

Przetapianie odlewów precyzyjnych ze stopu Inconel 713C przy zastosowaniu procesów spawalniczych

Remelting of precision casts from Inconel 713C alloy using welding processes

Streszczenie

Technologia odlewania precyzyjnego charakteryzuje się bardzo dobrym odwzorowaniem skomplikowanych kształtów, jednak ze względu na duże różnice w grubościach ścianek odlewów, a tym samym zmiennej sztywności, w odlewach pojawiają się wady. Do najczęściej spotykanych wad odlewów precyzyjnych zaliczyć należy rzadzinny oraz mikro-pęknięcia. Do naprawy tych wad można stosować technologie spawalnicze.

Stop Inconel 713C jest uważany za trudnospawalny lub nawet niespawalny [1]. Jednak konieczność naprawy odlewów precyzyjnych wymaga podjęcia prób opracowania technologii ich przetapiania i napawania, co umożliwiłoby stosowanie tych procesów w praktyce przemysłowej. W artykule przedstawiono wyniki prób przetapiania różnymi metodami spawalniczymi odlewów precyzyjnych przeznaczonych dla lotnictwa ze stopu Inconel 713C. Stwierdzono, że główną przyczyną decydującą o niepowodzeniu naprawy technologiami spawalniczymi są pęknięcia gorące w obszarze wtopienia. Pęknięcia powstają w wyniku nadtopienia się obszarów międzykrystalicznych na linii wtopienia, a następnie podczas krystalizacji wtopienia, gdzie następnie w wyniku pojawiających się odkształceń warstwa cieczy międzykrystalicznej ulega rozerwaniu. Stwierdzono, że najlepsze rezultaty napawania umożliwia wykorzystanie technologii LMD (ang. *Laser Metal Deposition*).

Słowa kluczowe: Inconel 713C; pękanie gorące; przetopienie; TIG; PAW; LBW; LMD

Abstract

The precision casting technology is characterized by very good reproduction of complex shapes. However, due to the large wall thickness differences of castings and thus variable stiffness, defects appear in the castings. For most frequent defects in precision castings shrinkage porosities and microcracks should be considered. Welding technologies can be used to repair these defects.

The Inconel 713C alloy is considered as a difficult-to-weld or even impossible-to-weld. However, the need to repair precision castings requires attempt to develop technology for their remelting and padding, which would allow the use of these technologies in industrial practice. This paper shows the results of remelting attempts by various methods of welding for disclosed defects in precision castings intended for aviation. It was found that the main reason behind the failure to repair casting defects by welding technologies are hot cracks in the fusion area. These cracks occur as a result of intergranular areas overmelt in the fusion line. Then, during the crystallization of remelting or weld overlay, as a result of appearing deformations, the intergranular liquid film breaks. It was found that the best results of the pad welding allows the use of LMD (*Laser Metal Deposition*) technology.

Keywords: Inconel 713C; hot cracking; melting; TIG; PAW; LBW; LMD

Wstęp

Odlewanie precyzyjne należy do bardzo zaawansowanych technologii produkcyjnych.

W odlewach, które charakteryzują się dużą zmiennością grubości ścianek i tym samym różną sztywnością w poszczególnych obszarach podczas krystalizacji, ze względu na naprężenia i odkształcenia występują wady odlewnicze.

Do najczęściej występujących wad zaliczyć należy rzadzinny, pory i pęcherze oraz pęknięcia [2].

Jednym ze sposobów naprawy wad odlewniczych jest przetapianie lub napawanie. Stop Inconel 713C jest uważany jako stop trudnospawalny i technologie spawalnicze nie są zalecane do napraw odlewów. Powoduje to, że wadliwe

Dr hab. inż. Janusz Adamiec, prof. PŚI; mgr inż. Katarzyna Łyczkowska – Politechnika Śląska; **mgr inż. Michał Urbańczyk** – Instytut Spawalnictwa.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: janusz.adamiec@polsl.pl

Tablica I. Wyniki ilościowej analizy XRF składu chemicznego badanych odlewów
Table I. Results of quantities analysis of chemical contents of casts

Alloy	Ni	Cr	Al	Mo	Nb	Zr	W	Cu	Co + Ta	Fe	Mn	Ti
In 713C (XRF)	70,38	13,29	5,78	4,44	2,13	0,04	0,31	0,47	1,92	0,36	0,08	0,8
AMS 5391	reszta	12÷14	5,5÷6,5	3,8÷5,2	<2,5	<5	–	<0,5	1,8÷2,8	<2,5	<0,25	0,5÷1,0

