

Ocena jakości warstw z proszków metali nakładanych w technologii osadzania laserowego (LDT)

Evaluation of the quality of metal powder layers applied by laser deposition technology

ANDRZEJ MAZURKIEWICZ
ANDRZEJ POPRZECZKA *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.12.189>

Badano napawanie na stali niestopowej C45 w technologii osadzania laserowego (LDT) proszku ze Stellite oraz stali wysokochromowej. Stwierdzono występowanie pęknięć w napoinie przy określonych parametrach wytwarzania, które należy wiązać ze zmiennymi parametrami dostarczania i odprowadzania ciepła na niepodgrzewanym podłożu.

SŁOWA KLUCZOWE: napawanie laserowe, laserowa technologia osadzania proszkiem, warstwa wierzchnia, dendryty

The article presents the research results of welding of non-alloy steel C45 by laser metal deposition (LDT) with Stellite powder and high-chromium. The occurrence of cracks in the weld was found, with specific production parameters, which should be associated with variable parameters of heat supply and heat dissipation on the unheated substrate.

KEYWORDS: laser welding, LDT, laser powder deposition technology, surface layer, dendrites

Głównym kryterium podziału wytwarzania warstwowego jest sposób podawania materiału: z użyciem wypełnionej platformy oraz regularnie wyrównywanej proszkiem (*powder bed*) lub bezpośrednio punktowe nanoszenie (*direct deposition*) [1].

Jest wiele metod wytwarzania, w których model jest kształtowany przez ciągły przyrost materiału, aż do uzyskania wymaganego kształtu [2, 3]. Dużą rolę odgrywa technologia laserowego osadzania – LDT (*laser deposition technology*). Jest to proces, w którym proszek metalowy jest wtryskiwany do wiązki skupionej lasera o dużej mocy w ściśle kontrolowanych warunkach atmosferycznych.

Na jakość wytworzonego elementu czy warstwy wpływa oddziaływanie promieniowania laserowego na materiał, które zależy przede wszystkim od:

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

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.

Siła oddziaływania wiązki laserowej na materiał jest związana z absorpcją promieniowania laserowego (fotonów). Absorpcyjność zależy głównie od długości promieniowania i temperatury materiału. Im krótsza fala, tym wyższa absorpcja.

Najniższą absorpcyjność wykazują metale charakteryzujące się dużym przewodnictwem cieplnym. Absorpcja promieniowania rośnie wraz z temperaturą na skutek utleniania się powierzchni. Tlenki znacznie lepiej absor-

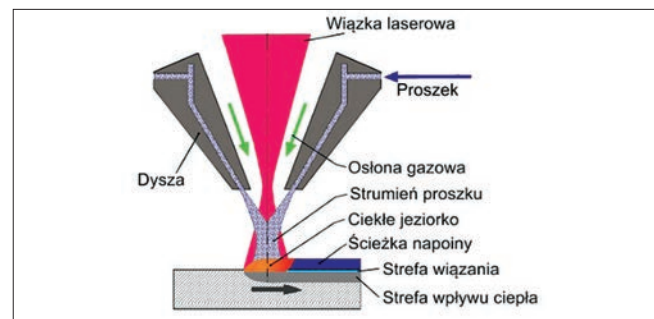
bują promieniowanie. To znaczy, że wstępne podgrzanie powierzchni zwiększa absorpcję promieniowania [4].

Absorpcja promieniowania laserowego o dużej energii w krótkim czasie może spowodować powstanie fali ciśnieniowej w materiale, a to z kolei wywołuje naprężenia rozciągające, prowadzące do mikropęknięć.

Występowanie naprężeń rozciągających w warstwie wierzchniej w przypadku laserowego stopowania stali Stellite przedstawiono m.in. w pracach [4, 5].

Na strukturę i jakość elementu wytwarzanego poprzez osadzanie proszku metalu wpływa w dużym stopniu wartość posuwu stołu roboczego. Wynika to z powiązania z szybkością odprowadzania ciepła [6, 7].

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. 1).



