

TECHNOLOGICAL TESTS OF LASER PAD WELDING OF EXHAUST VALVES OF AIRCRAFT ENGINE

Wojciech Napadłek, Zdzisław Bogdanowicz

Military University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warsaw, Poland
tel.: +48 22 6837357, 6839447
e-mail: wnapadlek@wat.edu.pl, z.bogdanowicz@wme.wat.edu.pl

Abstract

The results of technological tests of laser pad welding of faying surface of exhaust valves of ASz62IR piston aircraft engine have been presented in the paper. In the first stage of laboratory investigations using high power diode laser type ROFIN DL 020 as well as three kind of powders EuTroLoy 16006 and 16012 as well as AMI 3901 testes of pad welding were performed. On the samples made from 4H14N14W2M austenitic valve steel were selected optimal parameters of laser pad welding for individual powders. During second stage of investigations was carried out laser pad welding by stellite powders on the real elements – exhaust valves engine. As a result of pad welding of second final run of satellite following heating by laser ray as well as melting of surface layer of first final run, heating, melting and coating melted powder in liquid state on the base of first stellite fine run, directive crystallization of melted material, phase changes occur from liquid to solid state. As a result of heating of base follow changes of microstructure as well as draw of deeper situated layers of first fine run of padding weld. After it was made pad welding of valves, it was used slow cooling, fore example in the heated quartz furnace (temperature about 250 to 350 °C) or cooling with furnace, what let on minimize of welding deformation as well as internal stresses. Pad wading layers were put to organoleptic verification, x-ray tests, laboratory investigations of microstructure and hardness. Created by laser pad welding surface layer characterized by fine-crystalline structure without weld defects, high homogeneity without precipitations and cracks as well as hardens on the surface equal 37÷44 HRC. Technological tests of laser pad welding shout recognize as positive and augur perspectives of industry implementations.

Key words: internal combustion engine valves, laser pad welding, microstructure

PRÓBY TECHNOLOGICZNE NAPAWANIA LASEROWEGO ZAWORÓW WYLOTOWYCH SILNIKA LOTNICZEGO

Streszczenie

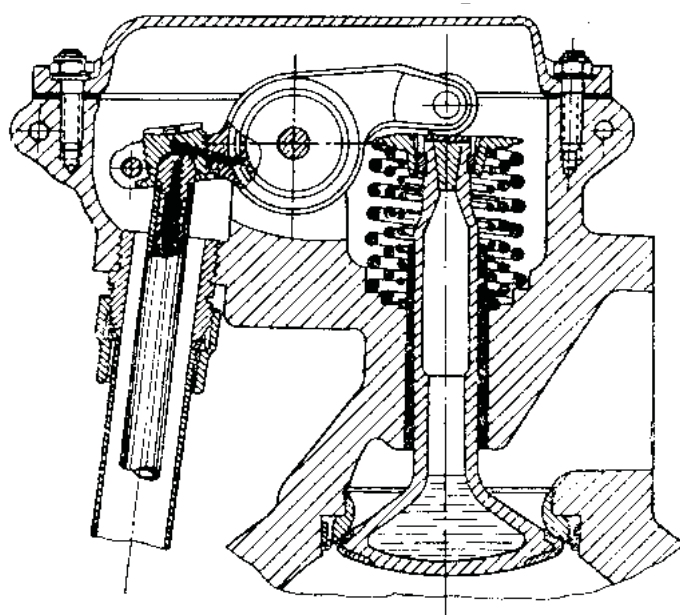
W artykule przedstawiono wyniki prób technologicznych napawania laserowego przyłgni zaworów wylotowych tłokowego silnika lotniczego ASz62IR. W pierwszym etapie badań laboratoryjnych stosując laser diodowy dużej mocy typu ROFIN DL 020 oraz trzy rodzaje proszków EuTroLoy 16006 i 16012 oraz AMI 3901 wykonano próby napawania. Na próbkach ze stali zaworowej austenitycznej 4H14N14W2M dobrano optymalne parametry napawania laserowego dla poszczególnych proszków. W drugim etapie badań przeprowadzono napawanie laserowe proszkami stellitowymi na rzeczywistych elementach – zaworach wylotowych silnika. W wyniku napawania drugiego ściegu stellitu następuje nagrzewanie promieniem lasera oraz topnienie warstwy wierzchniej pierwszego ściegu, nagrzewanie, topnienie i nakładanie roztopionego proszku w stanie ciekłym na podłoże pierwszego ściegu stellitowego, krystalizacja kierunkowa roztopionego materiału, zachodzą przemiany fazowe ze stanu ciekłego w stały. W wyniku nagrzewania podłoża następują zmiany mikrostruktury oraz odpuszczanie głębiej położonych warstw pierwszego ściegu napoiiny. Po wykonaniu napawania zaworów stosowano wolne studzenie, np. w rozgrzanym piasku kwarcowym (temp. ok. 250 – 350 °C) lub z piecem, co pozwoliło na zminimalizowanie odkształceń spawalniczych oraz naprężeń własnych. Napawane warstwy poddano weryfikacji organoleptycznej, badaniom rentgenowskim, badaniom laboratoryjnych mikrostruktury i twardości. Wytworzona poprzez napawanie laserowe warstwa wierzchnia charakteryzuje się budową drobnokrystaliczną bez wad spawalniczych, wysoką jednorodnością, bez wtrąceń i pęknięć oraz twardością na powierzchni równą 37÷44 HRC. Próby technologiczne napawania laserowego należy uznać za pozytywne i rokujące perspektywy wdrożeń przemysłowych.

