

Wojciech Napadłek^{1*}, Tomasz Durejko¹, Wojciech Chrzanowski¹, Piotr Garyga²

¹Wojskowa Akademia Techniczna im. gen. J. Dąbrowskiego, Warszawa

²Zakłady Remontowe Energetyki Katowice S.A., Katowice

Laserowe technologie 3D rewitalizacji łopat turbin parowych stopnia NP stosowanych w energetyce – problematyka technologiczna i diagnostyczna

3D laser technologies revitalization LP degree blades of steam turbines in the power sector - technological and diagnostic problems

ABSTRACT

Wear processes of NP turbine blades and evaluation of selected properties of Stellite Co-6 top surface produced by PTA multilayered plasma method, and incremental laser were analyzed, including LENS method on alloy steel X22CrMoV12-1. The topography of the worn blade surface was observed. Regenerative quality of weld overlays in cross section using Keyence optical microscope was recorded. We were looking for welding defects in padding welds. The usefulness of applied methods has been confirmed. "The work was cofinanced by the European Regional Development Fund, Contract No POIG 01.04.00-24-101/13 signed between National Center for Research and Development and ZRE Katowice S.A.

Keywords: 3D laser technologies, turbine blades, revitalization, diagnostics

STRESZCZENIE

Analizowano procesy zużywania łopat turbiny parowej NP i ocenę wybranych użytkowych właściwości warstw wierzchnich typu Stellite Co-6 wytworzonych metodami wielowarstwowego plazmowego napawania metodą PTA oraz przyrostowego laserowego, w tym metodą LENS na stali stopowej X22CrMoV12-1. Obserwowano topografię zużytej powierzchni łopat. Rejestrowano przez mikroskop optyczny Keyence jakość napoin regeneracyjnych w przekroju poprzecznym. Szukano wad spawalniczych w napoinach. Potwierdzono przydatność użytych metod optycznych. Praca współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego, Umowa o dofinansowanie nr POIG 01.04.00-24-101/13 podpisana pomiędzy Narodowym Centrum Badań i Rozwoju, a ZRE Katowice S.A.

Słowa kluczowe: laserowe technologie 3D, łopaty turbin parowych, rewitalizacja, diagnostyka

1. Wprowadzenie

Łopaska turbinowa, jeden z podstawowych elementów turbiny, pracując w niekorzystnych warunkach (wysoka temperatura, korozja, erozja) przenosi nie tylko bardzo duże obciążenia dynamiczne i zmęczeniowe, ale również często [1-3] narażona jest na degradację (ubytki) warstwy wierzchniej.

Bezwzględna wielkość ubytków związana ze zużyciem powierzchni roboczej łopatki jest niewielka w porównaniu do całkowitej jej powierzchni, często przy niezmiennych właściwościach rdzenia, nadanych w procesie wytwarzania. W takich przypadkach regeneracja jest często najbardziej opłacalnym rozwiązaniem technologicznym dla użytkownika [4]. Obecnie szeroko stosowanymi metodami odtwarzającymi właściwości użytkowe są techniki napawania oraz natryskiwania cieplnego. W efekcie napawania powstaje napoina metalurgicznie połączona z podłożem, a jej właściwości zależą od składu chemicznego oraz metody regeneracji. Często podczas regeneracji powstaje szeroka strefa wpływu ciepła i duży udział materiału podłoża w napoinie. W przypadku modyfikacji właściwości warstwy wierzchniej duży udział materiału podłoża w napoinie utrudnia uzyskanie jej odpowiedniego

składu chemicznego/fazowego. W przypadku technik natryskiwania cieplnego, wpływ natryskanej powłoki na podłoże pod kątem zmiany jego składu chemicznego jest minimalny, między innymi ze względu na niską temperaturę tego procesu, rzędu 100 – 250°C. Powłoka połączona jest z podłożem w sposób adhezyjny lub mechaniczny, co przy znacznym obciążeniu mechanicznym może okazać się niewystarczające. Poniżej przedstawiono krótką charakterystykę stosowanych metod regeneracji warstwy wierzchniej łopat turbiny parowej stopnia NP i innych elementów maszyn.