Rys. 1. Istota technologii LDT

Materiał i metoda badań

Głównym celem pracy było określenie wybranych właściwości jakościowych napoin wytworzonych w technologii laserowego osadzania proszków metali (LDT), takich jak: mikrostruktura, twardość oraz makrostruktura. Napoina powstała na podłożu ze stali niestopowej C45.

Materiałami napoiny były Stellite 21, proszek o gradacji 45÷180 µm, oraz stal wysokowęglowa wysokochromowa w postaci proszku o gradacji 45÷180 µm.

Skład chemiczny napoiny przedstawiono w tabl. I i II. Wielowarstwowe napawanie laserowe wykonano z wykorzystaniem standardowego systemu RPM1 557 do laserowego osadzania metalu w proszku. Parametry technologiczne wytwarzania przedstawiono w tabl. III.

TABLICA I. Skład chemiczny materiału napoiny typu Stellite 21

Skład chemiczny, %							
Co	C	Mo	Ni	Fe	Mn	Cr	Si
reszta	0,26	5,40	2,40	0,20	0,68	27,80	0,90

* Dr inż. Andrzej Mazurkiewicz (andrzej.mazurkiewicz@uthrad.pl), dr inż. Andrzej Poprzeczka (andrzej.poprzeczka@uthrad.pl) – Wydział Mechaniczny Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego w Radomiu

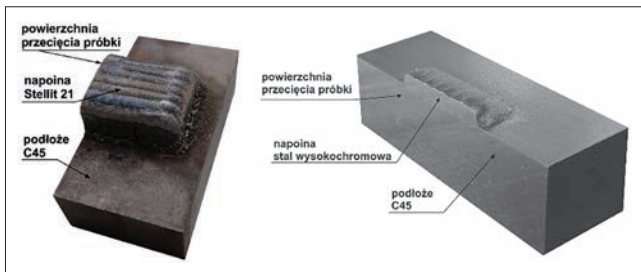
TABLICA II. Skład chemiczny materiału napoiny typu stal

Skład chemiczny, %								
Fe	C	Mo	Ni	Cr	Mn	Si	Mg	S
reszta	1,82	4,40	16,40	27,80	0,68	1,31	0,74	0,90

TABLICA III. Parametry wytwarzania napoiny stellitej (N) i stalowej (S) metodą laserowego osadzania proszku metalu (LDT)

Nr próbki i gatunek (Stellit 21, stal)	Prędkość skanowania cal/min		Podawanie proszku g/min		Moc lasera W	Liczba warstw	
	N	S	N	S	N	N	S
N1/S1	30	30	9,6	6,9	2740	14	4
N2/S2	30	21	7,6	5,0	2740	14	3
N3/S3	30	15	5,8	5,0	2740	14	5
N4/S4	24	21	5,8	5,0	2740	14	5

Wygląd przeciętych w środkowej części napoiny próbek oraz powierzchnię przeznaczoną do obserwacji mikroskopowej przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Kształt próbek po przecięciu oraz powierzchni przeznaczonych do obserwacji mikroskopowej – po lewej napoina stellitejowa, po prawej napoina stalowa wysokochromowa

Wyniki badań

■ **Napoina stellitejowa.** Napoiny miały regularny, powtarzalny kształt z widocznymi na powierzchni cząstkami nieprzetopionego proszku (rys. 2), co jest charakterystyczne dla napoin wykonanych z materiału proszkowego. Podobny wygląd mają napoiny wykonane ze stali wysokochromowej.

Makrostruktura próbki N3 (rys. 3) uwidacznia wykonanie 14 warstw od strefy wtopienia. Wśród próbek wykonanych z różnymi parametrami (tablica III) próbka N3 wyróżnia się znaczną liczbą pęknięć wewnątrz napoiny. Pęknięcia zarodkują już w pierwszej warstwie od podłoża i sięgają górnej powierzchni próbki. Pęknięcia te są ułożone zgodnie z kierunkiem odprowadzania ciepła, szczególnie intensywnie do obszarów niepodgrzewanego podłoża.

