

Problemy laserowego spawania materiałów do pracy w podwyższonej temperaturze

Problems of laser welding of heat resistant materials

HUBERT DANIELEWSKI
WŁODZIMIERZ ZOWCZAK*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.12.576

Prezentowano niektóre wyniki badań spawania laserowego materiałów przeznaczonych do pracy w podwyższonej temperaturze. Program badawczy obejmował stale węglowe, stopowe konstrukcyjne, stale nierdzewne martenzytyczne i austenityczne oraz nadstopy na bazie niklu. Opisano trudności związane z łączeniem tych materiałów oraz metody ich przewyciężania.

SŁOWA KLUCZOWE: spawanie laserowe, stale kotłowe, nadstopy niklu

Some effects of experiments on laser welding of heat resistant materials has been presented. The research programme included welding of carbon and alloy steels, martensitic and austenitic stainless steels and nickel based superalloys. The difficulties encountered and the ways to overcome them have been described.

KEYWORDS: laser welding, heat resistant steels, nickel superalloys

Laserowe spawanie stali i innych materiałów ma szereg zalet. Jest wydajne, pozwala uzyskać wąskie spoiny z bardzo niewielką strefą wpływu ciepła, zwykle bez konieczności stosowania materiału dodatkowego. Duża intensywność promieniowania laserowego w ogniskowanej wiązce przyczynia się do powstania kanału parowego, co prowadzi do efektu tzw. głębokiego spawania. Spoina jest wąska, a jej szerokość nie zmienia się gwałtownie wraz z głębokością. Dzięki temu mniejsze są też dystorsje spawalnicze.

Z tych powodów spawanie laserowe jest coraz powszechniej stosowane. Niestety są materiały, których łączenie za pomocą wiązki promieniowania laserowego napotyka rozmaite trudności. Należą do nich stale i inne stopy przeznaczone do pracy w podwyższonej temperaturze. Są to materiały wykorzystywane w instalacjach kotłowych pracujących w parametrach nadkrytycznych (temperatura przekraczająca 560°C przy ciśnieniu rzędu 27 MPa). Spawaniu tych materiałów poświęcony był realizowany w Centrum Laserowych Technologii Metali projekt badawczy finansowany przez NCBiR „Technologie laserowego spawania dla energetyki i ochrony środowiska”.

Projekt obejmował spawanie stali węglowych (P235GH), stali konstrukcyjnych stopowych (10CrMo9-10, 13CrMo4-5, 16Mo3, S235JRC, T24), stali nierdzewnych martenzytycznych (P91, VM12-SHC), austenitycznych (Super 304, HR3C, TP347-HFG) i nadstopów niklu (Inconel 617, Inconel 625). Wykonywano złącza jednoimienne oraz dla wybranych par materiałów – różnoimienne [1, 2]. W próbach spawania wykorzystano 5-osiowy system laserowy TruLaserCell 1005 z dodatkowym obrotnikiem do rur (jako szóstą osią). Źródłem promieniowania był laser CO₂ TruFlow 6000 o maksymalnej mocy 6 kW (metoda spawania 522).

* Mgr inż. Hubert Danielewski (hdanielewski@tu.kielce.pl), dr hab. inż. Włodzimierz Zowczak prof. PŚK (wzowczak@tu.kielce.pl) – Katedra Inżynierii Eksploatacji i Przemysłowych Systemów Laserowych Politechniki Świętokrzyskiej

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie trudności związanych ze spawaniem laserowym wymienionych materiałów, sposobów przewyciężania tych problemów, a także podanie niektórych wyników prowadzonych badań.