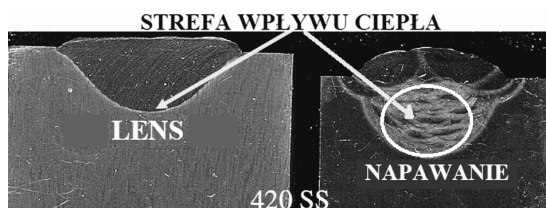
Napawanie laserowe jest to proces pokrywania przedmiotów metalowych warstwą metalu techniką spawalniczą przy jednoczesnym topieniu podłoża. Dla uzyskania wysokiej jakości połączenia z podłożem materiał наносzony jest podawany w postaci proszku, drutów oraz taśm litych i proszkowych. Technika ta jest szeroko stosowana do wytwarzania elementów maszyn z uszlachetnioną warstwą wierzchnią zwiększającą odporność na: korozję, zużycie ścierne, erozję, kawitację, a czasami – żaroodporność i żarowytrzymałość, podczas napawania produkcyjnego. Często technika ta służy do regeneracji części maszyn, podczas napawania regeneracyjnego [4-5].

Techniki laserowe coraz częściej stosowane są w procesach

*Autor korespondencyjny. E-mail: wojciech.napadlek@wat.edu.pl

nanoszenia powłok odtwarzających wskaźniki eksploatacyjne części maszyn i urządzeń. O ich wzrastającym znaczeniu w tym obszarze decydują szczególne cechy promieniowania laserowego oraz intensywny rozwój dziedzin związanych z wykorzystaniem laserów w inżynierii materiałowej. Absorpcja promieniowania laserowego prowadzi do różnych efektów w zależności od współczynnika pochłaniania powierzchni, gęstości mocy oraz czasu oddziaływania wiązki na daną powierzchnię. W przypadku nanoszenia powłok regeneracyjnych wykorzystywane są głównie termiczne efekty absorpcji promieniowania. Energia wiązki laserowej powinna zostać zaabsorbowana w jak największym stopniu, aby nastąpiło efektywne topienie się materiału nanoszonego. Nagrzewanie i topienie się materiału następuje w wyniku przejmowania kwantów energii przez wolne lub związane elektrony materiału przetwarzanego. Powoduje to zwiększenie energii elektronów oddziałujących na sieć krystaliczną i inne elektrony w objętości materiału. Ciągłe pochłanianie kwantów energii i jej przekazywanie powoduje wzrost temperatury, co prowadzi do zerwania wiązań atomowych i przejścia w stan ciekły.

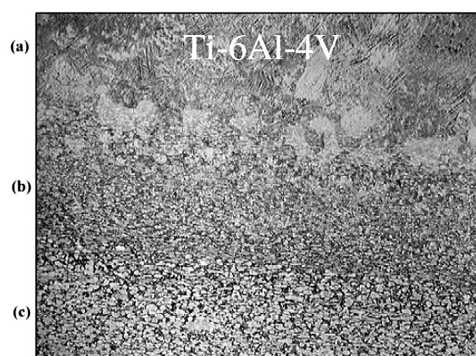
Do niewątpliwie innowacyjnych rozwiązań należy zaliczyć metodę LENS (Laser Engineered Net Shaping) zaliczaną do technik przyrostowych, która ze względu na swoją specyfikę może być wykorzystywana, zarówno do nanoszenia warstw ochronnych o niespotykanych dotąd właściwościach użytkowych (wynikających między innymi z możliwości tworzenia układów gradientowych o różnym stopniu dyskretyzacji), jak również jako doskonałe narzędzie regeneracyjne nowej generacji. LENS jako laserowa technika nanoszenia napoin/powłok posiada szereg zalet wyróżniających ją spośród konwencjonalnych metod napawania czy natryskiwania cieplnego. Nagrzewanie ma charakter lokalny, co minimalizuje szerokość strefy wpływu ciepła (rys. 1), zmniejsza ryzyko występowania „zniekształceń termicznych” oraz ogranicza udział materiału podłoża w napoinie do poziomu poniżej 2%. Dzięki możliwości sterowania szybkością chłodzenia i gradientem temperatury istnieje możliwość kształtowania struktury w szerokim przedziale wymiarowym tj. od drobnoziarnistej do amorficznej (rys. 2) [6-7].