Powstawanie pęknięć jest wynikiem występowania naprężeń własnych. Aby zapobiec powstawaniu pęknięć, stosuje się wygrzewanie przed laserową modyfikacją obrabianych elementów lub po niej.

Możliwość występowania pęknięć wskutek działania naprężeń rozciągających w warstwie wierzchniej w przypadku materiałów o niskiej przewodności cieplnej, takich jak Stellite, przedstawiono w pracy [8].

Mikrostruktura przekroju poprzecznego próbki N4 (rys. 4) jest charakterystyczna dla badanych próbek.

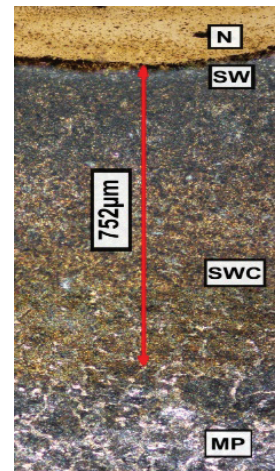
Mikrostruktura warstw materiałów napoin jest dendrytyczna (rys. 5a). Osie dendrytów są zgodne z kierunkami odprowadzania ciepła w trakcie krystalizacji. Dendryty mają dość duże rozmiary i przebiegają przez granice warstw, tzn. zachowują swoje kierunki krystalograficzne, a kolejne warstwy nie hamują ich wzrostu (rys. 5b). Dendryty mają długie osie główne, ale są słabo rozgałęzione,

co świadczy o szybkiej krystalizacji kierunkowej. Na granicach „pakietów” dendrytów, biegnących w różnych kierunkach, nie występują porowatość skurczowa ani pęknięcia.

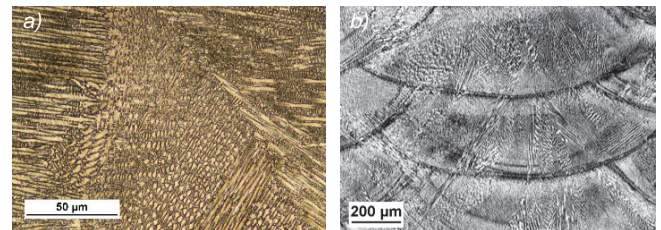
Do oceny właściwości napoin wykorzystano pomiar mikrotwardości (rys. 6) w przekroju prostokątnym do powierzchni napoiny, czyli od powierzchni zewnętrznej napoiny, poprzez strefę połączenia metalurgicznego, do stalowego podłoża.



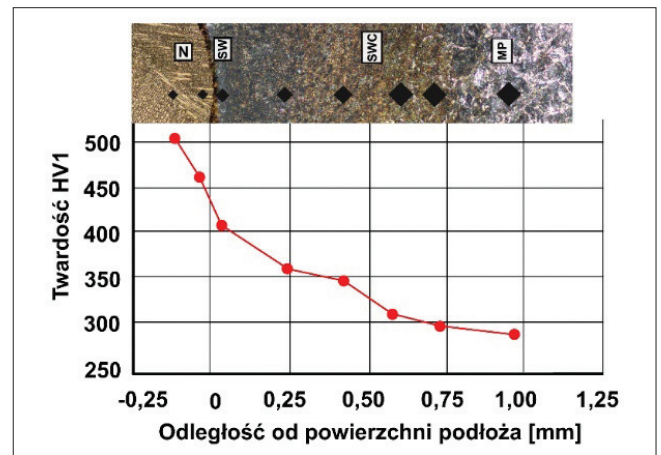
Rys. 3. Widok przeciętej powierzchni, próbka N3 z widocznymi pęknięciami w kierunku tworzenia warstw, pow. 7x



Rys. 4. Mikrostruktura przekroju poprzecznego próbki N4, napawanej proszkiem typu Stellite 21 na podłożu ze stali C45, wykonanej techniką wielowarstwowego napawania laserowego LDT, N – napoina, SW – strefa wtopienia, SWC – strefa wpływu ciepła, MP – materiał podłoża



