

Wojciech NAPADŁEK¹
Tadeusz BURAKOWSKI²
Agnieszka LABER³

ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA MIKRONAPAWANIA LASEROWEGO W NEURALGICZNYCH STREFACH ZAWORÓW WYLOTOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań laboratoryjnych napawania laserowego przyłgni zaworów wylotowych silnika spalinowego z zastosowaniem stopowych proszków stellite, jako alternatywy dla standardowych metod napawania np. metodą TIG. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że napawanie laserowe pozwala na utworzenie precyzyjnych warstw zabezpieczających przyłgnię zaworów wylotowych silnika spalinowego przed procesami przyspieszonego zużycia. Ze względu na wysokie koszty materiałowe i technologiczne procesu napawania laserowego w skali makro, przeprowadzono analizę możliwości zastosowania mikronapawania laserowego, jako alternatywną, ekonomiczną i bardzo perspektywiczną technologię do napawania przyłgni oraz główki trzonka zaworu wylotowego silnika spalinowego. Na podstawie przeprowadzonych wstępnych badań laboratoryjnych stwierdzono, że stosując nowoczesny laser Nd:YAG z optycznym układem śledzącym, możliwe jest wytworzenie pełnowartościowych mikronapoin w neuralgicznych strefach zaworów wylotowych.

ANALYSE USE LASER MICROPAD WELDING IN THE NEURALGIC ZONES OF THE VALVES OF ESCAPE COMBUSTION ENGINES

In the article were introduced the chosen results of the laboratory investigations of filling with the laser escape valves of the combustion engine with the use of alloys powders stellite, as alternatives for the standard methods of filling with e.g. the method TIG. It was affirmed in the result of conducted audits that filling with laser allowed to creation of precise layers. Because of the high material and technological costs of the process of filling with of the laser in the scale the macro, the analysis of the possibility of the use laser mikronapawania was conducted, as the alternative, economic and very far-reaching technology to filling with przyłgni and the head of the handle of the valve of the escape combustion engine. Affirm on the basis of conducted preliminary laboratory audits, that apply the modern laser Nd:YAG with the optical arrangement following, producing balanced mikronapoin in the neuralgic zones of escape valves possible is.

¹Wojciech NAPADŁEK, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, 00-908 Warszawa, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, tel. (0-22) 683-73-57, tel. kom. 664494297 e-mail: wnapadlek@wat.edu.pl,

²Tadeusz BURAKOWSKI, Politechnika Koszalińska, ul. Raclawicka 15/17, 75-620 Koszalin, Instytut Mechaniki Precyzyjnej, ul. Duchnicka 3, 01-796 Warszawa, tel. (22)6634319, tel. kom. 601374812, e-mail: wach@imp.edu.pl

³ Agnieszka Laber, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, 00-908 Warszawa, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, e-mail: alaber@wat.edu.pl, Poszukiwania Naftowe „Diament” 65-705 Zielona Góra, ul. Naftowa 3 e-mail: alaber@pn-diament.com.pl

1. WSPÓŁCZESNE TECHNOLOGIE NAPAWANIA PRZYLGNI ZAWORÓW WYLOTOWYCH SILNIKA SAPALINOWEGO

Z uwagi na rozwój motoryzacji oraz wzrost wymogów odnośnie trwałości i niezawodności poszczególnych elementów pojazdów samochodowych, w tym również zaworów wylotowych silnika spalinowego, należy odpowiednio zaprojektować i zrealizować proces produkcyjny. Zapewnienie wysokiej trwałości i niezawodności zaworu realizuje się przede wszystkim poprzez zastosowanie odpowiedniego materiału i technologii wytwarzania. Newralgiczną strefą zaworu, wpływającą na jego trwałość jest przylgnia zaworu. Podlega ona zużyciu, które jest wynikiem następujących procesów: korozji tarciowej, korozji wywołanej oddziaływaniem chemicznym spalin, erozji wywołanej przepływem strumienia gazów o wysokiej temperaturze i przy dużych prędkościach, odkształceń plastycznych oraz zmęczenia cieplnego materiału. Przykłady zużycia zaworów przedstawiono na rys. 1. W celu zabezpieczenia przed w.w. czynnikami zużycia stosuje się wzmocnianie warstwy wierzchniej przylgni zaworu poprzez napawanie: gazowe (sporadycznie), łukowe (np. metodą TIG), plazmowe oraz bardzo nowoczesne i precyzyjne napawanie laserowe. Schemat idei procesu napawania laserowego przedstawiono na rys. 2 [1].

a)



b)



Rys.1. Przykłady zużycia przylgni oraz trzonka zaworów w wyniku eksploatacji.;
a – fragmenty grzybka zaworu z przylgniami zużytymi w wyniku korozji gazowej,
b – fragment grzybka zaworu z przylgnią zużytą w wyniku korozji gazowej oraz odkształcenia plastycznego,

