

Wpływ warunków procesu napawania laserowego na mikrostrukturę i twardość napoiny Stellite 694 na podłożu z nadstopu niklu Inconel 738LC

Effect of laser cladding process parameters on microstructure morphology and hardness of Stellite 694 overlay deposited onto Inconel 738LC alloy substrate

ANDRZEJ GRADZIK
GRAŻYNA MRÓWKA-NOWOTNIK
JACEK NAWROCKI
JAN SIENIAWSKI *

DOI: 10.17814/mechanik.2016.4.36

Przedstawiono ocenę wpływu warunków procesu napawania laserowego na morfologię mikrostruktury i właściwości napoiny wytworzonej na podłożu z nadstopu niklu Inconel 738LC, z którego wytwarza się elementy części gorącej silnika lotniczego. Proces prowadzono za pomocą lasera dyskowego TruDisk 1000 firmy TRUMPF o mocy 1 kW z różnymi wartościami prędkości napawania – od 400 do 700 mm/min. Materiałem dodatkowym był proszek stopu kobaltu – Stellite 694. Określono stopień oddziaływania warunków procesu napawania laserowego na skład chemiczny i morfologię składników fazowych mikrostruktury oraz wpływ objętości względnej materiału podłoża w napoinie na jej twardość.

SŁOWA KLUCZOWE: napawanie laserowe, podłoże Inconel 738LC, napoina Stellite 694, morfologia mikrostruktury, twardość napoiny

In this paper the influence of laser cladding process parameters on microstructure and hardness of Stellite 694 coatings deposited onto Inconel 738LC alloy substrate is presented. Laser cladding process was carried out using Yb:YAG – TRUMPF TruDisk 1000 disc laser with maximum power of 1 kW in continuous wave mode. Laser cladding head velocity from 400 to 700 mm/min was applied. The effect of process parameters on chemical composition, microstructure morphology was examined by means of optical microscopy and scanning electron microscopy. The influence of volume fraction of substrate in the coating on its hardness was determined.

KEYWORDS: laser cladding, Inconel 738LC substrate, Stellite 694 coating, microstructure, hardness

Łopatki turbiny gazowej pracują w trudnych warunkach – są narażone na oddziaływanie wysokiej temperatury, środowiska gazów utleniających oraz dużych obciążeń mechanicznych. Te elementy produkuje się z żarowytrzymałych materiałów, przede wszystkim z nadstopów niklu, a także żelaza i kobaltu. Nadstopy niklu charakteryzują się szczególnie dobrą żarowytrzymałością oraz odpornością na zmęczenie cieplne [1, 2].

Analiza danych literaturowych wskazuje, że zużycie pióra łopatkę najczęściej następuje wskutek erozji. Dodatkowo półki łopatek tworzące zewnętrzny pierścień turbiny są narażone na zużycie ściernie. W miejscach ich styku

stosuje się zatem warstwy ochronne materiału o większej odporności na ścieranie w porównaniu z materiałem podłoża, którym zazwyczaj jest nadstop niklu. Wspomniane warstwy wytwarza się ze stopów kobaltu z dużą zawartością chromu i wolframu (Stellity), a także ze stopów kobaltu z molibdenem, chromem, wolframem i krzemem (stopy Tribaloy). Gatunki tych stopów charakteryzują się dużą twardością (55÷60 HRC) w porównaniu z nadstopami niklu (35 HRC) oraz dobrą odpornością na pełzanie i zużycie ściernie [3÷5].

Warstwy ochronne o dobrej odporności na ścieranie otrzymuje się w procesach napawania gazowego, napawania elektrycznego, natryskiwania plazmowego lub napawania laserowego. Napawanie laserowe jest nowoczesną metodą pozwalającą na uzyskanie warstw o prognozowanych właściwościach użytkowych. Ten proces najczęściej prowadzi się z użyciem laserów diodowych, dyskowych i CO₂ [6÷8], a charakteryzują go: długość fali promieniowania, gęstość mocy i czas oddziaływania wiązki lasera na materiał oraz zjawisko absorpcji promieniowania. Absorpcja promieniowania laserowego przez materiał zależy od wielu czynników (m.in. od długości fali promieniowania, temperatury podłoża oraz właściwości fizycznych powierzchni i jej chropowatości [9, 10]) i wzrasta dla materiału w stanie ciekłym [6, 8, 10].

Wiązka lasera topi jednocześnie materiał dodatkowy i materiał podłoża, tworząc napoinę. Moc i rozmiary wiązki lasera determinują gęstość mocy wiązki – dla napawania laserowego przyjmuje ona zwykle wartości 10²÷10⁶ W/cm² [6, 8÷10]. Materiał dodatkowy w procesie napawania laserowego ma postać drutu lub proszku. Drut wprowadza się pod kątem 20÷60° do wiązki lasera, natomiast proszek wprowadza się przez dyszę boczną lub otwory w dyszy głowicy laserowej. Natężenie przepływu proszku zwykle wynosi 1÷50 g/min [6÷9, 12÷15]. Do napawania laserowego stosuje się proszki o ziarnach kulistych w rozmiarach 40÷100 μm, wytwarzane metodą atomizacji gazowej lub wodnej [6, 8, 9]. Typowymi gazami nośnymi i osłonowymi są hel i argon.