Rys. 5. Mikrostruktura materiału napoiny (próbka N2) w 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

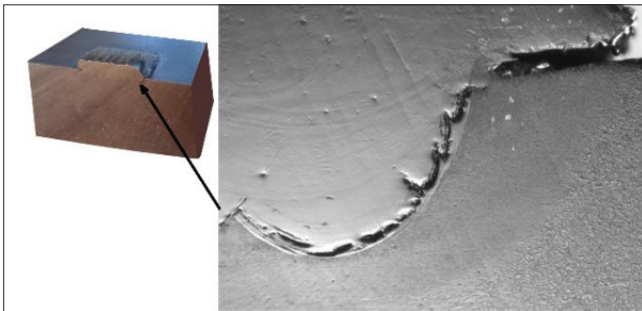


Rys. 6. Rozkład twardości w przekroju poprzecznym napoiny próbki N3, z proszku typu Stellite 21 na podłożu ze stali C45, wykonanej techniką wielowarstwowego napawania laserowego LDT

■ **Napoina stalowa wysokochromowa.** W odróżnieniu od napoiny stellitej napoina stalowa wysokochromowa nie ma żadnych pęknięć wewnętrznych przy stosowanych parametrach wytwarzania próbek.

Wśród obserwowanych próbek wykonanych z różnymi parametrami (tabl. III) wyróżniają się próbki S2 i S4, mające w skrajnych obszarach napoiny znaczne pęknięcia obejmujące zewnętrzne pierwsze ścieżki nakładania warstw (rys. 7). Są to miejsca pierwszego kontaktu materiału napoiny z zimnym podłożem, co musi sprzyjać szybkiemu odprowadzaniu ciepła.

Pęknięcia są ułożone zgodnie z kształtem wtopienia materiału napoiny. Na możliwość występowania naprężeń rozciągających przy powierzchni w stalach chromowych przetapianych laserowo wskazują niektóre badania [4, 8].

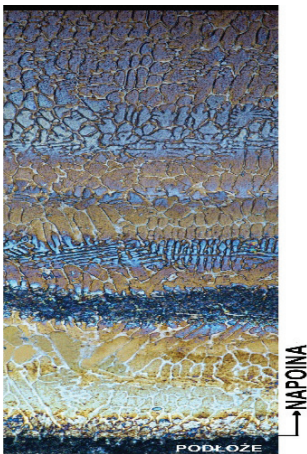


Rys. 7. Widok i miejsce pęknięcia próbki S2 występujące w skrajnych ścieżkach nakładania pierwszej warstwy napoiny

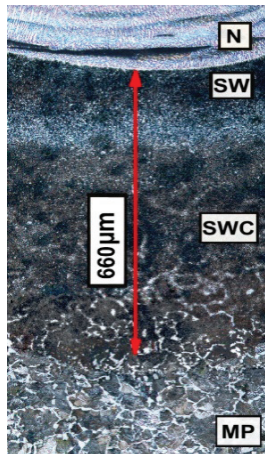
Struktura warstw materiału napoiny jest dendrytyczna, zwłaszcza w pierwszej warstwie, bliższej SWC. Widoczne są duże dendryty z osiami skierowanymi w kierunku odprowadzania ciepła w trakcie krystalizacji. Podobnie jak w przypadku napoiny stellitej, także dendryty mają dość duże rozmiary i przebiegają przez granice warstw.

W napoinie stalowej zwraca uwagę duże zróżnicowanie struktury, wynikające z różnych warunków krystalizacji materiału podczas procesu wytwarzania (rys. 8). Istnieje możliwość ujednorodnienia struktury poprzez obróbkę cieplną. Podobna sytuacja występuje podczas wytwarzania elementów w technologii selektywnego stapiania laserowego – SLM, gdzie niejednorodność również warstwowej struktury usunięto poprzez wyżarzanie ujednorodniające [3].

Mikrostruktura przekroju poprzecznego próbki S4 (rys. 9) jest charakterystyczna dla wszystkich przyjętych parametrów napawania wielowarstwowego.

