

Technologia spawania laserowego rur ożebrowanych

Finned pipes laser welding technology

Streszczenie

Wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną w Europie wymaga ciągłego poszukiwania nowych źródeł energii, rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych. Utrzymanie dotychczasowego poziomu produkcji energii elektrycznej wymaga nie tylko napraw i modernizacji eksploatowanych jednostek, ale także budowy nowych bloków na parametry nadkrytyczne i ultranadkrytyczne. Podwyższenie sprawności termicznej przy jednoczesnej redukcji kosztów energii możliwe jest dzięki zastosowaniu rur żebranych na wymienniki ciepła.

W pracy przedstawiono technologie wytwarzania rur ożebrowanych, ze szczególnym uwzględnieniem innowacyjnej technologii spawania laserowego opracowanej w Energoinstal. Wykorzystanie laserów dyskowych dużej mocy umożliwia spawanie rur ożebrowanych z kilkakrotnie większą wydajnością w stosunku do technologii spawania łukowego, przy zachowaniu restrykcyjnych wymagań jakościowych i technicznych.

Słowa kluczowe: rury ożebrowane, spawanie laserowe, kocioł energetyczny, sprawność energetyczna

Abstract

The increase in demand for electricity in Europe requires a continuous search for new sources of energy, engineering and technology solutions. Maintaining the current level of electricity production requires not only repair and modernization of the operating units, as well as construction of new blocks of supercritical and ultra-supercritical. Increasing thermal efficiency while reducing energy costs is possible through the use of finned tubes for heat exchangers.

This paper presents the technologies of finned tubes, with particular emphasis on innovative laser welding technology developed in the Energoinstal company. The use of high power disk laser allows the welding of finned tubes several times more efficient compared to arc welding technology, while maintaining stringent quality and technical requirements.

Keywords: finned tubes, laser welding, power boiler, energy efficiency

Wstęp

Poprawa efektywności energetycznej to jeden z głównych filarów bezpieczeństwa energetycznego i poprawy konkurencyjności gospodarki europejskiej [1, 2]. Rosnący popyt na energię elektryczną i uwarunkowania dyrektyw Unii Europejskiej wymuszają modernizację europejskiego przemysłu energetycznego. Powoduje to konieczność podjęcia działań w zakresie

projektowania, technologii wytwarzania oraz eksploatacji bloków energetycznych, a także znajdowania nowych źródeł energii odnawialnej [2].

Jednym z kierunków poprawy sprawności gazowych bloków energetycznych jest zastosowanie rur ożebrowanych. Rury ożebrowane z żebrzem ciągłym bądź naciętanym, w zależności od parametrów eksploatacyjnych czynnika roboczego i spalin, mogą pełnić rolę: podgrzewaczy, ekonomizerów lub przegrzewaczy (rys. 1).

Dr hab. inż. Janusz Adamiec, prof. PŚI; dr inż. Grzegorz Kokot – Politechnika Śląska, Katowice;
mgr inż. Michał Więcek – Energoinstal S.A.

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

Żebra zwiększają wydatnie powierzchnie wymiany ciepła, umożliwiając optymalizację powierzchni ogrzewalnych kotła, dzięki czemu uzyskuje się zmniejszenie gabarytów kotła, a tym samym zmniejszenie jego masy. Sprawność rurowego wymiennika ciepła zależy od współczynnika przewodzenia pomiędzy ścianką rury a medium i polem powierzchni rury. Dla rur ożebrowanych powierzchnia wymiany ciepła może wzrosnąć o 30 razy w porównaniu do rur nieożebrowanych i tym samym współczynnik przewodzenia wyraźnie rośnie, a jednostkowy strumień ciepła wzrasta prawie o 300% w porównaniu do rur gładkich, co prowadzi do wzrostu ogólnej sprawności kotłów przemysłowych.