Typowe niezgodności spawalnicze

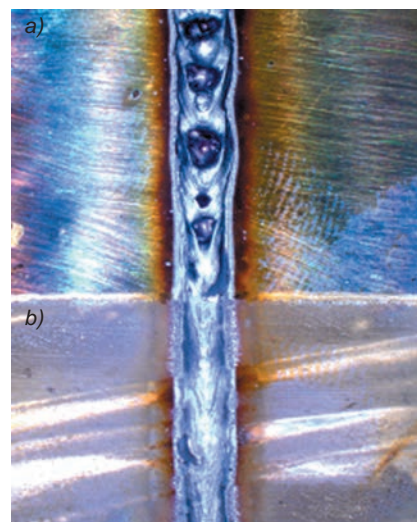
Niezgodności spawalnicze pojawiające się w złączach wykonywanych wiązką laserową sklasyfikowane do oceny jakości złącza według normy PN-EN ISO 13919-1 są następujące:

- pęcherze gazowe,
- porowatość,
- pęcherze kanalikowe,
- przyklejenia i braki przetopu,
- podtopienia i wycieki,
- pęknięcia,
- wady struktury (powodujące np. kruchość) [3].

Przyczyny występowania tego rodzaju niezgodności mogą być rozmaite, a ich uniknięcie wymaga często prowadzenia licznych prób technologicznych. W dalszej części artykułu przedstawiono podstawowe czynniki wpływające na jakość spoin.

Czystość powierzchni elementów łączonych

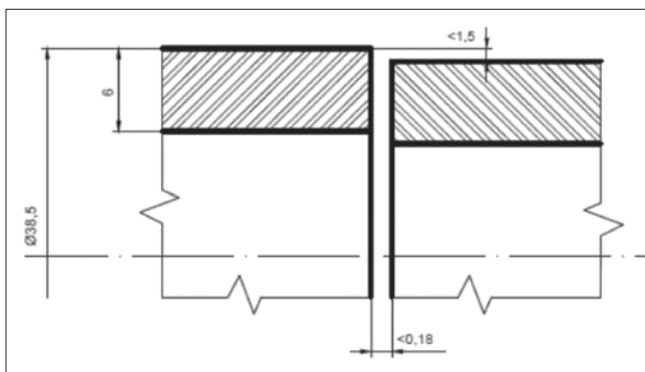
Pierwszym potencjalnym źródłem wad jest niedokładne oczyszczenie powierzchni w strefie oddziaływania wiązki promieniowania laserowego. Powierzchnie powinny być oczyszczone mechanicznie, można też użyć środka odrdzewiającego. Ten sposób ma dodatkową zaletę polegającą na poprawie absorpcyjności powierzchni nim pokrytej. Na rys. 1 pokazano efekt oddziaływania wiązki na powierzchnię wyczyszczoną mechanicznie do metalicznego połysku (a) oraz pokrytą dodatkowo środkiem odrdzewiającym na bazie kwasu fosforowego (b).



Rys. 1. Efekt oddziaływania wiązki na powierzchnię stali 16Mo3: a) oczyszczoną tylko mechanicznie, b) oczyszczoną mechanicznie i pokrytą dodatkowo środkiem odrdzewiającym

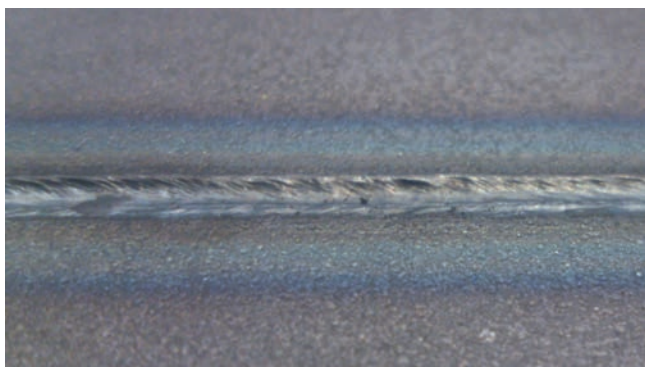
Przyleganie łączonych powierzchni

W porównaniu ze spawaniem metodami tradycyjnymi przy spawaniu laserowym wyższe są wymagania w odniesieniu do łączonych powierzchni. Niewielka średnica zogniskowanej wiązki (ok. 0,3 mm) powoduje, że spawane powierzchnie muszą być obrobione i mocno do siebie dociśnięte (rys. 2). Brak przylegania powierzchni może spowodować przejście wiązki na drugą stronę i jej niepełną absorpcję, w konsekwencji czego mogą powstać niezgodności spawalnicze.



