

Wojciech NAPADŁEK*, Agnieszka LABER**

**BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI
WYSOKODYSERSYJNYCH NAPOIN
WYTWORZONYCH TECHNIKĄ LASEROWĄ
PRZEZNACZONYCH NA ELEMENTY MASZYN
O PODWYŻSZONEJ ODPORNOŚCI NA ZUŻYCIE
W WARUNKACH TARCIA**

**THE INVESTIGATION OF CHOSEN PROPERTIES OF
HIGH DISPERSION PADDING WELDS PRODUCED THE
LASER TECHNIQUE OF DESIGNED ON UNITS MACHINE
ENGINES ABOUT RAISED RESISTANCE ON WASTE IN
THE CONDITIONS OF THE FRICTION**

Słowa kluczowe:

stal kwasoodporna, nanodrut proszkowy, napoina laserowa, mikrostruktura, skład chemiczny, mikrotwardość

* Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49, tel.: (22) 683-73-57, kom. 664494297 e-mail: wnapadlek@wat.edu.pl.

** Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49, tel.: (22) 683-73-57, kom. 664494297 e-mail: wnapadlek@wat.edu.pl oraz Poszukiwania Naftowe „DIAMENT” Sp. z o.o., ul. Naftowa 3, 65-705 Zielona Góra, Serwis Mechaniczny.

Key words:

acid resistant steel, pulveraceous nanowire, laser padd weld, microstructure, chemical composition, microhardness

Streszczenie

W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań laboratoryjnych w zakresie wytwarzania wysokodispersyjnych napoin z nanodrutu proszkowego Castolin EnDOTec DO390N na stali kwasoodpornej 0H18N9 z wykorzystaniem techniki laserowej. Przedstawiono topografię powierzchni lica napoin dla wybranych parametrów obróbki laserowej. Ze względu na specyficzny skład chemiczny stali kwasoodpornej oraz materiału napoiny, a także duży szok termiczny, jaki powstał w procesie napawania laserowego stwierdzono liczne makro- i mikropęknięcia napoiny. Badania mikrostruktury wykazały wysokodispersyjną mikro- i nanostrukturę, 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 duże zróżnicowanie składu chemicznego w mikroobszarach oraz dużą niejednorodność mikrostruktury. Twardość powierzchni ww. napoiny wynosiła 68–72 HRC. Pomiary mikrotwardości w przekroju poprzecznym wykazały bardzo wysokie wartości wynoszące nawet 990–1100 HV0,1. Uzyskane wyniki nie są zadowalające ze względu na liczne mikropęknięcia, dlatego należy prowadzić dalsze badania laboratoryjne nad opracowaniem technologii mikroonapawania laserowego z użyciem nanodrutów proszkowych o małych średnicach (0,6–0,8 mm).

WPROWADZENIE

Dynamiczny rozwój przemysłu wymusza wytwarzanie nowoczesnych materiałów inżynierskich w celu optymalizacji własności, a co za tym idzie wydłużenia czasu eksploatacji elementów maszyn i urządzeń, zminimalizowania powstawania odpadów i zanieczyszczenia środowiska. Taką perspektywę rozwoju stwarza szybko rozwijająca się nanotechnologia obejmująca naukę i inżynierię dotyczącą wytwarzania materiałów, struktur funkcjonalnych i urządzeń uporządkowanych w skali nanometrycznej.

W technice przedrostek „nano” odpowiada 10^{-9} [m], więc nanostrukturalne materiały mogą zawierać do kilkudziesięciu tysięcy atomów [L. 1].

Nanostrukturalne materiały wymagają zatem precyzyjnego lokowania atomów lub ich grup oraz kontrolowania wielkości i składu utworzonych ziaren lub bloków, co skutkuje poszukiwaniem unikatowych metod technologicznych.

Materiały nanostrukturalne to przykładowo kropki i druty kwantowe, cząstki, nanorurki, nanopręty, nanokryształy, metale, fazy międzymetaliczne, półprzewodniki, minerały, kompozyty, stopy, materiały organiczne, polimery, struktury i urządzenia funkcjonalne. Wymienione materiały mają zastosowanie m.in. w kosmonautyce, lotnictwie, przemyśle samochodowym, optoelektronice, medycynie oraz farmacji, na narzędzia skrawające, powłoki oraz systemy mikro- i nanomechaniczne MEMS/ NEMS.

Trzeba nadmienić, że materiały nanostrukturalne wykazują odmienne własności mechaniczne, elektryczne, magnetyczne oraz optyczne od materiałów konwencjonalnych. Przykładowo ziarna miedzi wielkości 6 nm mają twardość pięciokrotnie większą od miedzi konwencjonalnej. Wśród materiałów nanostrukturalnych istotne miejsce zajmują materiały metalowe otrzymywane wskutek krystalizacji szkieł metalicznych [L. 2].