Rys. 1. Zakres strefy wpływu ciepła w warstwie ze stali 420SS nanoszonej techniką LENS w porównaniu do napawania [8]
Fig. 1. Range of heat transfer zone in 420SS steel layer applied by LENS compared to surfacing [8]

Napawanie plazmowe polega na stapianiu w łuku plazmowym materiału dodatkowego w postaci proszku, pręta lub drutu, który wraz z nadtopionym metalem podłoża tworzy napoinę. Uzyskana napoina musi posiadać własności zapewniające trwałość w przewidywanych warunkach pracy o czym decyduje skład chemiczny oraz kształt. Napawanie plazmowe może być prowadzone w sposób ręczny, półautomatyczny, automatyczny lub zrobotyzowany i charakteryzuje się bardzo wysoką koncentracją energii

oraz dużą wydajnością i oszczędnym zużyciem materiału dodatkowego. Koncentracja energii na niewielkim obszarze zmniejsza także skutki cieplnego oddziaływania procesu na własności materiału rodzimego. Napawanie tą metodą umożliwia otrzymywanie powłok gładkich, zmniejszających koszty związane z zastosowaniem obróbki skrawaniem. Technologia napawania plazmowego znajduje zastosowanie przede wszystkim do nakładania na elementy maszyn warstw o szczególnych właściwościach np. wysokiej twardości, odporności na ścieranie, erozję oraz korozję w warunkach atmosferycznych lub aktywnych chemicznie [10].



Rys. 2. Mikrostruktura stopu Ti-6Al-4V po nanoszeniu techniką LENS na podłożu Ti-6Al-4V: (a) stop przetopiony laserem, (b) strefa wpływu ciepła, (c) materiał podłoża [9]

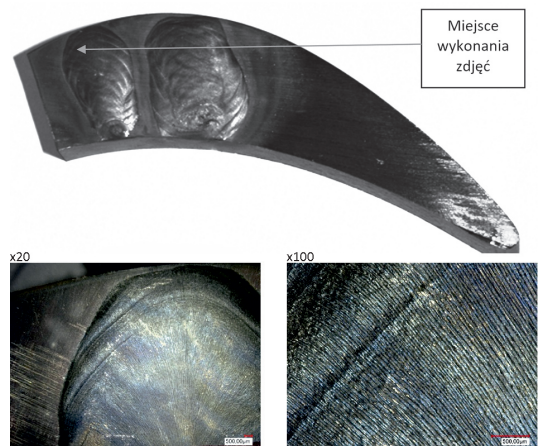
Fig. 2. Ti-6Al-4V microstructure after LENS application on Ti-6Al-4V base: (a) melted laser, (b) heat affected zone, (c) parent material [9]

