

Charakterystyka napoin wykonanych technologią Laser Metal Deposition

Characteristics of cladding welds made by Laser Metal Deposition technology

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki prób napawania proszkowego z użyciem wiązki laserowej (LMD – ang. *Laser Metal Deposition*) wykonanych w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach. Technologia LMD umożliwia wytworzenie funkcjonalnych powłok o ulepszonych właściwościach mechanicznych, a dodatkowo pozwala na minimalizację kosztów poprzez naprawę elementu, zapobiegając tym samym kosztownej wymianie. Badania prowadzone były na precyzyjnie odlewanych łopatkach pracujących w gorącej części silnika. Badania obejmowały analizę makro i mikrostruktury napoiny, materiału podłoża i strefy wpływu ciepła. Praktyka przemysłowa potwierdza, że stop Inconel 713C jest materiałem trudno-spawalnym ze skłonnościami do pękania gorącego, jednak otrzymane wyniki dowodzą, że zminimalizowanie ilości wprowadzanego ciepła do materiału eliminuje powstawanie pęknięć umożliwiając tym samym jego naprawę.

Słowa kluczowe: Laser Metal Deposition; Inconel 713C; pękanie gorące; napawanie

Abstract

This paper presents the results of pad welds made by laser metal deposition technology (LMD) in Institute of Welding in Gliwice. LMD technology allows for the creation of functional coatings with improved mechanical properties and additionally allows minimizing costs by repairing the element and preventing expensive replacement. The tests were conducted on precisely cast test blades working in the hot part of the engine. The studies included analyses of the macro- and microstructure of the pad welds, the base materials, and the heat-affected zones. The industrial practice confirms that the Inconel 713C alloy is a low-weldability material with hot cracking tendencies, however, the obtained results prove that minimizing the amount of heat entering the material eliminates the formation of cracks, thus enabling its repair.

Keywords: Laser Metal Deposition; Inconel 713C; hot cracking; cladding welds

Wstęp

Ze względu na dobre właściwości mechaniczne stopy na osnowie niklu wykorzystywane są w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, kosmicznym, jądrowym, spożywczym itd. Do grupy stopów utwardzanych wydzieleniowo należy stop Inconel 713C, który z powodzeniem stosowany jest na elementy silnika lotniczego narażonego na działanie wysokiej temperatury i agresywnego środowiska spalin. Niestety proces odlewania precyzyjnych złożonych elementów często prowadzi do powstawania wad odlewniczych jakimi są pęknięcia, rzadziny, niedolewy czy porowatość, które dyskwalifikują odlew do eksploatacji. W odlewach o złożonych kształtach ilość niezgodności nie może przekraczać 10% objętości. W celu obniżenia kosztów generowanych przez wymianę uszkodzonych elementów poszukuje się nowych rozwiązań technologicznych, które zapewnią

naprawę wad powstałych wskutek odlewania. Konieczne jest zatem stosowanie nowych rozwiązań technologicznych i materiałowych, które obniżą koszty przy jednoczesnym zapewnieniu trwałości i skuteczności naprawy. Propozycją do reparacji jest technologia Laser Metal Deposition, która polega na trójstrumieniowym nadmuchu proszku metalu na podłożu. Proces laserowego napawania proszkowego uzależniony jest od szeregu parametrów, na które składają się m.in. moc wiązki, długość fali promieniowania, kształt obszaru ogniska i jego położenie, rodzaj gazu osłonowego, właściwości fizykochemiczne proszku i materiału rodzimego, a także parametry procesu jak prędkość napawania, ilość obrotów głowicy czy moc wiązki. W trakcie napawania proszkowego laser rozgrzewa obrabiany element lokalnie go roztopiając, jednocześnie doprowadzając proszek wymieszany