Wytwarzanie wymienników ciepła z rurami ożebrowanymi, ze względu na rosnącą konkurencję wymaga wdrażania nowych rozwiązań technologicznych w obszarze produkcji. Do podstawowych technologii wytwarzania rur ożebrowanych należy zaliczyć nawijanie taśmy bezpośrednio na rurę, mechaniczne zagniatanie nawiniętej taśmy, wytwarzanie w procesie przeróbki plastycznej, zgrzewanie prądami dużej częstotliwości oraz spawanie łukiem elektrycznym,

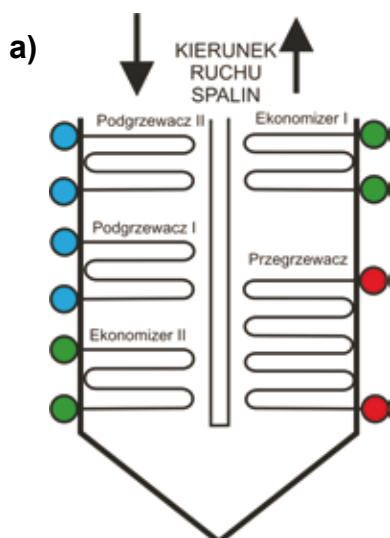
najczęściej metodą MAG. Rury z nawijaną taśmą lub taśmą zagniataną nie są stosowane w energetyce ze względu na dzieloną budowę, która nie zapewnia wystarczająco dobrych warunków wymiany ciepła. Ponadto w miarę upływu czasu eksploatacji jakość połączenia spada pod wpływem rozszerzalności cieplnej oraz drgań, co skutkuje pogorszeniem ich sprawności cieplnej [4]. W nowoczesnych kotłach gazowych coraz częściej stosuje się rury ożebrowane wykonane spawaniem laserowym. Wykorzystanie skoncentrowanej mocy wiązki laserowej pozwala na znaczący wzrost prędkości łączenia, przy zapewnieniu jakości połączenia wymaganej przez przepisy i normy techniczne.

Symulacja procesu spawania rur ożebrowanych metodą elementów skończonych

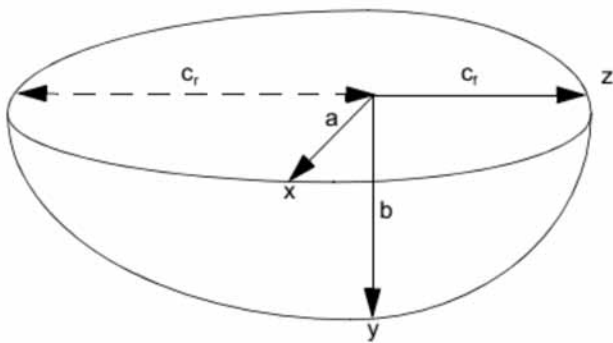
Proces spawania jest związany z wysoką temperaturą, szybkim wprowadzaniem ciepła do materiału rodzimego, ruchomym źródłem ciepła i określonym cyklem cieplnym. W opracowanym modelu spawania do obliczeń metodą elementów skończonych (MES) uwzględniono wszystkie te parametry procesu, co umożliwiło odwzorowanie rzeczywistego przebiegu spawania metodą MAG i spawania wiązką laserową rur ożebrowanych. Obecnie tylko w kilku systemach CAE (*Computer Aided Engineering*) możliwe jest symulowanie takich procesów z uwzględnieniem niemal wszystkich warunków spawania, takich jak: kształt źródła ciepła, prędkość spawania, moc spawania, kształt ścieżki spawania itd. Zadanie to w tych systemach jest rozwiązywane jako sprzężony problem termomechaniczny [5]. Symulację procesu spawania rur ożebrowanych wykonano w systemie MSC Marc [6].

Wprowadzane ciepło spawania zostało zamodelowane jako przestrzennie zmienny rozkład ciepła przyłożony do materiału spawanego oraz spoiny. Jako kształt jeziorka spawalniczego przyjęto eliptyczną bryłę zgodnie z modelem zaproponowanym przez Goldaka [7]. Model ten może być stosowany zarówno w symulacjach 2D, jak i 3D (rys. 2).

