

Wojciech NAPADŁEK¹
Zdzisław BOGDANOWICZ²
Grzegorz TRAWIŃSKI³
Agnieszka LABER⁴

BADANIA MIKROSTRUKTURY NAPONI WYKONANYCH ZE STOPÓW NA BAZIE KOBALTU

W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych mikrostruktury naponi wykonanych ze stopów na bazie kobaltu (stellyty). Stosując laser diodowy dużej mocy typu ROFIN DL 020 oraz proszek AMI 3901 wykonano próby napawania na próbkach oraz zaworach ze stali zaworowej austenitycznej. Stosując różne parametry obróbki laserowej oraz prowadząc badania topografii powierzchni, mikrostruktury, mikrotwardości, wytypowano najlepszy wariant technologiczny. Analizując mikrostrukturę, stwierdzono w strefach przetopionych budowę drobnokrystaliczną o wysokiej mikrotwardości nawet do ok. 550 HV0,1. Próby technologiczne napawania laserowego należy uznać za pozytywne a drobnokrystaliczna mikrostruktura wytworzonych naponi rokuje wysoką odporność na tarcie w warunkach korozji gazowej.

THE INVESTIGATION OF PADDING WELD MICROSTRUCTURE MADE FROM ALLOYS ON THE BASE OF COBALT

The laboratory investigation results of padding microstructure made from alloys on the base of cobalt (stellyts) were introduced in the article. The padding tests were carried out on samples from valvular austenitic steel by using the diode laser ROFIN DL 020 with large power and powders AMI 3901. Using the various parameters of the laser processing and leading the investigations and valves of the surface topography, microstructure, microhardness, the best technological variant was chosen. Analysing microstructure, was affirmed in zones even melts the fine-crystalline building about high microhardness of approx. 550HV0,1. The technological tests of laser padding should be affirmed as positive and fine-crystalline microstructure of padding shows the high friction resistance in the gas corrosion conditions.

¹ dr inż. Wojciech NAPADŁEK, 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

² dr hab. inż. Zdzisław BOGDANOWICZ prof. WAT, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, 00-908 Warszawa, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, tel. (0-22) 683-91-40, e-mail: zbgdanowicz@wat.edu.pl

³ dr inż. Grzegorz TRAWIŃSKI, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, 00-908 Warszawa, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, tel. (0-22) 683-70-46, e-mail: gtrawinski@wat.edu.pl

⁴ mgr inż. Agnieszka LABER, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, 00-908 Warszawa, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, tel. (0-22) 683-73-57, e-mail: alaber@wat.edu.pl

1. WSTĘP

Rozwój przemysłu motoryzacyjnego powoduje wzrost wymagań stawianych poszczególnym zespołom pojazdów samochodowych. Powoduje to konieczność stosowania coraz nowszych rozwiązań technologicznych i materiałowych w produkcji poszczególnych elementów pojazdów samochodowych. Wśród wielu podzespołów można wyróżnić silnik spalinowy. Poszczególne elementy silnika spalinowego narażone są na różnego rodzaju obciążenia (np. mechaniczne, cieplne, itp.), które wynikają z jego warunków pracy.

Jednym z najbardziej obciążonych cieplnie i mechanicznie elementów silnika jest zawór wylotowy, będący jednym z elementów układu rozrządu, który odpowiada za właściwą pracę i osiągi silnika. Z uwagi na wspomniany rozwój motoryzacji oraz wzrost wymogów odnośnie trwałości i niezawodności poszczególnych elementów pojazdów samochodowych, w tym również zaworów wylotowych należy odpowiednio zrealizować proces konstrukcyjno - technologiczny. Zapewnienie wysokiej trwałości i niezawodności zaworu realizuje się przede wszystkim poprzez zastosowanie odpowiedniego materiału i technologii wytwarzania. Jak widać z przedstawionego opisu produkcja, technologia wytwarzania i materiał są zależne od siebie i wpływają na efekt końcowy jakim jest produkt w postaci gotowego zaworu wylotowego.