Analiza danych literaturowych wskazuje, że w procesie napawania laserowego proszek ulega przetopieniu w objętości 30÷90%. Jednocześnie ustalono, że proces cechuje się największą wydajnością, gdy średnica wiązki lasera jest zbliżona do średnicy strumienia wprowadzanego proszku. Prędkość przemieszczania głowicy laserowej względem powierzchni (prędkość napawania v_n) decyduje o czasie oddziaływania wiązki lasera na materiał podłoża, który z reguły wynosi 50÷1000 mm/min [6, 8, 9, 12, 16].

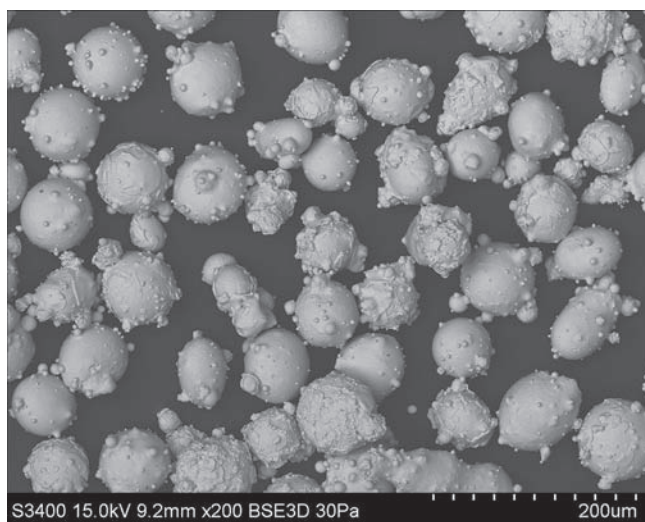
* Mgr inż. Andrzej Gradzik (andrzej_gradzik@prz.edu.pl), dr hab. inż. Grażyna Mrówka-Nowotnik, prof. PRz (mrowka@prz.edu.pl) – Katedra Materiałoznawstwa, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej; mgr inż. Jacek Nawrocki (jaceknaw@prz.edu.pl), prof. dr hab. inż. Jan Sieniawski (jansien@prz.edu.pl) – Uczelniane Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego Politechniki Rzeszowskiej

Celem prowadzonych badań było ustalenie wpływu prędkości napawania i natężenia przepływu gazu osłonowego na kształt i objętość względną materiału podłoża w napoinie. Określono także zależność twardości napoiny od objętości względną materiału podłoża w wytworzonej napoinie.

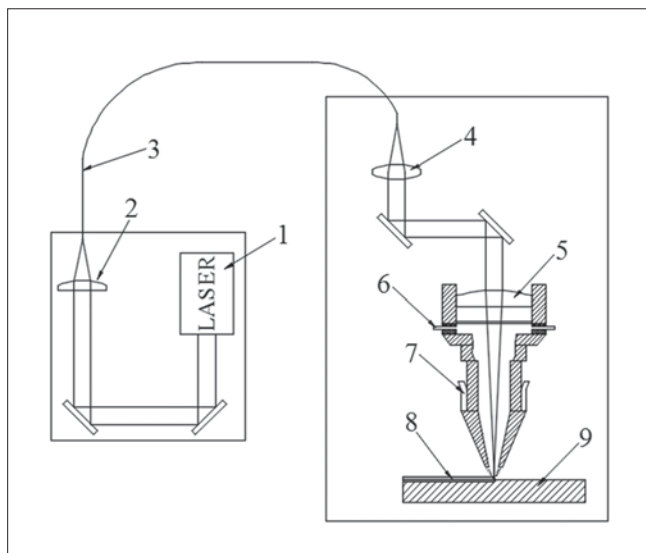
Materiał i metodyka badań

W procesie napawania laserowego stosowano nadstop niklu Inconel 738LC o następującym składzie chemicznym: Cr – 16, Co – 8,5, Ti – 3,4, Al – 3,4, W – 2,6, Mo – 1,75, Ta – 1,75, Nb – 0,9, C – 0,11, Zr – 0,04, B – 0,01% mas., Ni – reszta. Materiałem dodatkowym był proszek nadstopu kobaltu – Stellite 694 o rozmiarach cząstek $30\div 80\text{ }\mu\text{m}$ (rys. 1) i składzie chemicznym: Cr – 28, W – 18,6, Ni – 5,4, V – 0,8, C – 0,85% mas., Co – reszta.

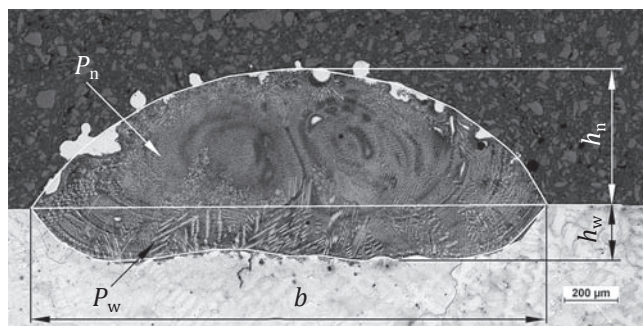
Proces napawania laserowego prowadzono za pomocą urządzenia TruLaser Cell 3008 i lasera dyskowego Yb:YAG – TruDisk 1000 firmy TRUMPF. Stosowano wiązkę ciągłą promieniowania o mocy 900 W i średnicy na