Słowa kluczowe: zawory silnika spalinowego, napawanie laserowe, mikrostruktura

1. Warunki pracy zaworów i gniazd silnika lotniczego

Powierzchnia grzybków zaworów od strony komory spalania silnika lotniczego ASz62IR (rys.1) cyklicznie ulega podgrzewaniu w takt pracy silnika od spalania mieszanki paliwowej, której temperatura dochodzi do 2000 -2500°C. Ponadto podczas suwu wydechu cała powierzchnia główki zaworu i część trzpienia omywana jest produktami spalania, co powoduje, że zawór wydechowy nagrzewa się znacząco bardziej niż zawór ssący, który w odróżnieniu do zaworu wydechowego jest schładzany mieszanką paliwowo powietrzną zasysaną do cylindra w procesie suwu ssania o stosunkowo niskiej temperaturze. Odprowadzenie ciepła od grzybków zaworów możliwe jest tylko przez powierzchnię przylgni zaworu i gniazda jak również przez trzon stykający się z prowadnicą zaworową. W rezultacie intensywnego nagrzewania oraz niedostatecznego odprowadzenia ciepła robocza temperatura główki zaworu wydechowego dochodzi do 750-850°C (bez chłodzenia sodem), a zaworu ssącego 350-450°C. Pracując w tych warunkach zawór osiada na gnieździe z udarem. Częstotliwość tych uderów jest wielka, np.: przy prędkości obrotowej wału korbowego 1800 obr/min wynosi 54 000 uderów na godzinę. Zawór zatem nieprzerwanie jak gdyby podlega ciągłemu „kuciu”, a jeśli nie posiada odpowiedniej wytrzymałości to jego przylgnia odkształca się plastycznie, a trzon zaworu wydłuża się [1,2].

Zawory dolotowe opisywanego silnika lotniczego najczęściej wykonuje się ze stali martenzytycznych H9S2 a wylotowe (wydechowe) głównie ze stali austenitycznych 4H14N14W2M. W celu zwiększenia żaroodporności przylgni zaworów (szczególnie wylotowych) stosuje się stopy twarde żaroodporne, zwane stellitami. Są to materiały na bazie kobaltu, chromu, wolframu i niklu. Odznaczają się one dużą odpornością na korozję i zużycie oraz dużą twardością w podwyższonych temperaturach. W budowie silników samochodowych i lotniczych stosowane są do wzmocnienia przylgni grzybków i główek trzonek zaworów, głównie metodą napawania łukowego TIG. Napawanie przylgni grzybka zaworu wydechowego stelitem ma na celu podwyższenie odporności na oddziaływanie korozji gazowej i zmniejszenie deformacji przylgni od uderów występujących podczas osadzania na gnieździe a w konsekwencji uzyskanie wysokich właściwości użytkowych, a przez to znaczące wydłużenie czasu eksploatacji. W ostatnich operacjach technologicznych na etapie produkcji trzon zaworu wydechowego jest azotowany gazowo dla podwyższenia jego odporności na zużycie w warunkach tarcia. Napawane przylgnie zaworu poddawane są szlifowaniu.



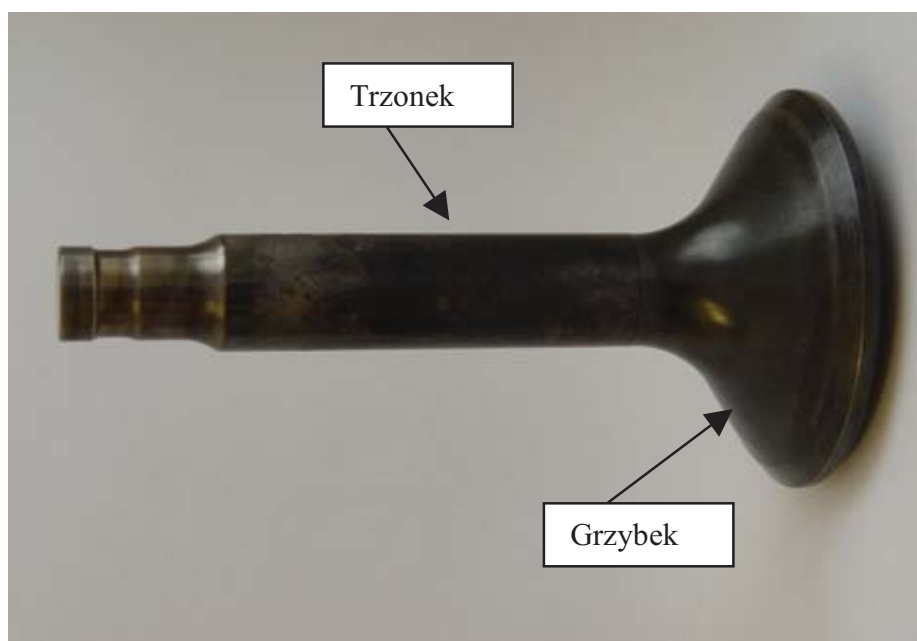
Rys. 1. Wzrost układu rozrządu silnika lotniczego ASz62IR dla zaworu wydechowego [1]
Fig. 1. Kinematic pair of timing gear system for exhaust valve of ASz62IR aircraft engine [1]

Zawór wydechowy jest najbardziej cieplnie obciążonym elementem silnika. Aby podwyższyć jego żywotność wprowadzono: chłodzenie zaworu przy pomocy metalicznego sodu, napawanie stellite, posadowienie zaworu na pływającym gnieździe.