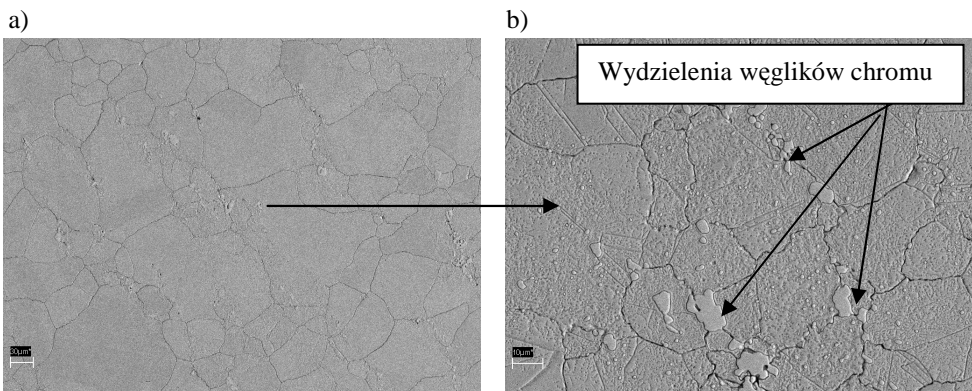
W wyniku szeregu prac badawczych, a także wielu lat doświadczeń i ciągłego rozwoju inżynierii materiałowej oraz technologii produkcji, opracowano na potrzeby motoryzacji szereg procesów produkcji zaworów, które znacząco różnią się względem siebie, a wynika to z rodzaju materiału użytego do budowy zaworu. Newralgiczną strefą zaworu, wpływającą na jego trwałość jest przylgnia zaworu. Aby zwiększyć jej trwałość, tj. odporność na cykliczne obciążenia mechaniczne, zużycie w warunkach tarcia, żaroodporność oraz odporność na korozję gazową, stosuje się m.in. różne metody napawania przylgni. Napawanie warstwy wierzchniej może odbywać się różnymi metodami, tj. napawanie elektryczne, gazowe, plazmowe bądź laserowe. Do napawania stosuje się różne materiały tj. elektrody otulone, druty proszkowe, druty samoostłonowe i proszki. Do popularnych stopów, wykorzystywanych do napawania, należą stopy na bazie kobaltu, które nazywane są stellitami [1].

Jedną z najnowocześniejszych metod inżynierii powierzchni zwiększających trwałość eksploatacyjną przylgni zaworu jest napawanie laserowe [1 -4]. Do procesu napawania wykorzystuje się m.in. 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: gęstość mocy 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 element, w wyniku czego uzyskuje się małe naprężenia i odkształcenia spawalnicze. Szybkie odprowadzenie ciepła przez objętość elementu 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. [1, 2].

2. LASEROWE NAPAWANIE ZAWORÓW WYLOTOWYCH WYKONANYCH ZE STALI ZAWOROWEJ AUSTENITYCZNEJ X53CRMNNIN 21-9

Badany zawór wylotowy silnika spalinowego poddany napawaniu laserowemu, wykonany był z stali austenitycznej X53CrMnNiN 21-9, zawierającej jako podstawowe pierwiastki stopowe chrom (ok. 21% stężenia masowego), mangan (ok. 9% stężenia masowego), nikiel (ok. 4% stężenia masowego), węgiel (ok. 0,5% stężenia masowego). Resztę stanowiło żelazo. Mikrostrukturę wyjściową ww. materiału zaworu wylotowego stanowią dość regularnie rozmieszczone ziarna austenitu (rys. 1). Ziarna austenitu wykazują zróżnicowaną wielkość (z przedziału 50 - 200 μ m) i są względnie równoosiowe. Po granicach i w objętości ziaren występują równomiernie rozmieszczone, drobne, globularne wydzielienia węglików i węglikoazotków, głównie chromu - rys. 1.



Rys. 1. Mikrostruktura stali zaworowej austenitycznej X53CrMnNiN 21-9 stosowanej w produkcji zaworów wylotowych silników spalinowych

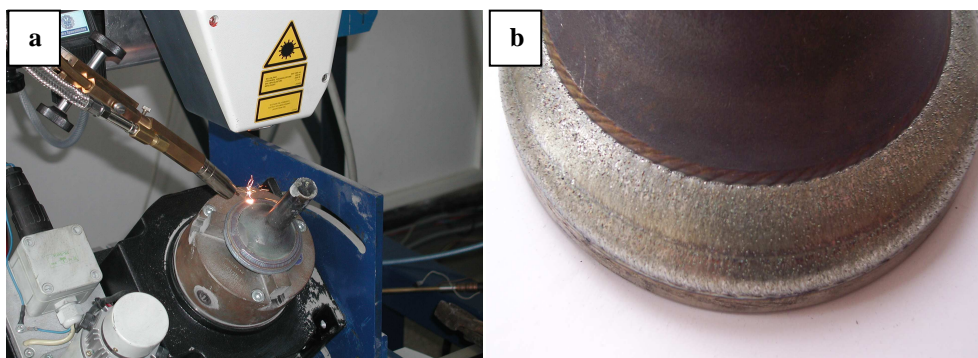
Nie stwierdzono wyraźnych oznak rozrostu ziarna w strefie przejścia do materiału napoiny, co potwierdza poprawny dobór parametrów procesu napawania. Jediną oznaką wystąpienia pewnego stopnia przegrzania strefy przejściowej jest rozwinięcie powierzchni niektórych granic austenitu (pofalowanie granic) mogące być efektem początkowego