Zawory dolotowe (ssące) najczęściej wykonuje się ze stali martenzytycznych H9S2, H10S2M, a wylotowe (wydechowe) głównie ze stali austenitycznych 50H21G9N4, 4H14N14W2M. W celu zwiększenia żaroodporności przylgni zaworów (szczególnie wylotowych) stosuje się żaroodporne stopy twarde, 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 trzonków zaworów, głównie metodą napawania łukowego TIG (rys. 2). Do nowoczesnych technologii konstytuowania warstw stopowych zaliczamy stopowanie i napawanie (natapianie) laserowe [1-7]. Schemat ideowy tego procesu przedstawiono na rys. 3. a efekty

uzyskane w badaniach laboratoryjnych WAT na rys. 4. Aktualnie, w procesie produkcyjnym zaworów wylotowych silników spalinowych stosuje się tradycyjne napawanie plazmowe proszkami stelliteowymi (np. stellite typu F6) w strefie przylgni zaworu, która w czasie eksploatacji narażona jest na oddziaływanie korozji gazowej w wysokiej temperaturze (ok. 650 °C), zużyciu przez tarcie oraz cyklicznym oddziaływaniami dynamicznym w strefie styku przylgni zaworu z gniazdem.

Wysoka temperatura powoduje zmiękczenie materiału zaworów, co wpływa na zwiększenie podatności do odkształceń plastycznych oraz zużycie. Zastosowanie napoin wykonanych ze stelliteów ogranicza do minimum ww. procesy.

a)

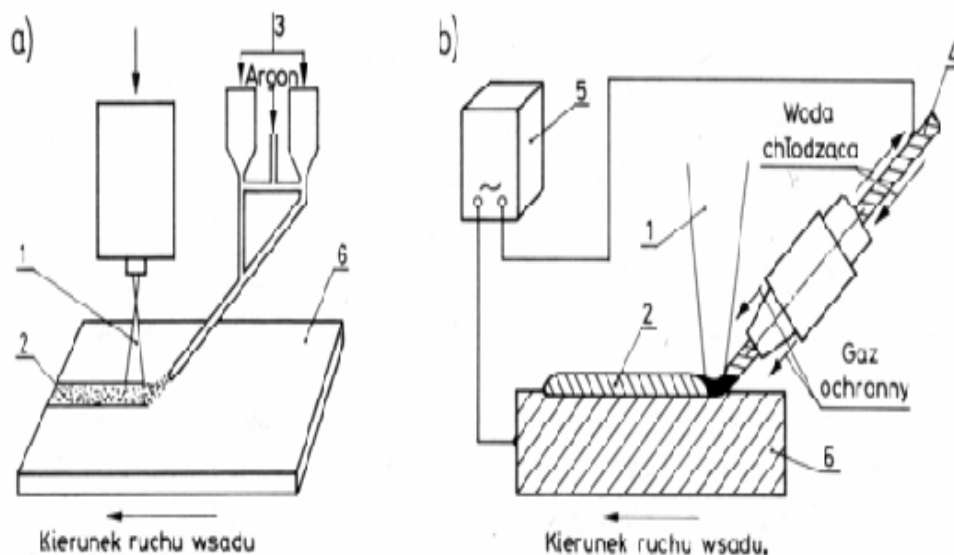


b)

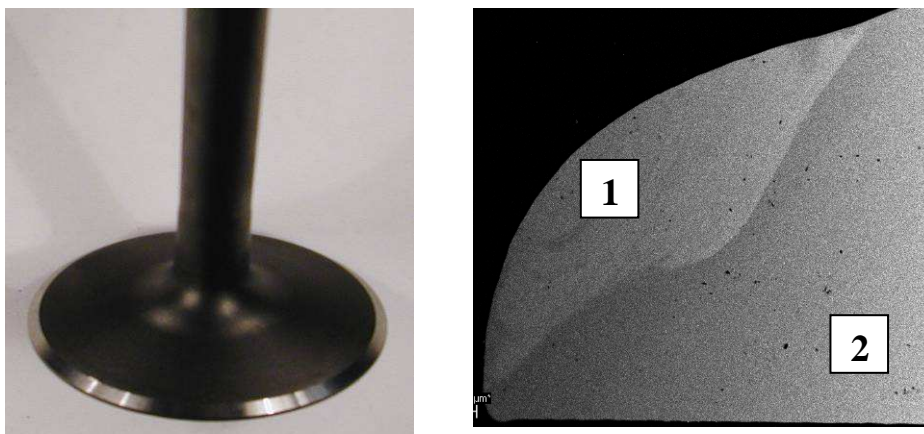


Rys. 2. Przylgni zaworów wylotowych: a) zawór silnika T359E po napawaniu metodą TIG stelliteem typu F6 na bazie Co; b) przekrój zaworu wylotowego silnika ASz62IR z widoczną strefą napoiny wykonanej metodą TIG

Niestety w dalszym ciągu stosuje się tradycyjne technologie, tj. napawanie metoda TIG, napawanie plazmowe, głównie ze względów ekonomicznych. Wśród znanych koncernów produkujących zawory, w tym wylotowe z przylgnią napawaną plazmowo, na czołowym miejscu uplasowała się firma w MAHLE Polska S.A. Technologia ta pozwala na uzyskanie wysokich właściwości użytkowych a przez to znaczące wydłużenie czasu eksploatacji przylgni zaworu. Napawanie laserowe w atmosferze ochronnej (np. argonu), pozwala uzyskać, precyzyjną, pełnowartościową napoinę o wysokiej wytrzymałości na zużycie przez tarcie w różnych warunkach, np. w agresywnych mediach, podwyższonych temperaturach. W procesie tym wykorzystuje się m.in. lasery stałe Nd: YAG, lasery gazowe CO₂ oraz lasery diodowe dużej mocy np. HPDL. Na proces napawania (natapiania) laserowego mają wpływ: gęstość mocy wiązki lasera, rozkład modowy wiązki laserowej, absorpcja promieniowania laserowego napawanych materiałów, prędkość napawania, rodzaj i natężenie gazu ochronnego, wydatek podawanego proszku lub drutu.