Chłodzenia zaworu przy pomocy metalicznego sodu ma na celu zmniejszenie temperatury grzybka zaworu poprzez bardziej intensywne odprowadzenie ciepła przez jego trzon do głowicy silnika. Do tego celu zapelnia się wewnętrzną przestrzeń zaworu do 2/3 jej objętości metalicznym sodem a końcówkę trzonu zaślepia się na stałe. Cały zawór wydechowy posiada masę 600 g, w tym masa sodu jest znikoma i wynosi 36 g. Metaliczny sod posiada mały ciężar właściwy równy $0,97\text{g/cm}^3$, temperaturę topnienia $97,6^{\circ}\text{C}$ oraz wrzenia 880°C , współczynnik przewodzenia ciepła $0,32\text{ kcal/m godz }^{\circ}\text{C}$, większy niż dla stali, który wynosi $0,14$ [1].

Proces chłodzenia polega na tym, że podczas pracy silnika zawór wydechowy ulegając nagrzewaniu powoduje stopienie metalicznego sodu i przejście w stan płynny. Przemieszczająca się ciecz podczas drgających ruchów zaworów w czasie ich pracy odbiera ciepło od grzybka zaworu i przenosi do chłodniejszych ścianek trzonka, a stąd przez prowadnicę do głowicy silnika i dalej do otoczenia. Chłodzenie sodem powoduje obniżenie temperatury grzybka zaworu o $150\text{--}200^{\circ}\text{C}$.

Ogólny widok zaworu wydechowego silnika lotniczego ASz62IR po eksploatacji przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Ogólny widok zaworu wydechowego silnika lotniczego ASz62IR
Fig. 2. General view of exhaust valve of ASz62IR aircraft engine

Napawanie warstwy wierzchniej może odbywać się różnymi metodami, tj. napawanie elektryczne, gazowe, plazmowe. Do nowoczesnych technologii konstytuowania warstw stopowych zaliczamy stopowanie laserowe [3-6]. Znane koncerny samochodowe świata (np. Mercedes, General Motors, Toyota, Mazda) w ostatnim czasie podjęły produkcję zaworów wylotowych z przyłgnią napawaną laserowo. Do napawania stosuje się różne materiały tj. elektrody otulone, druty proszkowe, druty samoosłonowe i proszki. Do popularnych stopów, wykorzystywanych do napawania przyłgni zaworów jak wcześniej wspomniano, należą stopy na bazie kobaltu, które nazywane są stellite.

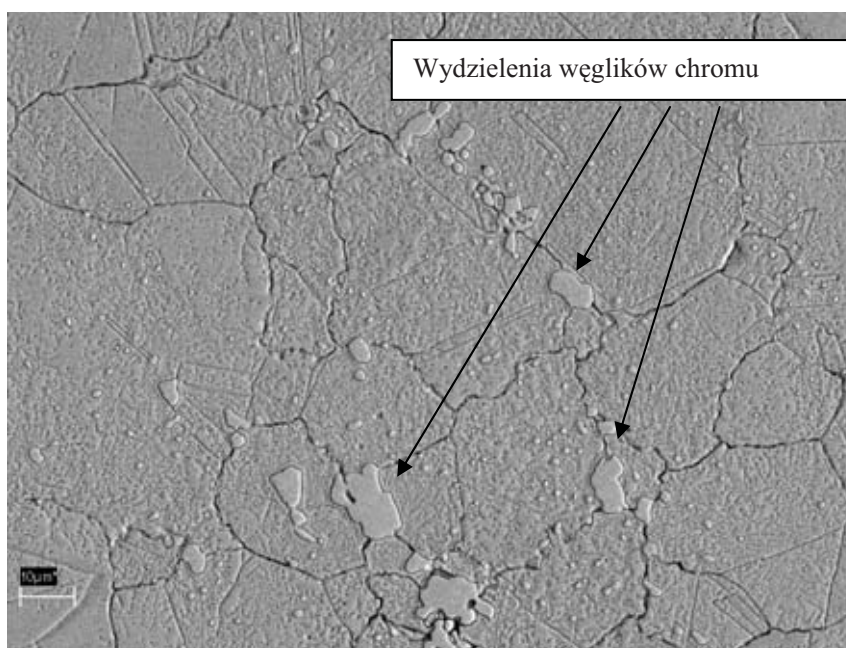
W procesie napawania laserowego wykorzystuje się energię wiązki lasera, która stapia materiał dodatkowy w postaci drutów proszkowych lub proszków oraz nadtopia podłoże tworząc w ten sposób trwałe połączenie metaliczne (metalurgiczne) [6]. W procesie napawania laserowego wykorzystuje się gazy osłonowe do zabezpieczenia ciekłego metalu przed czynnikami