Rys. 2. Sposób przygotowania powierzchni bocznych do spawania laserowego na przykładzie króćca rurowego ze stali VM12-SHC

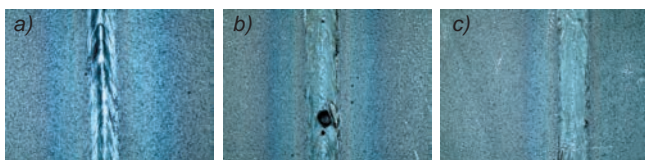
Zbyt słaby docisk powoduje rozchodzenie się łączonych powierzchni pod wpływem temperatury (rys. 3).



Rys. 3. Wklęsnięcie lica spoiny spowodowane naprężeniami cieplnymi i niedostatecznym dociskiem łączonych części

Wybór gazu osłonowego

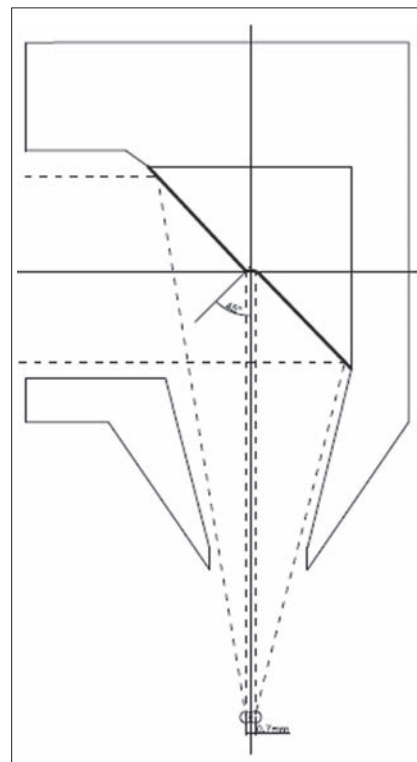
Kolejnym czynnikiem mogącym mieć wpływ na jakość spoiny jest skład gazu osłonowego. Na rys. 4 pokazano spawanie tego samego materiału (stali 16Mo3) z użyciem kolejno argonu, helu i mieszanki 70% He, 28% Ar i 2% O₂. Najlepsze wyniki pod względem braku niezgodności spawalniczych w spoinie dało zastosowanie czystego helu oraz czystego argonu, jednak użycie helu pozwoliło na uzyskanie lepszej budowy spoiny (mniejszej wypukłości lica).



Rys. 4. Spawanie z zastosowaniem różnych rodzajów gazu osłonowego: a) argonu, b) mieszanki 70% He, 28% Ar i 2% O₂, c) helu (materiał 16Mo3)

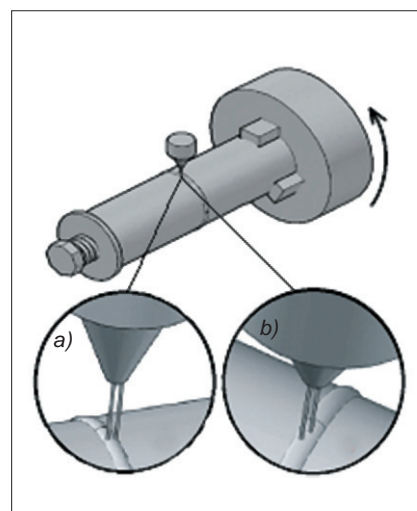
Wybór układu optycznego

Duża prędkość spawania i wąska strefa przetopienia – choć korzystne ze względów technologicznych i estetycznych – mogą utrudniać wydostawanie się par metalu z kanału parowego i w ten sposób sprzyjać powstawaniu pęcherzy oraz porowatości w spoinie. Można próbować temu zapobiegać, stosując odmienne od tradycyjnych układy optyczne. Na rys. 5 przedstawiono dwuogniskowe zwierciadło do spawania laserowego.