Powyższe materiały otrzymywane są metodą odlewania na szybko wirujący walec miedziany a następnie poddawane nanokrystalizacji cieplnej w trakcie wygrzewania w odpowiedniej temperaturze. Podczas nanokrystalizacji w wyniku zarodkowania i wzrostu w amorficznej osnowie stopu wydzielają się nanokrystaliczne cząstki roztworu o składzie osnowy, np. $Al\alpha$, $Ni(Mo)\gamma$, $Fe\alpha$, $Fe(Si)\alpha$, $Co\alpha$, jak również faz międzymetalicznych odpowiadających składowi stopu, np. $TiCo$, $TiNi$, $Fe_{14}Nd_2B$, $Fe_{14}Pr_2B$, Co_3B , Co_2B . W zależności od składu chemicznego w ten sposób powstałego materiału nanostrukturalnego uzyskuje się poprawę własności mechanicznych lub fizycznych. [L. 2].

Znaczne miejsce w inżynierii materiałowej zajmują nanodruty metalowe. W porównaniu z innymi systemami niskowymiarowymi mają dwa kierunki kwantowo ograniczone, w wyniku czego pozostaje jeden możliwy kierunek przewodnictwa elektrycznego. Ze względu na cechującą je wyjątkową gęstość stanów elektronowych, nanodruty wykazują odmienne własności optyczne, elektryczne i magnetyczne od ich trójwymiarowych, litych odpowiedników krystalicznych [L. 1, 2].

W technice spawalniczej dąży się również do nakładania cienkich, precyzyjnych powłok napawanych. Pozwala to na uzyskanie bardzo wy-

sokiej odporności na ścieranie i korozję, bardzo wysokiej twardości warstw napawanych, utrzymanie wysokich własności mechanicznych w wysokich temperaturach oraz bardzo niski współczynnik tarcia.

Wprowadzenie na rynek nowoczesnych nanostrukturalnych drutów lub proszków do napawania umożliwia wykonywanie precyzyjnych napoin. Pozwalają one na zmniejszenie ilości zużycia materiału dodatkowego w porównaniu z innym tradycyjnym materiałem przeznaczonym do napawania warstw odpornych na zużycie w warunkach tarcia.

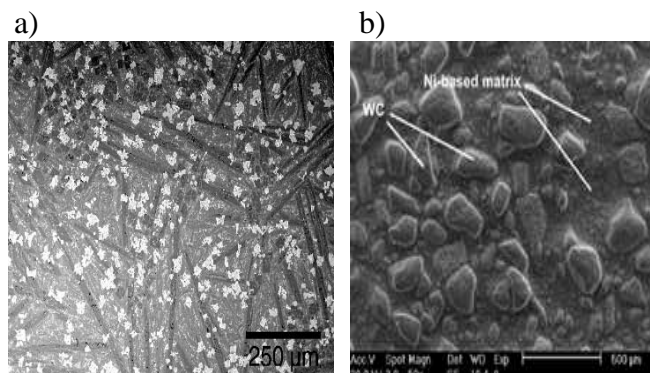
Obecnie na rynku polskim pojawił się nanodrut do napawania firmy Castolin EnDOtec DO*390N oraz elektroda NanoAlloy XHD 6395N. Pierwszy z wyżej wymienionych pozwala na zmniejszenie zużycia spoiwa o około 37%, na co wpływa niższa jego gęstość ($7,6 \text{ g/cm}^3$, a typowych spoiw na bazie Ni z węglnikami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

Specjalna nanostruktura to 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 przez tarcie (np. ścierne abrazyjne) zawierają bardzo twarde węgliki wolframu WC o nieregularnych kształtach, umieszczone zazwyczaj w osnowie o niższej twardości, na bazie Ni lub Fe (**Rys. 1c**). Podczas pracy, cząsteczki 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. 1c**). 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 [**L. 5, 6**].

W przypadku typowych spoiw na bazie Ni z węglnikami, takie samo wymieszanie materiału powoduje znaczne spadki twardości stopiwa, wymuszają więc napawanie kolejnych warstw, w celu uzyskania twardości zgodnej z tą podaną w kartach materiału. Prowadzi to do zwiększenia kosztów robocizny oraz większego zużycia materiału dodatkowego napoiny.

Bardzo interesującym zagadnieniem technologicznym wydaje się opracowanie technologii wytwarzania nanostrukturalnych napoin z wyko-

rzystaniem nowoczesnych technologii inżynierii powierzchni. Wśród tych technologii na szczególną uwagę zasługują technologie laserowe [L. 4, 7].



Rys. 1. Mikrostruktura: a) drut EnDOtec DO*390N, b) standardowy materiał kompozytowy do napawania [L. 4]