2. Metodyka badań

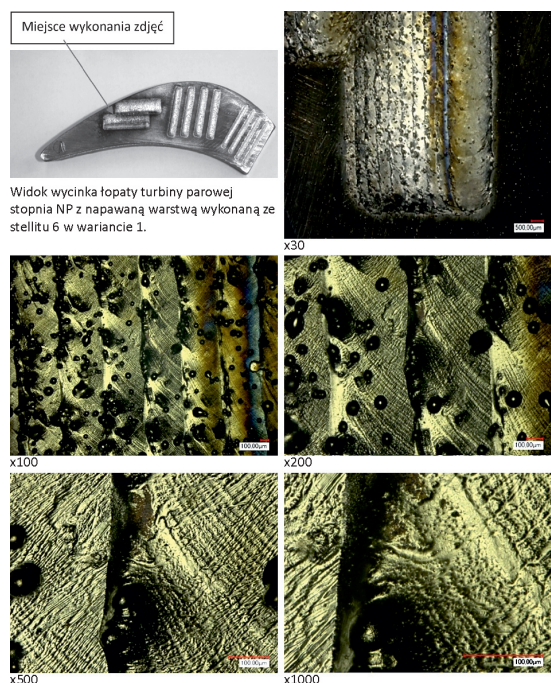
Napoiny wykonywane na stali stopowej X22CrMnV12-1 uzyskano metodą wielowarstwowego napawania laserowego, napawania plazmowego (PTA) oraz napawania techniką LENS z wykorzystaniem Stellitu Co-6, Stellitu Co-12 oraz w różnych konfiguracjach FeAl. Badanie wykonane na napoinach wykazały, iż najlepsze wyniki uzyskiwano z wykorzystaniem Stellitu Co-6, w stosunku do pozostałych, stąd wszystkie dalsze próby prowadzone były na tym materiale. Proces wielowarstwowego napawania laserowego, napawania techniką LENS oraz napawania plazmowego prowadzono w WAT na materiale stali stopowej X22CrMoV12-1 pobranym z łopaty turbiny parowej stopnia NP dostarczonej przez ZRE – Katowice S.A. Wielowarstwowo napawanie laserowe prowadzono na stanowisku TruLaser Cell 3008 firmy TRUMPF. Do napawania techniką LENS stosowano stanowisko LENS 850R. Napawanie plazmowe wykonano na stanowisku PPC 250 HG firmy KSK Česká Třebová. Powierzchnię wytworzonych napoin obserwowano na mikroskopie optycznym VHX-1000 firmy Keyence. Przekroje próbek po cięciu inkludowano w żywicy, wykorzystując automatyczną prasę Opal 410 firmy ATA oraz szlifowano i polerowano na talerzowej szlifierko-polerce Saphir 520 firmy ATA. Próbkę szlifowano na papierach ściernych o gradacji od 80 do 2400, a następnie polerowano na dyskach polerskich z użyciem zawiesziny diamentowej o ziarnistości 6 oraz 3 μm . Przed obserwacją mikrostruktury próbki trawiono. Pomiar twardości wykonywano na twardościomierzu FLC-50A firmy Future Tech.

3. Wyniki badań

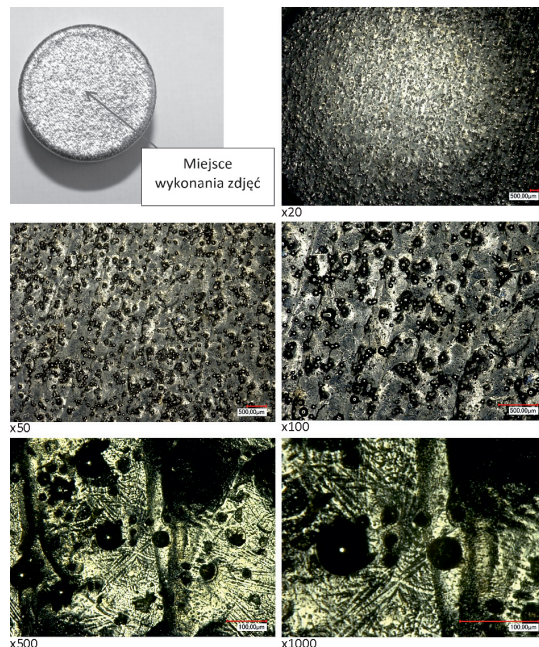
Napawanie zrobotyzowane plazmowe PTA wykonywano na specjalistycznym stanowisku w firmie KSK w Česká Třebová (Czechy). Materiałem podłoża była stal stopowa pobrana z łopaty dostarczonej przez ZRE Katowice S.A. Widok przykładowych napoin przedstawiono na rys. 3. Wytworzone napoiny mają regularny, powtarzalny kształt z widocznym kierunkiem krystalizacji. Na powierzchni napoin nie stwierdzono pęknięć, poza próbką wykonaną w wariantcie 2, na powierzchni której w obszarze zakończenia procesu zauważono niewielkie pęknięcia.