Rys. 1. Proszek stopu kobaltu – Stellite 694



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego do prowadzenia procesu napawania laserowego. 1 – rezonator lasera, 2 – złącze światłowodowe, 3 – światłowód o średnicy rdzenia $200\text{ }\mu\text{m}$, 4 – kolimator, 5 – soczewka skupiająca o długości ogniskowej $f = 220\text{ mm}$, 6 – wprowadzenie gazu osłonowego do dyszy, 7 – wprowadzenie proszku i gazu nośnego przez otwory w dyszy głowicy, 8 – napoina, 9 – podłoże



Rys. 3. Przekrój poprzeczny napoiny (P_n – pole powierzchni napoiny, P_w – pole powierzchni wtopienia, h_n – wysokość napoiny, h_w – głębokość wtopienia, b – szerokość napoiny)

powierzchni podłoża $1,13\text{ mm}$. Przyjęto odległość dyszy głowicy laserowej od powierzchni podłoża równą 12 mm . Proszek stopu Stellite 694 wprowadzano przez trzy otwory dyszy głowicy laserowej (rys. 2), która przemieszczała się z prędkością $400, 500, 600$ oraz 700 mm/min . Stosowano natężenie przepływu: proszku – $8,6\text{ g/min}$, helu (gazu nośnego) – $8\text{ dm}^3/\text{min}$, argonu (gazu osłonowego) – $10, 13, 15$ i $20\text{ dm}^3/\text{min}$. Klasa czystości stosowanych gazów technicznych: N5,0.

Rozmiary i kształt napoiny – jej wysokość i szerokość oraz głębokość wtopienia – mierzono według schematu przedstawionego na rys. 3. Przyjęto, że wartość ilorazu powierzchni wtopienia i całkowitej powierzchni przekroju poprzecznego napoiny odpowiada objętości względną materiału podłoża w napoinie [5]:

$$V_v = \frac{P_w}{P_n + P_w} \cdot 100\%$$

gdzie: V_v – objętość względną materiału podłoża w napoinie, P_w – pole powierzchni wtopienia, P_n – pole powierzchni napoiny.

W badaniach mikroskopowych stosowano mikroskop optyczny Nikon Epiphot 300. Powierzchnię przygotowanych zgładów trawiono odczynnikami o składzie chemicznym: $80\text{ cm}^3\text{ HCl} + 2\text{ cm}^3\text{ HNO}_3 + 11\text{ cm}^3\text{ H}_2\text{O} + 16\text{ g FeCl}_3$. Analizę składu chemicznego w mikroobszarach napoiny prowadzono za pomocą mikroskopu Hitachi S-3400N z przystawką EDS. Liniowy rozkład zawartości pierwiastków stopowych określono od powierzchni napoiny do głębokości ok. $500\text{ }\mu\text{m}$ – poniżej granicy wtopienia. Pomiary twardości napoiny wykonano mikrotwardościomierzem Innovatest Nexus 4303, metodą Vickersa przy obciążeniu $4,9\text{ N}$.

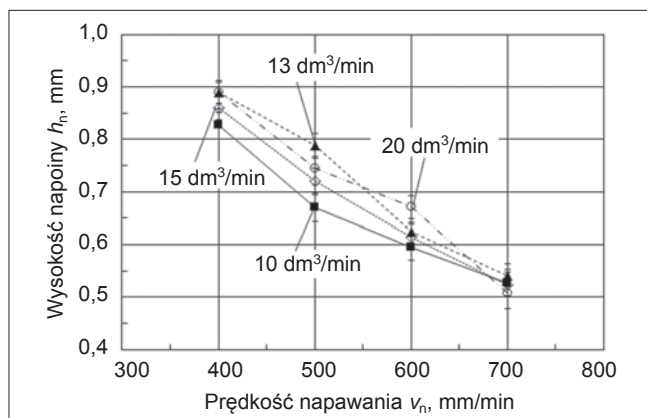
Wyniki badań i ich analiza

Analiza stanu powierzchni napoin wykonanych z użyciem wiązki lasera dla prędkości napawania $400\div 700\text{ mm/min}$ i natężenia przepływu argonu $10\div 20\text{ dm}^3/\text{min}$ wykazała obecność cząstek proszku nieprzetopionych lub częściowo stopionych w procesie napawania laserowego. Stwierdzono utlenienie powierzchni napoiny dla natężenia przepływu argonu $< 15\text{ dm}^3/\text{min}$. Ustalono również, że zmiana warunków napawania wpływa na kształt napoiny oraz objętość względną materiału podłoża w napoinie. Zwiększenie prędkości napawania w zakresie od 400 do 700 mm/min prowadzi do zmniejszenia wysokości i szerokości napoiny odpowiednio od $0,85$ do $0,55\text{ mm}$ oraz od $2,35$ do 2 mm (rys. 4 i 5). Jednocześnie zwiększenie natężenia przepływu argonu od 10 do $20\text{ dm}^3/\text{min}$ powoduje

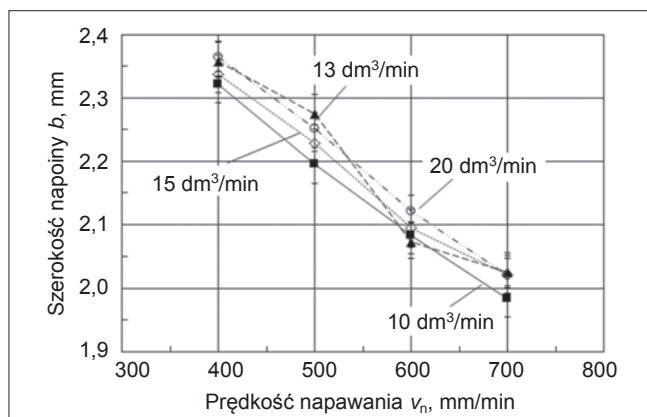
niewielką zmianę ($<0,1$ mm) wysokości i szerokości napoiny. Zwiększenie prędkości napawania skutkuje skróceniem czasu oddziaływania wiązki lasera na materiał. Maleje także masa proszku przetapianego w procesie. W związku z tym zwiększa się objętość względna materiału podłoża w napoinie (rys. 6).