zewnątrznymi jak również jako nośnik materiału dodatkowego (proszku). Często używanymi gazami osłonowymi są Ar, He, CO₂ i ich mieszanki. Do procesu napawania wykorzystuje się lasery stałe Nd:YAG lasery gazowe CO₂ oraz lasery diodowe dużej mocy np. HPDL. Wiązka lasera wytwarzana przez lasery stałe i diodowe może być doprowadzona do głowicy spawalniczej za pomocą światłowodu, a w przypadku laserów gazowych, wiązka doprowadzana jest za pomocą zwierciadeł, które muszą być intensywnie chłodzone. Na proces napawania laserowego mają wpływ następujące czynniki: moc wiązki lasera, rozkład ogniska wiązki laserowej, absorpcja promieniowania laserowego napawanych materiałów, prędkość przesuwu, rodzaj i natężenie gazu ochronnego oraz ilość podawanego proszku.

Do zalet napawania laserowego można zaliczyć ograniczony wpływ oddziaływania cieplnego wiązki lasera na przedmiot, w wyniku czego uzyskuje się małe naprężenia i odkształcenia spawalnicze. Szybkie odprowadzenie ciepła przez objętość przedmiotu powoduje powstanie bardzo drobnoziarnistej struktury napoiny o dużej czystości metalurgicznej. Dzięki możliwości sterowania procesem możemy ograniczyć udział materiału podłoża w napoinie do ok. 4%, co pozwala na uzyskanie warstwy wierzchniej o określonych właściwościach, już w pierwszej warstwie napoiny. Zastosowanie światłowodu w doprowadzaniu wiązki laserowej do głowicy daje możliwość zautomatyzowania i zrobotyzowania procesu spawalniczego. Z uwagi na dość wysoki koszt urządzeń wykorzystywanych w procesie napawania laserowego jak również wysokie wymagania jakościowe w przygotowaniu powierzchni napawanych, laserowe napawanie stosuje się dla elementów, w których uzyskana warstwa wierzchnia musi spełniać wysokie wymagania jakościowe. Dlatego metoda ta znalazła zastosowanie między innymi w przemyśle samochodowym, energetycznym i lotniczym, w którym niektóre produkowane elementy urządzeń (np. zawory silników spalinowych, łopatki turbin, elementy rurociągów) są narażone na pracę w bardzo ciężkich warunkach termicznych, chemicznych, itp. [3, 4, 6].

2. 1. Badania własne

Badany zawór wykonany jest z stali austenitycznej zawierającej pierwiastki stopowe jak: chrom i nikiel w równych częściach po około 14% wagowych oraz domieszką krzemu, wolframu i molibdenu. Resztę składu chemicznego stanowi żelazo. Skład ten potwierdzono w analizie wykonanej metodą EDS na mikroskopie skaningowym.



Rys. 3. Mikrostruktura stali zaworowej austenitycznej 4H14N14W2M stosowana w produkcji zaworów wylotowych silnika ASz62 IR

Fig. 3. Microstructure of 4H14N14W2M austenitic valve steel use in the manufacturing of exhaust valve of ASz62IR aircraft engine

Mikrostrukturę wyjściową materiału zaworu wylotowego silnika stanowią dość regularnie rozmieszczone ziarna austenitu (rys. 3).

Wykazują one zróżnicowaną wielkość (z przedziału 50 - 200 μ m) i są względnie równoosiowe. Po granicach i w objętości ziaren występują równomiernie rozmieszczone, drobne, globularne wydzielania węglików i węglikoazotków, głównie chromu.

Do napawania laserowego przyłgni zaworu wytypowano trzy rodzaje proszków stelliteowych, tj. EuTroLoy 16006 i 16012 oraz AMI 3901. Badanie mikroskopowe oraz składu chemicznego przeprowadzono przy użyciu mikroskopu skaningowego Philips XL30. W wyniku tej analizy stwierdzono, że proszek AMI 3901 jest bardziej drobnoziarnisty niż proszek 16006. Średnia wielkość ziaren proszku EuTroLoy 16006 wg obliczeń statystycznych wynosi \bar{x} =128 μ m a proszku AMI 3901 wynosi \bar{x} =46,50 μ m.

Pojedyncze ziarna proszków wykazują wady budowy - odstępstwa od kształtu kulistego. Proszek AMI 3901 wykazuje mniejszą regularność kształtów kulistych, niż proszek 16006, co spowodowane może być technologiczną trudnością wytwarzania proszku o małej ziarnistości. Mikrobudowa pojedynczych cząstek obu proszków jest dendrytyczna.

2. 2. Laserowe (napawanie) zaworów wylotowych wykonanych ze stali 4H14N14W2M

Laserowe napawanie przeprowadzono na próbkach oraz rzeczywistych zaworach wylotowych silnika przy wykorzystaniu lasera diodowego ROFIN DL 020. Przyłgni zaworów i część denka grzybka przygotowano wstępnie poprzez kształtowe podtoczenia a następnie napawano laserowo zgodnie z wymogami dokumentacji konstrukcyjnej.