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

Autor korespondencyjny/Corresponding author: katarzyna.lyczkowska@polsl.pl

Tablica I. Skład chemiczny IN 713C
Table I. Chemical composition of IN 713C

Alloy	Ni	Cr	Al	Mo	Nb	Zr	W	Cu	Co+Ta	Fe	Mn	Ti	Si
IN 713C	reszta	13,29	5,78	4,44	2,13	0,04	0,31	0,47	1,92	0,36	0,08	0,8	–
IN 625	reszta	22,3	0,18	9,73	3,9	–	–	–	–	3,12	0,41	0,2	0,32

z gazem osłonowym. Roztopiony proszek łączy się z powierzchnią obrabianego elementu w rozgrzanym przez wiązkę obszarze. Metoda ta umożliwia precyzyjne nakładanie bardzo cienkich warstw (w zakresie 0,1÷1 mm) przy nieznacznym wymieszaniu proszku z materiałem podłoża oraz nieznacznym obciążeniu cieplnym napawanego obszaru eliminując w ten sposób skłonność napoin laserowych do pęknięcia. Dzięki tej metodzie możliwe jest utworzenie dobrego połączenia między podłożem, a natryskiwany proszkiem zachowując przy tym prawidłowe właściwości obu składowych oraz niewielki stopień wymieszania materiału dodatkowego z materiałem podłoża w przetopionej warstwie.

Metodyka i wyniki badań

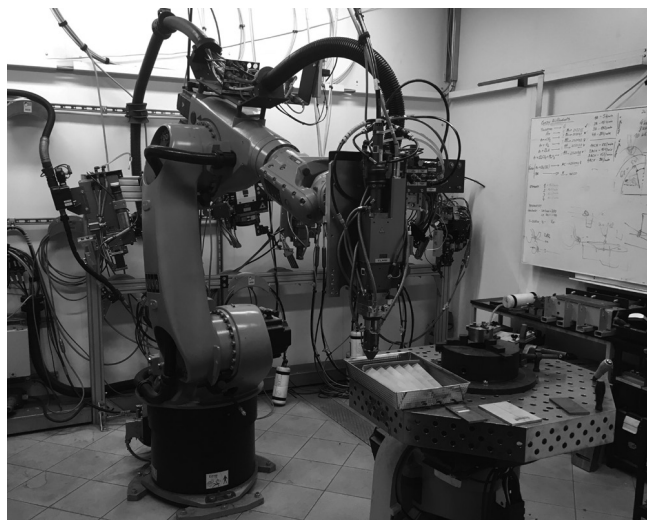
Celem prowadzonych badań była ocena mikrostruktury w obszarze przetopienia, strefy wpływu ciepła oraz materiału podłoża na odlewach precyzyjnych ze stopu Inconel 713C. Weryfikacja składu chemicznego stopu Inconel 713C wykonana została za pomocą dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego urządzeniem XRF Niton HLT 898W, którego wyniki przedstawiono w tablicy I. Odlewy precyzyjne w postaci tzw. vanclasterów (rys. 1) wykonano w Consolidated Precision Products Poland Sp. z o. o. Próby laserowego napawania proszkowego przeprowadzono w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach na zrobotyzowanym stanowisku wyposażonym w robota KUKA KR 30 HA, laser dyskowy Yb:YAG TruDisk 12002 o mocy 12 kW, firmy Trumpf oraz głowicę z soczewką ogniskującą (rys. 2). Ogniskowa wiązki wynosiła: 400 mm, a średnica ogniska: 0,6 mm. Parametrami zmiennymi procesu technologicznego LMD była moc wiązki (500 W, 1000 W, 1500 W) oraz ilość obrotów (0; 1,5; 2,5 obr/min). Napawanie wykonano w osłonie argonu o przepływie 18 l/min w dwóch wariantach: a) bez materiału dodatkowego (rys. 3a÷3c); b) z materiałem dodatkowym w postaci proszku (rys. 3d÷3i). Ze względu na agresywne środowisko i podwyższoną temperaturę pracy naprawianych elementów zastosowano proszek na osnowie niklu – Inconel 625 (tabl. I).