Badania makroskopowe potwierdziły, że materiał podłoża – stop Inconel 738LC – ma budowę polikrystaliczną (rys. 7). W napoinie obserwowano widoczne efekty związane z konwekcyjnym przemieszczaniem się ciekłego stopu w jeziorze napoiny (rys. 8 i 9). Stwierdzono także występowanie w niej pojedynczych pęcherzy gazowych.

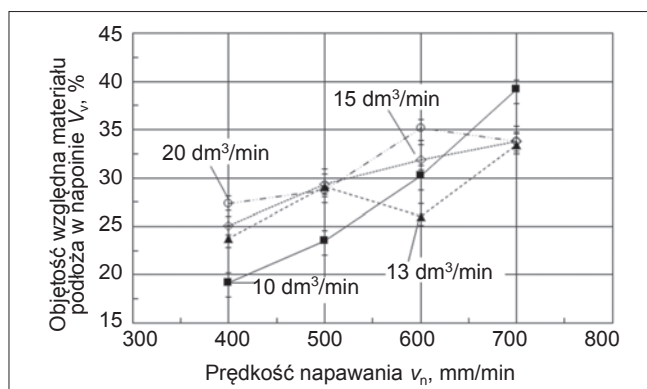
Badania mikroskopowe pozwoliły na określenie morfologii składników fazowych mikrostruktury materiału podłoża i wytworzonej napoiny stopu Stellite 694. Materiał podłoża ma budowę dendrytyczną z wydzieleniami węglików (rys. 10).



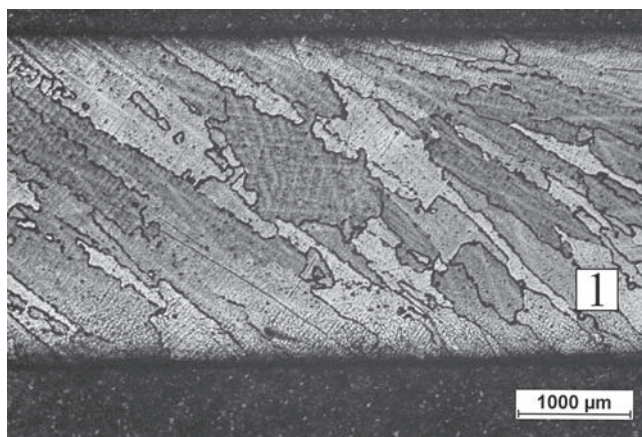
Rys. 4. Wpływ prędkości napawania i natężenia przepływu argonu na wysokość napoiny



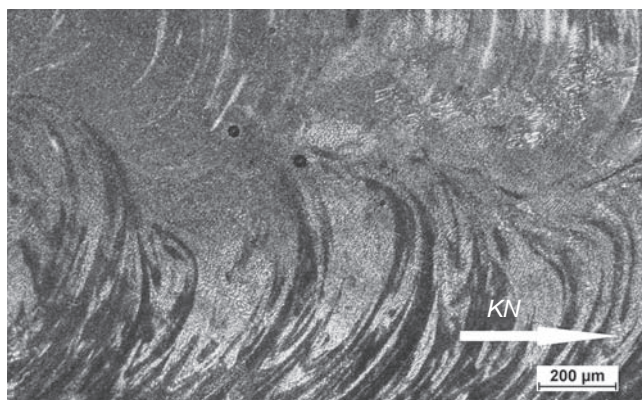
Rys. 5. Wpływ prędkości napawania i natężenia przepływu argonu na szerokość napoiny



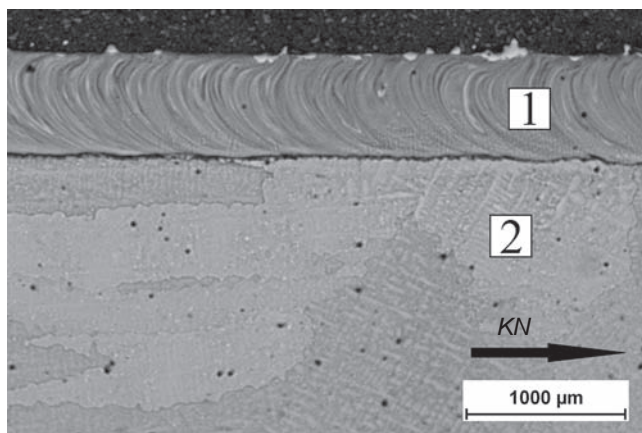
Rys. 6. Wpływ prędkości napawania i natężenia przepływu argonu na objętość względną materiału podłoża w napoinie