Rys. 3. Schemat natapiania (napawania) [1]: a) proszkowego dwuskładnikowego, b) drutowego; 1 – wiązka laserowa, 2 – ścieżka laserowa – materiał natopiony (napawany), 3 – zasobnik proszku, 4 – drut, 5 – źródło prądu grzania oporowego bezpośredniego, 6 - podłoże

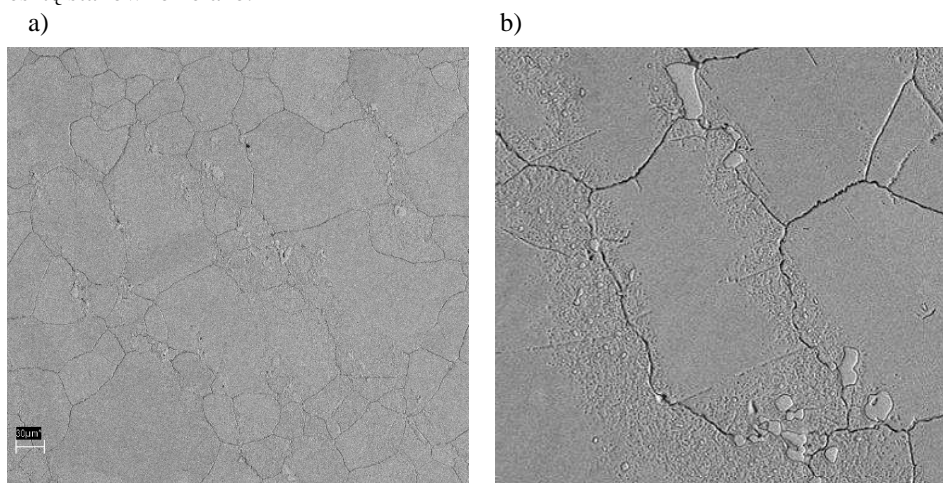


Rys.4. Zawór wylotowy silnika spalinowego z przyłgnią napawaną laserowo proszkiem stelliteowym : a) widok ogólny grzybka zaworu, b) przekrój poprzeczny w strefie przyłgni zaworu; 1 – strefa napawana laserowo, 2 – fragment strefy grzybka zaworu

Do zalet napawania laserowego można zaliczyć także 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 sterowalności procesu możemy ograniczyć udział materiału podłoża w napoinie do ok. 4%, co pozwala na uzyskanie warstwy wierzchniej o określonych właściwościach, już w pierwszej warstwie napoiny. Materiały do napawania podobnie jak przy standardowym napawaniu dobiera się według potrzeb użytkowych, stosując w tym procesie materiały dodatkowe o średnicy $1,2 \div 1,6$ mm. Technologia ta pozwala na uzyskanie wysokiej jakości napoin. Niestety w dalszym ciągu technologia ta jest droga i dlatego należy poszukiwać alternatywnych rozwiązań. W ostatnich latach pracownicy WAT prowadzili z dużym powodzeniem badania w zakresie napawania laserowego przyłgni zaworów, min. wdrożono proces napawania laserowego przyłgni zaworów silnika lotniczego ASz62IR w WSK „PZL – Kalisz” S.A.

2. METODYKA I WYNIKI BADAŃ

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.

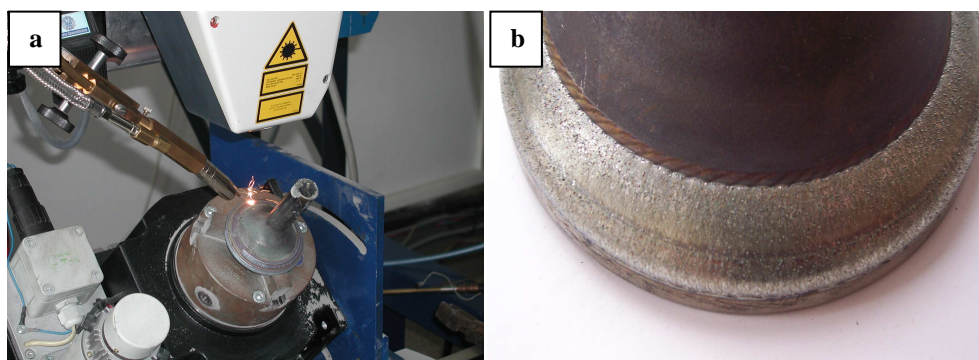


Rys.5. Mikrostruktura stali zaworowej austenitycznej stosowanej w produkcji zaworów wylotowych silnika spalinowego a) widoczne ziarna austenitu, b) widoczne wydzielenia węglików chromu

Mikrostrukturę wyjściową materiału zaworu wylotowego wykonanego z ww. stali austenitycznej w której znajdują się dość regularnie rozmieszczone ziarna austenitu przedstawiono na rys. 5. Po granicach i w objętości ziaren występują równomiernie

rozmieszczone, drobne, globularne wydzielenia węglików i węglikoazotków, głównie chromu - rys. 5b. Nie stwierdzono wyraźnych oznak rozrostu ziarna w strefie przejścia napoiny do materiału rodzimego, 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.