Laser YAG charakteryzuje się wiązką promieniowania o wielowidmowym rozkładzie gęstości mocy, co wpływa na kształt napoiny. Wykonane napoiny charakteryzują się łagodnym wtopieniem (rys. 3).



Rys. 1. Naprawa segmentu łopatek ze stopu Inconel 713C – napoiny wykonane laserem

Fig. 1. Repair of an Inconel 713C blade segment – pad welds made by laser



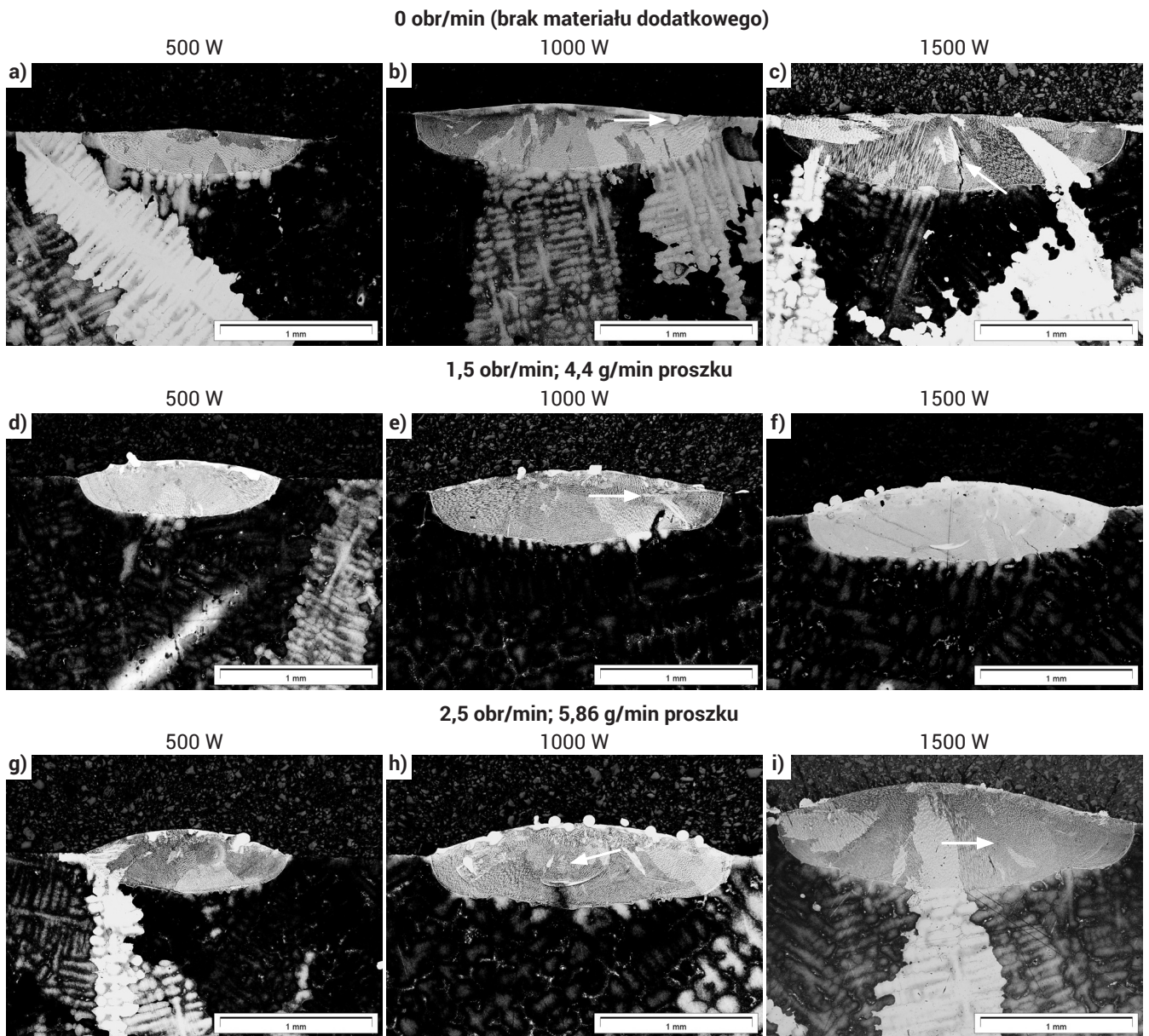
Rys. 2. Zrobotyzowane stanowisko do proszkowego napawania laserowego