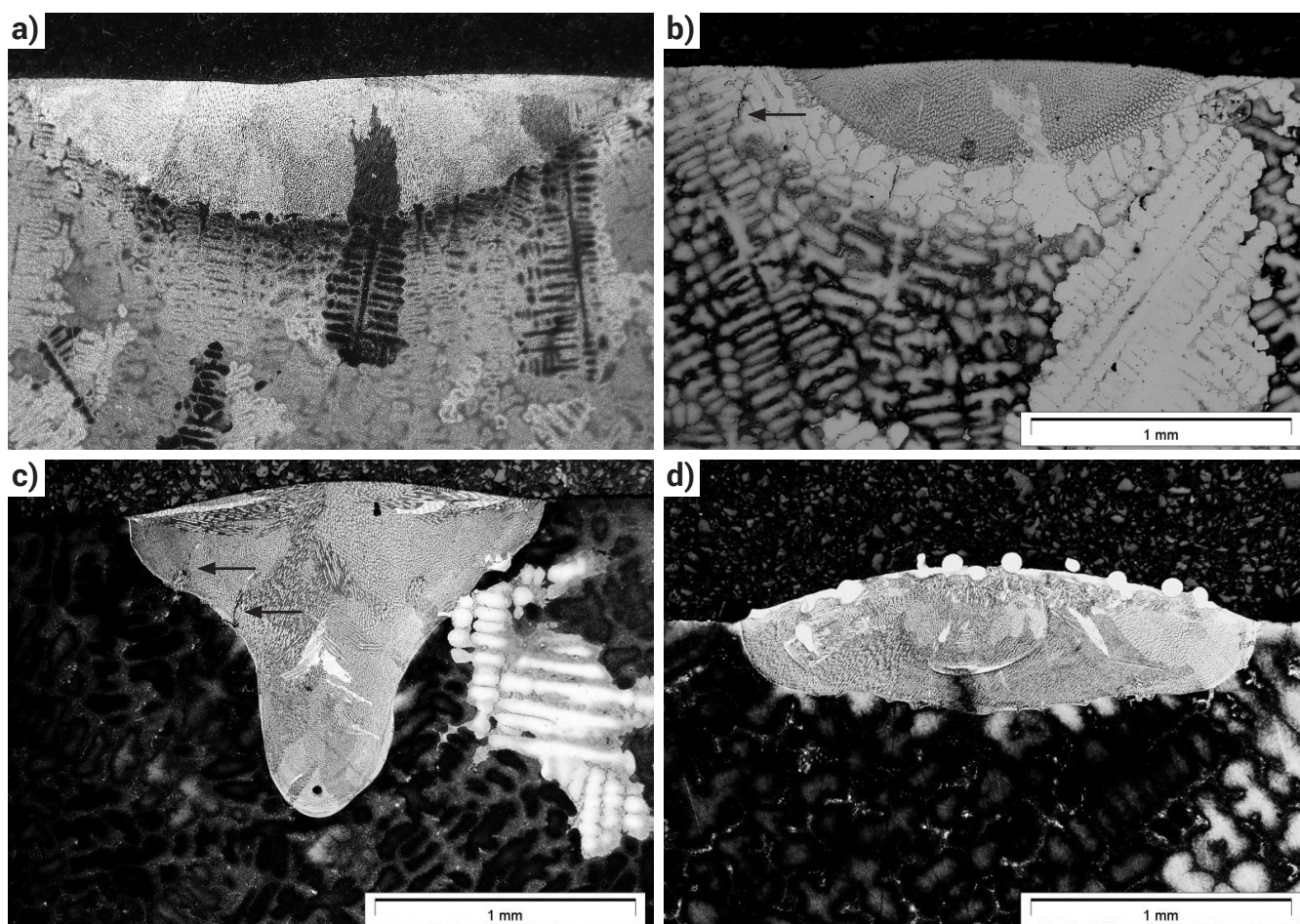
odlewy precyzyjne są uznawane jako odpad, co powoduje znaczące straty w procesie wytwarzania. Istnieje zatem konieczność podjęcia prób oceny spawalności stopu Inconel 713C. W pracy [3,4] stwierdzono, że występujące w napoinie pęknięcia są powodowane naprężeniami powstającymi wskutek niskiej przewodności cieplnej stopu, dużej szybkości krystalizacji oraz mikroporowatości międzydendrytycznej. Natomiast autorzy badań [2,5] wskazują, że pęknięcia występują w strefie częściowego wtopienia i wynikają ze zjawisk zachodzących w zakresie kruchości wysokotemperaturowej. Brak jest jednak jednoznacznych i powtarzalnych informacji o możliwości wykorzystania technologii spawalniczych do naprawy odlewów precyzyjnych ze stopu Inconel 713C. W ramach pracy wykonano próby przetapiania i napawania odlewów ze stopu Inconel 713C metodą TIG, łukiem plazmowym, laserem oraz metodą LMD (ang. *Laser Metal Deposition*). Na podstawie badań metalograficznych określono jakość wykonanych napoin i przetopień oraz wskazano technologie o największym potencjale wdrożenia do praktyki przemysłowej do naprawy odlewów ze stopu Inconel 713C.