Napawanie laserowe przeprowadzono na próbkach oraz rzeczywistych zaworach wylotowych silnika przy wykorzystaniu lasera diodowego ROFIN DL 020. Przyłgnie zaworów przygotowano wstępnie poprzez kształtowanie podtoczenia a następnie napawano laserowo zgodnie z wymogami dokumentacji konstrukcyjno - technologicznej. Zastosowano proszek EuTroLoy 16006, którego napawano wielowarstwowo z podgrzewaniem wstępnym (rys. 6a).



Rys. 6. Laserowe napawanie przyłgni zaworów silnika spalinowego oraz efekty technologiczne: a – widok ogólny stanowiska laserowego podczas napawania zaworu, b – ogólny widok napawanej przyłgni zaworów

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 obrótniku na stole obróbczym o dokładności przesuwu $0,2 \mu\text{m}/100 \text{ mm}$ (rys. 6a). 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 stellitowym. Do napawania przyłgni zaworu wylotowego silnika spalinowego użyto proszku EuTroLoy 16006 (tab.1). Parametry napawania laserowego przyjęte w eksperymencie laboratoryjnym przedstawiono w tab.2. Zastosowany proszek charakteryzuje się: twardością po napawaniu ok. $\sim 40 \text{ HRC}$, wysoką odpornością na korozję i utlenianie w wysokich temperaturach, odpornością na ścieranie w skojarzeniach typu metal-metal. W czasie eksperymentów napawania wytworzono kilka ściągów z wykorzystaniem proszku stellitowego. W wyniku napawania drugiego ścięgu stellitu

(rys. 7) nastąpiło nagrzewanie promieniowaniem laserowym oraz topnienie warstwy wierzchniej pierwszego ściegu. Następstwem tego procesu była krystalizacja kierunkowa roztopionego materiału ze stanu ciekłego w stały (rys. 7b).

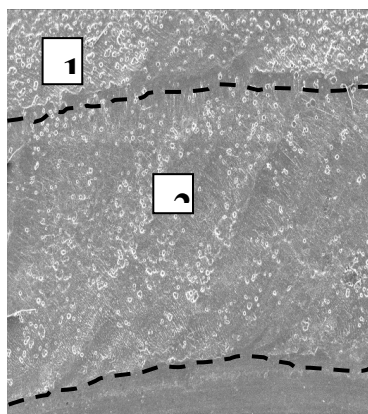
Tabela 1. Skład chemiczny proszku EuTroLoy 16006

Rodzaj proszku	C	Si	Cr	W	Ni	Mo	Fe	Co	Twardość napoiny
EuTroLoy 16006	1,2	1,2	28,8	4,9	2,2	< 0,1	2,0	Reszta	37-40 HRC

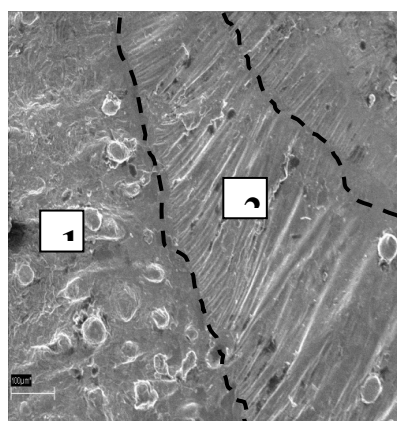
Tabela 2. Parametry napawania laserowego

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

a)

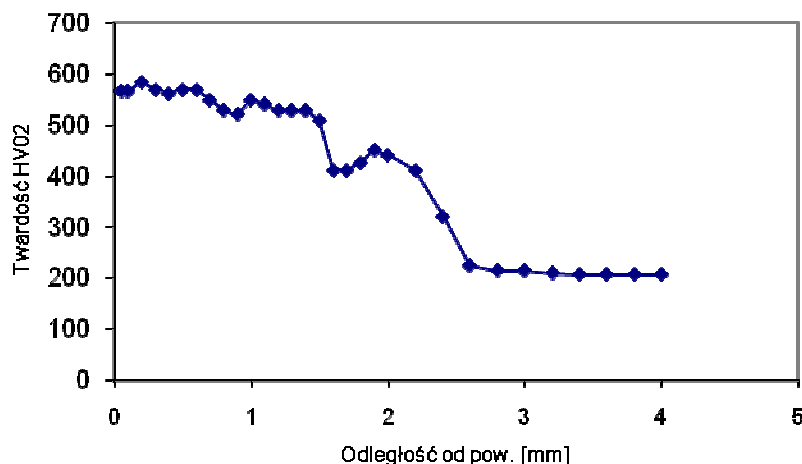


b)



Rys.7. Topografia napoiny laserowej na powierzchni roboczej zaworu wylotowego (strefa przyłgni oraz grzybka) po przetopieniu proszku EuTroLoy16006: 1- pierwsza warstwa, 2 – druga warstwa,

W wyniku nagrzewania podłoża następują także zmiany mikrostruktury oraz odpuszczanie głębiej położonych warstw pierwszego ściegu napoiny, co w istotny sposób wpływa na łagodny spadek mikrotwardości w tzw. strefie wpływu ciepła (SWC) o ok. 50÷70 HV0,2 (rys.8). Jak widać z rozkładu mikrotwardości grubość napoiny wynosi ok. 2 mm.



