OCENA JAKOŚCI WARSTW NAKŁADANYCH METODĄ LASEROWEGO OSADZANIA METALU W PROSZKU LDT

W artykule przedstawiono badania próbek ze stali niestopowej C45 napawanych metodą laserowego osadzania metalu proszkiem typu Stellite Co-21w technice LDT (Laser Deposition Technology). Obserwowano mikrostrukturę przekroju poprzecznego próbek wytworzonych z różną prędkością skanowania oraz ilością podawanego proszku przy stałej mocy lasera. Analizując powierzchnie przekrojów poprzecznych próbek stwierdzono występowanie w napoinie pęknięć, przy określonych parametrach wytwarzania, które należy wiązać z ilością dostarczanego i odprowadzanego ciepła, szczególnie przy niepodgrzewanym podłożu. Potwierdzać to może występowanie w mikrostrukturze napoin podłużnych dendrytów słabo rozgałęzionych, co należy wiązać z kierunkowym procesem odprowadzania ciepła oraz szybką krystalizacją kierunkową. Istnieje możliwość regulowania tych zjawisk przez dobór odpowiednich parametrów obróbki. Analiza mikrostruktury powierzchni przekrojów poprzecznych próbek po napawaniu techniką LDT wskazuje na dobrą jakość metalurgiczną napoiny z wyraźnym wtopieniem i niedużą strefą wpływu ciepła wynoszącą od około 660÷760µm. Pomiary mikrotwardości wykonane na przekrojach próbek wskazywały na szeroki przedział mikrotwardości wynoszący od 510HV1 w napoinie, około 410HV1 w strefie wpływu ciepła, do 270HV1 w podłożu ze stali konstrukcyjnej C45.

WSTĘP

Technika przyrostowego wykonywania metalowych elementów uwzględnia: formę i rodzaj materiału roboczego oraz sposób jego łączenia i podawania. Dobór poszczególnych rozwiązań określa rodzaj technologii, w jakiej urządzenie będzie pracowało. Obecnie wyróżnia się wiele technologii druku 3D obiektów metalowych, a każda ma specyficzne cechy. Wybór najlepszej technologii zależy przede wszystkim od wymagań stawianych wytwarzanym wyrobom oraz od możliwości wykonawcy i zamawiającego elementy drukowane 3D z metalu. Te wymagania to najczęściej: krótki czas i niski koszt wytworzenia, odpowiednia jakość i właściwości mechaniczne materiału, wysoka dokładność kształtu wiernie odwzorowująca projekt jak też wykonanie skomplikowanych geometrycznie modeli. Głównym kryterium podziału jest sposób podawania materiału: z użyciem platformy wypełnionej oraz regularnie wyrównywanej proszkiem (powder bed) lub bezpośrednie punktowe nanoszenie (direct deposition) [1].

Bezpośrednie punktowe nanoszenie – typowe dla procesów spiekania, topienia czy napawania – gwarantuje, że wewnątrz zamkniętej bryły nie znajdują się pozostałości nieutwardzonego proszku. System podawania materiału poprzez równe wyłożenie proszku na platformie roboczej ma natomiast tę przewagę, że model nie musi mieć wygenerowanych wsporników. Dodatkowo ta metoda daje możliwość wykonywania modeli piętrowo, tzn. w wyższych partiach komory roboczej. Kolejnym kryterium podziału jest sposób łączenia materiału. Niemal wszystkie technologie wymagają wysokiej temperatury, powodującej spiekanie lub stapianie materiału. W metodach wykorzystujących wiązkę lasera czy elektronów konieczne jest użycie urządzenia pracującego w szczelnej komorze gazowej lub próżniowej [2].

Jest wiele metod przyrostowych wytwarzania gdzie model kształtowany jest przez ciągły przyrost materiału do uzyskania wymaganego kształtu.