Rys. 3. Widok powierzchni napoiny wykonanej z Stellitu Co-6 na stali stopowej (materiał łopaty) po zrobotyzowanym napawaniu plazmowym przy różnych powiększeniach
Fig. 3. A view of the surface of a Stellite Co-6 alloy on a steel alloy (shovel) after robotic plasma welding at different magnifications

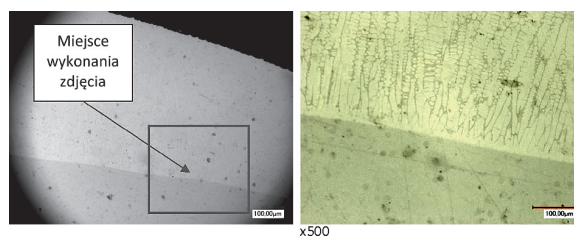


Rys. 4. Widok powierzchni napoiny ze Stellitu Co-6 (przy różnych powiększeniach) wytworzonej na stali stopowej (pobranej z materiału łopaty) po zrobotyzowanym laserowym napawaniu w wariantcie 1 (10 ściegów)
Fig. 4. View of the surface of the Stellite Co-6 (with different magnifications) on the alloy steel (taken from the material of the blade) after robotic laser welding in variant 1 (10 runs)



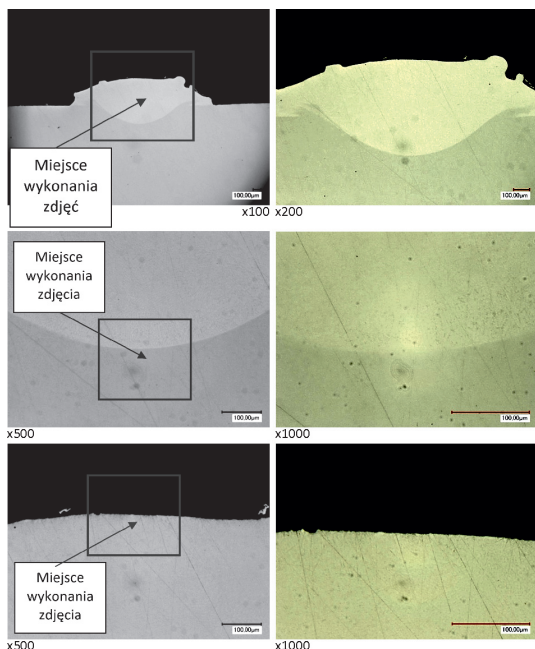
Rys. 5. Widok charakterystycznej powierzchni napoiny ze stellitu 6 (przy różnych powiększeniach) wytworzonej na stali stopowej X22CrMnV12-1 ulepszonej cieplnie w procesie napawania przyrostowo-gradientowej techniką LENS
Fig. 5. View of the characteristic surface of a Stellite 6 (at different magnifications) on X22CrMnV12-1 alloyed steels with thermally enhanced LENS

Napawanie laserowe wykonano także na materiale stali stopowej X22CrMoV12-1 pobranej z fragmentu łopaty dostarczonej przez ZRE Katowice S.A. W trakcie doboru i optymalizacji parametrów napawania wykonywano pojedyncze ściegi oraz napawanie wielościegowe (od 4 do 10 ściegów). Materiał podłoża w kilku wariantach podgrzewano przed napawaniem do temperatury ok. 400°C. Przykładowe topografie uzyskanych powierzchni przedstawiono na rys. 4. Uzyskane napoiny miały regularny, powtarzalny kształt z widocznymi cząstkami nieprzetopionego proszku na powierzchni napoin- jest to charakterystyczne dla napoin wykonanych z proszku.



Rys. 6. Widok przekroju napoin wykonanych ze Stellitu Co-6 metodą napawania plazmowego PTA
Fig. 6. View of the section of padding weld made from Stellite Co-6 by PTA plasma welding

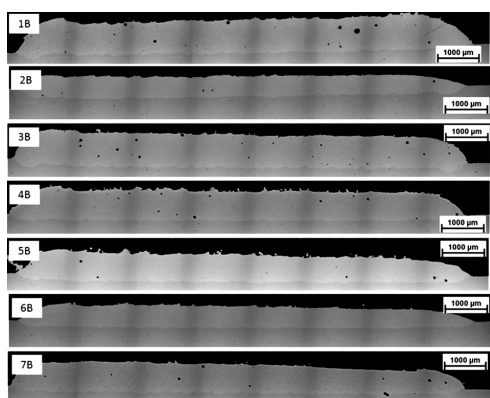
Do wytworzenia próbek metodą LENS wykorzystano system LENS 850R. Podczas doboru optymalnych parametrów napawania proszków wsadowych sterowano m. in. mocą lasera, położeniem ogniska lasera, prędkością podawania proszku, również wydatkiem gazu na dyszy centralnej oraz przepływem gazu transportującego proszek jako parametrami mogącymi mieć wpływ na tzw. porowatość gazową.