Rys. 8. Rozkład mikrotwardości w głąb przekroju poprzecznego napoiny wytworzonej techniką laserową w strefie przylgni grzybka zaworu wylotowego

Aby wytworzyć tego typu napoinę należy zużyć dużą ilość drogiego proszku stellitego. Wykonując kilka sciegów napoiny, wydłuża się znacznie czas procesu napawania. Reasumując: proces tego typu napawania jest drogi i małoekonomiczny, co znacznie zmniejsza perspektywy wdrożenia tej technologii na szeroką skalę w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym. Aby proces ten był nie tylko nowoczesny, ale także bardzo ekonomiczny, przeprowadzono analizę możliwości zastosowania napawania laserowego w skali mikro. W wyniku tych analiz stwierdzono, że należy odchodzić we współczesnych technologiach produkcji zaworów od stosowania grubych warstw stelliteowych w strefach przylgni zaworu. Z przeprowadzonych analiz zużycia przylgni zaworów wynika, że w zupełności wystarczy wytworzyć precyzyjną napoinę o grubości nie większej niż ok. 0,3 mm. Grubość tej napoiny po obróbce mechanicznej, tj. szlifowaniu może wynosić ok. 0,2 mm. Podobne wnioski nasunęły się co do stosowania napoin w strefie główki trzonka zaworu wylotowego. W celu zmniejszenia kosztów produkcji zaworów, producenci wytwarzają zawory bimetaliczne, stosując drugi materiał konstrukcyjny, tj. stal martenzytyczną zgrzewaną w strefie główki zaworu lub przed strefą grzybka zaworu. Materiał ten łatwo hartuje się, co pozwala uzyskać twardość w strefie główki zaworu większą niż 50 HRC. Nie zawsze jednak istnieje możliwość zgrzewania. Wtedy pozostaje jedynie wytworzenie napoiny o wysokiej twardości poprzez lokalne napawanie.

3. WSTĘPNE PRÓBY MIKRONAPAWANIA LASEROWEGO W NEURALGICZNYCH STREFACH ZAWORÓW WYLOTOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH

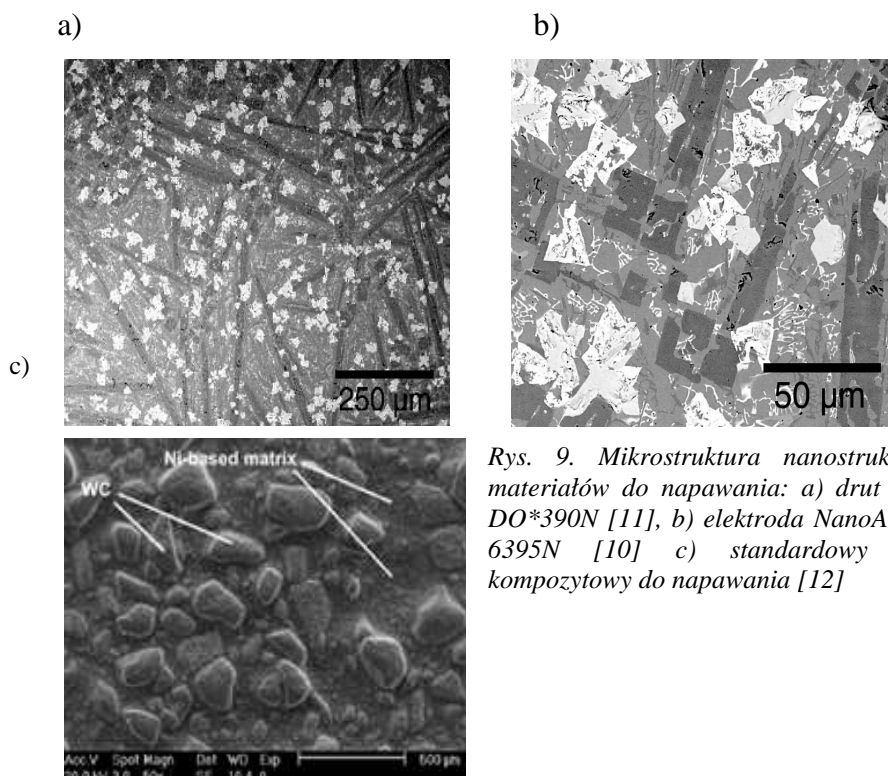
W procesach napawania stosuje się różnego rodzaju materiały dodatkowe w postaci proszków, drutów oraz elektrod m. in na bazie węglików wolframu (WC). Szybko rozwijająca się nanotechnologia umożliwia wytwarzanie materiałów nanostrukturalnych o odmiennych własnościach mechanicznych, elektrycznych, magnetycznych oraz optycznych od materiałów konwencjonalnych.