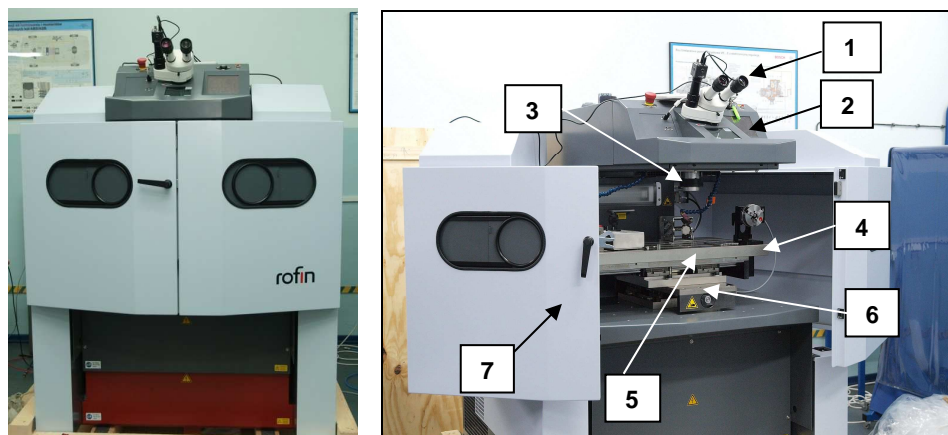
Fig. 1. The Microstructure of materials to filling with: a) the wire EnDOtec TO*390 N, b) standard kompozite makings to pad welding [L. 4]

BADANIA WŁASNE

W artykule przedstawiono wyniki pilotażowych badań nanostrukturalnych napoin wykonanych na stali konstrukcyjnej niestopowej S235JR oraz stali nierdzewnej, kwasoodpornej 0H18N9, których skład chemiczny przedstawiono w **Tab. 1**.

Nanostrukturalne napoiny wytworzono na ww. materiałach techniką laserową z zastosowaniem jako materiału dodatkowego nanodrutu proszkowego Castolin EnDOtec DO390N. Dodatkowo w celach porównawczych poprzez napawanie ręczne wykonano napoinę ww. drutem metodą TIG oraz elektrodą otuloną NanoAlloy XHD 6395 firmy Castolin. Tak wytworzone napoiny dodatkowo zmodyfikowano przez przetopienie laserowe. Skład chemiczny ww. materiałów przedstawiono w **Tabeli 2**.

Napawanie laserowe przeprowadzono z wykorzystaniem impulsowego lasera Nd: YAG, firmy Rofin model Integral (**Rys. 2**), który jest na wyposażeniu Laboratorium Inżynierii Powierzchni WME WAT.



Rys. 2. Laser Nd: YAG firmy Roфин przeznaczony do spawania i napawania materiałów konstrukcyjnych: 1 – układ optyczny do obserwacji, 2 – pulpit sterujący, 3 – układ optyczny lasera, 4 – obrotnik, 5 – stół X-Y sterowany CNC, 6 – moduł umożliwiający przesuwanie w osi Z, 7 – obudowa ochronna lasera

Fig.2. The laser Sun: THE YAG of the firm Roфин designed to welding and filling with constructional materials: 1 – optical arrangement to observation, 2 – desk top steering, 3 – the optical arrangement of the laser, 4 – obrotnik, 5 – the table X-Y steered CNC, 6 – the module enabling shoves in the axis From, 7 – the protective casing of the laser

Podstawowe parametry lasera Roфин Integral: rodzaj lasera – Nd: YAG, $\lambda = 1064$ nm, o działaniu impulsowym, 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.

Badania topografii powierzchni oraz mikrostruktury wybranych połączeń spajanych 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, tj. spektrometr dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego, który umożliwia analizę jakościową oraz ilościową w mikroobszarach badanych preparatów. Pomiar

mikrotwardości materiału rodzimego oraz napoin w charakterystycznych strefach wykonano na mikrotwardościomierzu PMT-3.

W ramach badań podstawowych napoin zbadano ich mikrostrukturę, skład chemiczny w mikroobszarach oraz mikrotwardość. Ze względu na ograniczenia objętościowe artykułu zostały przedstawione tylko wybrane wyniki z badań napoiny wytworzonej techniką laserową z wykorzystaniem nanodrutu proszkowego Castolin EnDotec DO390N na stali kwasoodpornej 0H18N9.

Tab. 1. Skład chemiczny materiałów podłoża przeznaczonych do napawania wg EN 10025-2:2004

Table 1. The chemical composition of the materials of the base paper designed to pad welding EN 10025

Gatunek materiału podłoża	Skład chemiczny materiału										
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Al	N	Mo	Cu
	max %	max %	max %	max %	max %	max %	max %	min %	%		
S235 JR	0,17	1,4	–	0,045	0,045	–	–	–	0,009	–	–
0H18N9	≤0,12	≤2,0	≤0,8	≤0,045	≤0,030	17,0– –19,0	8,0– –10,0	–	–	–	–

Tab. 2. Skład chemiczny materiałów dodatkowych wykorzystanych do napawania [L. 4, 6]

Table 2. The chemical Composition of additional materials used to pad welding [L. 4, 6]