Materiał do badań

Do badań wykorzystano odlewy precyzyjne ze stopu Inconel 713C wykonane w CPP Poland (Consolidated Precision Products Poland Sp. z o.o.). Do stopienia materiału wsadowego wykorzystano metodę VIM (ang. *Vacuum Induction Melting*). Odlewy były napawane w stanie po odlewaniu, w obszarach, w których były najczęściej ujawniane wady odlewnicze tj. w obszarach zamków van-clasterów. Skład chemiczny stopu wg AMS 5391 oraz wyniki pomiaru odlewu metodą XRF pokazano w tablicy I.

Odlewy precyzyjne ze stopu Inconel 713C były przetapiane metodą TIG w osłonie gazu obojętnego I1 wg PN-EN ISO 14731 (99,99% Ar) o natężeniu przepływu 12 l/min, elektrodą wolframową (WT20) o grubości 1,6 mm w pozycji podolnej (PA), prądem stałym o biegunowości ujemnej i natężeniu prądu spawania 40 A oraz napięciu łuku 10 V. Przykładową makrostrukturę pokazano na rysunku 1a.

Próby technologiczne przetapiania łukiem plazmowym wykonano w osłonie gazu obojętnego I1 wg PN-EN ISO 14175 (99,99% Ar) o natężeniu przepływu 6 l/min, elektrodą



Rys. 1. Przetopienie odlewu precyzyjnego ze stopu Inconel 713C (LM): a) makrostruktura przetopienia wykonanego metodą TIG, b) przetopienie wykonane za pomocą łuku plazmowego z widocznymi pęknięciami, c) przetopienie laserem dyskowym z pęknięciami w spoinie d) napoina wykonana metodą LMD, widoczny brak wtopienia ziarna proszku; strzałkami zaznaczono pęknięcia

Fig. 1. Melting-affected zone of an Inconel 713C precision casting: a) macrostructure of the melting-affected zone welded by TIG, b) macrostructure of melting-affected zone with a visible crack in the fusion zone welded by PAW, c) laser melting-affected zone with cracks in the fusion zone, d) LMD cladding weld with visible powder grains, cracks are marked with arrows