Wysokie własności nanostrukturalnych materiałów są coraz częściej wykorzystywane do produkcji nanodrutów oraz nanoelektrod w celu nakładania cienkich, precyzyjnych napoin. Pozwala to na uzyskanie warstw napawanych wysokiej twardości, utrzymanie wysokich własności mechanicznych w wysokich temperaturach, niskiego współczynnika tarcia, odporności na ścieranie i korozję. Pozwalają one również na zmniejszenie ilości zużycia materiału dodatkowego w porównaniu do innego tradycyjnego materiału przeznaczonego do napawania warstw odpornych na zużycie w warunkach tarcia [8, 9].

Obecnie na rynku polskim pojawił się nanodrut do napawania firmy Castolin EnDOtec DO*390N oraz elektroda NanoAlloy XHD 6395N. Pierwszy z wyżej wymienionych pozwala na zmniejszenie wartości zużycia spoiwa o około 37% , które wynika z jego niższej gęstości ($7,6 \text{ g/cm}^3$ a typowych spoiw na bazie Ni z węglnikami wynosi ok. 12 g/cm^3) [10].

W specyficznej nanostrukturze znajdują się cząstki faz węglików (MC) o dużej objętości, węglików boru $M_{23}(BC)$ oraz borków M_2B , rozmieszczonych równomiernie w drobnoziarnistej osnowie żelaza (rys.1a). Standardowe materiały kompozytowe stosowane do napawania warstw odpornych na zużycie w wyniku tarcia. Zawierają one bardzo twarde węgliki wolframu WC o nieregularnych kształtach, umieszczone zazwyczaj w osnowie o niższej twardości, na bazie Ni lub Fe (rys.1c). Podczas pracy, cząstki ścierające natychmiast „atakują” miękką osnowę, aż do stopniowego odsłaniania węglików, które w konsekwencji ulegają wykruszeniu bądź pękaniu. Zjawisko takie ma miejsce szczególnie w przypadku węglików o kształtach sferoidalnych (rys.1 c). To samo medium ścierające, w tych samych warunkach zużycia, nie jest zdolne do „ataku słabych punktów” stopiwa drutu EnDOtec DO*390N. Już pojedyncza warstwa DO*390N często wystarcza, aby uzyskać twardość powierzchni dochodzącą do 68-70 HRC pomimo niemożliwego do wyeliminowania zjawiska wymieszania materiałów. Specjalna nanostruktura stopiwa jest wyjątkowo odporna na tego rodzaju zużycie [10, 11].

W przypadku typowych spoiw na bazie Ni z węglnikami, takie samo wymieszanie materiału powoduje znaczne spadki twardości stopiwa, wymuszając więc napawanie kolejnych warstw. W celu uzyskania twardości zgodnej z tą podaną w kartach materiału. To prowadzi do zwiększenia kosztów robocizny oraz większego zużycia materiału dodatkowego napoiny. Bardzo interesującym zagadnieniem technologicznym wydaje się opracowanie technologii wytwarzania nanostrukturalnych napoin z wykorzystaniem nowoczesnych technologii inżynierii powierzchni, szczególnie laserowych (napawanie, mikronapawanie).



Rys. 9. Mikrostruktura nanostrukturalnych materiałów do napawania: a) drut EnDOTec DO*390N [11], b) elektroda NanoAlloy XHD 6395N [10] c) standardowy materiał kompozytowy do napawania [12]

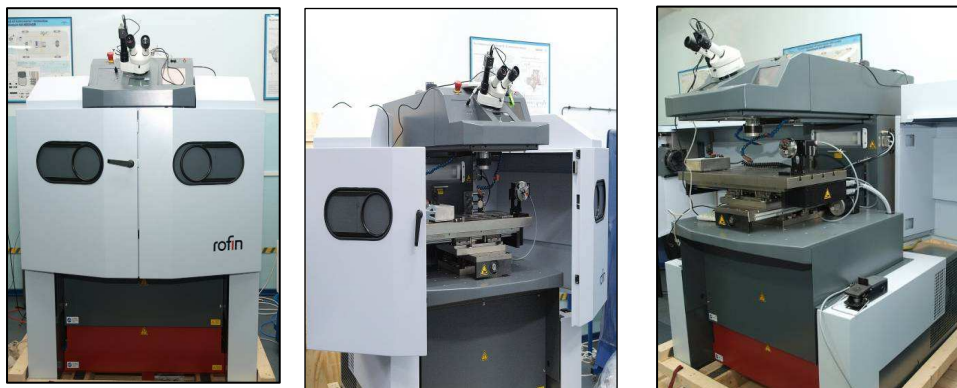
W ramach wstępnych badań laboratoryjnych wykonano próby mikronapawania laserowego stali zaworowej X53CrMnNiN 21-9 z zastosowaniem materiału dodatkowego - nanodrutu proszkowego EnDOTec DO390N firmy Castolin. Skład chemiczny ww. materiału dodatkowego przedstawiono w tabeli nr 3.