Technika przyrostowego wykonywania metalowych obiektów uwzględnia: formę materiału roboczego oraz sposób jego łączenia i podawania. W zależności od poszczególnych rozwiązań określa się rodzaj technologii, w jakiej urządzenie będzie pracowało. Obecnie jest wiele technologii przyrostowych wytwarzania obiektów metalowych, gdzie model kształtowany jest przez ciągły przyrost materiału do uzyskania wymaganego kształtu. Każda z technologii ma specyficzne cechy.

Należą do nich [2, 3, 7]:

- EBM (ang. Electron Beam Melting) – topienie metalowych proszków za pomocą wiązki elektronowej;
- SLS (ang. Selective Laser Sintering) – selektywne spiekanie laserowe proszków, najczęściej z tworzyw sztucznych (poliamidów) i metali (wytwarzanie wyrobów z porowatością);
- SLM (ang. Selective Laser Melting) – selektywne stapianie proszków za pomocą wiązki laserowej. Lasery stosowane w metodzie SLM muszą mieć większą moc niż w SLS;
- DMLS (ang. Direct Metal Laser Sintering) jest to unikalna nazwa metody SLM zastrzeżona przez niemiecką firmę Electro Optical Systems;
- LC (laser cladding) – laserowe napawanie. Metoda ta polega na miejscowym nanoszeniu materiału – w postaci proszku lub drutu – i spiekanie/topienie go laserem. Jest wykorzystywana do tworzenia nowych obiektów oraz naprawy/regeneracji uszkodzonych bądź zużytych elementów maszyn, np. przez naniesienie dodatkowej warstwy w miejscu ubytku;
- LENS (ang. Laser Engineering Net Shaping) – wytwarzania elementów z materiałów sproszkowanych poprzez ich miejscowe nanoszenie i spiekanie wiązką lasera. W przeciwieństwie do metody SLS/SLM proszek nie jest rozprowadzany w całej komorze roboczej, lecz dostarczany w ściśle określone miejsce. Dzięki temu metoda LENS pozwala także na miejscową naprawę (regenerację) istniejących części maszyn. Metoda jest specyficznym rozwiązaniem metody napawania laserem LC, a została opracowana i opatentowana przez Sandia Corporation.

Nazwa LENSTM jest zastrzeżona jako znaktowarowy przez Sandia Corporation;

- LDW (laser deposition welding) – laserowe osadzanie przez spawanie. Skrót odnosi się głównie do metod związanych z naprawą lub modyfikacją istniejących obiektów. Jednym z producentów urządzeń przeznaczonych do tej metody jest firma DMG MORI;
- LDT (Laser Deposition Technology) – laserowa technologia osadzania. Jest to proces, w którym proszek metalowy jest wtryskiwany do wiązki skupionej lasera dużej mocy w ściśle kontrolowanych warunkach atmosferycznych. Laser Deposition Technology (LDT) to nazwa, która obejmuje wiele procesów "podobnych" - bezpośrednie osadzanie metali. Opracowana przez RPM Innovations Inc.

Przyrostowe kształtowanie przedmiotów staje się efektywne w produkcji jednostkowej lub realizowanej w niewielkich seriach. Wytwarzanie przez kształtowanie przyrostowe nie wymaga stosowania specjalnego oprzyrządowania (np. form lub matryc). Ma więc dużą przewagę nad konwencjonalnymi metodami formowania, jak też pewną przewagę nad procesami obróbki skrawaniem. Jednak metody przyrostowego kształtowania obecnie nie zapewniają wystarczającej dokładności elementów o małych rozmiarach i mikroelementów. Dlatego w przypadku elementów, dla których decydującym czynnikiem jest minimalizacja ich wymiarów, stosowane są niektóre niekonwencjonalne sposoby kształtowania ubytkowego (np. drążenie mikrootworów) [3].

Na jakość wytworzonego elementu czy warstwy ma efekt oddziaływania promieniowania laserowego na materiał, który zależy przede wszystkim od:

- • rodzaju materiału,
- • długości fali promieniowania,
- • gęstości mocy promieniowania,
- • czasu oddziaływania promieniowania na materiał.