stadium wydzielania nieciągłego lamelarnych węglików (rys. 1). Ziarna austenitu i rozproszone cząstki węglików w materiale rodzimym zaworu

Napawanie laserowe przeprowadzono na próbkach oraz rzeczywistych zaworach wylotowych silnika przy wykorzystaniu lasera diodowego ROFIN DL 020. Przyłgnie zaworów przygotowano wstępnie poprzez kształtowe podtoczenia a następnie napawano laserowo zgodnie z wymogami dokumentacji konstrukcyjno - technologicznej.

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 mocowano w obrotniku na stole obróbczym o dokładności przesuwu $0,2 \mu\text{m}/100 \text{ mm}$ (rys. 2a). Stanowisko do napawania laserowego wyposażone było dodatkowo w układ podawania proszku do miejsca napawanego z płynnie sterowanym natężeniem podawania w zakresie $0,8 - 25 \text{ g/min}$.

W badaniach własnych zawory wylotowe mocowano w uchwycie i napawano proszkiem stelliteowym AMI 3901, wielowarstwowo z podgrzewaniem wstępnym (rys. 2a).



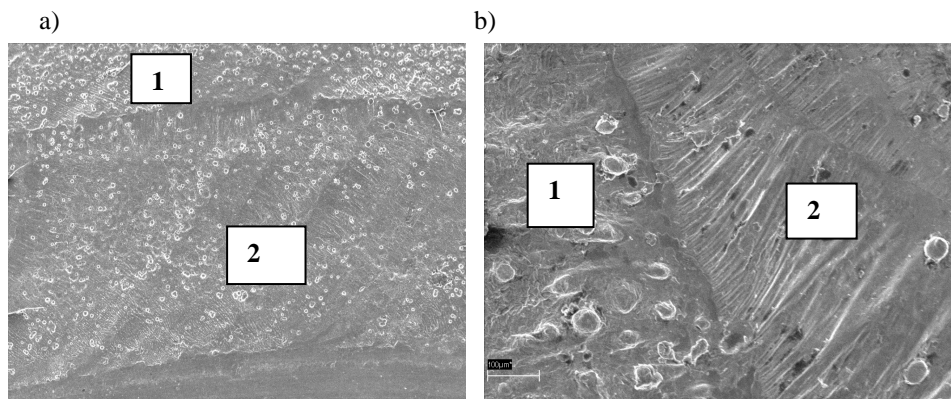
Rys. 2. Laserowe napawanie przyłgni zaworów silnika spalinowego oraz efekty technologiczne: a – widok ogólny stanowiska laserowego podczas napawania zaworu, b –ogólny widok napawanej przyłgni zaworów

3. BADANIA ZAWORÓW Z NAPOINĄ STELLITOWĄ

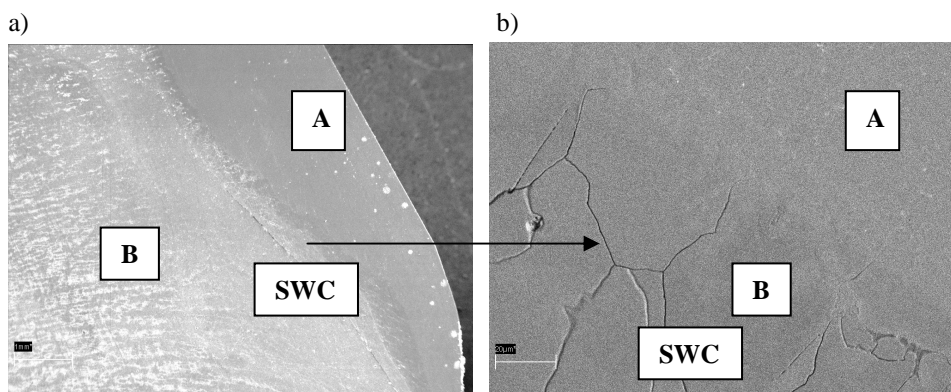
Do napawania laserowego przyłgni zaworu wylotowego zastosowano proszek stelliteowy AMI 3901 firmy Euromat. Badanie mikroskopowe oraz składu chemicznego przeprowadzono przy użyciu mikroskopu optycznego Zeiss oraz skaningowego Philips XL30. W wyniku tej analizy ziarnistości stwierdzono, że proszek AMI 3901 posiadał ziarnistość w przedziale $23 - 75 \mu\text{m}$ (średnią wynosiła $\bar{X} = 46,50 \mu\text{m}$).