Tab.3. Skład chemiczny nanodrutu proszkowego wykorzystanego do napawania [10,11]

EnDOTec DO*390N	Fe + <5%C, <2,0%Si, <5,0%Mn, <20,0%Cr, <10,0%Mo, <10,0%Nb, <10,0%W, <5,0%B, twardość po napawaniu 71 HRC
-----------------	--

Napawanie laserowe przeprowadzono za pomocą impulsowego lasera Nd: YAG, firmy ROFIN model INTEGRAL (rys. 10), który znajduje się na wyposażeniu Laboratorium Inżynierii Powierzchni WME WAT. Podstawowe parametry lasera ROFIN INTEGRAL : laser - Nd: YAG, $\lambda=1064$ nm, działanie impulsowe, energia impulsu laserowego - do 100 J, moc znamionowa lasera - 200 W, maksymalna moc impulsu laserowego - 12 kW, częstotliwość impulsu laserowego - do 20 Hz, czas trwania impulsu laserowego

- 0,5–20 ms, średnica wiązki laserowej - 0,3 – 2,5 mm, mikroskop stereoskopowy umożliwiający obserwację procesu spawalniczego.



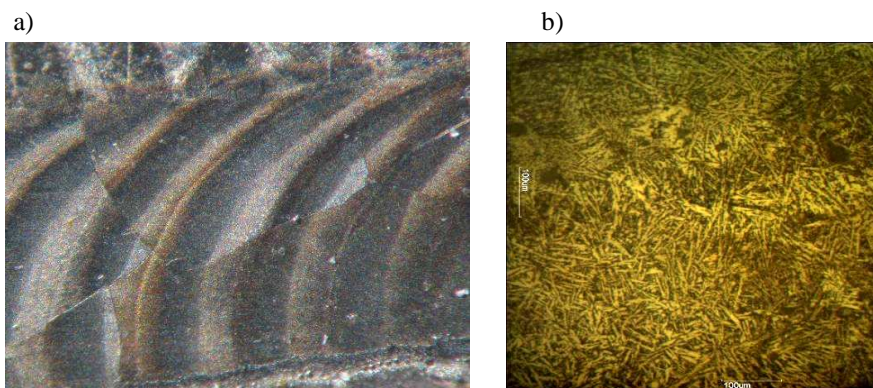
Rys. 10. Stanowisko laserowe ROFIN INTEGRAL stosowane do spawania i napawania

Badania topografii powierzchni oraz mikrostruktury wybranych napoin zostały przeprowadzone za pomocą mikroskopu stereoskopowego Zeiss Discovery V12 SteREO, optycznego XJP – 6A oraz skaningowego mikroskopu elektronowego Philips XL 30 LaB6. Analizę składu chemicznego materiału rodzimego oraz wytworzonych napoin w charakterystycznych mikroobszarach wykonano na ww. mikroskopie skaningowym, wykorzystując przystawkę EDAX, umożliwiającą analizę jakościową oraz ilościową w mikroobszarach badanych próbek. Pomiar mikrotwardości materiału rodzimego oraz napoin w charakterystycznych strefach wykonano za pomocą mikrotwardościomierza Future – Tech FM – 700.

W ramach badań podstawowych napoin zbadano ich mikrostrukturę, skład chemiczny w mikroobszarach oraz mikrotwardość. W niniejszym artykule przedstawiono tylko wybrane wyniki badań napoin wytworzonych techniką laserową z wykorzystaniem nanodrutu proszkowego Castolin EnDotec DO390N.

Próby wykonano przy różnych parametrach obróbki, stosując różną gęstość energii, częstotliwości repetycji, czas trwania impulsu laserowego oraz zakładkę 50% dla obu gatunków materiałów podłoża.

Widok wykonanych napoin przedstawiono na rys. 11. W wyniku precyzyjnego napawania laserowego przy różnych parametrach uzyskano poprawne technologicznie lica napoin. Poprawny wtop w warstwę wierzchnią stali zaworowej, uzyskano w wyniku przetapiania laserowego nanodrutu proszkowego, czego wynikiem był właściwy kształt lica napoiny. Ze względu na duży szok termiczny jaki dostarczono łączonym materiałom, powstały dość liczne makro- i mikropęknięcia napoiny.



Rys. 11. Nanostrukturalna mikroapoina wytworzona techniką laserową na stali zaworowej austenitycznej X53CrMnNiN 21-918N9 przy użyciu nanodrudu proszkowego Castolin EnDOtec DO390N: a) widok lica napoiny (pow.70x), b) wysokodispersyjna mikrostruktura napoiny (pow. 500x)

W wyniku napawania materiału austenitycznej stali zaworowej wytworzono mikronapoiny o bardzo dużej mikrotwardości 900 – 11 HV0,1. Wystąpiły jednak mikropełnienia w strefie napoiny. Można przypuszczać, że stosując wstępne podgrzewanie materiału podłoża oraz wykorzystanie nanodrudów o małej średnicy (0,6 – 0,8 mm) możliwe jest uzyskanie precyzyjnych mikronapoin o wysokich własnościach technologicznych. Tak wytworzone warstwy technologiczne mogą mieć perspektywiczne zastosowanie w produkcji zaworów, w celu wzmacniania newralgicznych stref (przyłgna, główka trzonka zaworu) oraz podwyższenia właściwości tribologicznych, zwłaszcza odporności na zużycie przez tarcie.