W zależności od tych czynników w materiale mogą zachodzić różne procesy. Do zastosowań przemysłowych wykorzystuje się głównie cieplne efekty oddziaływania promieniowania na materiał, które prowadzą do nagrzewania, topnienia oraz parowania materiału. Rysunek 1 przedstawia schematycznie zależność procesów zachodzących w metalach i stopach od gęstości mocy promieniowania laserowego i czasu oddziaływania wiązki laserowej na materiał.

Rys. 1. Wpływ gęstości mocy promieniowania i czasu oddziaływania wiązki laserowej na procesy zachodzące w metalach [4]

Poprzez zastosowanie różnych kombinacji gęstości mocy i czasu oddziaływania możliwe jest prowadzenie różnych procesów technologicznych. W większości z nich wykorzystywany jest efekt nagrzewania i topnienia warstwy wierzchniej. Procesom tym mogą towarzyszyć inne zjawiska, jak np. tworzenie plazmy, emisja jonów itp. Zjawiska fizyczne zachodzące przy nagrzewaniu różnych materiałów wiązką laserową zostały dobrze poznane i opisane w wielu pracach [4, 5].

Na strukturę i jakość wytwarzanego elementu w technologii osadzania proszku metalu wpływa w dużym stopniu wartość posuwu stołu roboczego. Wynika to z powiązaniem z procesami szybkości odprowadzania ciepła. Oznacza to, że wartość posuwu stołu roboczego wpływająca na szybkość nanoszenia warstw, a tym samym na szybkość chłodzenia, może wpływać na zróżnicowaną budowę strukturalną stopów (gruboziarnista, komórkowa, kolumnowa itd. [6].

Obecnie najczęściej stosowanymi technologiami odtwarzającymi właściwości użytkowe elementów maszyn są różne metody napawania. W procesie odtwarzania ubytków podczas regeneracji elementów 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.

Do innowacyjnych technik przyrostowych, która może być wykorzystywana do nanoszenia warstw ochronnych i regeneracji powierzchni elementów maszyn należy metoda LDT (Laser Deposition Technology) – laserowa technologia osadzania.

Technologia osadzania laserowego to proces, w którym proszek metalowy jest wtryskiwany do wiązki skupionej lasera dużej mocy w ściśle kontrolowanych warunkach atmosferycznych osłoniętych gazem argonowym. Skoncentrowana wiązka laserowa topi powierzchnię materiału docelowego i wytwarza małą stopioną warstwę materiału podstawowego. Materiał w postaci proszku dostarczany jest w sposób ciągły do jeziora materiału bazowego i tam ulega stopieniu z bardzo dużą prędkością, w wyniku czego na powierzchni elementu tworzy się cienka warstewka stopu materiału rodzimego i proszku (rys. 2).

Rys. 2. Istota technologii LDT (Laser Deposition Technology)

Technologia laserowa nanoszenia powłok, posiada wiele zalet. Nagrzewanie ma charakter lokalny, co minimalizuje szerokość strefy wpływu ciepła, 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 mikrostruktury w szerokim przedziale wymiarowym tj. od drobnoziarnistej do amorficznej [7]. Powstaje wysokiej jakości połącze-

nie metalurgiczne deponowanej warstwy z podłożem. Cały proces odbywa się w osłonie gazu obojętnego z prędkością rzędu 10^6 °C/s [8].