Uwzględniając rzeczywiste wymiary rur ożebrowanych (rura o średnicy 51 mm, grubości ścianki 5,0 mm oraz taśma 19 x 1 mm) wykonanych metodą MAG oraz spawanych laserem, opracowano trójwymiarowe modele dyskretne oparte na 8-węzłowym 6-ściennym bryłowym elemencie skończonym HEX8. Wytworzone modele numeryczne składały się z 73 tys. węzłów i 60 tys. elementów. Ze względu na analizę w trzech wymiarach model numeryczny zawiera do 120 tys. stopni swobody. Model dla złącza wykonanego metodą MAG przedstawiono na rysunku 3, a model złącza spawanego laserem na rysunku 4.



Rys. 1. Schemat typowego kotła przemysłowego z częściami roboczymi (a), zestaw wymienników ciepła z rurami ożebrowanymi (b) [3]
Fig. 1. Typical industrial boiler with operating parts (a), heat exchangers with finned pipes (b) [3]

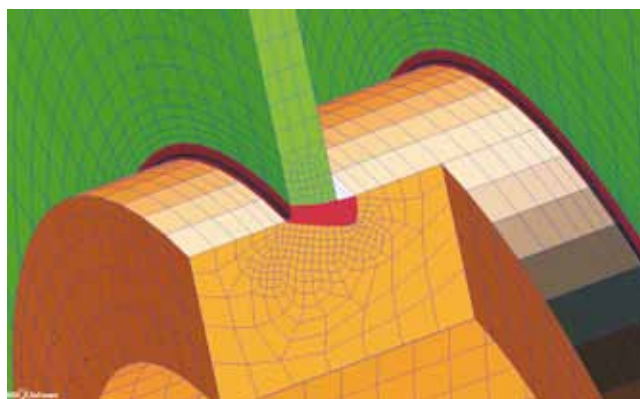
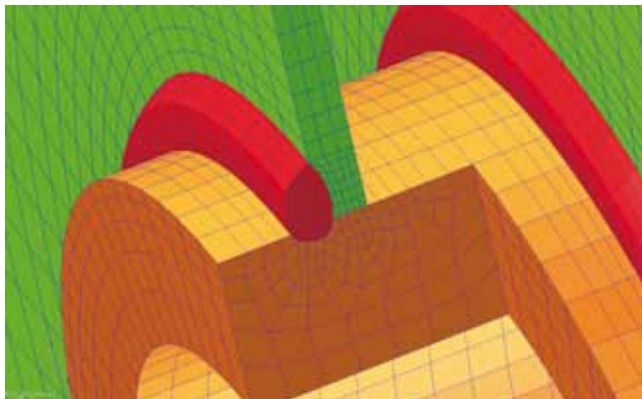
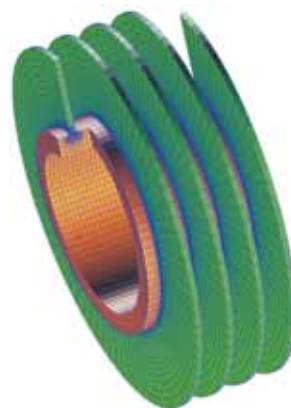
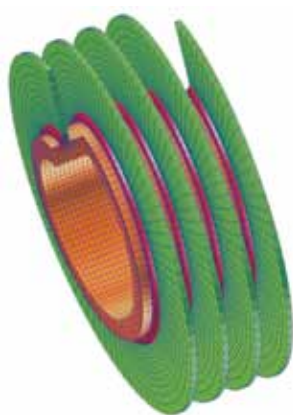


$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_r \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \exp\left(\frac{-3z^2}{c^2}\right)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_r \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \exp\left(\frac{-3z^2}{c^2}\right)$$

Rys. 2. Kształt źródła ciepła wg Goldaka i jego opis matematyczny, gdzie: q_f i q_r – składowe ciepła dostarczanego jako objętościowe źródło ciepła, $Q = \eta UI$ – moc spawania, U – napięcie łuku spawalniczego, I – natężenie prądu spawania, a – szerokość jeziora spawalniczego wzdłuż kierunku X , b – głębokość wzdłuż kierunku Y , c_f i c_r – odległości wg schematu, f_f i f_r – współczynniki bezwymiarowe