Laser ROFIN DL 020 wyposażony był w głowicę z dwoma pakietami diod zasilanych z oddzielnych źródeł prądu, układ sterowania mocą wiązki laserowej oraz układ chłodzenia pakietu diod. Głowicę laserową mocowano na prowadnicy pionowej z układem pozycjonowania sterowanym numerycznie, a zawory w obrotniku na stole obróbczym o dokładności przesuwu 0,2 μ m / 100 mm. (rys.9a). Stanowisko do platerowania laserowego wyposażone było dodatkowo w układ podawania proszku do miejsca napawanego z płynnie sterowanym natężeniem podawania w zakresie 0,8 – 25 g/min.

Dane techniczne lasera diodowego dużej mocy Rofin DL 020:

- maksymalna moc wyjściowa wiązki 2500W,
- długość fali 808 nm lub 940 nm,
- zakres płynnej regulacji mocy wiązki roboczej 100 – 2500W,
- długość ogniska wiązki 82 mm / 32 mm,
- wymiary ogniska wiązki 1,8 x 6,8 mm / 1,8 x 3,8 mm,
- zakres gęstości mocy wiązki na powierzchni ogniska 8 – 365 W/mm².

W badaniach własnych zawory wylotowe mocowano w uchwycie i napawano proszkiem stelliteowym AMI 3901, wielowarstwowo bez podgrzewania wstępnego (rys. 4a) przy parametrach podanych w tabeli 1. Dodatkowo: natężenie gazu transportującego proszek, argonu – 2,0 l/min, natężenie gazu ochronnego, również argonu – 6 l/min, średnica dyszy podajnika proszku – 1,2 mm, kąt pochylenia dyszy – 40⁰, odległość dyszy od jeziora napawanego materiału – 10 mm.

Tab. 1. Parametry laserowego napawania
Tab. 1. The parameters of laser pad welding

Moc lasera [KW]	Prędkość napawania [m/min]	Natężenie podawania proszku [g/min]	Grubość napoiny [mm]	Szerokość napoiny [mm]
1,2	0,20	5,0	1,0 – 1,2	6,0

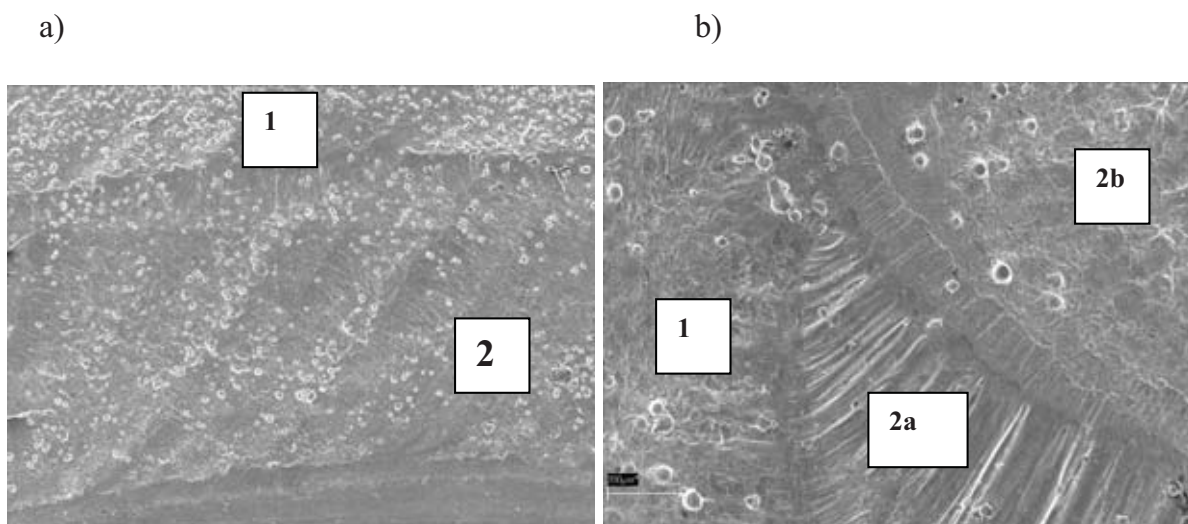
Ogólny widok zaworów napawanych laserowo przedstawiono na rys.4b-c, gdzie uwidacznia się regularny kształt napoiny, bardzo mała strefa wpływu ciepła nie powodująca przegrzewania się materiału rodzimego. Aby uzyskać można było wymaganą grubość warstwy stellitej z odpowiednimi naddatkami do obróbki mechanicznej należało wykonać kilka napoin. Zawór po napawaniu laserowym poddano weryfikacji organoleptycznej oraz badaniom rentgenograficznym.



Rys. 4. Laserowe platerowanie (napawanie) przyłgni zaworów lotniczego silnika spalinowego oraz efekty technologiczne: a – widok ogólny stanowiska laserowego podczas platerowania zaworu, b, c –ogólny widok napawanej przyłgni zaworów wylotowych silnika