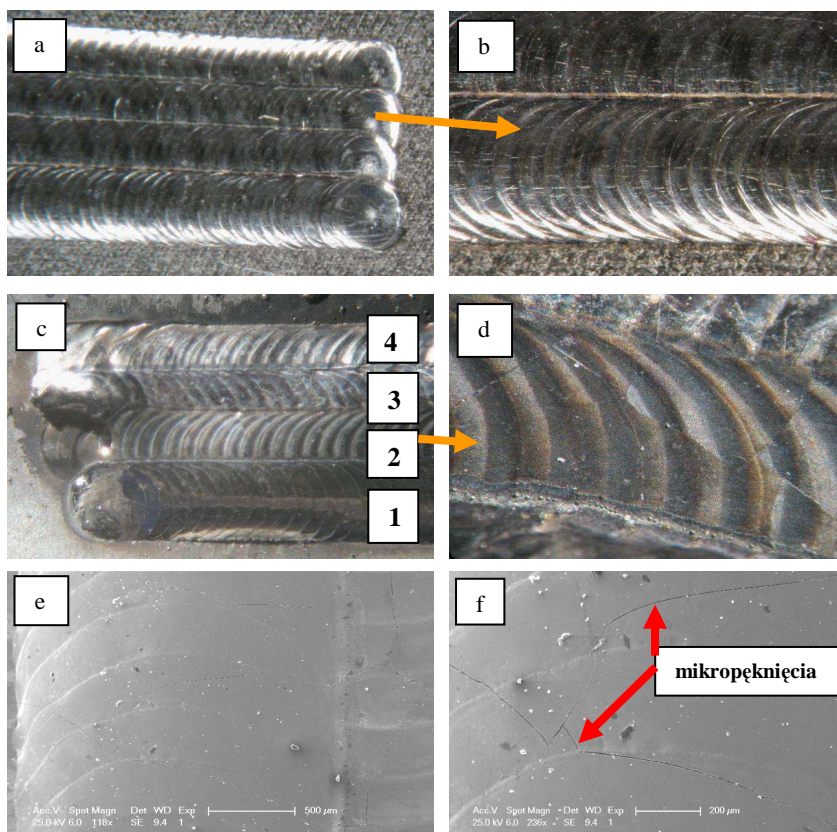
EnDotec DO*390N	Fe + <5%C, <2,0%Si, <5,0%Mn, <20,0%Cr, <10,0%Mo, <10,0%Nb, <10,0%W, <5,0%B 71 HRC
NanoAlloy XHD 6395	Fe + <5%C, <2,0%Si, <5,0%Mn, <20,0%Cr, <10,0%Mo, <10,0%Nb, <10,0%W, <5,0%B 71 HRC

Próby wykonano przy różnych parametrach obróbki, stosując różną gęstość energii, częstotliwości repetycji, czas trwania impulsu laserowego oraz zakładkę 50%. Przykładowe warianty parametrów obróbki laserowej przedstawiono w **Tabeli 3**.

Tabela 3. Parametry obróbki laserowej dla czterech wariantów

Table 3. Parameters of laser processing for four variants

Nr wariantu obróbki	Parametry
1	Gęstość energii – 1548 J/cm ² , częstotliwość repetycji – 1 Hz, czas trwania impulsu – 4,5 ms, zakładka 50%, dwa przejścia.
2	Gęstość energii – 29997 J/cm ² , częstotliwości repetycji – 1 Hz, czas trwania impulsu – 4,5 ms, zakładka 50%, trzy przejścia.
3	Gęstość energii – 1548J/ cm ² , częstotliwość repetycji – 1 Hz, czas trwania impulsu – 4,5 ms, zakładka 50%, trzy przejścia.
4	Gęstość energii – 1548J/ cm ² , częstotliwości repetycji – 1 Hz, czas trwania impulsu – 4,5 ms, zakładka 50%, dwa przejścia.



Rys. 3. Napoiny wykonane technologią laserową z wykorzystaniem nanodrutu proszkowego Castolin EnDOtec DO390N na stali kwasoodpornej 0H18N9 (warianty podano w Tabeli 3)

Fig. 3. Pad welds executed the laser technology from utilization of nanowire pulveraceous Castolin EnDOtec DO390 N on acid resistant steel 0H18N9 (variants were passed in Table 3)