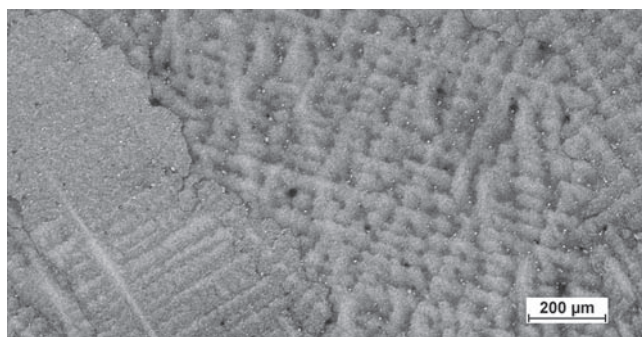
Rys. 7. Makrostruktura materiału podłoża 1 – stopu Inconel 738LC



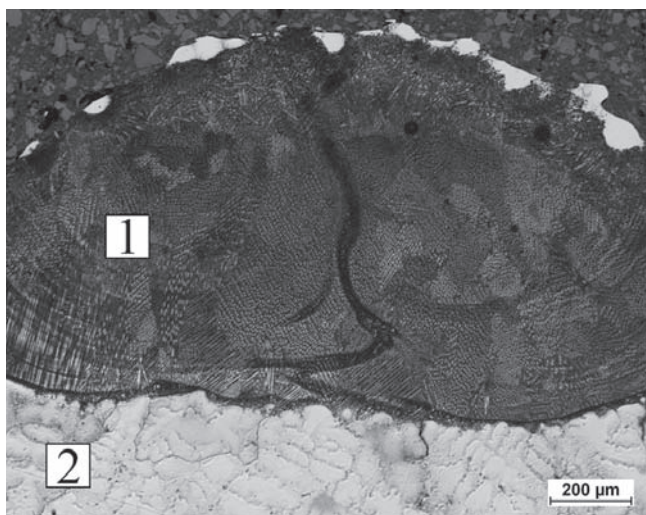
Rys. 8. Makrostruktura napoiny (prędkość napawania $v_n = 700$ mm/min, natężenie przepływu argonu – $15 \text{ dm}^3/\text{min}$) – przekrój wzdłużny równoległy do powierzchni podłoża (KN – kierunek napawania)



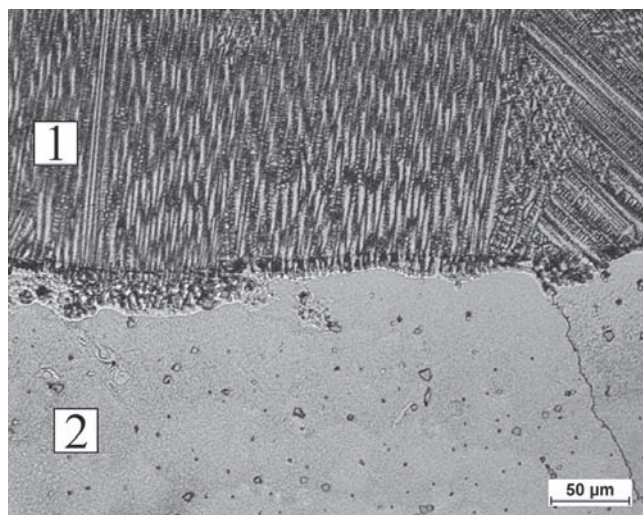
Rys. 9. Makrostruktura napoiny (prędkość napawania $v_n = 600$ mm/min, natężenie przepływu argonu – $15 \text{ dm}^3/\text{min}$) – przekrój wzdłużny prostopadły do powierzchni podłoża. KN – kierunek napawania, 1 – napoina Stellite 694, 2 – podłożo Inconel 738LC



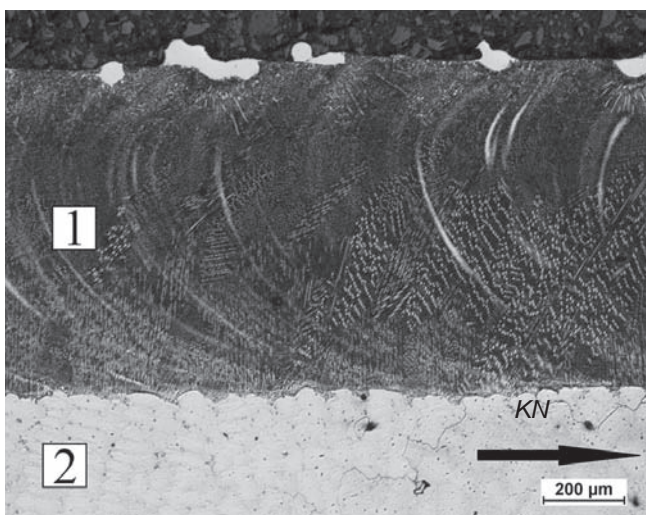
Rys. 10. Mikrostruktura podłoża – stop Inconel 738LC