Możliwość sterowania z dużą dokładnością głębokością nadtopienia materiału rodzimego sprawia, że jego udział w napoinie może być bardzo mały, od ok. 3÷5% do 10%. Jest to szczególnie ważne gdy skład chemiczny materiału napawanego różni się znacznie od składu chemicznego materiału rodzimego. Oznacza to, że już w pierwszej warstwie można uzyskać wymagane własności eksploatacyjne, a nadek na obróbkę ostateczną nie przekracza 0,1÷0,3 mm. W zależności od stosowanej technologii (rodzaju urządzenia, kształtu materiału dodatkowego) możliwe jest wykonanie w jednym przejściu napoin 0,1÷5 mm i szerokości do 5÷20 mm przy prostym torze głowicy laserowej [8]. Rodzaje materiałów stosowanych do laserowego osadzania w technologii LDT przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Przykłady materiałów stosowanych w technologii LTD [8, 9]

Rodzaje stopów stosowane w technologii LDT	
Stopy na bazie Fe	Stale nierdzewne, stopy żelaza o wysokiej twardości (rzędu 60HRC)
Stopy na bazie Ni	Inconeale (np.: In625, In622, In686) zapewniające wysoką odporność korozyjną; stopu Ni o wysokiej twardości (40÷60 HRC) zapewniające wysoką odporność korozyjną, erozyjną, odporność na zużycie ścierne; żaroodporne i żarowytrzymałe stopy Ni.
Stopy na bazie Co (Stellity)	Stellit 6, Stellit 21, Stellit 20: materiały o twardości 30÷60 HRC o wysokiej odporności korozyjnej (również wysokotemperaturowej) i ścierniej; stopy żarowytrzymałe i żaroodporne do pracy w wysokiej temperaturze, stopy o wysokich właściwościach ślizgowych w podwyższonych temperaturach (np.: Triballoy T-400 i T-800).
Stopy na bazie Cu	Brąz aluminiowy, brąz cynowy – materiałów o niskim współczynniku tarcia i wysokiej przewodności cieplnej
Cermale	Węgiel wolframu (w postaci kruszonej i sferoidalnej) oraz węgiel chromu na osnowie NiCr lub NiCrSiB o bardzo wysokiej odporności na ścieranie jak również odporności korozyjnej

1. BADANIA WŁASNE

1.1. Materiał i metoda badań

Głównym celem pracy było określenie wybranych właściwości jakościowych napoin, takich jak: mikrostruktura, twardość, mikrostruktura wytworzonych technologią laserowego osadzania proszków metali (LDT). Napoina została wytworzona na podłożu stali niestopowej C45.

Materiałem napoiny był Stellit 21, proszek o gradacji 45÷180 μ m z przeważającą ziarnistością z zakresu 71÷150 μ m (92,13%). Oznacza to spełnienie wymagań stosowania proszku dotyczących wielkości z określonego przedziału przy zastosowanej technologii wytwarzania.

Podstawowymi pierwiastkami wchodzącymi w skład proszku były: Co, Cr, Mo, Mg, Fe, Ni oraz C i Si. Skład chemiczny napoiny przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 1. Skład chemiczny materiału napoiny Stellit 21

Skład chemiczny, [%]							
Co	C	Mo	Ni	Fe	Mn	Cr	Si
reszta	0,26	5,4	2,4	0,2	0,68	27,8	0,9

Wielowarstwowe napawanie laserowe wykorzystując urządzenie przedstawione na rysunku 3. Parametry technologiczne wytwarzania warstw przedstawiono w tabeli 2. Podczas procesu wytwarzania sterowano wartością posuwu stołu roboczego oraz wydatkiem proszku (tabela 1) przy stałej mocy lasera równej 2740 W. Powierzchnię wytworzonych napoin obserwowano na mikroskopie optycznym Nikon Eclipse MA200 VHX-1000. Pomiary mikrotwardo-

ści wykonano na Twardościomierzu Wilson Wolpert MicroVickers Analog 401MVA.