Fig. 2. Goldak's heating source shape with mathematical description, where: q_f and q_r – heat input components as volume heating source, $Q = \eta UI$ – welding heat input, U – arc voltage, I – welding current, a – welding pool length in X -axis direction, b – depth in Y -axis direction, c_f and c_r – distances acc. to the scheme, f_f and f_r – nondimensional factors



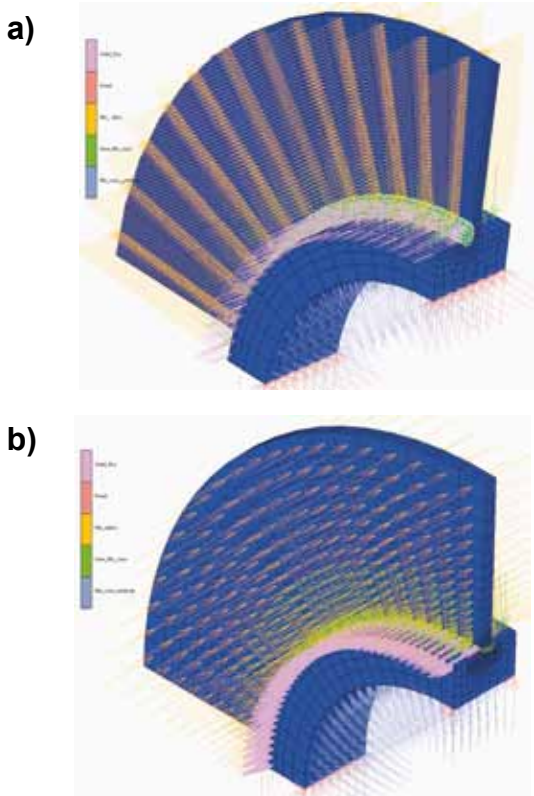
Rys. 3. Model dyskretny 3D rury ożebrowanej spawanej metodą MAG
Fig. 3. 3D model of finned pipe MAG welded

Rys. 4. Model dyskretny 3D rury ożebrowanej spawanej laserem
Fig. 4. 3D model of finned pipe laser beam welded

Zdefiniowany model numeryczny fragmentu złącza spawanego metodą MAG z przyjętym sposobem usztywnienia przedstawiono na rysunku 5a, a na rysunku 5b pokazano analogiczny model dla złącza spawanego laserem.

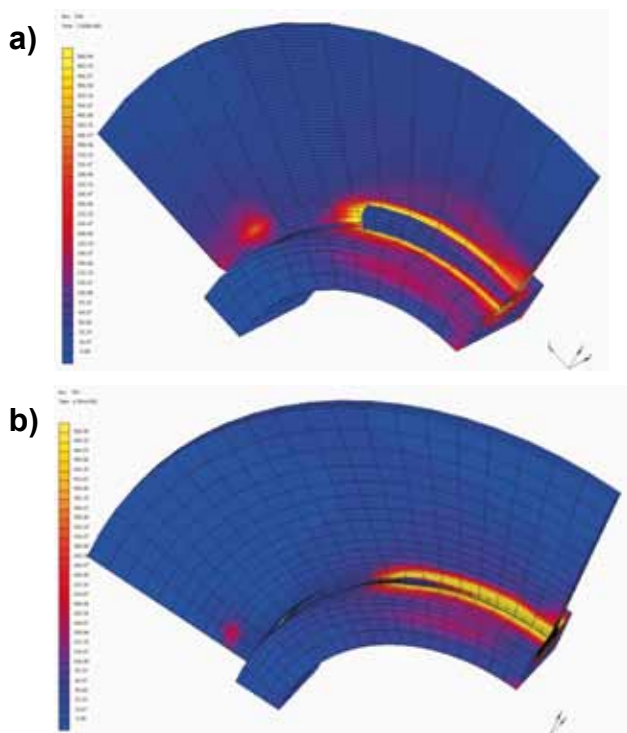
Spoina była modelowana z wykorzystaniem elementów nieaktywnych, które powstają dynamicznie podczas symulacji wraz z przemieszczającym się źródłem ciepła. Połączenie rury i żebra modelowano z wykorzystaniem tzw. „kontaktu”, co powoduje, że podczas symulacji odpowiednie warunki brzegowe są generowane auto-