Rys. 7. Widok przekroju napoin wykonanych z Stellite Co-6 metodą napawania wielowarstwowego laserowego
Fig. 7. View of the section of padding weld made from Stellite Co-6 by multi-layer laser welding

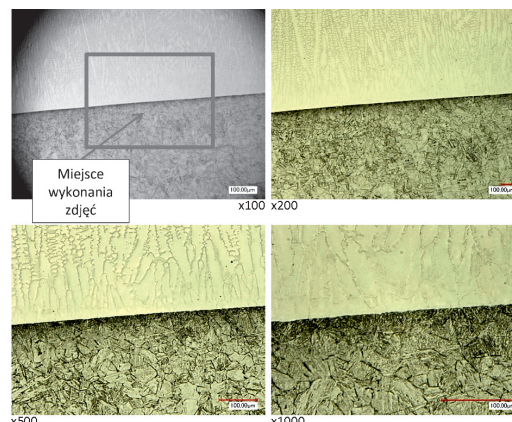
Widok wycinka łopaty turbiny parowej stopnia NP z napawaną warstwą wykonaną ze Stellite Co-6 techniką LENS przedstawiono na rys. 5 i 8.

Wyniki obserwacji powierzchni przekrojów próbek po zrobotyzowanym napawaniu plazmowym na materiale pobranym z łopaty turbiny parowej stopnia NP po eksploatacji przedstawiono na rys. 6 i 9. Analiza otrzymanych mikrostruktur wykazała, że w strukturze napoiny istnieją uprzywilejowane kierunki krystalograficzne wzrostu dendrytów. Uzyskana mikrostruktura ma kształt iglastych dendrytów o kierunku wzrostu prostopadłym do powierzchni, jest to związane z kierunkowym procesem oddawania ciepła.

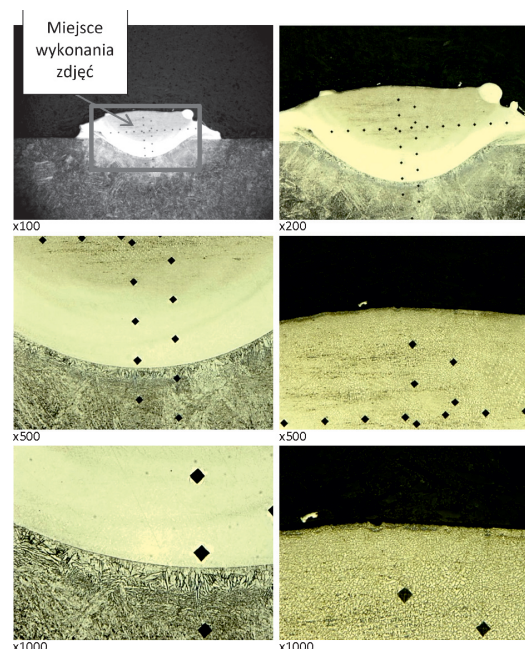


Rys. 8. Widok przekroju napoin wykonanych z Stellite Co-6 techniką LENS
Fig. 8. Cross section of Stellite Co-6 padding welds by LENS

Wyniki obserwacji powierzchni przekrojów próbek po napawaniu laserowym proszku ze Stellite Co-6 na materiale stali pobranym z łopaty turbiny parowej stopnia NP po eksploatacji przedstawiono na rys. 7 i 10. Na analizowanych próbkach z napoinami ze Stellite Co-6 wykonanymi laserowo



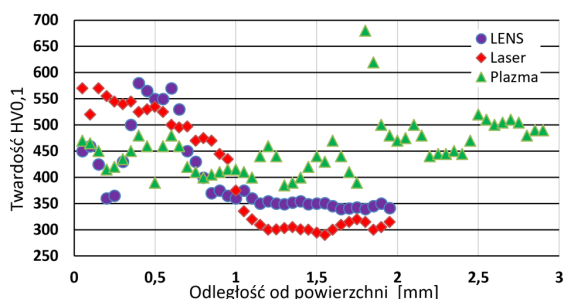
Rys. 9. Widok charakterystycznej mikrostruktury materiału rodzimego i napoiny utworzonej ze stellite Co-6 w procesie zrobotyzowanego napawania plazmowego – materiał rodzimy (podłoże): stal pobrana z łopaty turbiny parowej
Fig. 9. View of the characteristic microstructure of the parent material and the weld made from Stellite Co-6 by the robotized plasma welding process - parent material (substrate): steel taken from the steam turbine blade