Rys. 3. Standardowy system RPMI 557 do laserowego osadzania metalu w proszku w technologii LDT (Laser Deposition Technology) [9]

Tab. 2. Parametry wytwarzania napoin metodą laserowego osadzania metalu w proszku (LDT)

Nr próbki Gatunek- Stellit 21	Prędkość skanowania [cal/min]	Podawanie proszku [g/min]	Moc lasera [W]	Ilość warstw
N1	30	9.6	2740	14
N2	30	7.6	2740	14
N3	30	5.8	2740	14
N4	24	5.8	2740	14

Wykonane próbki zostały przecięte w środkowej części długości napoiny prostopadle do kierunku nanoszonych warstw. Wygląd przeciętych próbek oraz powierzchnia przeznaczona do obserwacji mikroskopowej została przedstawiona na rysunku 4.

Rys. 4. Widok kształtu wykonanych próbek po przecięciu oraz powierzchni przeznaczonych do obserwacji mikroskopowej

1.2. Wyniki badań

Wytworzone napoiny miały regularny, powtarzalny kształt z widocznymi cząstkami nieprzetopionego proszku na powierzchni

napoin (rys. 4), co jest zjawiskiem charakterystycznym dla napoin wykonanych z materiału proszkowego.

Na rysunku 5 przedstawiono strukturę próbek N1 i N3. Widoczne jest ułożenie wykonanych 14 warstw od strefy wtopienia. Z obserwowanych próbek wykonanych z różnymi parametrami (tabela 2) wyróżnia się szczególnie próbka N3 posiadająca znaczną ilość pęknięć. Pęknięcia zarodkują już w pierwszej warstwie od podłoża i sięgają górnej powierzchni próbki (rys. 6). Pęknięcia ułożone są zgodnie z kierunkiem odprowadzanego ciepła, szczególnie intensywnie do obszarów niepodgrzewanego podłoża. Znaczną ilość pęknięć w próbce N3 można wiązać z najmniejszą ilością podawanego proszku przy znacznej prędkości skanowania, co można wiązać z wyższą prędkością chłodzenia. Taka sama ilość podawanego proszku przy mniejszej prędkości skanowania w próbce N4 nie wykazywała tak widocznych pęknięć, podobnie jak w próbce N1 i N2.

Rys. 5. Widok przeciętej powierzchni a) próbki N1, b) próbki N3 z widocznymi pęknięciami w kierunku tworzenia warstw, pow. 7x

Mikrostruktura przekroju poprzecznego napoiny próbki N4 (rys. 7) jest charakterystyczna dla wszystkich przyjętych parametrów napawania wielowarstwowego. Struktura zawiera cztery charakterystyczne obszary: napoina N, strefa wtopu SW, strefa wpływu ciepła SWC i materiał podłoża MP. Zasięg SWC w przedstawionej na rysunku 7 próbce wynosi 752μm do około 660μm w pozostałych próbkach.

Rys. 6. Widok pęknięcia w próbce N3, a) początek pęknięcia w pierwszej warstwie (dolna część fotografii), b) zakończenie pęknięcia w warstwie powierzchniowej (górna część fotografii)

Rys. 7. Mikrostruktura przekroju poprzecznego napoiny próbki N4 z proszku typu Stellite Co-21 na podłożu ze stali C45 wykonanej techniką wielowarstwowego napawania laserowego LDT, N – napoina, SW – strefa wtopienia, SWC – strefa wpływu ciepła, MP – materiał podłoża

Struktura warstw materiałów napoin jest dendrytyczna (rys. 8a). Osie dendrytów są zgodne z kierunkami odprowadzania ciepła w trakcie krystalizacji. Dendryty mają dość duże rozmiary i przebiegają przez granice warstw, tzn. zachowują swoje kierunki krystalograficzne, a kolejne warstwy nie hamują ich wzrostu (rys. 8b). Dendryty mają długie osie główne lecz są słabo rozgałęzione, co świadczy o szybkiej krystalizacji kierunkowej. Na granicach „pakietów” dendrytów biegnących w różnych kierunkach nie występuje porowatość skurczowa ani pęknięcia.