Fig. 2. Robotic station for laser metal deposition technology

Obserwacja mikrostruktury prowadzona była na zglądach metalograficznych, które przygotowano z napoin wyciętych prostopadle do kierunku przetapiania, w taki sposób, aby ujawnić wszystkie jego obszary. W celu ujawnienia struktury materiał trawiono w odczynniku Marble'a ($\text{CuSO}_4 + \text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$). Obserwacji mikrostruktury dokonano na mikroskopie świetlnym Olympus GX71 (LM) przy powiększeniach do 500x w technice pola jasnego oraz na elektronowym mikroskopie skaningowym JEOL JCM-6000 Neoscope II (SEM) w technice elektronów wtórnych SE, przy powiększeniu do 1000x i napięciu przyspieszającym wiązkę elektronów 15keV. Badania uzupełniono o mikroanalizę składu chemicznego wykonaną metodą EDS w strefie pęknięcia.

Wyniki obserwacji metalograficznych ujawniły, że krystalizacja przebiegała w sposób prawidłowy, a kryształy narastały w kierunku odprowadzenia ciepła na nadtopionych dendrytach materiału rodzimego i obszarach międzydendrytycznych. Ciepło powstające na skutek spawania wpłynęło na wzrost rozszerzalności cieplnej, co wiąże się ze skurczem materiału w strefie wpływu ciepła. Obniżenie mocy wiązki do 500 W zredukowało objętość ciekłego metalu tworzącego napoinę, a tym samym spowodowało mniejszy skurcz w SWC podczas chłodzenia. Dzięki temu w materiale zminimalizowane zostały obciążenia cieplne i podatność na pękanie gorące, co umożliwiło otrzymanie przetopu wolnego od pęknięć (rys. 3a, 3d, 3g). Ze względu na niższe naprężenia powstające w materiale stwierdzono, że wraz ze wzrostem stosunku szerokości do głębokości napoiny zmniejszyła się liczba pęknięć. Niezależnie od wariantu napawania zwiększenie prędkości spawania, ilości proszku metalicznego (próby z materiałem dodatkowym) i ilości obrotów tarczy nie wpływa na zmniejszenie ilości pęknięć powstałych w napoinie.

Dodatkowo na linii wtopienia ujawniono zwartą strefę fazy γ' , która tworzy w materiale obszary wolne od wydzielań, tzw. precipitate-free zones (PFZ). Źle dobrane parametry (powyżej zastosowania mocy wiązki lasera o wartości 1000 W)