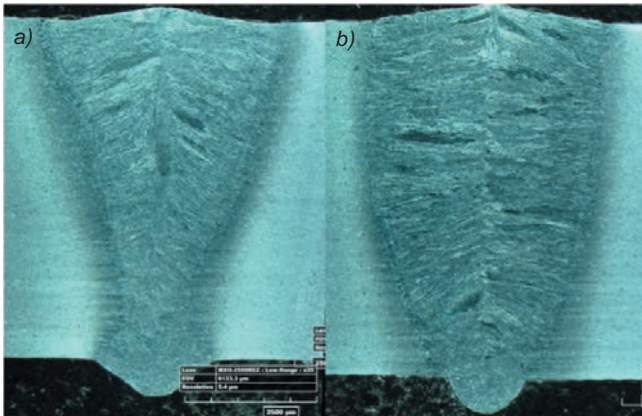
Rys. 5. Zwierciadło dwuogniskowe

Połowy zwierciadła są przesunięte względem siebie, w ten sposób powstają dwa ogniska oddalone o 0,7 mm i strefa oddziaływania wiązki jest rozszerzona. Równocześnie proces zachowuje właściwości spawania głębokiego, takie jak: obecność kanału parowego, odpowiednia głębokość przetopu i brak konieczności stosowania materiału dodatkowego. Taka optyka pozwala na przetopienie większej objętości materiału, prędkość spawania jest więc odpowiednio mniejsza [4]. Ułatwia to wydostawanie się ewentualnych pęcherzy gazowych ze strefy przetopu.



Rys. 6. Możliwe orientacje ognisk w stosunku do kierunku spawania: a) poprzeczne, b) wzdłużne

Na rys. 6 pokazano możliwe konfiguracje ognisk względem kierunku spawania (w przypadku spawania rur). Kształty przetopu uzyskane w tych konfiguracjach są widoczne na rys. 7. W obydwu przypadkach gradienty temperatury (zarówno przestrzenne, jak i czasowe) podczas spawania są niższe w porównaniu ze spawaniem optyką jednoogniskową, co korzystnie wpływa na właściwości mechaniczne spoiny.

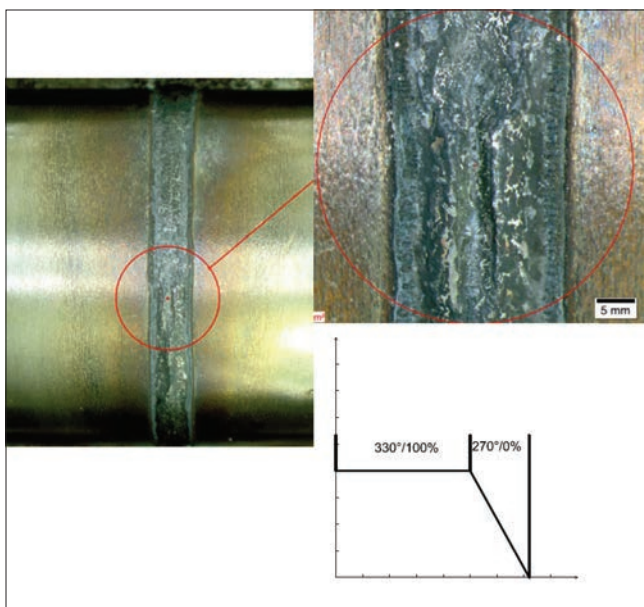


Rys. 7. Kształty strefy przetopienia dla: a) poprzecznej, b) wzdłużnej konfiguracji ognisk wobec kierunku spawania