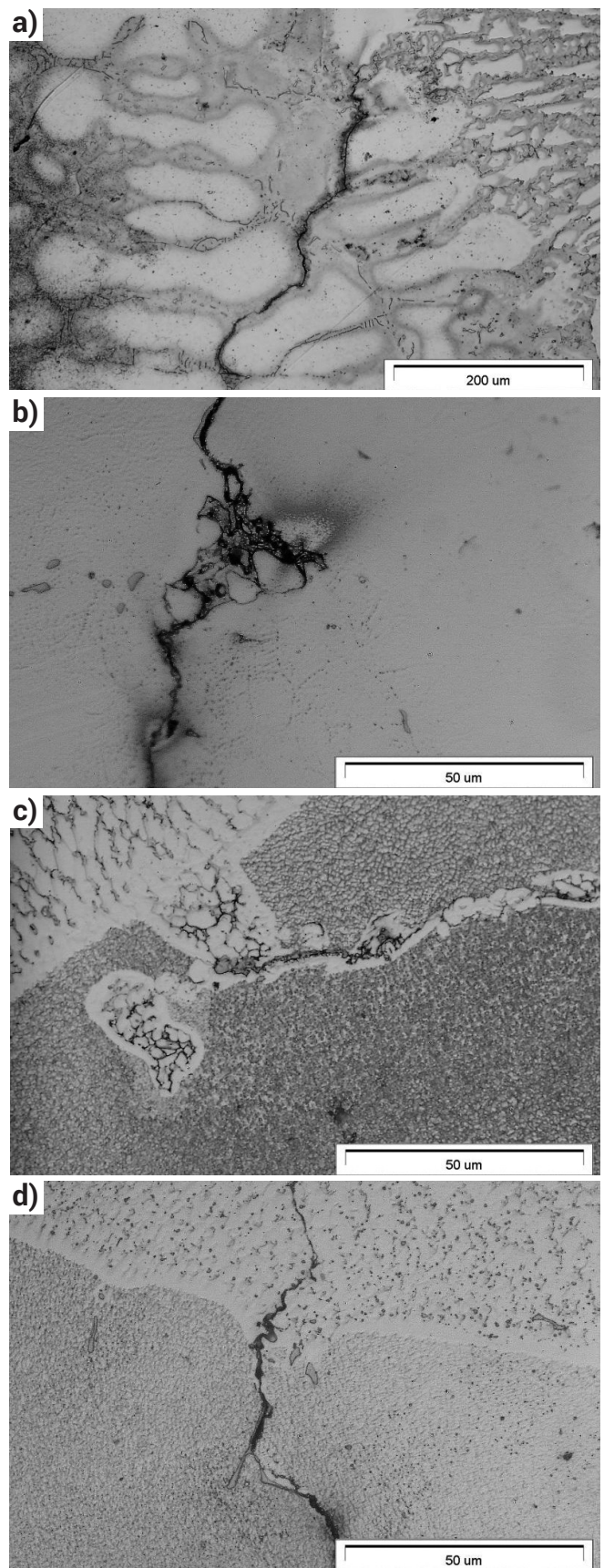
wolframową (podobnie jak przy TIG) o średnicy 1,6 mm. Dysza podająca gaz plazmowy – 1,2 mm. Przetopienia wykonano w pozycji podolnej (PA), prądem stałym o biegunowości ujemnej i natężeniu prądu spawania od 5÷18 A i napięciu łuku 20 V. Na rysunku 1b pokazano przykładowe makroobszaru przetapianego z widocznymi pęknięciami.

Przetapiania laserowe wykonano na stanowisku wyposażonym w laser dyskowy o mocy 12 kW Trumph LaserDisk 12002, głowicę D70 Hybrid ze światłowodem o średnicy 0,3 mm. Ogniskowa wiązki wynosiła 400 mm, a średnica ogniska 0,6 mm. Wiązka laserowa była zogniskowana na powierzchni odlewu. W próbach technologicznych przetapiania stosowano moc wiązki w zakresie od 1 kW do 2,5 kW, prędkość przetapiania od 1 do 2 m/min. Jako gaz osłonowy, podawano dyszą typu flet argon (I1 wg PN-EN ISO 14175, 99,99% Ar) o natężeniu przepływu 18 l/min. Przykładową makrostrukturę przetopienia z ujawnionym pęknięciem pokazano na rysunku 1c.