Rys. 10. Widok charakterystycznej mikrostruktury materiału rodzimego i napoiny utworzonej ze stellite Co-6 w procesie wielowarstwowego laserowego napawania – materiał rodzimy (podłoże): stal pobrana z łopaty turbiny parowej
Fig. 10. View of the characteristic microstructure of the parent material and the weld made of Stellite Co-6 by the multi-layer laser welding process - parent material (substrate): steel taken from the turbine blade

stwierdzono występowanie układów dendrytycznych ziaren. Kształt ich był podobny do kształtu uzyskanego po napawaniu plazmowym, ale ich wielkość była dużo mniejsza. Jest to związane z bardzo dużą szybkością nagrzewania, chłodzenia i krystalizacji materiału poddanego procesowi modyfikacji laserowej (napawania laserowego). Analiza otrzymanych mikrostruktur wykazała, że w mikrostrukturze napoiny istnieją uprzywilejowane kierunki krystalograficzne wzrostu dendrytów. Zaobserwowano występowanie dendrytów

skrzystalizowanych w różnych kierunkach, tj. prostopadłe oraz pod różnymi kątami do powierzchni materiału rdzenia, a także w niewielkiej ilości w płaszczyźnie poziomej. Jest to związane z kierunkowym procesem odprowadzania ciepła w głąb materiału, a także w kierunku powierzchni. Przykładowe wykresy rozkładu mikrotwardości zaprezentowano na rys. 11.



Rys. 11. Przykładowy wykres twardości zmierzonej w przekroju poprzecznym na napawanych (laserowo, plazmowo i LENS) próbkach ze stali stopowej X22CrMnV12-1 Stellite Co-6

Fig. 11. Sample hardness graph measured in cross section on welded (laser, plasma and LENS) samples of X22CrMnV12-1 alloy steel Stellite Co-6

4. Wnioski

Analizując uzyskane wyniki, stwierdzono że:

- 1) W trakcie realizacji badań wykonano napoiny z proszku Stellite Co-6 na stali stopowej X22CrMnV12-1 metodą wielowarstwowego napawania laserowego, napawanie plazmowe (PTA) oraz napawania techniką LENS. Uzyskano napoiny o poprawnej geometrii, o regularnym i powtarzalnym kształcie z widocznym kierunkiem krystalizacji wytworzonej warstwy. Na powierzchni wytworzonych napoin nie stwierdzono pęknięć.
- 2) Na podstawie przeprowadzonych obserwacji powierzchni przekrojów poprzecznych próbek po zrobotyzowanym napawaniu plazmowym stwierdzono, że napoiny wykonane ze stopu Stellite Co-6 charakteryzują się dobrą jakością metalurgiczną z wtopieniem w materiał rodzimy i wyraźną granicą rozdziału napoina - podłoża.
- 3) Analizując powierzchnie przekrojów poprzecznych próbek po laserowym napawaniu, nie stwierdzono pęknięć i nieciągłości w strefie połączenia materiału podłoża z napoiną. W trakcie doboru parametrów napawania w kilku próbkach stwierdzono niewielkie nieciągłości i brak przetopu materiału podłoża. Było to związane ze zbyt małą gęstością wiązki laserowej lub ze złym ogniskowaniem wiązki.
- 4) W wyniku obserwacji trawionych powierzchni przekrojów próbek po zrobotyzowanym napawaniu plazmowym na materiale pobranym z dostarczonej łopaty turbiny parowej stopnia NP zaobserwowano, że mikrostruktura ma kształt iglastych dendrytów o różnych kierunkach wzrostu względem powierzchni podłoża.
- 5) W wyniku obserwacji powierzchni przekrojów próbek po napawaniu laserowym proszku ze Stellite Co-6 stwierdzono występowanie struktury dendrytycznej. Kształt dendrytów był podobny do kształtu uzyskanego po napawaniu plazmowym, ale ich rozdrobnienie było znacznie większe, co wynikało z procesu szybkiej krystalizacji napoiny, charakterystycznej dla napawania laserowego.