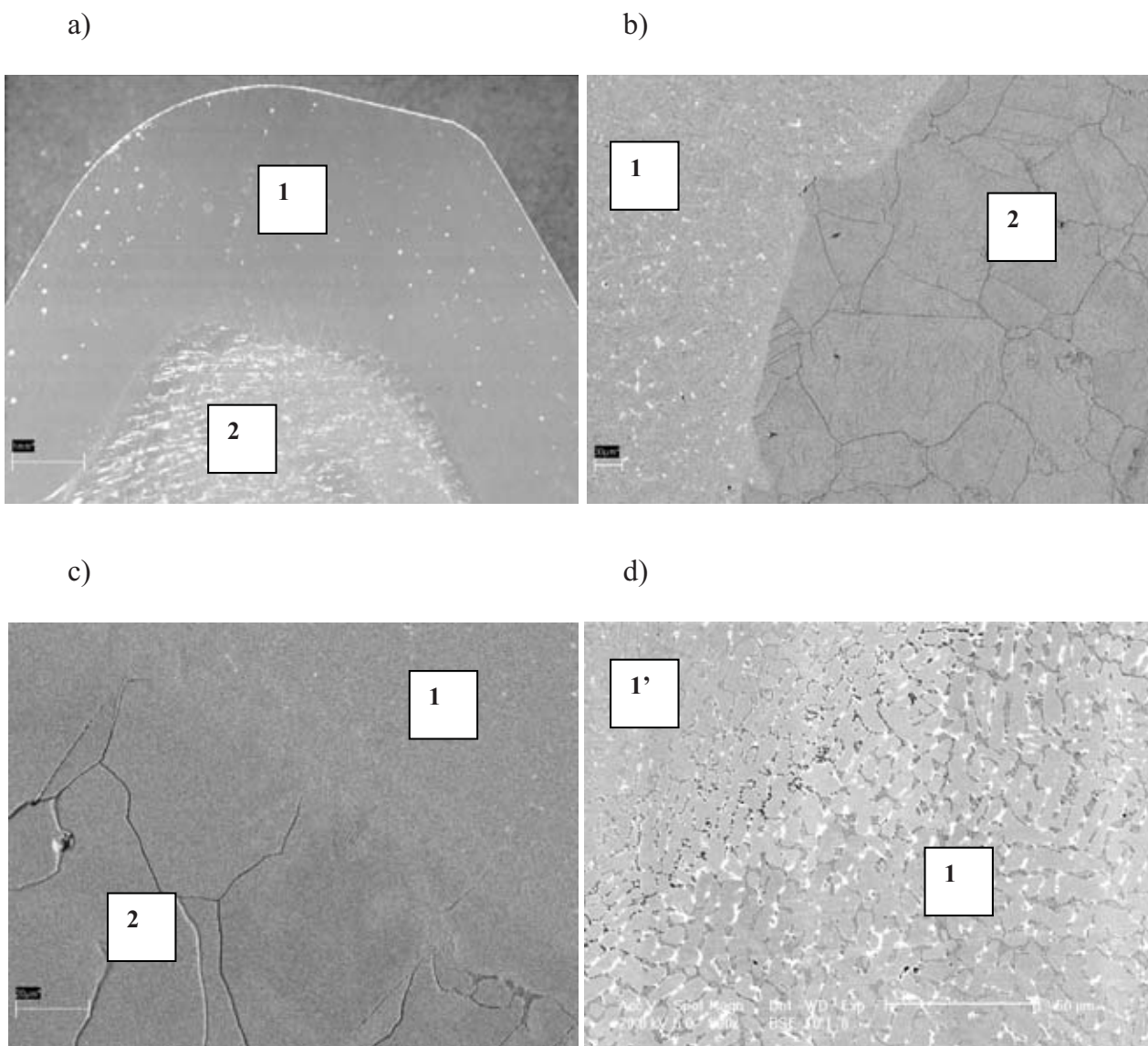
Fig. 4. Laser plating (pad welding) of valve faces of combustion aircraft engine as well as technological effects: a – general view of laser stand during paltering of valve, b, c – general view of pad welding faying surface of engine exhaust valves

Napawana warstwa stellitej posiadała charakterystyczne lico (rys.5), łagodny wtop oraz nie posiadała wad technologicznych (rys. 6, 7), co należy uznać za bardzo korzystny rezultat. Nie stwierdzono również wyraźnych oznak rozrostu ziaren austenitu w strefie wpływu ciepła (SWC), tj. strefie przejścia (wtopu) do materiału rodzimego (rys. 6b,c), co potwierdza poprawny dobór parametrów procesu napawania.

