3,06 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$, czas ekspozycji 7 ns, 50. impulsów laserowych, N - charakterystyczne nadtopienia

Efekt nadtopień jest możliwy do usunięcia przy zastosowaniu wielokrotnego skanowania laserowego przy mniejszej gęstości mocy, zastosowaniu, drugiej, trzeciej ewentualnie czwartej harmonicznej ($\lambda = 532 \text{ nm}$, 255 nm, 193 nm) a także poprzez stosowanie krótkich czasów naświetlania (od kilkuset mikro- do kilku femtosekund). Należy się jednak liczyć z tym, że efektywność usuwania korozji znacznie się zmniejszy, wzrośnie także czas procesu oczyszczania.

3.3 Analiza topografii powierzchni oczyszczonej z korozji powierzchniowej

Analizując powierzchnię próbki oczyszczonej z korozji powierzchniowej impulsowym promieniowaniem laserowymi o gęstości mocy $q=2,22 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$, czasie ekspozycji ok. 10 ns, częstotliwości repetycji 10 Hz i prędkości posuwu stolika sterowanego CNC $v=200 \text{ mm/min}$ (rys. 7a), można zaobserwować wyraźną granicę oczyszczenia powierzchni, świadcząca o wysokiej efektywności procesu. Oczyszczanie z zastosowaniem ww. stolika pozwala na bardzo równomierne usunięcie zanieczyszczeń. Możliwe jest zwymiarowanie odpowiedniej powierzchni, następnie wprowadzenie współrzędnych do programu komputerowego i rozpoczęcie procesu oczyszczania. Sposób ten jest możliwy do zastosowania gdy wykonanie profilu maski kształtującej jest bardzo skomplikowane lub praktycznie nie możliwe. Za pomocą programu komputerowego możemy zaprogramować bardzo dokładne prowadzenie wiązki laserowej po powierzchni o skomplikowanych kształtach. Próbką oczyszczona laserowo z prędkością posuwu stolika $v = 200 \text{ mm/min}$ charakteryzuje się bardzo dużą czystością. Powierzchnia ma metaliczny połysk, a produkty korozji zostały całkowicie usunięte (rys. 7). Przy małej prędkości posuwu stolika powierzchni poddana jest oddziaływaniu większej ilości impulsów laserowych na jednostkę powierzchni.



Rys. 7. Powierzchnia stalowej próbki pobranej z nadwozia samonośnego samochodu, oczyszczona z korozji wżerowej impulsami laserowymi o gęstości mocy promieniowania $q=2,22 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$, czasie naświetlania 10 ns, prędkości posuwu stolika $v=200 \text{ mm/min}$, dla częstotliwości repetycji 10Hz: a) mikroobszar ze strefami przed i po oczyszczeniu laserowym, b) mikroobszar z rys. a, efektywnie oczyszczony laserowo, bez śladów korozji powierzchniowej: A- powierzchnia oczyszczona laserowo, B- powierzchnia nieoczyszczona, pokryta korozją powierzchniową

Efektom tak długiego naświetlania jest powstawanie mikronadtopień powierzchniowych, które nie wpływają znacząco właściwości mechaniczne oczyszczanej blachy i są możliwe do zaakceptowania przy nakładaniu różnego rodzaju powłok. Próbkę poddana impulsom laserowym o gęstości mocy $q=2,22 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$, czasie ekspozycji 10 ns, przemieszczana z prędkością posuwu stolika $v=500 \text{ mm/min}$ nie została dokładnie oczyszczona. Na powierzchni pozostały drobne produkty korozji. Przy większej prędkości posuwu stolika pomiarowego warstwa powierzchniowa poddawana była oddziaływaniu mniejszej ilości impulsów laserowych na jednostkę powierzchni. Efektom krótszego naświetlania są mniejsze nadtopienia, jednak produkty korozji nie zostały w pełni usunięte. Powierzchnia blachy nadwozia oczyszczanej laserowo z korozji przy ww. prędkości skanowania, wymaga powtórnego oczyszczania laserowego. Wydłuża to proces technologiczny przygotowania powierzchni przed lakierowaniem renowacyjnym, ale ma również zaletę – znacząco zmniejsza liczbę mikroobszarów z nadtopieniami powierzchniowymi. Nierówności powierzchni oczyszczonej mieszczą się w przedziale 6-12 μm , natomiast powierzchnia na której znajduje się korozja posiadała bardzo zróżnicowaną chropowatości, której nierówności mieszczą się w granicach 10-25 μm .

W strefach gdzie dokonano usunięcia nawarstwień korozyjnych przeprowadzona analiza składu chemicznego w mikroobszarach wykazała brak obecności tlenu, siarki i krzemu.

4. PODSUMOWANIE BADAŃ

Przeprowadzone badania laboratoryjne wykazały, że istnieje możliwość zastosowania ablacyjnego oczyszczania laserowego w procesach technologicznych naprawy elementów nadwozi samonośnych samochodów a w szczególności w zakresie:

- usuwania nawarstwień oraz korozji z elementów nadwozi samonośnych,
- przygotowania warstwy powierzchniowej elementów nadwozi samonośnych do nakładania powłok ochronno-dekoracyjnych.