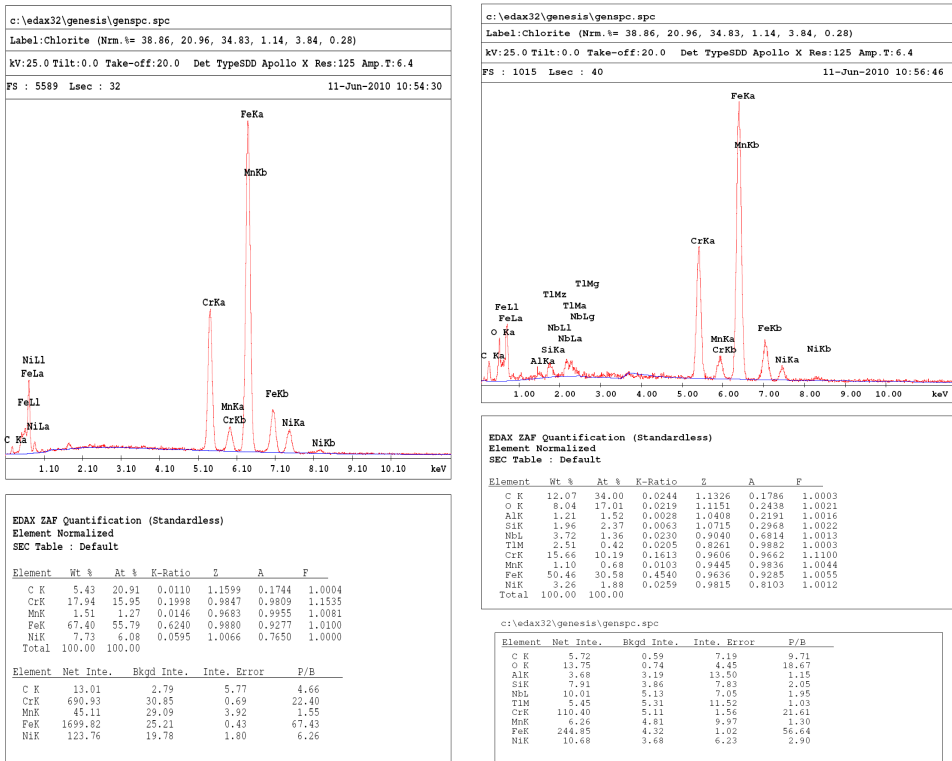
Widok wykonanych napoin przedstawiono na **Rys. 3**. W wyniku precyzyjnego napawania laserowego przy różnych parametrach uzyskano poprawne technologicznie lica napoin, mimo że średnica nanoproszkowego drutu była zbyt duża (1,6 mm), jak na wymagania dla tego typu lasera (maks. 0,8 mm). Poprawny wtop w warstwę wierzchnią stali kwasoodpornej oraz właściwy kształt lica napoiny uzyskano w wyniku dwu- i trzykrotnego przetapiania laserowego opisywanego wyżej nanodrutu proszkowego. Niestety ze względu na specyficzny skład chemiczny stali kwasoodpornej oraz materiału napoiny, a także duży szok termiczny, jaki dostarczony łączonym materiałem spowodowały, że powstały dość liczne makro- i mikropęknięcia napoiny (**Rys. 3d-f**).

Duża szybkość nagrzewania i topnienia materiałów, bardzo duży ich skurcz oraz ultraszybkie przemiany fazowe przyczyniły się także w bardzo dużym stopniu do kumulowania się lokalnych naprężeń stycznych i normalnych o znaku dodatnim (rozciągające). Proces napawania prowadzono na zimno, bez wstępnego podgrzewania materiału podłoża. Chłodzenie po napawaniu prowadzono w powietrzu. Miało to istotny wpływ na proces degradacji napoiny.

Najmniejszą liczbę pęknięć uzyskano przy parametrach napawania w wariantcie nr 2 (**Tabela 3**). Aby w przyszłości uniknąć pęknięć, należy przed procesem napawania laserowego zastosować wstępne podgrzanie materiału stali kwasoodpornej.

W ramach dalszych badań laboratoryjnych napoin wykonano ich przekroje poprzeczne, zgłady metalograficzne, badania mikrostruktury, analizę składu chemicznego w mikroobszarach oraz pomiary mikrotwardości. Wyniki badań składu chemicznego przedstawiono na **Rys. 4**.

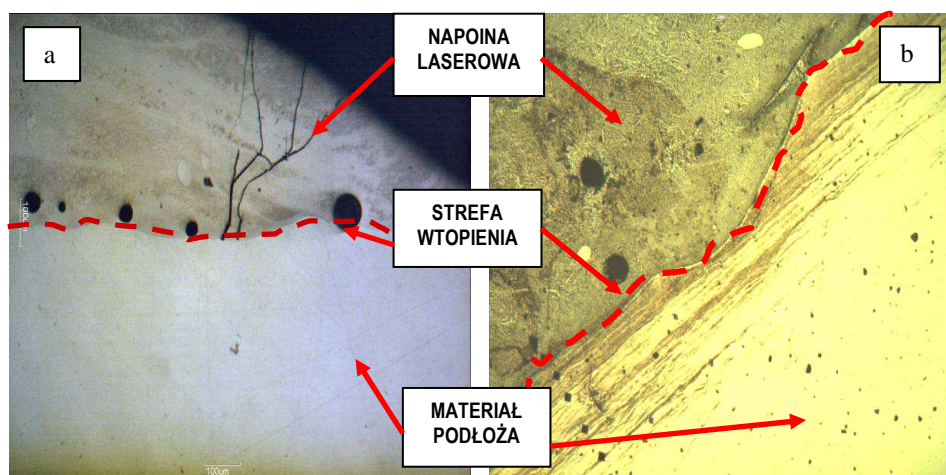
Z badań składu chemicznego w mikroobszarach wykonanych na mikroskopie scanningowym (z przystawką EDAX) w strefie materiału rodzimego (**Rys. 4a**) oraz w kilkunastu strefach napoin wykonanych techniką laserową przy różnych parametrach obróbki (**Rys. 4b**) wynika, że skład chemiczny stali kwasoodpornej jest zgodny z obowiązującą normą EN 10025-2:2004. Skład chemiczny wytworzonych napoin odpowiada także wartościom podawanym przez producenta nanodrutu, tj. firmę Castolin [**L. 4, 6**]. W wyniku dwu- i trzykrotnego przetapiania laserowego uzyskano mikrostrukturę o bardzo dużej dyspersji, dużej niejednorodności oraz zróżnicowanym składzie chemicznym w mikroobszarach, co nie jest wynikiem pozytywnym.