Sterowanie mocą i prędkością

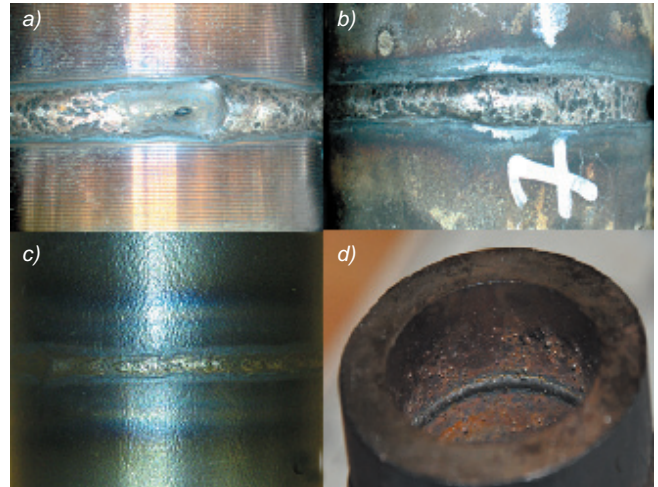
Problemy z wyciekaniem materiału i pojawianiem się wgłębień w spoinie mogą być spowodowane, jak wykazano, niedostatecznym dociskiem łączonych materiałów. Przy doczołowym spawaniu rur trudność pojawia się w punkcie zakończenia spoiny. Proste wyłączenie wiązki powoduje powstanie w tym miejscu otworu, co oczywiście dyskwalifikuje połączenie [5]. Dlatego należy stopniowo zmniejszać moc wiązki, nie przerywając posuwu.

Na rys. 8 pokazano połączenie rur ze stali austenitycznej TP347-HFG oraz zaprogramowaną zmianę mocy wiązki podczas wykonywania tej spoiny. Zmniejszanie mocy rozpoczęto 30° przed końcem spoiny i kontynuowano do zera przez 270° obrotu rury. W efekcie uzyskano złącze o prawidłowej budowie.



Rys. 8. Spawanie rur ze stali TP347-HFG. Wykres pokazuje zaprogramowaną zmianę mocy wiązki wzdłuż obwodu spoiny

W przypadku spawania niektórych materiałów, wykazujących wysoką lejność w stanie płynnym, pojawia się też problem wyciekania stopionego metalu ze strefy spawania, które powoduje wklęsnięcie lica oraz nadmierną wypływkę po stronie grani spoiny. Odpowiednie sterowanie mocą i prędkością obrotową (zwłaszcza na etapie zakończenia spoiny poprzez rampę wybiegu) służy również uniknięciu wgłębień oraz wybrzuszeń wzdłuż spoiny na obwodzie rury. Na rys. 9 pokazano efekt nieprawidłowego doboru parametrów spawania rur ze stali martenzytycznej VM12-SHC z widoczną nieprawidłową budową spoiny (a, b) oraz spoinę o prawidłowej budowie zarówno od strony lica (c), jak i grani (d).

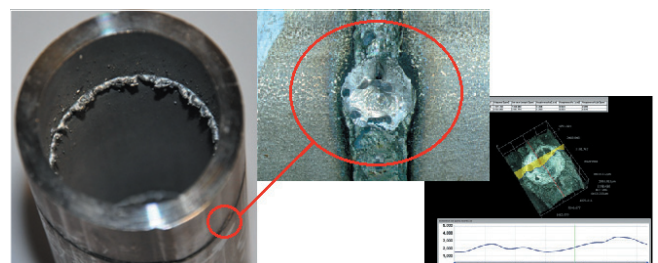


Rys. 9. Wyniki spawania rur ze stali VM12-SHC: a, b) nieprawidłowa budowa spoiny, c) prawidłowa budowa spoiny od strony lica, d) prawidłowa budowa spoiny od strony grani