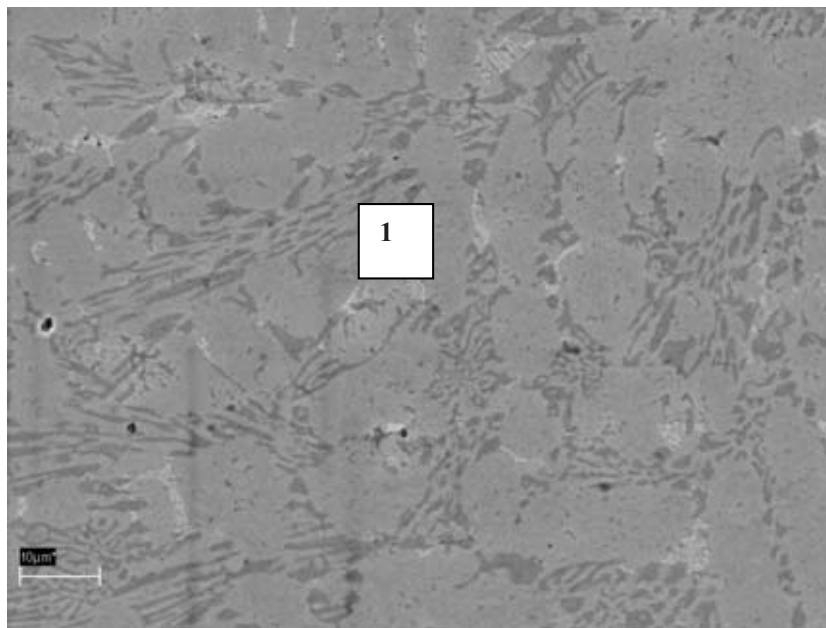


Rys. 5. Charakterystyczna topografia lica napoiny laserowej na powierzchni roboczej zaworu wylotowego (strefa przyłgni oraz grzybka) po przetopieniu proszku AMI 3901: 1- napoina poprzednia, 2 – napoina kolejna, 2a, 2b – kolejne fazy krystalizacji kierunkowej ciekłego materiału napoiny stellitej

Fig. 5. Characteristic topography of face of laser padding weld on the working surface of exhaust valve (zone of faying surface as well as valve head) after weld penetration of AMI 3901 powder: previous padding weld, 2- next padding weld, 2a, 2b – next phases of directional crystallization of liquid material of stellite padding weld



e)



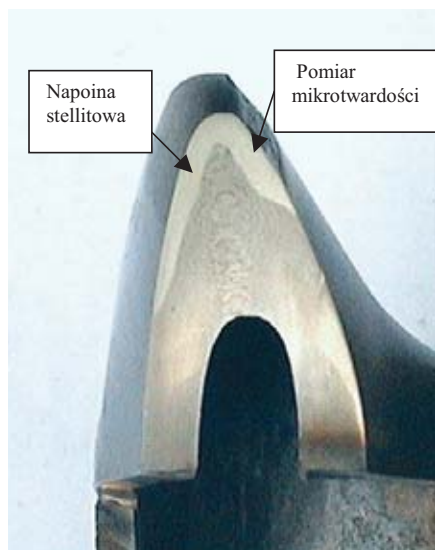
Rys. 6. Charakterystyczne strefy zaworu wylotowego oraz mikrostruktura strefie przejściowej i napoiny: a – przekrój poprzeczny strefy grzybka zaworu po napawaniu laserowym i toczeniu wstępnym, b – e) reprezentatywne mikrostruktury strefy przejściowej i napoiny; 1 – napoina, 2 – materiał rdzenia

Fig. 6. Characteristic zones of exhaust valve as well as microstructure in the transient zone and padding weld: a – cross-section of zone of valve head after laser pad welding and pre-turning, b-e) representative microstructures of transient zone and padding weld; 1 – padding weld, 2- material of core

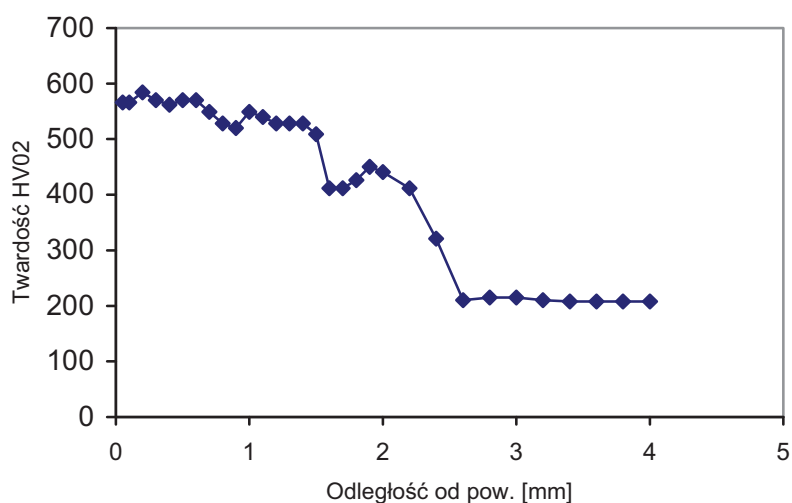
Jedyną oznaką wystąpienia pewnego stopnia przegrzania strefy przejściowej jest rozwinięcie powierzchni niektórych granic austenitu (pofalowanie granic) mogące być efektem początkowego stadium wydzielania nieciągłych lamelarnych węglików.

Twardość napawanej warstwy wynosiła 42 – 44 HRC. Rozkład mikrotwardości w głąb warstwy wierzchniej przedstawiono na wykresie rys. 7.

a)



b)



Rys. 7. Przekrój zaworu wydechowego z widoczną strefą napawania (a) oraz rozkład mikrotwardości w głąb napoiny wytworzonej w strefie grzybka zaworu (b)

Fig. 7. Section of exhaust valve with visible zone of pad welding (a) as well as distribution of microhardness far into padding weld created in the zone of valve head (b)

Na wykresie tym wyraźnie uwidacznia się układ napawanych warstw o zróżnicowanej mikrotwardości świadczący o oddziaływaniu cieplnym kolejno nakładanych warstw (odpuszczanie), co należy uznać za korzystny efekt (łagodne przejście utwardzenia do materiału rodzimego). Największa mikrotwardość występowała przy powierzchni i była równa około 570 HV. Zmiany mikrotwardości sięgały do głębokości 2,6 mm, co można uznać za właściwą grubość napoiny.