Stosując w badaniach laboratoryjnych laser Nd: YAG ($\lambda = 1024 \text{ nm}$, $\tau = 1-25 \text{ ns}$, częstotliwość repetycji 1–10 Hz), uzyskano różne efekty intensywności usuwania korozji wżerowej i powierzchniowej z próbek wyciętych z nadwozi samonośnych samochodów osobowych. Przeprowadzone badania laboratoryjne dotyczące oczyszczania korozji wżerowej wykazały, że stosowanie małej gęstości mocy ($\leq q = 0,87 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$) powoduje bardzo powolne (wręcz znikome) usuwanie korozji. Zwiększenie gęstości mocy promieniowania do $q = 3,06 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$, oraz większych, umożliwia oczyszczenie powierzchni blachy stalowej z produktów korozji z dużą wydajnością. W strefach gdzie dokonano usunięcia nawarstwień korozyjnych przeprowadzona analiza składu chemicznego w mikroobszarach wykazała brak obecności tlenu, siarki i krzemu. Stosując ww. gęstość mocy występowały lokalne nadtopienia materiału podłoża blachy stalowej. Efekt nadtopień jest możliwy do uniknięcia przy zastosowaniu, drugiej, trzeciej lub czwartej harmonicznej ($\lambda = 532 \text{ nm}$, 255 nm , 193 nm). Przy krótkich długościach promieniowania laserowego oraz czasach ekspozycji promieniowania laserowego (piko- i femtosekundy) nie występuje efekt termiczny nadtopień, lecz tylko degradacja wiązań atomowych w sieci krystalograficznej.

Selektywne oczyszczanie laserowe pozwala na zminimalizowanie ilości materiałów stosowanych do naprawy samochodów, oraz umożliwia uzyskanie właściwości materiału zbliżone do stanu przed naprawą. Zautomatyzowanie procesu umożliwia zwiększenie precyzji, powtarzalności i efektywności oczyszczania laserowego. Stosując w badaniach laboratoryjnych stoł x – y sterowany CNC uzyskano bardzo dobre efekty technologiczne. Oczyszczając wycinki blachy pokrytej korozją powierzchnią stosowano jedną gęstość mocy $q = 2,22 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$, oraz różne prędkości skanowania wiązką laserową w zakresie 200-900 mm/min. Przy stosowaniu małych prędkości posuwu stolika $v = 200-500 \text{ mm/min}$ uzyskano dobrze oczyszczoną powierzchnię, charakteryzującą się dużym stopniem czystości i metalicznym połyskiem. Powstałe lokalne nadtopienia przy prędkościach posuwu stolika 200 – 300 mm/min nie powodują widocznej zmiany w przebiegu profilu chropowatości. Przygotowana w ten sposób warstwa powierzchniowa oczyszczonej blachy, spełnia wymogi technologiczne stawiane elementom nadwozi samonośnych w procesie naprawy lakierniczej nadwozi samonośnych. Przy większych prędkościach posuwu stolika pojawiają się nieliczne mikroobszary z korozją, która nie w pełni została usunięta. W takich przypadkach należy powtórnie przeprowadzić oczyszczanie. Mimo wydłużenia czasu oczyszczania niewątpliwą zaletą usuwania korozji z wykorzystaniem ablacyjnej mikroobróbki laserowej przy małych gęstościach mocy jest brak lokalnych mikronadtopień warstwy powierzchniowej blachy.

Proces ablacyjnego oczyszczania laserowego jest bezstykowy, precyzyjny, selektywny, wydajny. Przy odpowiednio dobranych parametrach, nie powoduje uszkodzenia podłoża blachy, jedynie usuwa zbędne nawarstwienia, w tym korozję. Technologia ta ma

szczególnie ważną zaletę, gdyż pozwala również oczyszczać, lub usuwać powłoki lakierowe w strefach trudnodostępnych (profile zamknięte, strefy połączeń elementów nadwozi i ram).

Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2007 – 2010 jako projekt badawczy rozwojowy R15-0025-04/2008.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Burakowski T., Wierchoń T., *Inżynieria powierzchni metali*, WNT, Warszawa 1995.
- [2] Schawlow A. L., *Lasers Science*, Vol. 149, s.13-22. (1965).
- [3] Anisimov S.I, Luk'yanchuk B.S., *Selected problems of laser ablation theory*, Uspekhi Fizyčeskich Institut Nauk, 172, No.3 (2002), s. 301-333.
- [4] Asmus J.F, *Interdisciplinary Science Review*, Vol.12(No.2), 1987, s. 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), s. 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), s. 64 – 67.
- [8] Burakowski T., Marczak J., Napadłek W., *Istota ablacyjnego oczyszczania laserowego materiałów*, Prace Instytutu Elektrotechniki, LIII, Zeszyt 228'06 (2006), s. 125 – 135.
- [9] Burakowski T, Napadłek W., Marczak J., *Ablacyjna mikroobróbka laserowa w areologii*, Inżynieria Materiałowa nr 5 (153), rok XXVII, wrzesień – październik, 2006, s. 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), s. 137 - 146.
- [11] Napadłek W., Sarzyński A., Marczak J. *Analiza procesów zachodzących podczas ablacji laserowej na stopach aluminium*, Przegląd Spawalnictwa nr 5–6 (2006), s. 64 – 67.