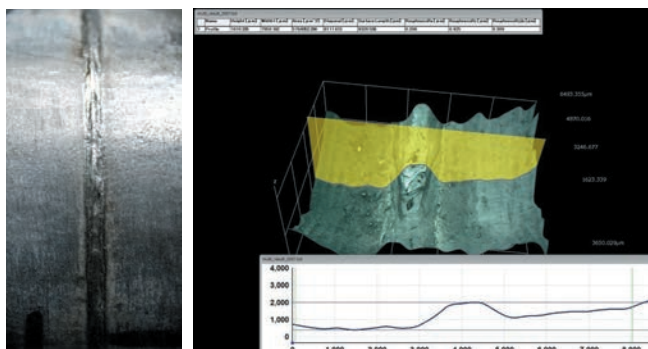
Stosowanie materiału dodatkowego

Jeszcze poważniejsze problemy z lejnością płynnego metalu pojawiły się w przypadku laserowego spawania rur z Inconelu, czyli nadstopu na bazie niklu. Na rys. 10 przedstawiono początkowe wyniki spawania Inconelu 625. Widoczne są wycieki metalu ze strefy spawania skutkujące wklęsnięciem lica i obecnością licznych porów w spoinie. Nieskuteczne okazały się próby zmiany pozycji spawania, mające utrudnić wypływanie. Ostatecznie zastosowano spawanie z użyciem materiału dodatkowego w postaci drutu Thermanite 625. Wymagało to nieznacznego zukosowania czołowych powierzchni rur. Najlepsze wyniki dało przyjęcie kątów rozwarcia szczeliny o wartościach nieprzekraczających 10°.

Na rys. 10 i 11 przedstawiono uzyskane efekty. Na rentgenogramie widać, że spoina nie wykazuje pęcherzy porowatości. Duża twardość materiału w strefie przetopienia wymaga przeprowadzenia obróbki cieplnej [6, 7].



Rys. 10. Wypływkę materiału od strony grani, widoczne wklęsnięcie lica spoiny w miejscu zakończenia spawania, oraz pomiar profilograficzny

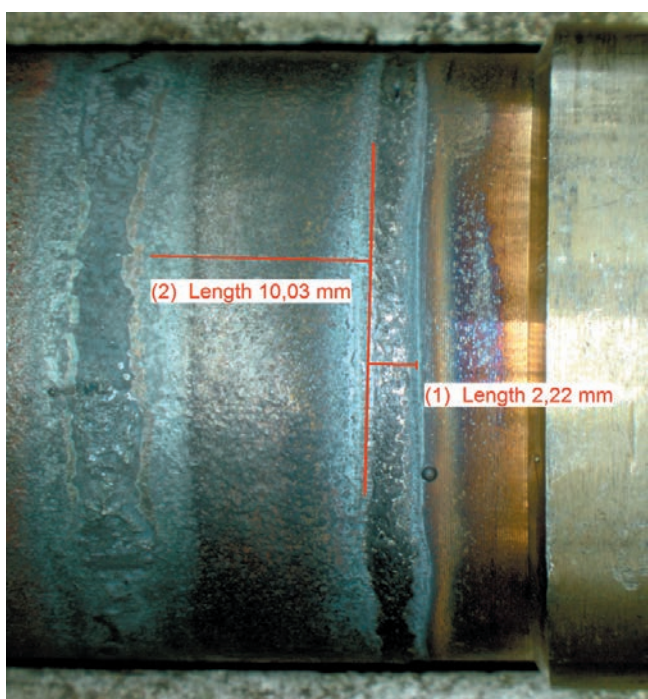


Rys. 11. Spawanie rur z Inconelu 625 z materiałem dodatkowym (drutem Thermanite 625)

Wstępne podgrzewanie łączonych elementów

Pojawiające się w spoinie i strefie wpływu ciepła pęknięcia i wady struktury można eliminować przez wstępne podgrzewanie łączonych elementów – dotyczy to zwłaszcza wysokostopowych stali martenzytycznych, które mają skłonność do pęknięcia na gorąco spowodowanego zbyt dużym gradientem temperatury podczas spawania. Wstępne podgrzewanie wymaga zastosowania dodatkowego procesu technologicznego. W przypadku spawania laserowego zarówno proces podgrzewania, jak i spawania można wykonać jednym urządzeniem. Wstępne podgrzewanie realizuje się poprzez oddziaływanie na powierzchnię przeznaczoną do spawania rozogniskowaną wiązką lasera i kontrolowanie temperatury tej powierzchni. W przypadku połączeń różniamiennych może zachodzić konieczność podgrzewania tylko jednego materiału.