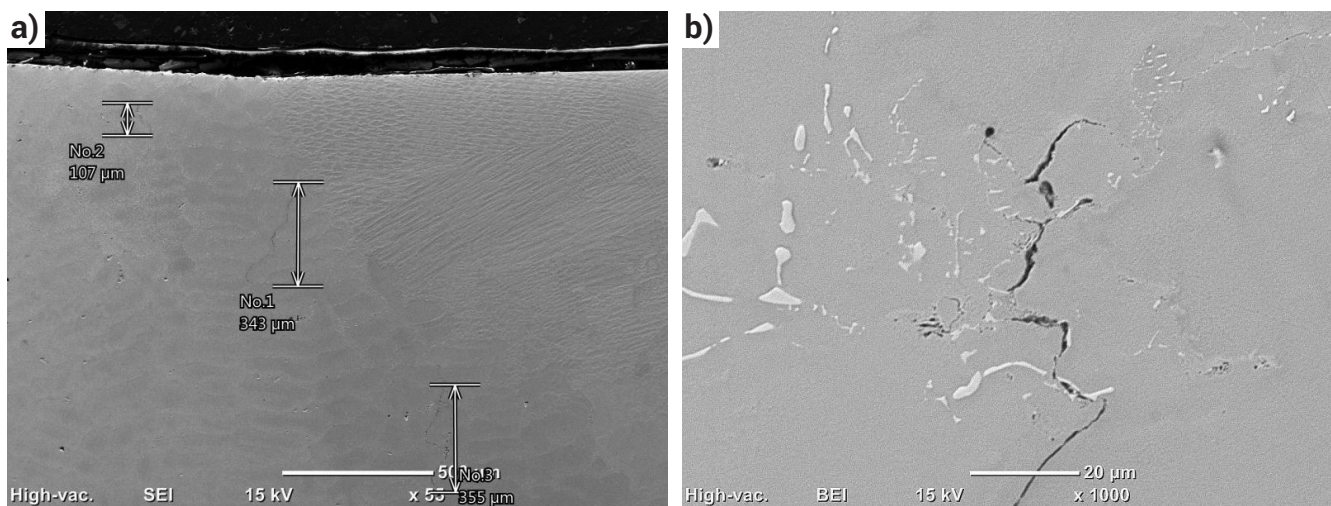
Na tym samym zrobotyzowanym stanowisku laserowym wykonano próby napawania metodą LMD. Dodatkowo stanowisko zostało wyposażone w specjalistyczną głowicę do napawania proszkowego oraz podajnik proszku typu PF2/2 firmy GTV. Głowica posiada soczewkę ogniskującą o ogniskowej 220 mm. Wiązki promieniowania laserowego wprowadzano do tej głowicy za pomocą standardowego światłowodu o średnicy 400 µm. W głowicy do napawania zainstalowano trójdrożną dyszę procesową MultiJet, której zadaniem jest wytworzenie ogniska strumieni proszku współosiowo do wiązki promieniowania laserowego. Proszek do napawania dostarczany jest do dyszy procesowej poprzez dystrybutor proszku, który bezpośrednio przed dyszą homogenizuje jego strumień i dzieli go na trzy pojedyncze strumienie wprowadzane do trzech kanałów równomiernie rozłożonych na obwodzie dyszy. Trzy strumienie proszku usytuowane są pod określonym kątem w stosunku do osi dyszy i koncentrują się w odległości 16 mm od czołowej powierzchni dyszy. Napawanie prowadzono za pomocą wiązki laserowej o mocy od 500 do 1500 W o położeniu ogniska 9 mm od płaszczyzny ogniskowania proszku, w wyniku czego uzyskano obszar ogniskowania wiązki o średnicy ok. 1 mm. Ilość podawanego proszku (Inconel 625) była w zakresie od 2÷5 g/min. Przykładową makrostrukturę napoiny pokazano na rysunku 1d.

Badania struktury przetopień

Próbki do badań strukturalnych zostały wycięte prostopadle do kierunku przetapiania. Z tak pobranych próbek wykonano zgłady metalograficzne, które w celu ujawnienia struktury były trawione chemicznie w odczynniku Marble'a ($10\text{g CuSO}_4 + 50\text{ cm}^3\text{ HCl} + 50\text{ cm}^3\text{ H}_2\text{O}$) (rys. 1). Obserwacje metalograficzne prowadzone były na mikroskopie stereoskopowym SZX9 (SM) w technice pola ciemnego przy powiększeniach do 50x, mikroskopie świetlnym (LM) OLYMPUS GX71 w technice pola jasnego przy powiększeniach do 500x. Uzyskane obrazy struktury umożliwiły jakościową ocenę struktury wszystkich obszarów przetopienia. Uzupełnieniem badań strukturalnych były obserwacje na elektronowym mikroskopie skaningowym (SEM) firmy JEOL JCM-6000 Neoscope II. Badania prowadzono w technice rejestracji elektronów wtórnych SE (tj. Secondary Electrons) oraz elektronów wstecznie rozproszonych BSE (tj. Back-Scattered Electrons) przy powiększeniu do 10000x. Obrazy SE odzwierciedlają topografię powierzchni próbki, natomiast obrazy BSE pozwalają na ocenę zróżnicowania składu chemicznego poszczególnych obszarów. Wyniki tych badań pokazano na rysunkach 2 i 3.