Rys. 4. Skład chemiczny w mikroobszarach: a) strefa materiału rodzimego, b) strefa napoiny
 Fig. 4. The chemical composition in microterritory a) the zone of the native material, b) the pad zone

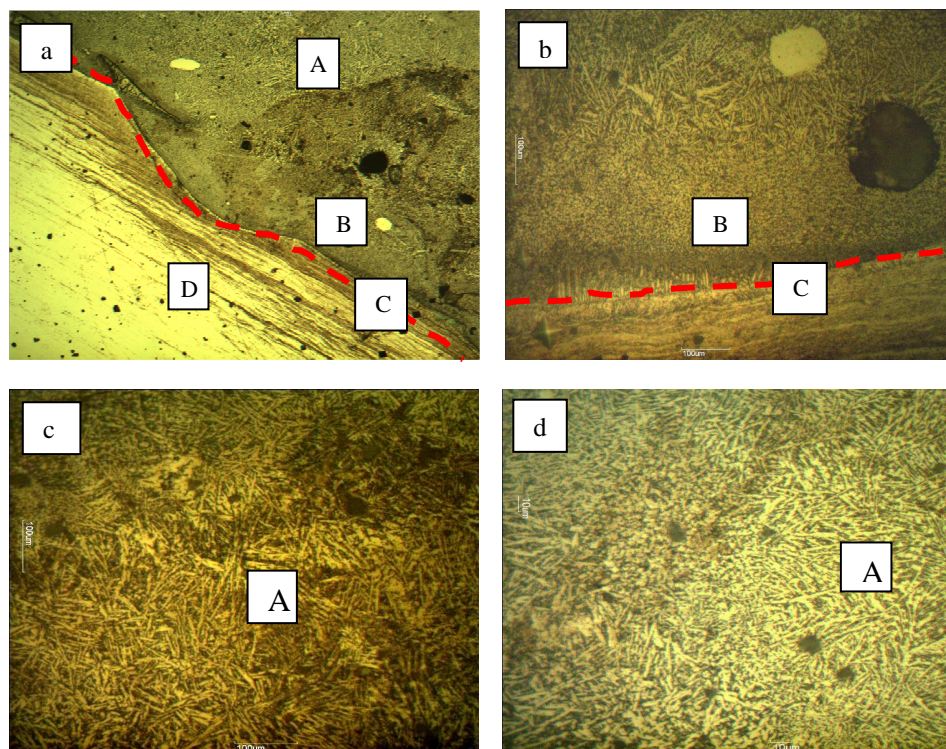
W wyniku badań jakości napoiny w jej przekroju poprzecznym stwierdzono dobre połączenie z materiałem podłoża, niestety z licznymi pęknięciami, porami i jamami usadowymi (**Rys. 5, 6a, b**).

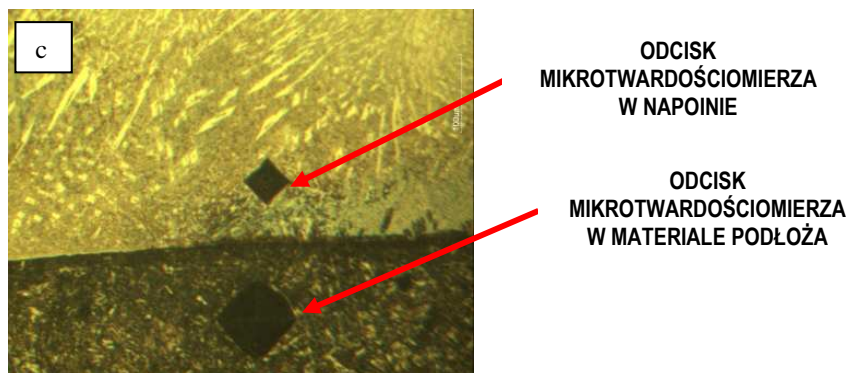
Z rozkładu mikrotwardości wynika, że w wyniku napawania laserowego stali kwasoodpornej 0H18N9 z użyciem nanodrudu proszkowego Castolin EnDOtec DO390N uzyskano w strefie przypowierzchniowej napoiny dla wariantu nr 2 i 3 bardzo wysoką mikrotwardość 990–1100 HV_{0,1} (**Rys. 7**). W wariacie nr 1 uzyskano nieco mniejszą mikrotwardość, tj. ok. 440–550 HV_{0,1}. W tym wariacie wystąpiło łagodne przejście materiału napoiny i materiału rodzimego (prawdopodobnie wystąpiło ich wzajemne wymieszanie). W dwóch wcześniejszych wariantach rozkład ten jest zgoła odmienny, tj. widać wyraźną granicę między materiałem napoiny, której grubość wynosi zależnie od stosowanego wariantu