Zaobserwowano, że dendryty zostały skryształizowane w różnych kierunkach, tj. prostopadle oraz pod różnymi kątami, a także w niewielkiej ilości w płaszczyźnie poziomej do powierzchni materiału podłoża. Proces krystalizacji był ściśle związany z kierunkowym procesem odprowadzania ciepła w kierunku powierzchni napoiny, a także w głąb materiału podłoża.

Występowanie dendrytycznych układów ziaren w mikrostrukturze napoin wykonanych z proszku typu Stellite 21 techniką wielowarstwowego napawania laserowego związane jest z większą szybkością nagrzewania, chłodzenia i krystalizacji przetopionego materiału. Ciepło dostarczone podczas procesu laserowego napawania, nagrzewające materiał podłoża może być kontrolowane parametrami wytwarzania. Wzrost temperatury podczas napawania laserowego spowodował niewielkie zmiany w mikrostrukturze podłoża. Uzyskano częściową koagulację płytek cementytowych.

a)

b)

Rys. 8. Mikrostruktura materiału napoiny (próbka N2), przy różnym powiększeniu, traw. 80 ml HCl, 80 g FeCl₃, 6 g CuCl₂, 1000 ml H₂O, a) struktura dendrytyczna materiału napoiny, b) struktura dendrytyczna przebiegająca przez kilka warstw

Do oceny właściwości napoin wykorzystano pomiar mikrotwardości w przekroju prostopadłym do powierzchni napoiny, czyli od powierzchni zewnętrznej napoiny, poprzez strefę połączenia metalurgicznego do podłoża stalowego. Ze względu na niejednorodność mikrostruktury i składu chemicznego typowego dla struktur dendry-

tycznych, rozkład twardości na przekroju napoiny charakteryzuje się dużą zmiennością. Dla ograniczenia wpływu dużych różnic w twardości obszarów dendrytycznych i między dendrytycznych, przeprowadzono serię pomiarów. Na rysunku 9 uwzględniono wartości średnie. W wyniku napawania laserowego techniką LDT uzyskano twardość napoiny w zakresie od 467 do 510 HV₁. Pomiędzy napawaną warstwą a podłożem znajdowała się warstwa przejściowa o twardości około 310÷410 HV₁, wytworzona w procesie wymieszania i krystalizacji ciekłego materiału napoiny z materiałem podłoża. Twardość podłoża ze stali węglowej C45 osiągnęła wartość 270÷300 HV₁.

Rys. 9. Rozkład twardości w przekroju poprzecznym napoin próbki N3 z proszku typu Stellite Co-21 na podłożu ze stali C45 wykonanych techniką wielowarstwowego napawania laserowego LDT

Szeroki zakres twardości może być związany ze zróżnicowanym wymieszaniem materiału napoiny z podłożem jak też zmiennymi parametrami dostarczania ciepła i odprowadzania ciepła. W związku z tym, że krystalizacja oraz przemiany fazowe zachodzą w napoinie (N) oraz w strefie wtopienia metalurgicznego (SW), to materiał podłoża (MP) został utwardzony w strefie wpływu ciepła (SWC), przyległej do napoiny na głębokość do około 0,5 mm. W większej odległości od SWC, w zależności od zastosowanych parametrów napawania, twardość pozostaje na poziomie twardości materiału wyjściowego.

WNIOSKI

1. Napawanie metodą laserowego osadzania metalu w proszku Stellite Co-21 techniką LDT pozwala na pokrywanie zwykłych materiałów konstrukcyjnych materiałami o wysokich cechach użytkowych. Pokrycia takie posiadają powtarzalne kształty i geometrie.
2. Ocena mikrostruktury powierzchni przekrojów poprzecznych próbek po napawaniu techniką LDT wskazuje na dobrą jakość metalurgiczną napoiny z wyraźnym wtopieniem i niewielką strefą wpływu ciepła.
3. Mikrostrukturę napoin po napawaniu laserowym wielowarstwową techniką LDT cechują podłużne dendryty słabo rozgałęzione, związane z kierunkowym procesem odprowadzania ciepła co świadczy o szybkiej krystalizacji kierunkowej o różnych kierunkach.
4. Od ilości dostarczanego ciepła i odprowadzania ciepła zależy struktura przekroju napoiny i możliwość występowania pęknięć. Technologia LTD poprzez regulowanie parametrów obróbki jak

posuw, ilość podawanego materiału proszków może wpływać na jakość wytwarzanej napoiny.