3. Wnioski

1. Laserowe napawanie warstwy stellitej na przyłgnie zaworów wylotowych silnika samolotu Asz62IR jest najbardziej efektywną metodą napawania, cechującą się następującymi zaletami:
 - źródło ciepła oddziałuje na bardzo wąskim obszarze nadtapianego materiału nie powodując przegrzewania obrabianego elementu,
 - nie powoduje dużych deformacji,
 - zapewnia minimalny udział materiału podłoża w napawanej warstwie (ok. $0,2 \div 0,3$ mm),
 - daje wyższą dokładność sterowania jakością i kształtem napoin oraz energią liniową napawania,
 - jest procesem energooszczędnym oraz zmniejsza zużycie proszków stellitejowych,
 - zapewnia uzyskanie korzystnych struktur, braku wtrąceń i pęknięć występujących w nakładanych warstwach.
2. Do napawania laserowego można stosować takie same proszki jak przy napawaniu plazmowym, lecz o nieco mniejszej granulacji, tj. $20 \div 80$ μm . Na podstawie wyników badań własnych stwierdzono, że do napawania laserowego przyłgni zaworów wylotowych silnika ASz62IR można stosować proszki na bazie kobaltu EuTroLoy 16006 i 16012 firmy Castolin Eutectik oraz AMI 3901 i 3902 firmy Euromat, uzyskując twardość w zakresie $37 \div 44$ HRC. Pozwala to na stosowanie ich w szerokim spektrum, tj. również dla zaworów bardzo mocno obciążonych cieplnie.
3. Dobrane i proponowane parametry laserowego napawania laserowego przedstawiono w tabeli:

Moc lasera [kW]	Prędkość napawania [m/min]	Natężenie podawania proszku [g/min]	Grubość napoiny pojedynczej warstwy [mm]	Szerokość napoiny pojedynczej warstwy [mm]
1,2	0,20	5,0	1,0 – 1,2	6,0

Dodatkowo: natężenie gazu transportującego proszek, argonu – 2,0 l/mni, natężenie gazu ochronnego, również argonu 0 - 6 l/min, średnica dyszy podajnika proszku - 1,2 mm, kąt pochylenia dyszy - 40° , odległość dyszy od jeziora napawanego materiału – 10 mm.

4. Laserowo napawana warstwa cechuje się wysoką jednorodnością, bez wtrąceń i pęknięć. Strukturę napoiny stanowią bardzo liczne (udział objętościowy do 90%) układy dendrytyczne wydzieleni fazowych Co, Cr, Ni, a także płytkowe węgliki w układach dendrytycznych w otoczeniu białych stref dominujących w wolfram. Ich kierunek uzależniony jest od kierunku odprowadzania ciepła. Mikrostruktura oraz jej mikrobudowa związana jest z kolejnością nakładania warstw, która wpływa na zróżnicowaną wielkość i kształt dendrytycznych wydzieleni fazowych.
5. W wyniku napawania drugiego ściegu stelliteu następuje nagrzewanie promieniem lasera oraz topnienie warstwy wierzchniej pierwszego ściegu, nagrzewanie, topnienie i nakładanie roztopionego proszku w stanie ciekłym na podłoże pierwszego ściegu

stellitowego, krystalizacja kierunkowa roztopionego materiału, zachodzą przemiany fazowe ze stanu ciekłego w stały. W wyniku nagrzewania podłoża następują zmiany mikrostruktury oraz odpuszczanie głębiej położonych warstw pierwszego ściegu napoiny, co wpływa na łagodny spadek mikrotwardości w tzw. strefie wpływu ciepła (SWC) 50÷80 HV0,2.

6. Ze względu na wymagane naddatki do obróbki mechanicznej oraz planowane w przyszłości 3, 4 naprawy główne silnika, przed napawaniem laserowym należy wykonać kształtowe podtoczenie kształtowe w przyłgni gniazda zaworowego na głębokości ok. 1-1,2 mm oraz dwa ściegi napoiny przy ww. parametrach obróbki laserowej.
7. Po wykonaniu napawania należy stosować wolne studzenie, np. w rozgrzanym piasku kwarcowym (temp. ok. 250-350°C) lub z piecem, co pozwoli na zminimalizowanie odkształceń spawalniczych oraz naprężeń własnych.
8. Dla zautomatyzowania procesu napawania przyłgni zaworu wylotowego silnika samolotu Asz62IR należy zaprojektować i wykonać specjalny uchwyt samozaciskowy pozwalający na szybkie mocowanie i wycentrowanie zaworu, co pozwoli obniżyć koszty obróbki laserowej.

Literatura

- [1] Łabazin, P., *Silnik lotniczy ASz62IR*, wersja rosyjska, Moskwa 1966 r.
- [2] Łunarski, J., *Technologia silników lotniczych*, Politechnika Rzeszowska, 1986 r.
- [3] Burakowski, T., Wierzchoń, T., *Inżynieria powierzchni metali*, WNT, Warszawa 1995.
- [4] Kusiński, J., *Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej*, Wydawnictwo Naukowe „Akapit”, Kraków, 2000.
- [5] Klimpel, A., Mazur, M., *Podręcznik spawalnictwa*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004.
- [6] Klimpel, A., *Napawanie i natryskiwanie cieplne*, Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa 2000.