matycznie na granicy strefy spoina – materiał rodzimy. Warunek przejmowania ciepła został uwzględniony na wszystkich ściankach zewnętrznych. Temperaturę początkową we wszystkich węzłach przyjęto na poziomie 20°C. W symulacji wykorzystano parametry materiałowe (moduł Younga, współczynnik rozszerzalności cieplnej, ciepło właściwe, przewodność cieplną itd.) w funkcji czasu i temperatury. Parametry technologiczne procesu spawania metodą MAG oraz spawania laserowego przyjęto na podstawie doświadczeń własnych przedstawionych w [8, 9].



Rys. 5. Sposób utwierdzenia modelu numerycznego złącza spawanego: a) metodą MAG, b) wiązką lasera

Fig. 5. Fastening of numerical model of welded joint: a) by MAG method, b) by laser beam

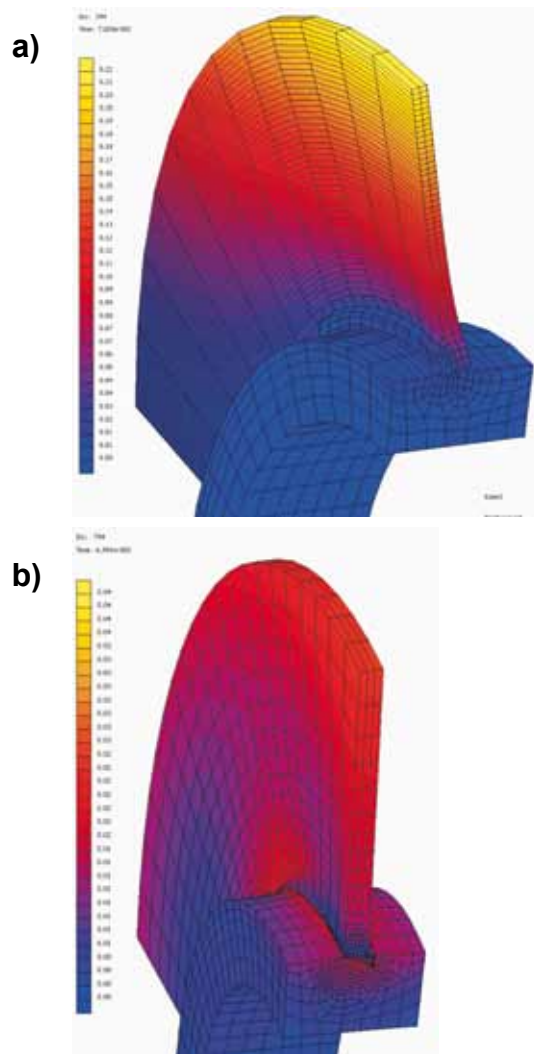


Rys. 6. Rozkład naprężeń zredukowanych Hubera von Misesa podczas spawania rur ożebrowanych: a) złącze wykonane metodą MAG – lico spoiny, b) złącze spawane laserem – lico spoiny

Fig. 6. Huber's and von Mises's reduced stresses distribution in finned piper welding process: a) MAG welded joint – face of weld, b) laser beam welded joint – face of weld

Trajektorię spawania zamodelowano jako uporządkowany ciąg węzłów tworzący krzywą geometryczną, sukcesywnie generowaną w zależności od warunków brzegowych. Spoina modelowana jest jako dynamicznie powstające elementy podczas symulacji, które są formułowane przez odpowiednie warunki brzegowe. Elementy te powstają zgodnie z przemieszczającym się źródłem ciepła. Wyniki symulacji pola naprężeń zredukowanych Hubera, von Misesa i pola przemieszczeń wypadkowych podczas spawania rur ożebrowanych pokazano na rysunkach 6 i 7.