Na rys. 11 pokazano przykład spawania rury ze stali martenzytycznej P91 z rurą ze stali austenitycznej TP347-HFG. Rury zostały stoczone do wspólnego wymiaru przekroju poprzecznego. Podgrzewanie stali P91 (rys. 12, lewa strona) odbyło się poprzez skanowanie obwodowe rozogniskowaną wiązką, której oś usytuowano w odległości 10 mm od powierzchni styku elementów (widoczna zaćmiwna powierzchnia) [8].

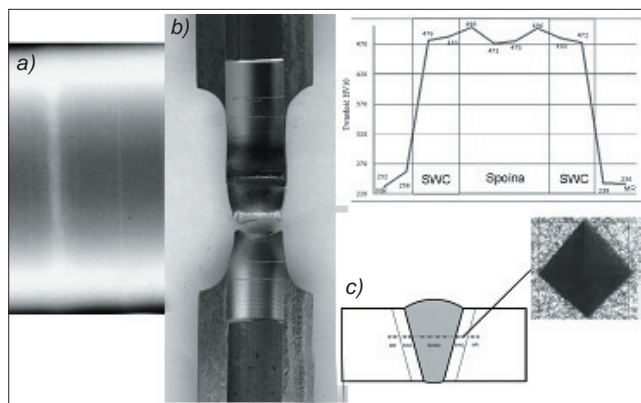


Rys. 12. Połączenie rury ze stali martenzytycznej P91 (z lewej strony) z rurą ze stali austenitycznej TP347-HFG

Badanie jakości połączeń

Podstawowymi metodami badania jakości otrzymanych złączy są wstępne badania wizualne (VT), a następnie badania radiograficzne (RT), na podstawie których dokonuje się oceny wewnętrznych niezgodności spawalniczych według normy PN-EN ISO 12517-1. Wymogi odnośnie do oceny jakości złączy dotyczą nie tylko oceny niezgodności spawalniczych poprzez badania nieniszczące; otrzymane złącza muszą również mieć odpowiednie właściwości wytrzymałościowe.

Aby ocenić wytrzymałość połączeń, wykonuje się badania niszczące złącza, w tym statyczną próbę rozciągania, próby zginania od strony lica i grani spoiny oraz badanie twardości. W przypadku próby rozciągania złącza zerwanie materiału nie może nastąpić w spoinie, najlepiej gdyby wystąpiło w materiale rodzimym. Próba zginania polega na obciążeniu próbki umieszczonej na dwóch podporach ze spoiną położoną pośrodku. Siła wywierana jest przez trzpień gnący aż do osiągnięcia kąta 180° i nie powinna spowodować pęknięcia spoiny. Badania niszczące zakładają również badanie twardości złącza – zarówno spoiny, jak i strefy wpływu ciepła (SWC) [9–12].



Rys. 13. Wyniki badań oceny jakości złącza ze stali VM12-SHC spawanego laserowo

Wyniki badania stali martenzytycznej w stanie surowym, bez dodatkowej obróbki cieplnej po procesie spawania, przedstawiono na rys. 13. Zaprezentowano wynik badania radiograficznego (a) (brak wskazań niezgodności spawalniczych w spoinie), statycznej próby rozciągania (b) (zerwanie próbki poza spoiną i SWC) oraz badania twardości złącza wraz z widoczną linią pomiaru (c) [13–16].

Podsumowanie

Spawanie laserowe wiąże się z wysokimi wymaganiami w zakresie przygotowania łączonych elementów i staranności prowadzenia procesu. Spawanie niektórych materiałów stwarza dodatkowe trudności z powodu zmian w strukturze i właściwościach połączeń wywołanych przez wysokie gradienty temperatury – zarówno czasowe, jak i przestrzenne – znacznie wyższe niż w przypadku konwencjonalnych metod spawania. Z drugiej jednak strony spawanie laserowe zapewnia znacznie lepszą kontrolę przebiegu i parametrów procesu – przede wszystkim przepływu energii. Dzięki temu udało się uzyskać zadowalające połączenia wszystkich wymienionych stali i stopów. Zgodnie z założeniami normy PN-EN ISO 13919-1 dotyczącej identyfikacji poziomu jakości złączy na podstawie oceny niezgodności spawalniczych otrzymano w sumie 19 rodzajów złączy jedno- oraz różniamiennych

spełniających najwyższy poziom jakości B (wymagania ostre). Spoiny spełniają zatem wymogi odnośnie do poziomu jakości złączy elementów przeznaczonych do instalacji kotłowych i energetycznych.