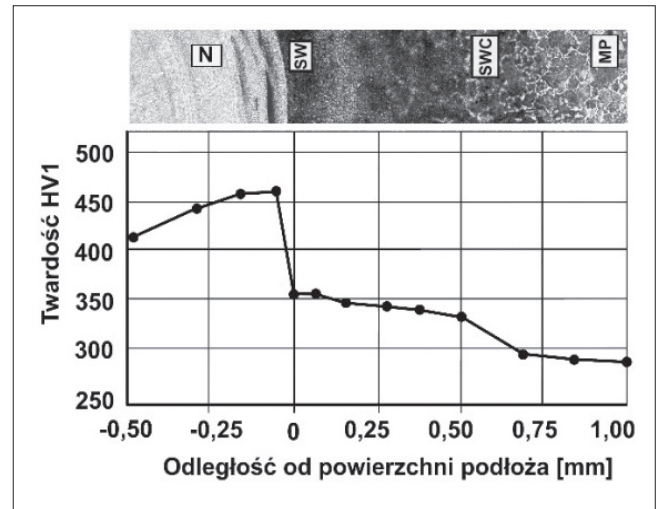


Rys. 8. Zakłócenia budowy w przekroju napoiny próbki S2, wskazujące na dużą niejednorodność struktury



Rys. 9. Mikrostruktura przekroju próbki S4 napawanej w technologii LDT proszkiem ze stali wysokochromowej (oznaczenia jak na rys. 5)

Na niejednorodność struktury napoiny oraz materiału rodzimego wykazuje również zmienność mikrotwardości w obu obszarach (rys. 10).



Rys. 10. Rozkład średnich wartości twardości w przekroju poprzecznym napoiny próbki S4 z proszku stali wysokochromowej na podłożu ze stali C45 wykonanej techniką wielowarstwowego napawania laserowego LDT

Wnioski

Napawanie metodą laserowego osadzania metalu w proszku Stellite 21 oraz stali wysokochromowej techniką LDT pozwala na powlekanie zwykłych materiałów konstrukcyjnych materiałami o wysokich cechach użytkowych. Takie powłoki mają powtarzalne kształty i geometrię.

Ocena mikrostruktury powierzchni przekrojów poprzecznych próbek po napawaniu techniką LDT wskazuje na dobrą jakość metalurgiczną napoiny z wyraźnym wtopieniem i niedużą strefą wpływu ciepła, ok. 0,7 mm.

Mikrostrukturę napoin po napawaniu laserowym wielowarstwowym techniką LDT cechują podłużne, słabo rozgałęzione, dendryty, związane z kierunkowym procesem odprowadzania ciepła, co świadczy o szybkiej krystalizacji kierunkowej o różnych kierunkach.

Zmiennymi parametrami dostarczania i odprowadzania ciepła można wpływać na niejednorodność struktury napoiny, zwłaszcza ze stali wysokochromowej.

LITERATURA

- Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. "Additive manufacturing of metals". *Acta Materialia*. 117 (2016): s. 371–392.
- Tataczak J. i in. „Przegląd nowoczesnych technologii druku 3D obiektów metalowych”. *Mechanik*. 7 (2017): s. 612–614.
- 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*. 2, 105 (2017): s. 79–86.
- Radziejowska J. „Laserowa modyfikacja właściwości warstwy wierzchniej wspomaganą nagniataniem”. Warszawa: Prace IPPT, 3/2011, 2011.
- Grum J., Sturm R. "A new experimental technique for measuring strain and residual stresses during a laser remelting process". *Journal of Materials Processing Technology*. 147 (2004): s. 351–358.
- Strutt P.R., Nowotny H., Tuli M., Kear B.H. "Laser surface melting of high speed tool steels". *Materials Science and Engineering*. 36 (1978): s. 217–222.
- Kusiński J. „Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej”. Kraków: Akapit, 2000.
- Gripenberg H. i in. "Prediction and measurement of residual stresses in clad steel". *Materials Science Forum*. 404–407 (2002): s. 861–866.