Rys. 5. Przekrój poprzeczny napoiny z widoczną strefą wtopienia: a) przed trawieniem, b) po trawieniu FeCl_3 , powiększenie $50\times$

Fig. 5. Cut transverse pad weld with the visible zone of setting: a) before digestion, b) after digestion of FeCl_3 , increase $50\times$





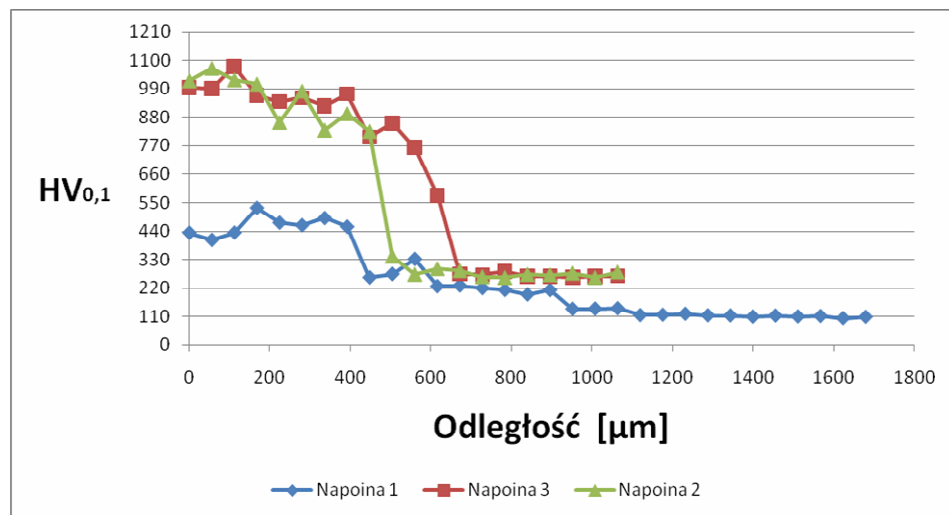
Rys. 6. Mikrostruktura napoiny wykonanej techniką laserową: a, b) strefa wtopienia w materiał rodzimy (stal 0H18N9), c, d) środek napoiny, e) strefa wtopienia z widocznymi odciskami mikrotwardościomierza przy obciążeniu 100G, A – D – charakterystyczne strefy napoiny

Fig. 6. Microstructure pad weld made the laser technique: a, b) zone of setting in native material (steel 0 H18 N9), c, d) the centre pad weld, e) zone of setting with visible imprints microhardness near the duty 100 G, A – D – characteristic zones pad weld.

od 450–750 μm . Wykresy rozkładu mikrotwardości dla wariantu 2 i 3 napawania laserowego w strefie wtopienia gwałtownie załamują się w dół, co świadczy o małym wymieszaniu napoiny z podłożem oraz o bardzo dużej różnicy w mikrotwardości (materiał podłoża ma mikrotwardość ok. 110 HV_{0,1} a napoiny nawet 1100 HV_{0,1}). Tak więc osiągnięto pozytywny efekt technologiczny. Na tak wysokie wartości mikrotwardości ma zapewne wpływ skład chemiczny oraz nanokrystaliczna mikrostruktura proszku będącego głównym składnikiem nanodrutu. Na tak dobry efekt miały również wpływ ultraszybkie procesy nagrzewania, topnienia i krystalizacji występujące przy napawaniu laserowym. Niestety, jak już wielokrotnie wspomniano, bardzo istotnym mankamentem są mikropęknięcia, które obniżają walory techniczne uzyskanych napoin.

Można przypuszczać, że stosując wstępne podgrzewanie materiału stali kwasoodpornej oraz nonanodrutu proszkowe o małej średnicy (0,6–0,8 mm) możliwe jest uzyskanie precyzyjnych mikro- i makronapoin o bardzo wysokich walorach technologicznych. Tak wytworzone warstwy technologiczne mogą mieć zastosowanie w wielu elementach maszyn w celu znacznego podwyższenia właściwości tribologicznych ich warstwy wierzchniej, zwłaszcza odporności na zużycie w warunkach tarcia (w tym ściernie abrazyjne), erozji itp.

W ramach dalszych eksperymentów laboratoryjnych na ww. napoinach w najbliższej przyszłości planuje się przeprowadzenie badań na zużycie w warunkach tarcia z wykorzystaniem nowoczesnych maszyn tribologicznych.