Praca zawiera wyniki badań przeprowadzonych w ramach projektu NCBiR nr PBS1/B5/13/2012 Technologia laserowego spawania dla energetyki i ochrony środowiska.

LITERATURA

1. Urzyncok M., Kwieciński K., Słania J. „Application of new GMAW welding methods used in prefabrication of P92 (X10CrWMoVNb9-2) pipe butt welds”. *Przegląd Spawalnictwa*. T. 81, nr 10 (2009): s. 13–19.
2. Viswanathan R., Sarver J., Tanzosh J.M. “Boiler materials for ultra-supercritical coal power plants – steamside oxidation”. *Journal of Materials Engineering and Performance*. Vol. 15, No. 3 (2006): pp. 255–274.
3. PN-EN ISO 13919-1: Spawanie – Złącza spawane wiązką elektronów i wiązką promieniowania laserowego – Wytyczne do określania poziomów jakości według niezgodności spawalniczych.
4. Antoszewski B., Gradoń R., Trela P., Cendrowicz E. “A study of laser-beam welding conducted at Centre for Laser Technologies of Metal”. Proceedings of SPIE.
5. Pilarczyk J. (red.). *Poradnik inżyniera – spawalnictwo*. T. 1. Warszawa: WNT, 2003.
6. Dahmen M., Janzen V., Lindner S., Wager R. “Mechanical properties of laser beam welded ultra-high strength chromium steel with martensitic microstructure”. *Physics Procedia*. Vol. 78 (December 2015): pp. 210–221.
7. Danielewski H., Skrzypczyk A. „Właściwości obwodowych złączy rur ze stali VM12-SHC spawanych laserowo”. Rozdział w monografii pod redakcją J. Pacyny: *Prace Szkoły Inżynierii Materiałowej – SIM*. Wydawnictwo Naukowe Akapit. 2015: s. 193–197.
8. Scendo M., Chat M., Antoszewski B. “Oxidation behaviour of laser welding of TP347HFG and VM12-SHC stainless steels”. *Int. J. Electrochem. Sci.* Vol. 10 (2015).
9. PN-EN ISO 12517-1: Badania nieniszczące spoin – Część 1: Ocena złączy spawanych ze stali, niklu, tytanu i ich stopów na podstawie radiografii – Poziomy akceptacji.
10. PN-EN ISO 5173: Badania niszczące spoin w materiałach metalowych – Badanie na zginanie.
11. PN-EN ISO 4136: Badania niszczące złączy spawanych metali – Próba rozciągania próbek poprzecznych.
12. PN-EN ISO 6507-1: Metale – Pomiar twardości sposobem Vickersa – Część 1: Metoda badań.
13. Radziszewska A., Kąc S., Solecka M. „Charakterystyka mikrostruktury i własności laserowo spawanych rur kotłowych”. NM-NT 2015.
14. Taban E., Deleu E., Dhooge A., Kaluc E. „Laser welding of modified 12% Cr stainless steel: Strength, fatigue, toughness, microstructure and corrosion properties”. *Materials and Design*. Vol. 30(4) (April 2009): pp. 1193–1200.
15. Pańcikiewicz K., Kwiecień S., Tasak E. „Właściwości połączeń spawanych stali bainitycznej 7CrMoVTiB10-10”. *Przegląd Spawalnictwa*. T. 8 (2010): s. 8–14.
16. Dzioba I., Zowczak W., Kasińska J., Pała T. „Badanie właściwości mechanicznych złączy z niskowęglowych stali Cr-Mo spawanych laserowo”. *Mechanik*. Nr 1 (2016): s. 46–50. ■