Ogólny widok przyłgni zaworu napawanego laserowo przedstawiono na rys. 2b, gdzie uwidacznia się regularny kształt napoiny, bardzo mała strefa wpływu ciepła nie powodująca przegrzewania się materiału rodzimego. Aby uzyskać wymaganą grubość warstwy stelliteowej z odpowiednimi naddatkami do obróbki mechanicznej należało wykonać kilka napoin. Zawór po napawaniu laserowym poddano weryfikacji organoleptycznej oraz badaniom rentgenograficznym. Napawana warstwa stelliteowa

posiadała charakterystyczne lico (rys. 3), łagodny wtop oraz nie posiadała wad technologicznych (rys. 3, 4), co należy uznać za bardzo korzystny rezultat. Nie stwierdzono również wyraźnych oznak rozrostu ziaren austenitu w strefie wpływu ciepła (SWC), tj. strefie przejścia (wtopienia) do materiału rodzimego (rys. 4b), co potwierdza poprawny dobór parametrów procesu napawania.



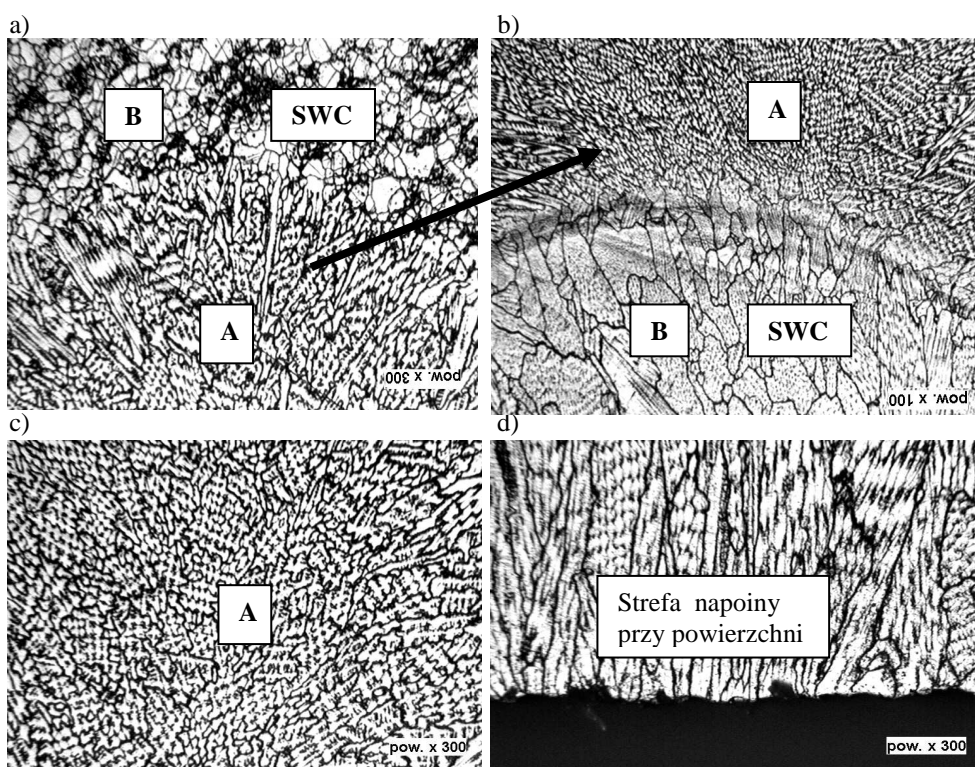
Rys. 3. Charakterystyczna topografia napoiny laserowej na powierzchni przylgni zaworu wylotowego (strefa przylgni oraz grzybka) po przetopieniu proszku AMI 3901: 1- napoina poprzednia, 2 – kolejna napoina



Rys. 4. Charakterystyczne strefy napoiny zaworu wylotowego silnika spalinowego (a) oraz mikrostruktura (b) w strefie wpływu ciepła (SWC) – przekrój poprzeczny strefy grzybka zaworu po napawaniu laserowym i toczeniu wstępnym: reprezentatywne mikrostruktury strefy SWC i napoiny; A – napoina, B - materiał rodzimy zaworu