Rys. 7. Rozkład mikrotwardości w przekroju poprzecznym napoiny wykonanej techniką laserową na stali kwasoodpornej 0H18N9 z zastosowaniem nanodrudu proszkowego Castolin EnDOtec DO390N przy różnych parametrach procesu (z Tabeli 3)

Fig. 7. Schedule of microhardness in intersection transverse pad weld of made the laser technique on acid-resistant steel 0H18 N9 with the use nanowire pulveraceous Castolin EnDOtec DO390 N near the various parameters of the process (from Table 3)

WNIOSKI

1. Pilotażowe badania laboratoryjne w zakresie wytwarzania techniką laserową na stali kwasoodpornej 0H18N9 wysokodyspersyjnych, nanostrukturalnych napoin z zastosowaniem jako materiału dodatkowego nanodrudu proszkowego Castolin EnDOtec DO390N potwierdziły celowość dalszych badań oraz przyszłość tej technologii w inżynierii produkcji i regeneracji elementów maszyn.
2. Precyzyjne napawanie laserowe przeprowadzone z wykorzystaniem impulsowego lasera diodowego Nd:YAG, firmy Rofin model Integral z wykorzystaniem ww. nanodrudu proszkowego, ze względu na jego dużą średnicę (1,6 mm) oraz konieczność właściwego jego

- wtopienia w materiał podłoża, prowadzone było poprzez dwu- i trzykrotne przetapianie. Skład chemiczny stali kwasoodpornej oraz materiału napoiny, a także duży szok termiczny, jaki dostarczono łączonym materiałom były przyczyną powstania dość licznych makro- i mikropeęknięć napoiny.
3. Przeprowadzone badania mikrostruktury wykazały wysokodyspersyjną mikro- i nanostrukturę, 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 duże zróżnicowanie składu chemicznego w mikroobszarach oraz dużą niejednorodność mikrostruktury.
 4. Twardość powierzchni ww. napoiny wynosiła 68–72 HRC. Pomiarzy mikrotwardości w przekroju poprzecznym wykazały bardzo wysokie wartości wynoszące nawet 990–1100 HV 0,1. Na tak wysokie wartości mikrotwardości ma zapewne wpływ skład chemiczny oraz nanokrystaliczna mikrostruktura proszku będącego głównym składnikiem nanodrutu. Istotny wpływ miały również ultraszybkie procesy nagrzewania, topnienia i krystalizacji występujące przy napawaniu laserowym.
 5. Uzyskane wyniki nie są zadowalające ze względu na liczne mikropeęknięcia, dlatego należy prowadzić dalsze badania laboratoryjne nad opracowaniem technologii mikroonapawania laserowego z użyciem nanodrutów proszkowych. Można przypuszczać, że stosując wstępne podgrzewanie materiału stali kwasoodpornej oraz nonanodrutu proszkowe o małej średnicy (0,6–0,8 mm) możliwe jest uzyskanie precyzyjnych mikro- i makronapoin o bardzo wysokich walorach technologicznych. Tak wytworzone warstwy technologiczne mogą mieć zastosowanie w wielu elementach maszyn w celu znacznego podwyższenia właściwości tribologicznych ich warstwy wierzchniej, zwłaszcza odporności na zużycie w warunkach tarcia, erozji, kawitacji itp.
 6. W ramach dalszych eksperymentów laboratoryjnych na ww. napoinach w najbliższej przyszłości planuje się przeprowadzenie badań na zużycie w warunkach tarcia z wykorzystaniem nowoczesnych maszyn tribologicznych.

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

LITERATURA

1. Sajewicz K.: Nanostruktury. Instytut Fizyki UJ, FOTON 101, 2008.
2. Dobrzański L.A.: Metalowe materiały konstrukcyjne. WNT, wyd. 1 Warszawa 2004.
3. Dobrzański L.A.: Kształtowanie struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich i biomedycznych. OCSCO, Gliwice 2009.
4. Dręczewski B., Herman A., Wroczyński P.: Nanotechnologia: stan obecny i perspektywy” Gdańsk 1997
5. Messer Eutectic Castolin Sp. z o.o., http://www.castolin.com.pl/wCastolin_pl/index.php
6. Klimpel A., Kik T.: Erosion and abrasion wear resistance of GMA wire surfaced nanostructural deposits” Archives of Materials Scienceand Engeneering, vol. 30, issue 2, April 2008.
7. Burakowski T., Wierzchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. WNT, Warszawa 1995.

Recenzent:
Stanisław KRAWIEC

Summary

The chosen results of laboratory investigations were introduced in the work in the range productions of high disprsnion pad welds from nanowires pulveraceous Castolin EnDOtec DO390 N on acid-resistant steel 0 H18 N9 with utilization of the laser technique. The topographies of the surface of grain napoin for the chosen parameters of the laser processing were introduced. Acid-resistant and the material pad weld lies because of specific chemical type- matter, and also large what thermal shock came into being in the process of filling with of the laser the numerous macro was affirmed- and microhardness pad weld. High dispersion pad weld showed the audits of microstructure- and nanostucture in which particles of phaze of carbides (MC) about large volume, the carbides of the forest $M_{23}(BC)$ and borides M_2B are disposed in the fine-grained warp irons. Laser layers pad weld because of kilkukrotne melting were

affirmed the large differentiation of the chemical composition in microzones and the large inhomogeneity of microstructure. 68-72 HRC carried out the hardness of the surface pad weld. The measurements of microhardness in the transverse section showed very high values carrying out even 990 – 1100 HV0,1. Got results zadawalajace are not because of numerous microbroken, that is why you should lead farther laboratory audits over the study of the technology laser micro pad welding ia with the use of pulveraceous nanowires about small diameters (0,6 – 0,8 mm).