4. WNIOSKI

1. Warstwa napawana laserowo proszkiem stelitowym EuTroLoy 16006 w strefie przyłgni zaworu, cechuje się wysoką jednorodnością, bez wtrąceń i pęknięć. Mikrostrukturę 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 wielkości i kształt dendrytycznych wydzieleni fazowych.
2. W wyniku napawania laserowego drugiego ściegu stelittem typu F6, w pierwszym etapie następuje nagrzewanie promieniem lasera oraz topnienie warstwy wierzchniej pierwszego ściegu, nagrzewanie, topnienie i nakładanie roztopionego proszku w stanie ciekłym na podłoże pierwszego ściegu stelitowego, krystalizacja kierunkowa roztopionego materiału ze stanu ciekłego w stały z jednoczesnymi przemianami fazowymi. 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.
3. Z przeprowadzonych analiz technologicznych wynika, że zarówno w tradycyjnych metodach napawania łukowego TIG, napawania plazmowego oraz nowoczesnego napawania laserowego, zostają wytwarzane zbyt grube napoiny. Generuje to znaczne koszty ich wytwarzania oraz obróbki mechanicznej. Celowym wydaje się podjęcie prac badawczych w zakresie mikronapawania laserowego w newralgicznych strefach zaworu, tj. w strefie przylgni oraz główki trzonka zaworu.
 4. Wykorzystując nowoczesne lasery z optycznym układem monitorowania przeprowadzono pierwsze próby mikronapawania proszkiem stelitowym EuTroLoy 16006 oraz nanodrutem EnDOtec DO*390N firmy Castolin. Przeprowadzona analiza mikrostruktury wykazała powstanie mikro- i nanostruktury, w której cząstki faz węglików (MC) o dużej objętości, węglików boru $M_{23}(BC)$ oraz borków M_2B są rozmieszczone w drobnoziarnistej osnowie żelaza. Ze względu na kilkukrotne przetapianie laserowe warstwy napoiny, stwierdzono zróżnicowanie składu chemicznego w mikroobszarach oraz dużą niejednorodność mikrostruktury.
 3. Twardość na powierzchni nanostrukturalnej mikronapoiny wynosiła 68-72 HRC. Pomiar mikrotwardości w przekroju poprzecznym wykazały bardzo wysokie wartości wynoszące nawet 990 – 1100 HV0,1. Na wysoką wartość mikrotwardości ma zapewne wpływ skład chemiczny oraz nanokrystaliczna mikrostruktura proszku będącego głównym składnikiem nanodrutu. Tak wytworzona nanostrukturalna mikrowarstwa może mieć zastosowanie w procesie napawania główki trzonka zaworu wylotowego.
 4. Uzyskane wyniki nie są zadowalające ze względu na liczne mikropęknięcia, dlatego należy prowadzić dalsze badania laboratoryjne nad opracowaniem technologii mikronapawania laserowego z użyciem nanodrutów proszkowych. Można przypuszczać, że stosując wstępne podgrzewanie materiału austenitycznej stali zaworowej oraz nanodrutu proszkowego o małej średnicy (0,6 – 0,8 mm), możliwe jest uzyskanie precyzyjnych mikro- i makronapoin o bardzo wysokich walorach technologicznych.
 5. W ramach dalszych badań laboratoryjnych nad technologią wytwarzania mikronapoin na stali zaworowej z wykorzystaniem precyzyjnej techniki laserowej, w najbliższej przyszłości planuje się przeprowadzenie badań kompleksowych w zakresie doboru parametrów mikronapawania, badania mikrostruktury, mikrotwardości, badania tribologiczne oraz odporności na korozję gazową.

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] Włodarski J.K.: *Tłokowe silniki spalinowe – procesy tribologiczne*. WPW, Warszawa 1992
- [4] Burakowski T., Wierzchoń T.: *Inżynieria powierzchni metali*. WNT, Warszawa 1995
- [5] Bojar Z., Przetakiewicz W., Ziencik H.: *Materiałoznawstwo, t. II Metaloznawstwo*. WAT, Warszawa 1995
- [6] Klimpel A, Mazur M.: *Podręcznik spawalnictwa*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004.
- [7] Klimpel A.: *Napawanie i natryskiwanie cieplne*. Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa 2000.
- [8] Dobrzański L. A.: *Kształtowanie struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich i biomedycznych*. OCSCO, Gliwice 2009.
- [9] Dręczewski B., Herman A., Wroczyński P.: *Nanotechnologia: stan obecny i perspektywy*. Gdańsk 1997.
- [10] Messer Eutectic Castlin Sp.zo.o, www.castolin.com.pl/wCastolin_pl/index.php.
- [11] Dr. Gary R.: *Heath Nanotechnology and welding – actual and possible future applications*. Wear & Fusion Technology, Castolin Eutectic
- [12] [http://tm-consultants.com/proszki.htm#Sferoidalny Węglík Wolframu](http://tm-consultants.com/proszki.htm#Sferoidalny_Węglík_Wolframu).