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

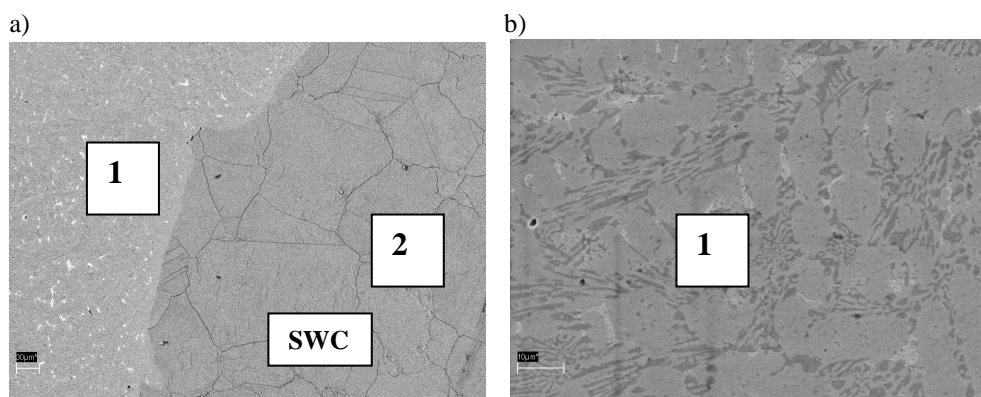
Napoina stellitowa wytworzona technologią laserową warstwa cechuje się wysoką jednorodnością, bez wtrąceń i pęknięć oraz twardością na powierzchni równą 37÷44 HRC. Strukturę napoiny stanowią bardzo liczne (udział objętościowy do 90%) układy dendrytyczne wydzieleni fazowych Co, Cr, Ni, a także płytkowe węgliki w układach dendrytycznych w otoczeniu białych stref dominujących w wolfram (rys. 5, 6). 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.



Rys. 5. Charakterystyczne mikrostruktury w strefie wpływu ciepła (SWC – B, rys. a, b), oraz napoiny (B, rys. b, c) zaworu wylotowego silnika spalinowego - mikroskopia optyczna, pow. 300x

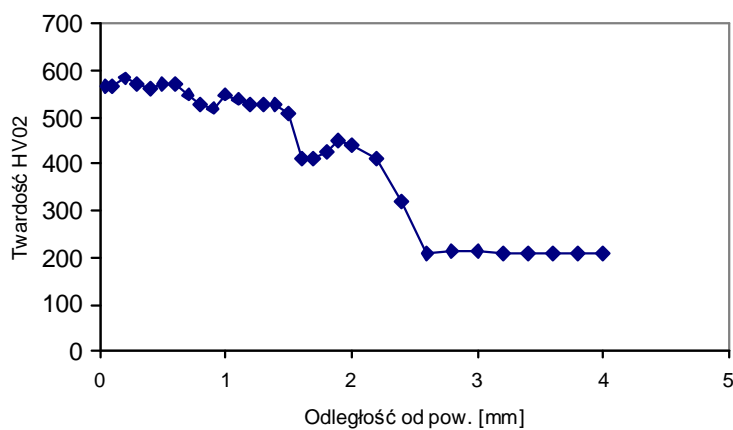
W wyniku napawania drugiego ściegu stellitu (rys.3, 5a, b), następuje nagrzewanie promieniowaniem laserowym oraz topnienie warstwy wierzchniej pierwszego ściegu, nagrzewanie, topnienie i nakładanie roztopionego proszku w stanie ciekłym na podłoże pierwszego ściegu stellitowego, krystalizacja kierunkowa roztopionego materiału oraz zachodzą przemiany fazowe ze stanu ciekłego w stały (krystalizacja kierunkowa – rys. 5, 6b). W wyniku nagrzewania podłoża następują także zmiany mikrostruktury oraz

odpuszczanie głębiej położonych warstw pierwszego ścięgu napoiny, co wpływa na łagodny spadek mikrotwardości w tzw. strefie wpływu ciepła (SWC) o 50 ± 80 HV_{0,2}.