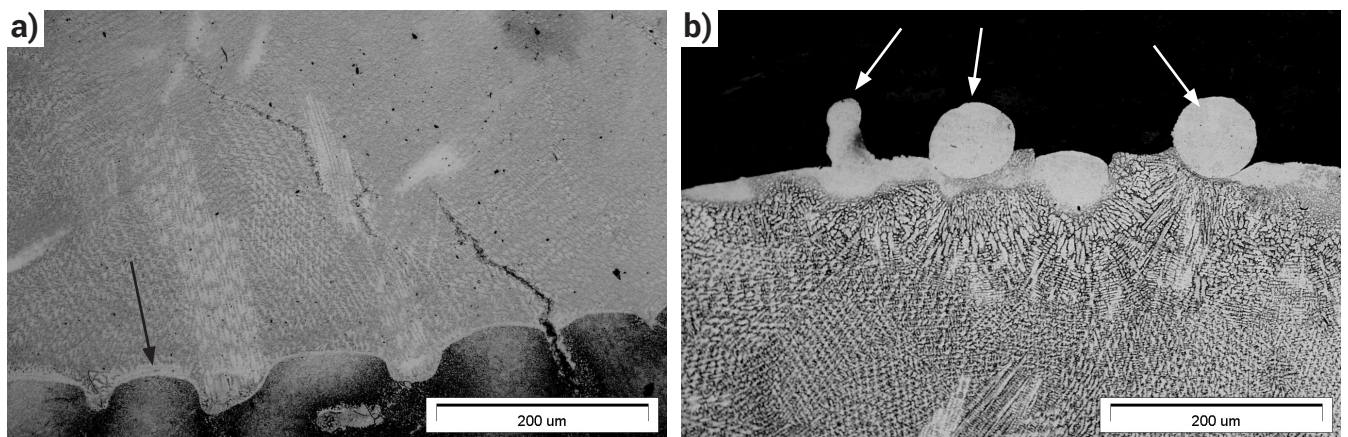


Rys. 3. Makrostruktura przetopień napoin wykonanych technologią LMD
 Fig. 3. Macrostructure of the melted areas made LMD technology

powodują niepełne wtopienie się pojedynczych ziaren proszku na powierzchni napoiny, co skutkować może korozją materiału (rys. 4a).

W spoinie i SWC ukazano pęknięcie, w obrębie którego stwierdzono podwyższoną zawartość chromu (tabl. II; rys. 5).

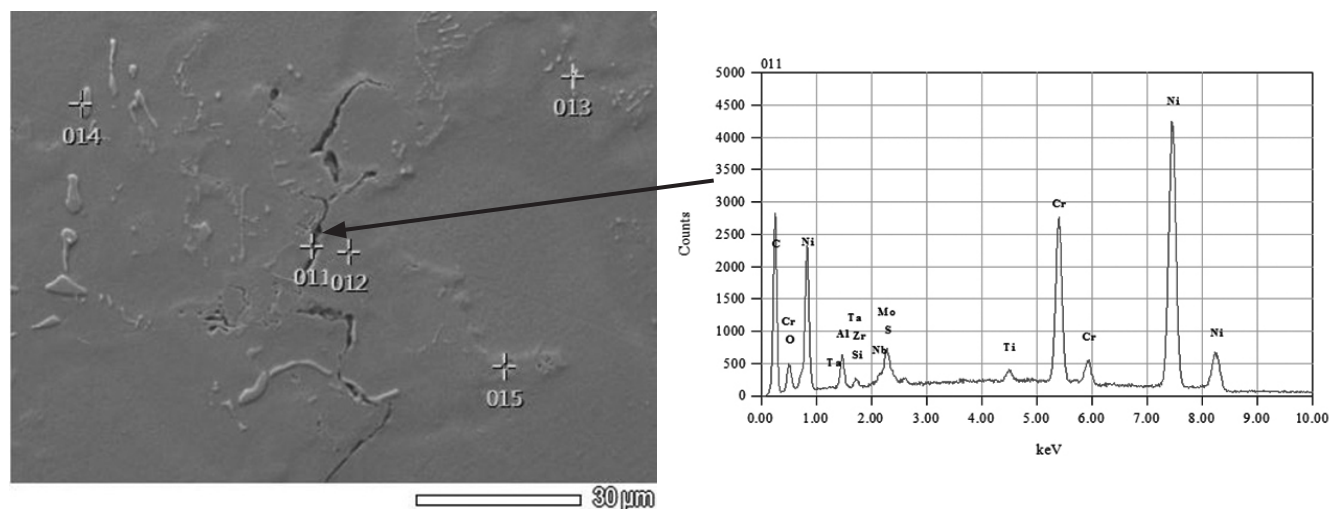
Może to świadczyć o gorącym charakterze pęknięcia z udziałem tlenku chromu powstającego na powierzchni. Wskazuje to również na wydzielanie się węglików tworzących eutektykę faz γ/γ' .