Pole naprężeń zredukowanych jest znacznie większe podczas spawania metodą MAG w stosunku do spawania laserowego rur ożebrowanych. Jednak maksymalne naprężenia zredukowane zarówno w przypadku spawania MAG, jak i spawania laserowego są na podobnym poziomie (rys. 6). Ocena rozkładu naprężeń od strony grani spoiny ujawniła wąską symetryczną strefę naprężeń zredukowanych podczas spawania laserem (rys. 6b) i duże pole naprężeń o szerokości ok. 10 mm podczas spawania MAG (rys. 6a).



Rys. 7. Rozkład przemieszczeń wypadkowych: a) złącze wykonane metodą MAG, b) złącze spawane laserem

Fig. 7. Resultant displacement distribution: a) MAG welded joint, b) laser beam welded joint

Taki stan naprężeń powstający w złączu pachwinowym wywołuje nierównomierne przemieszczenia żebra, co prowadzi do powstania szczeliny od strony grani spoiny. Szczelina ta jest karbem geometrycznym i równocześnie może powodować korozję szczelinową złącza (rys. 7a). W procesie spawania zautomatyzowanego istnieje również możliwość pojawienia się mikropęknięć w spoinie od strony grani, które powstają w wyniku ponownego nagrzania złącza podczas układania kolejnych ściegów. Spawanie laserowe z pełnym przetopem powoduje nieznaczne symetryczne przemieszczenia, które nie powodują istotnego wyężenia materiału żebra (rys. 7b) i tym samym złącze takie charakteryzuje się mniejszą skłonnością do korozji szczelinowej (pełny przetop) oraz do pęknięć typu *reheat*.

Analiza rozkładu naprężeń zredukowanych oraz przemieszczeń wypadkowych, głównie żebra podczas spawania laserowego doczołowego z pełnym przetopem i spawania metodą MAG spoiną pachwinową, wskazuje na istotny wpływ kształtu i wielkości spoiny na wyężenie złącza. Stwierdzono, że żebro spawane metodą laserową jest znacznie mniej wyężone i mniej odkształcone w stosunku do spawania metodą MAG (rys. 7).

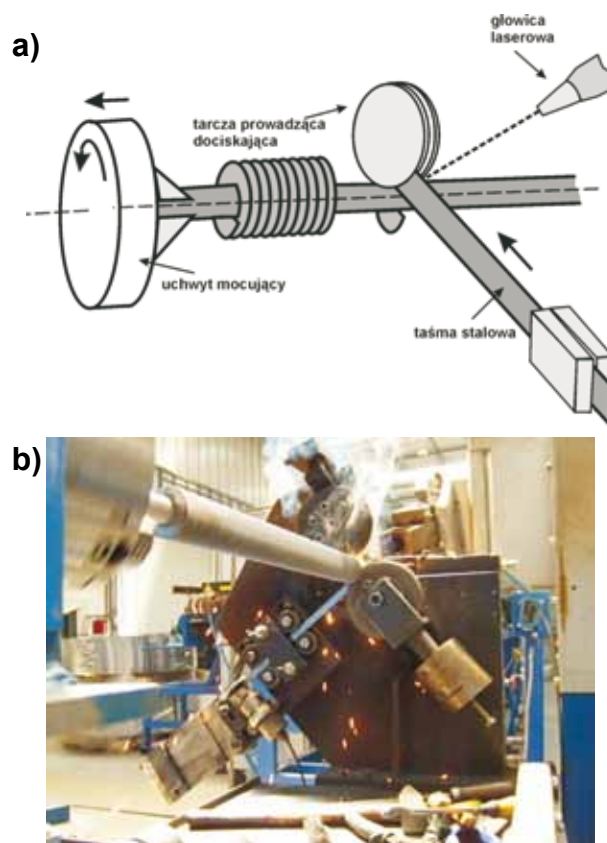
Innowacyjna technologia spawania laserowego rur ożebrowanych

Rozwój technologiczny w zakresie nowoczesnych metod wytwarzania oraz rosnące zapotrzebowanie i wymagania inwestorów spowodowały, że zaczęto poszukiwać efektywniejszych technologii produkcji rur ożebrowanych. Alternatywą dla produkcji rur ożebrowanych spawanych za pomocą tradycyjnych technologii spajania może być spawanie laserowe.