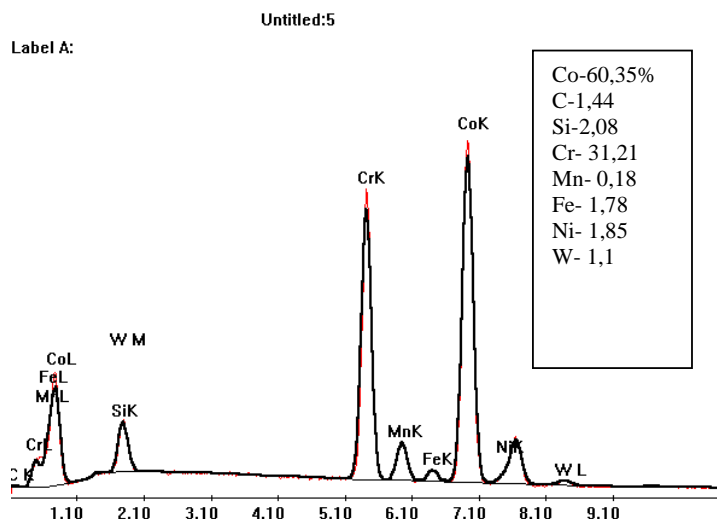
Rys. 6. Charakterystyczne mikrostruktury w strefie wpływu ciepła (SWC - a , oraz napoiny (b) zaworu wylotowego silnika spalinowego – mikroskopia skaningowa (SEM)

Rozkład mikrotwardości w głąb warstwy wierzchniej przedstawiono na rys. 7. 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.



Rys. 7. Rozkład mikrotwardości w głąb przekroju poprzecznego napoiny wytworzonej techniką laserową w strefie przylgni grzybka zaworu wylotowego

Badania składu chemicznego w charakterystycznych mikroobszarach napoiny stellitej przeprowadzone metodą rentgenowską, potwierdziły jego zgodność ze specyfikacją producenta (rys. 8).



Rys. 8. Charakterystyczny spektrogram rozkładu podstawowych pierwiastków w napoinie laserowej wytworzonej z proszku AMI 3901 oraz ilościowy skład chemiczny w mikroobszarach

4. WNIOSKI

1. Wytwarzanie żaroodpornych warstw wierzchnich typu stellitego w strefie przylgni zaworów wylotowych silnika spalinowego z wykorzystaniem techniki laserowej, jest najbardziej efektywną metodą napawania, cechującą się następującymi zaletami:
 - źródło ciepła oddziałuje w bardzo wąskim obszarze nadtapianego materiału nie powodując przegrzewania obrabianego elementu oraz dużych deformacji,
 - zapewnia minimalny udział materiału podłoża w napawanej warstwie (ok. $0,2 \pm 0,3$ mm), daje wyższą dokładność sterowania jakością i kształtem napoin oraz energią liniową napawania,
 - jest procesem energooszczędnym oraz zmniejsza zużycie materiałów proszkowych,
 - zapewnia uzyskanie korzystnych mikrostruktur, bez wtrąceń niemetalicznych oraz pęknięć, mogących występować w nakładanych warstwach.
2. Do napawania laserowego można stosować takie same proszki jak przy napawaniu plazmowym, lecz o nieco mniejszej granulacji, tj. $20 \div 80 \mu\text{m}$. Na podstawie wyników badań własnych stwierdzono, że do napawania laserowego przylgni zaworów wylotowych silników spalinowych można z powodzeniem stosować proszki na bazie

kobaltu typu AMI 3901 firmy Euromat, uzyskując twardość w zakresie 37÷44 HRC. Pozwala to na stosowanie ich w szerokim spektrum, tj. również dla zaworów bardzo mocno obciążonych cieplnie.

3. Warstwa napawana laserowo 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.
4. 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 napoiny, co wpływa na łagodny spadek mikrotwardości w tzw. strefie wpływu ciepła (SWC) 50÷80 HV0,2.
5. 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.
6. 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.
7. Dla zautomatyzowania procesu napawania przyłgni zaworów silnika spalinowego należy zaprojektować i wykonać specjalny uchwyt samozaciskowy pozwalający na szybkie mocowanie i wycentrowanie zaworu, co znacznie skróci czas mocowania zaworu oraz pozwoli obniżyć koszty obróbki laserowej.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Burakowski, T., Wierzchoń, T., *Inżynieria powierzchni metali*, WNT, Warszawa 1995.
- [2] Kusiński, J., *Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej*, Wydawnictwo Naukowe „Akapit”, Kraków, 2000.
- [3] Klimpel, A., Mazur, M., *Podręcznik spawalnictwa*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004.
- [4] Klimpel, A., *Napawanie i natryskiwanie cieplne*, Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa 2000.