Rys. 4. Napoina stopu Inconel 713C po LMD: a) linia wtopienia z widocznym obszarem PFZ, b) proszek z Inconela 625 na napoinie
 Fig. 4. Pad weld on the Inconel 713C alloy after LMD technology: a) fusion line with the visible area of PFZ, b) powder from Inconel 625 in pad weld

Tablica II. Skład chemiczny pęknięcia na IN 713C
Table II. Chemical composition cracking on IN 713C

Mass, %	Al	Si	Ti	Cr	Ni	Zr	Nb	Mo	Ta
011	1,74	0,34	0,79	17,58	75,27	0,14	0,99	2,90	0,24
012	4,70	0,21	0,89	14,70	72,62	–	1,87	4,55	0,47
013	3,31	0,16	3,69	10,66	46,90	–	25,05	9,89	0,34
014	0,47	0,20	9,63	3,31	10,99	–	66,97	8,06	0,36
015	1,12	0,37	0,45	18,83	60,90	3,18	3,02	11,77	0,36



Rys. 5. Analiza punktowa składu chemicznego wraz z widmem EDS
Fig. 5. Point analysis of the chemical composition with EDS

Podsumowanie

Lasery napawanie proszkowe umożliwia precyzyjne nakładanie cienkich powłok przy nieznacznym wymieszaniu materiału rodzimego z proszkiem. Wykorzystanie technologii Laser Metal Deposition do naprawy i regeneracji precyzyjnie odlewanych elementów jest co raz częściej stosowane, szczególnie w przypadkach, gdy koszt naprawy jest niższy niż wytworzenie nowego detalu. Badania ukazały, że pęknięcia powstające podczas krystalizacji stopu Inconel 713C można zminimalizować dzięki zmniejszeniu mocy wiązki, tj. poprzez obniżenie temperatury jeziora spawalniczego. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że napoiny pozbawione pęknięć uzyskano jedynie przy mocy 500 W. Zwiększenie mocy wiązki promieniowania do 1000 W i 1500 W spowodowało zwiększenie głębokości wtopienia i szerokości lica napoiny, co negatywnie wpłynęło na kształt napoiny prowadząc do pojawienia się pęknięć gorących.

Praca sfinansowana w ramach Programu Badań Stosowanych finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, projekt pt.: „Zaawansowane technologie odlewnicze” – INNOCAST”, nr umowy INNOLOT/1/8/NCBR/2013

Literatura

- [1] Dudziak B.: Examples of parts regeneration used in the internal combustion engines made in LMD technology. *Combustion Engines*, 2013, 3, pp. 977-980.
- [2] Dobrzański L.A.: Kształtowanie struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich i biomedycznych, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych. Politechnika Śląska, Gliwice 2009.
- [3] Kusiński J.: Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej. Wydaw. Nauk. Akapit, Kraków 2000.
- [4] Pilarczyk J., Banasik M., Dworak J., Stano S.: Centrum laserowe Instytutu Spawalnictwa – możliwości, badania i zastosowania przemysłowe, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach, 2010, vol. 54, s. 44-50.
- [5] Pilarczyk J., Banasik M., Dworak J., Stano S.: Technologiczne zastosowania wiązki laserowej w Instytucie Spawalnictwa, *Przegląd Spawalnictwa*, 2006, 78, s. 6-10.
- [6] Hejrowski T.: Badania odporności na zużycie ściernie i erozyjne powłok napawanych, *Inżynieria Materiałowa* 5, 2006, s. 1005-1008.
- [7] Napadłek W., Bogdanowicz Z.: Próby technologiczne napawania laserowego zaworów wylotowych silnika lotniczego. *Journal of KONES*, 2007, 4, s. 285-294.
- [8] E. Tasak, A. Ziewiec: Pęknięcie spoin w procesie krzepnięcia, *Przegląd Spawalnictwa*, 2007, s. 14-18.
- [9] Klimpel A.: Technologie napawania i natryskiwania cieplnego, Gliwice 1999.