Rys. 2. Mikrostruktura przetopień odlewów ze stopu Inconel 713C: a) pęknięcie po granicach dendrytów w obszarze SCS w przetopieniu wykonanym metodą TIG, b) pęknięcie ujawnione w odlewie przetapianym łukiem plazmowym, c) nadtopione eutektyki w próbce przetapianej laserem, d) pęknięcie na linii stopienia wzdłuż węglików niobu **Fig. 2.** Inconel 713C casting – microstructure of the melting-affected zone: a) crack along dendrite boundaries in the PMZ welding by TIG, b) interdendritic crack in the PMZ in PAW welded cast, c) area of the partially melted eutectic mixture in the PMZ with visible discontinuities remelted by laser, d) crack along a phase γ dendrite boundary and along niobium carbides



Rys. 3. Pęknięcia w strefie częściowego stopienia w obszarze przetopienia stopu Inconel 713C: a) ujawnione pęknięcia w SCS (strefa częściowego stopienia), b) obszar częściowego nadtopienia eutektyki w SCS z widocznymi nieciągłościami

Fig. 3. Inconel 713C – cracks in the partially melted zone in the melting-affected zone: a) cracks identified in the PMZ, b) interdendritic crack in the PMZ

Analiza wyników

W odlewach ze stopu Inconel 713C pojawiają się wady, które powodują, że detal jest niedopuszczony do eksploatacji. Analiza danych literaturowych wskazuje, że do najczęściej występujących wad zaliczyć należy niedolania i pęknięcia o wymiarach poniżej 1 mm [7,8]. Istnieje zatem konieczność naprawy tego typu wad za pomocą technologii spawalniczych [2,4,5,9]. Przeprowadzone badania metalograficzne oraz analiza danych literaturowych [6,8] potwierdziły, że odlewy precyzyjne ze stopu Inconel 713C charakteryzują się strukturą dendrytyczną faz γ/γ' z obszarami eutektyki węglkowej w przestrzeniach międzydendrytycznych i wydzieleniami węglików, głównie węglików niobu i tantalu.

Do prób technologicznych przetapiania odlewów precyzyjnych dobrano metodę TIG, przetapianie łukiem plazmowym, przetapianie laserem oraz technologie napawania proszkowego LMD.

Analiza makrostruktury przetopień wykonanych metodą TIG ujawniła prawidłowy kształt napoiny o szerokości ok. 3 mm i głębokości do 2 mm (rys. 1a). Szczegółowa analiza mikrostruktury w badanych napoinach we wszystkich przypadkach ujawniła pęknięcia w strefie częściowego stopienia. Pęknięcia te, o długości ok. 300 μm (rys. 3a) były ułożone prostopadłe do linii stopienia i przebiegały głównie po granicach kryształów struktury materiału rodzimego (rys. 2a). Pęknięcia te są wynikiem nadtopienia się granic kryształów i obszarów segregacji oraz odkształceń związanych z procesem krystalizacji przetopienia.

Podobne pęknięcia ujawniono również w przetopieniach wykonanych łukiem plazmowym (rys. 2b). Stwierdzono jednak, że ograniczenie ilości wprowadzonego ciepła przetapiania plazmowego powoduje ograniczenie ilości i długości pęknięć. Potwierdza to mechanizm pęknięcia związany z natapianiem się obszarów eutektycznych i granic kryształów w strefie częściowego stopienia i w efekcie oddziaływania odkształceń spawalniczych utratę spójności cieczy międzydendrytycznej (rys. 3b).

Analiza struktury przetopień wykonanych laserem dyskowym wykazała typowe obszary dla lokalnego stopienia materiału (rys. 1c). Ujawniono obszar materiału rodzimego,

strefę częściowego stopienia (w której następuje nadtopienie materiału rodzimego po granicach dendrytów (rys. 2d) w obszarach eutektycznych (rys. 2c)), a także strefę przetopienia zbudowaną z dendrytów narastających na nadtopionych ziarnach materiału rodzimego, zgodnie z kierunkiem odprowadzenia ciepła (rys. 1c). W tych przetopieniach obserwowano pęknięcia po granicach kryształów w spoinie (rys. 2c). Są to pęknięcia gorące związane z wyczerpaniem się zapasu plastyczności materiału w zakresie kruchości wysokotemperaturowej, tj. zakresie temperatur podczas krystalizacji, w którym materiał posiada już wytrzymałość (zakres ciekło-stały materiału z siatką kryształów materiału pomiędzy którymi jest ciecz), a jego plastyczność jest zmierzająca do zera. Zakres ten dla materiału podstawowego został opisany w pracy [5]. Ze względu na gradient temperatury podczas przetapiania laserowego, a tym samym powstające lokalne naprężenia i odkształcenia, technologia ta ma obecnie ograniczone perspektywy do wykorzystania do naprawy odlewów precyzyjnych ze stopu Inconel 713C.