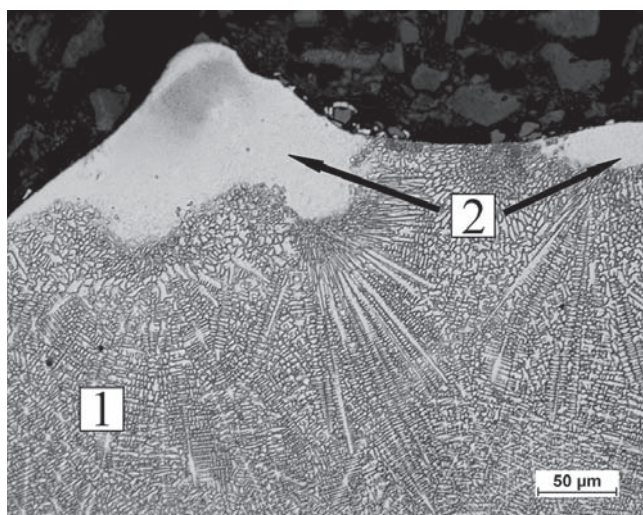
Rys. 11. Mikrostruktura napoi (prędkość napawania $v_n = 500$ mm/min, natężenie przepływu argonu – $15 \text{ dm}^3/\text{min}$) – przekrój poprzeczny. 1 – napoina Stellite 694, 2 – podłoże Inconel 738LC



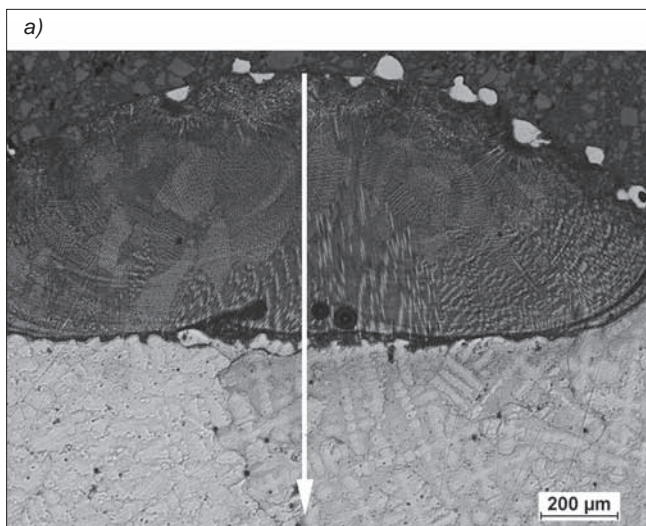
Rys. 13. Mikrostruktura napoi przy granicy wtopienia (prędkość napawania $v_n = 700$ mm/min, natężenie przepływu argonu – $15 \text{ dm}^3/\text{min}$). 1 – napoina Stellite 694, 2 – podłoże Inconel 738LC



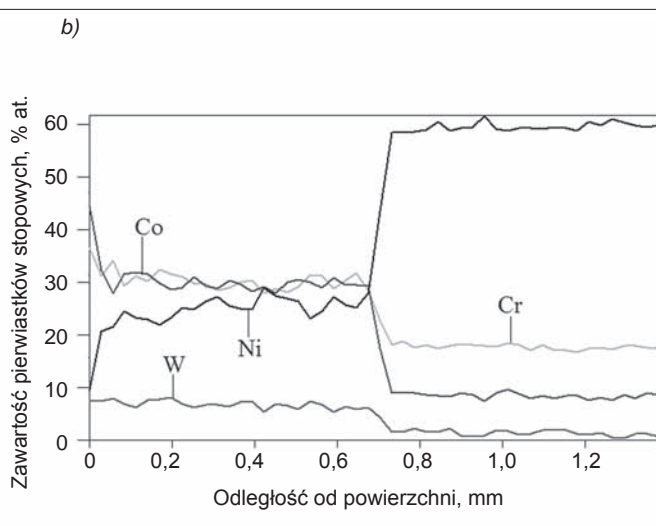
Rys. 12. Mikrostruktura napoi (prędkość napawania $v_n = 500$ mm/min, natężenie przepływu argonu – $15 \text{ dm}^3/\text{min}$) – przekrój wzdłużny prostopadły do powierzchni podłoża. KN – kierunek napawania, 1 – napoina Stellite 694, 2 – podłoże Inconel 738LC