5. Twardość dla napoin wytworzonych w wyniku wielowarstwowego napawania laserowego wynosiła od 450 do 570 HV0,1, a w do strefie wpływu ciepła wynoszącej ok. 0,5 mm wynosiła od 320 do 420 HV0,1, wyraźnie obniżając się w kierunku podłoża do wartości 280HV0,1.
6. Napawanie laserowe wielowarstwowe metodą LTD umożliwia obniżanie kosztów regeneracji dzięki stosowaniu na podłoża zwykłej stali konstrukcyjnej pokrytej Stelitem dającym wysokie właściwości użytkowe, zwiększające żywotność części i możliwość regeneracji narzędzi.

BIBLIOGRAFIA

1. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C., Additive manufacturing of metals, „Acta Materialia” 2016, s. 371–392.
2. Tatarczak J. i inni, Przegląd nowoczesnych technologii druku 3D obiektów metalowych, „Mechanik” 2017, nr 7, s. 612–614.
3. Mazurkiewicz A., Nędzi B., Analysis of selected properties of an article made from metal powder using laser additive manufacturing. Journal of Machine Construction and Maintenance. “Problemy Eksploatacji – Maintenance Problems” 2017, nr 2 (105), p.79–86.
4. Burakowski T., Wierzchoń T., Inżynieria Powierzchni Metali, WNT, Warszawa 1995.
5. Kusiński J., Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej, Akapit, Kraków 2000.
6. Durejko T., Łazińska M., Przetakiewicz W., Wytwarzanie materiałów na podstawie fazy Fe₃Al techniką LENS, „Inżynieria Materiałowa” 2012, nr 5, s. 353–357.
7. Napadłek W., Chrzanowski W., Woźniak A., Przyrostowe technologie 3d w odbudowie kształtu zużytych eksploatacyjnie łopat turbin parowych, „Autobusy” 2017, nr 12, s. 1147–1152.
8. <http://eagle-group.eu/technologie/deponowanie-laserowe/>
9. <http://www.rpm-innovations.com/>

Evaluation of the quality of layers applied by LDT laser metal deposition

The article presents the results of a study of C45 carbon steel hardfacing using laser metal deposition with Stellite Co-21 powder. The microstructure of the cross-section of samples prepared with different scanning speed and the amount of used powder at constant laser power was observed. Analyzing the cross-sectional areas of the samples, it was found that, at specific production parameters, cracks occur in weld overlay, which should be associated with the amount of heat supplied and discharged, especially at the unheated basis. This may be confirmed by the presence of deposits of weakly branched dendrites in the microstructure, which should be related to the directional heat dissipation process and rapid directional crystallization. It is possible to regulate these phenomena by selecting appropriate processing parameters. The microstructure analysis of cross-sectional areas of samples after hardfacing using LDT technique indicates good metallurgical quality of the deposit with a small heat affected zone of about 660÷760 μm. The microhardness measurements on the sample cross-sections indicated a wide microhardness distribution ranging from 510HV1 in the weld overlay, about 410HV1 in the heat affected zone, to 270HV1 in the C45 steel base.

Autorzy:

dr inż. Andrzej **Mazurkiewicz** – Wydział Mechaniczny, Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu
andrzej.mazurkiewicz@uthrad.pl

dr inż. Andrzej **Poprzeczka** – Wydział Mechaniczny, Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu
a.poprzeczka@uthrad.pl

JEL: L64 DOI: 10.24136/atest.2018.140

Data zgłoszenia: 2018.05.23 Data akceptacji: 2018.06.15