Ciekawym rozwiązaniem jest napawanie proszkowe laserem w technologii LMD (ang. *Laser Metal Deposition*). Technologia umożliwia nie tylko przetopienie materiału, ale również dostarczenie materiału dodatkowego w postaci stopionego w wiązce proszku. Materiał dodatkowy pozwala na wypełnienie jeziorka ciekłego metalu i uzupełnienie ubytków spowodowanych wadami odlewniczymi oraz odparowaniem materiału podczas przetapiania laserem. Analiza wyników prób napawania metodą LMD odlewów precyzyjnych ze stopu Inconel 713C mocą wiązki od 500 W do 1,5 kW wskazuje, że dobre rezultaty (brak pęknięć) uzyskano dla napawania najmniejszymi mocami, tj. 500W (rys. 1d). Wtopienie napoiny w materiał rodzimy było poniżej 0,5 mm, co w zupełności wystarczy do naprawy pęknięć powierzchniowych. Wyniki badań makrostrukturalnych ujawniły jednak, że przy tak małej energii wiązki nie wszystkie cząsteczki proszku metalicznego są przetopione (rys. 1d). Dlatego konieczna jest po procesie naprawy obróbka powierzchni napoiny. W badanych próbkach dla mocy wiązki powyżej 1 kW pojawiały się pęknięcia zarówno na linii stopienia, jak również w samym przetopieniu.

Podsumowanie

Przeprowadzone rozpoznanie możliwości przetapiania i napawania odlewów precyzyjnych ze stopu Inconel 713C wskazuje, że ciekawą propozycją jest napawanie proszkowe LMD. Zastosowanie mocy wiązki na poziomie 500 W pozwoliło na wykonane napoin o głębokości wtopienia ok. 0,5 mm, bez pęknięć. Wyniki przedstawionych badań mogą być podstawą do opracowania powtarzalnej i bezpiecznej technologii naprawy odlewów precyzyjnych ze stopu Inconel 713C.

Praca sfinansowana w ramach Programu Badań Stosowanych finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, projekt pt.: „Zaawansowane technologie odlewnicze” – INNOCAST”, nr umowy INNOLOT/I/8/NCBR/2013

Literatura

- [1] Engineering Properties of Alloy 713C, Nickel Institute, www.nickelinstitute.org
 - [2] Łyczkowska K., Adamiec J.: Repair of precision casting made of the Inconel 713C alloy, Archives of Foundry Engineering Issue 3, Vol. 17, 2017, pp. 210-216.
 - [3] Lachowicz M.: Microstructural changes in padding welds made from the 713C alloy after heat treatment, Archives of Foundry Engineering Issue 3, Vol. 10, 2010, pp. 11-16.
 - [4] Lachowicz M.: Charakterystyka napoin oraz pęknięć powstałych podczas napawania superstopu Inconel 713C, Inżynieria Materiałowa, Vol. 27, nr 3, 2006, s. 474-477.
 - [5] Łyczkowska K., Adamiec J., Jachym R., Kwieciński K.: Properties of the Inconel 713 Alloy Within the High Temperature Brittleness Range, Archives of Foundry Engineering Issue 4, Vol. 17, 2017, pp. 103-108.
 - [6] Binczyk F., Śleziona J.: Phase transformations and microstructure of IN-713C nickel superalloy, Archives of Foundry Engineering 25/2, Vol. 9, 2009, pp. 109-112.
 - [7] Zupanič F., Bončina T., Kiržman A., Tichelaar F.D.: Structure of continuously cast Ni-based superalloy Inconel 713C, Journal of Alloys and Compounds 329, 2001, pp. 290-297.
 - [8] Szczotok A., Kościelniak B.: Characterization of IN713C superalloy microstructure after high temperature creep test by LM, SEM and STEM, Inżynieria Materiałowa, Vol. 2, 2016, pp. 50-58.
 - [9] Łyczkowska K.: Struktura przetopień odlewów precyzyjnych ze stopu Inconel 713C, XLIV Szkoła Inżynierii Materiałowej, Kraków – Rytyro 2016.
-