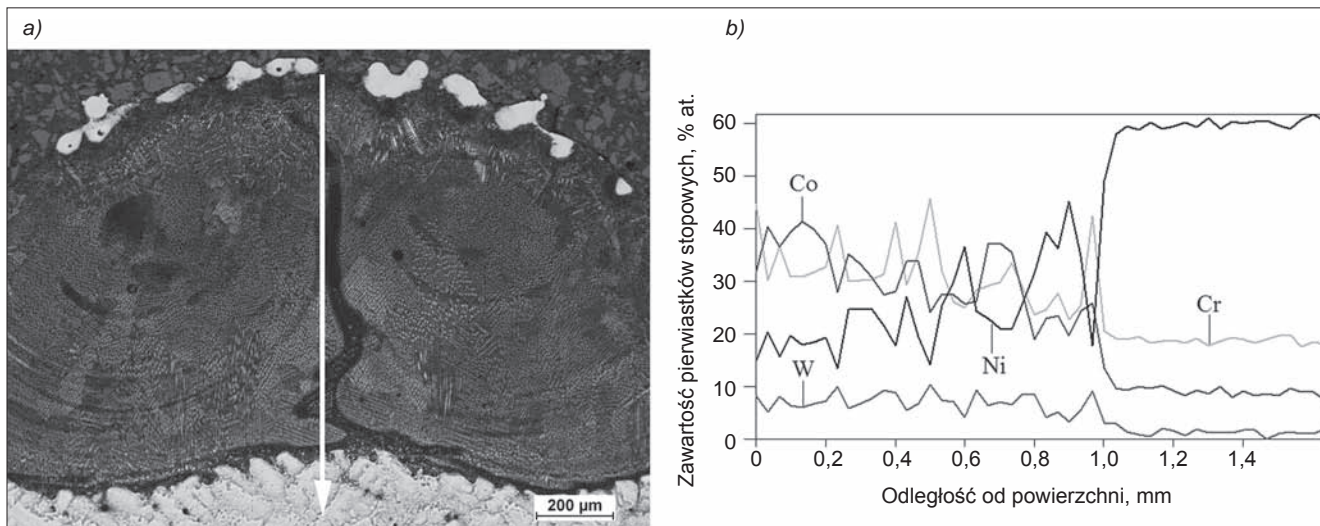


Rys. 14. Mikrostruktura warstwy wierzchniej napoi (prędkość napawania $v_n = 600$ mm/min, natężenie przepływu argonu – $13 \text{ dm}^3/\text{min}$). 1 – napoina Stellite 694, 2 – nadtopione cząstki proszku Stellite 694

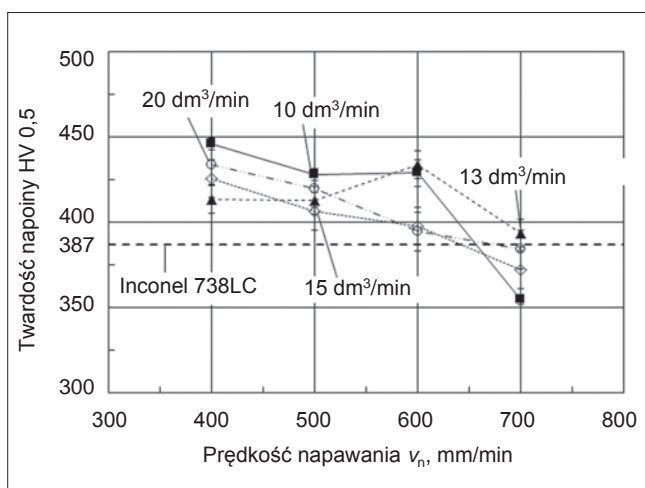


Rys. 15. Mikrostruktura napoi (a) oraz rozkład liniowy zawartości Co, Cr, Ni i W na jej przekroju (b). Prędkość napawania $v_n = 700$ mm/min, natężenie przepływu argonu – $15 \text{ dm}^3/\text{min}$

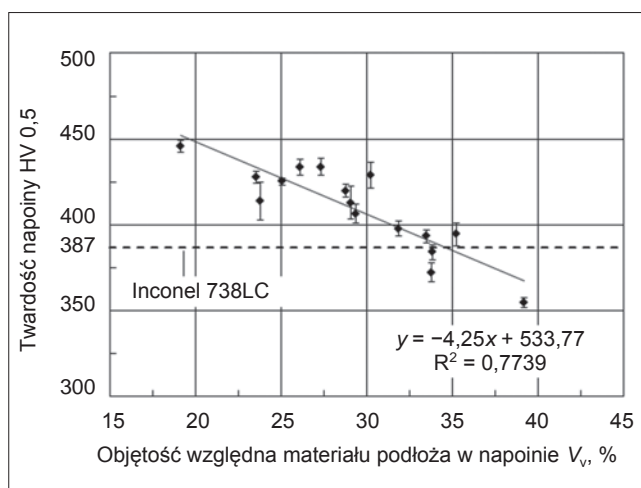




Rys. 16. Mikrostruktura napoi (a) oraz rozkład liniowy zawartości Co, Cr, Ni i W na jej przekroju (b). Prędkość napawania $v_n = 400$ mm/min, natężenie przepływu argonu – $15 \text{ dm}^3/\text{min}$



Rys. 17. Wpływ prędkości napawania i natężenia przepływu argonu na twardość napoi



Rys. 18. Zależność twardości napoi od objętości względnej materiału podłoża – Inconelu 738LC

W mikrostrukturze napoi można wyodrębnić dwie charakterystyczne strefy: przy granicy wtopienia i w środku napoi oraz w jej warstwie wierzchniej. W strefie przy granicy wtopienia dendryty wzrastają epitaksjalnie na podłożu nadtopionego stopu Inconel 738LC w kierunku powierzchni napoi (rys. 11–13). Mikrostruktura strefy przy powierzchni napoi ma budowę dendrytyczną. Morfologia dendrytów wskazuje, że tworzą się one na powierzchni napoi oraz na cząstkach proszku i wzrastają w ciekłym stopie w kierunku podłoża – odprowadzania ciepła (rys. 14).

Liniowa mikroanaliza składu chemicznego wykazała duże różnice zawartości pierwiastków stopowych w napoi. Po stopieniu wiązką lasera materiał podłoża – nadstop Inconel 738LC – wskutek konwekcyjnego przemieszczania się w ciekłym jeziorze napoi ulega mieszanii z materiałem dodatkowym – proszkiem Stellite 694. Jednocześnie stwierdzono, że zawartość pierwiastków stopowych w napoi zależy od prędkości napawania. Jej zmniejszenie powoduje także niejednorodność składu chemicznego napoi (rys. 15 i 16).