- 6) W strukturze napoiny wykonanych techniką LENS wyodrębniono obszary o różnym składzie chemicznym. Osnowę stanowią drobne dendryty austenitu kobaltowego z rozmieszczonymi, w miarę równomiernie, na ich granicach wydzieleniami zawierającymi Cr, W, Fe. Uzyskana struktura nie wykazuje cech anizotropii krystalograficznej oraz występowania tzw. substruktury. Zarówno analiza dyfrakcyjna w mikroobszarach, jak i dyfrakcja w ujęciu makro, potwierdziły zróżnicowaną budowę strukturalną napoin połączoną z występowaniem złożonych węglików kobaltowo-wolframowych pomiędzy dendrytami Co.
- 7) Twardość dla napoin wytworzonych w wyniku wielowarstwowego napawania laserowego wynosiła w zakresie 420-620 HV0,1, a w strefie wpływu ciepła wynoszącej ok. 0,5 mm wynosiła ok. 290 HV0,1.
- 8) Twardość dla napoin wytworzonych w wyniku napawania technologią LENS wynosiła w zakresie od 320-580 HV0,1, a w strefie wpływu ciepła wynosiła od 300 do 460 HV0,1.
- 9) Twardość dla napoin wytworzonych w wyniku napawania plazmowego wynosiła w zakresie 320-520 HV0,1, a w strefie wpływu ciepła wzrastała do 500-550 HV0,1 po czym łagodnie spadała do twardości materiału wyjściowego.
- 10) Napawanie plazmowe wiąże się z dostarczeniem dużej ilości ciepła do materiału podłoża, co powoduje znaczny wzrost temperatury próbki w całej objętości, deformacje i odkształcenia, a tym samym powstanie dużych naprężeń własnych, mających istotny wpływ na kształt geometryczny oraz właściwości użytkowe wytworzonych napoin. Wzrost temperatury podłoża podczas napawania spowodował także pewne zmiany w mikrostrukturze, zarówno materiału podłoża, jak i wytworzonych napoin. W strefie wpływu ciepła materiału podłoża uzyskano częściowe przebudowanie sieci krystalograficznej martenzytu oraz niewielką koagulację płytek cementytu.

5. Literatura/References

- [1] J. Dobosiewicz, "Niektóre przyczyny uszkodzeń łopatek roboczych turbin parowych", *Energetyka*, no. 6, pp. 395-400, 2003.
- [2] J. Chmielniak, *Maszyny przemysłowe*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 1997.
- [3] A. Miller, *Maszyny i urządzenia cieplne i energetyczne*. Warszawa: Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, 1998.
- [4] L. Dobrzański, A. Dobrzańska-Danikiewicz, "Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich", *Open Access Library*, vol. 5, 2011.
- [5] "TRUMPF GmbH + Co. KG", 2017. [Online]. Available: <http://www.pl.trumpf.com/pl/>. [Accessed: 09- Oct- 2017]
- [6] J. Kusiński, *Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej*. Kraków: Wydawnictwo Naukowe "Akapit", 2000.
- [7] R. Mudge, N. Wald, "Laser Engineered Net Shaping Advances Additive Manufacturing and Repair", *Welding Journal*, pp. 44-48, January, 2007.
- [8] D. Keicher, "Laser Engineered Net Shaping PHASE II", OPTOMECH, Albuquerque USA, 2001.
- [9] M. Hedges, N. Calder, "Near Net Shape Rapid Manufacture and Repair by LENS", in *Cost Effective Manufacture via Net-Shape Processing*, Meeting Proceedings, RTO-MP-AVT-139, Paper 13. Neuilly-sur-Seine, France: RTO, pp. 13-1 - 13-14, [Online]. Available: <http://www.rto.nato.int/abstracts.asp>.
- [10] J. Pilarczyk, J. Pilarczyk, *Spawanie i napawanie elektryczne metali*. Katowice: Śląsk, 1996.