Na podstawie wyników pomiaru twardości można stwierdzić, że twardość napoi zmniejsza się ze wzrostem prędkości napawania (rys. 17). Jest to spowodowane

zwiększaniem się objętości względnej materiału podłoża w napoi oraz mniejszą masą przetapianego materiału dodatkowego – proszku stopu Stellite 694. Duża objętość względna materiału podłoża w napoi ($V_v > 33\%$) powoduje, że jej twardość jest zbliżona do twardości podłoża – 387 HV 0,5 – lub mniejsza. Stosowanie prędkości napawania 400 mm/min i natężenia przepływu argonu 10 dm^3/min umożliwia wytworzenie napoi o dużej twardości, tj. 445 HV 0,5, oraz objętości względnej materiału podłoża w napoi $V_v < 20\%$. Twardość napoi zmniejsza się proporcjonalnie wraz ze zwiększaniem w niej objętości względnej materiału podłoża (rys. 18).

Podsumowanie

Analiza otrzymanych wyników badań prowadzi do wniosku, że przyjęte warunki napawania laserowego na podłożu z nadstopu niklu Inconel 738 LC z użyciem materiału dodatkowego Stellite 694 umożliwiają wytworzenie napoi o objętości względnej materiału podłoża $V_v < 20\%$. Twardość napoi przyjmuje największą wartość – 455 HV 0,5 – dla prędkości napawania $v_n = 400$ mm/min i zmniejsza się wraz ze zwiększaniem objętości względnej materiału podłoża w wytworzonej napoi.

Zastosowanie natężenia przepływu gazu osłonowego (argonu) $> 15 \text{ dm}^3/\text{min}$ zapobiega utlenianiu powierzchni napoiny podczas procesu napawania. Kształt i rozmiary napoiny ulegają niewielkiej zmianie wskutek zwiększania natężenia przepływu argonu. Natomiast zmniejszenie prędkości napawania – od 700 do 400 mm/min – prowadzi do zwiększenia zarówno szerokości, jak i wysokości napoiny (odpowiednio od ok. 2 do 2,35 mm oraz od ok. 0,55 do 0,85 mm), a ponadto powoduje niejednorodność składu chemicznego napoiny na jej przekroju.

Analiza morfologii składników fazowych mikrostruktury napoiny wykazała różnice – zwłaszcza w mikrostrukturze strefy przy granicy wtopienia i w środku napoiny oraz w jej warstwie wierzchniej. Ustalono, że dendryty w obszarze przy granicy wtopienia wzrastają epitaksjalnie na podłożu stopu Inconel 738LC, natomiast dendryty w warstwie wierzchniej napoiny tworzą się na częściowo stopionych cząstkach proszku i powierzchni napoiny i wzrastają w objętości ciekłego stopu w kierunku podłoża.

Pracę wykonano w ramach realizacji projektu badawczego INNOLOT/II/7/NCBR/2013 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Unię Europejską.

LITERATURA

1. Sieniawski J. „Kryteria i sposoby oceny materiałów na elementy lotniczych silników turbinowych”. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 1995.
2. Szeliga D., Kubiak K., Burbelko A., Cygan R., Ziaja W. „Modelling of grain microstructure of IN-713C castings”. *Solid State Phenomena*. Vol. 197 (2013): pp. 83÷88.
3. Klimpel A. „Napawanie i natryskiwanie cieplne”. Warszawa: WNT, 2000.
4. Burakowski T., Wierzchoń T. „Inżynieria powierzchni metalu”. Warszawa: WNT, 1995.
5. Davis J.R. „ASM Specialty Handbook – Nickel, Cobalt and their Alloys”. Ohio: ASM International, 2000.
6. Klimpel A. „Technologie laserowe – spawanie, napawanie, stopowanie, obróbka cieplna i cięcie”. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2012.
7. Kusiński J. „Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej”. Kraków: Akapit, 2000.
8. Ion J.C. „Laser Processing of Engineering Materials”. Oxford: Elsevier, 2005.
9. Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S. „Laser Cladding”. Boca Raton: CRC Press LLC, 2005.
10. Filip R. „Kształtowanie mikrostruktury i właściwości warstwy wierzchniej stopów tytanu w procesie przetapiania laserowego”. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2008.
11. Filip R., Sieniawski J. „Mikrostruktura i właściwości użytkowe warstwy wierzchniej stopu tytanu Ti-6Al-4V kształtowanej metodą stopowania laserowego”. *Inżynieria materiałowa*. Nr 3 (2006): s. 383÷386.
12. Nowotny S., Scharek S., Beyer E., Richter K.H. „Laser Beam Build-Up Welding: Precision in Repair, Surface Cladding, and Direct 3D Metal Deposition”. *Journal of Thermal Spray Technology*. Vol. 16, No. 3 (2007): pp. 345÷348.
13. Syed W.U.H., Pinkerton A.J., Li L. „A comparative study of wire feeding and powder feeding in direct diode laser deposition for rapid prototyping”. *Applied Surface Science*. Vol. 247 (2005): pp. 268÷276.
14. Sexton L., Lavin S., Byrne G., Kennedy A. „Laser cladding of aerospace materials”. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 122 (2002): pp. 63÷68.
15. Klimpel A., Kik T. „Sterowanie jakością napawania laserowego”. *Inżynieria materiałowa*. R. 151, nr 3 (2006): s. 441÷444.
16. Bogdanowicz Z., Grzelak K. „Wpływ parametrów laserowego napawania proszkowego stali zaworowej na właściwości napoiny”. *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*. R. 59, nr 1 (2010): s. 21÷34. ■