W Energoinstalu podjęto próby spawania rur ożebrowanych na innowacyjnym stanowisku do automatycznego spawania laserowego składającego się z lasera dyskowego Trudisk 8002 firmy Trumpf z układem podziału wiązki laserowej na dwa stanowiska spawalnicze wyposażone w systemy obrotu i posuwu rur podczas spawania oraz automatyczny system malowania. Schematycznie układ spawania pokazano na rysunku 8a.

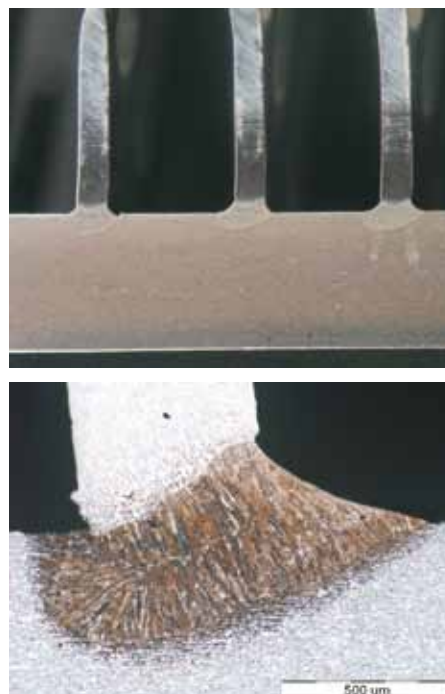
Laser Trudisk 8002 został wyposażony w dwa światłowody o długości 30 m, co w połączeniu z dwoma głowicami spawalniczymi umożliwia spawanie przemienne na każdej linii stanowiska. Taki układ zapewnia maksymalizację wykorzystania pracy lasera. Podczas spawania na linii nr 1 na drugiej linii trwa przygotowanie następnej rury. Układ transportu rur umożliwia ich przemieszczanie z prędkością liniową do 5 m/min. Zakres długości spawanych rur wynosi od 3 do 24 m, przy zachowaniu wybiegów od 50 do 250 mm.

Istotnym czynnikiem decydującym o możliwości spawania rur ożebrowanych z prędkościami obrotowymi powyżej 200 obr/min (prędkość liniowa spawania ok. 24 m/min) jest układ pozycjonowania głowicy



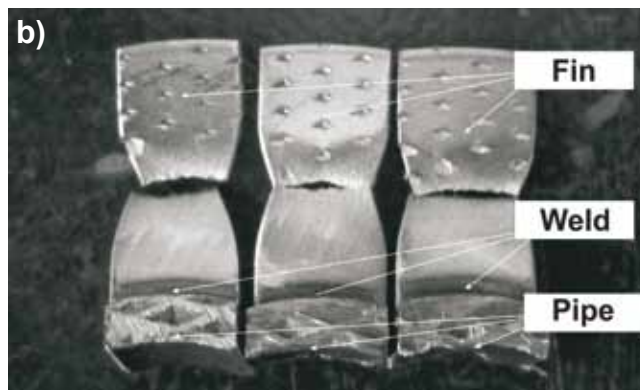
Rys. 8. Laserowe stanowisko do spawania rur ożebrowanych opracowane w Energoinstal: a) schemat ogólny układu spawania, b) pracujące stanowisko

Fig. 8. Finned pipes laser beam welding station designed in Energoinstal: a) scheme of the process, b) working station



Rys. 9. Makrostruktura złącza wykonanego laserem o mocy 4 kW przy prędkości 150 obr/min. (a); mikrostruktura złącza P235GH+X2CrTi12 (b)

Fig. 9. Macrostructure of laser beam welded joint with the use of 4 kW device and welding velocity of 150 rot/min. (a); microstructure of P235GH+X2CrTi12 joint (b)



Rys. 10. Rozkład twardości w złączu rura-żebro wykonanym w technologii laserowej (a), wyniki technologicznej próby odrywania żebra (b)
Fig. 10. Hardness distribution in the laser beam welded pipe-fin joint (a), results of technological removal test of fin and pipe (b)

spawającej. W Energoinstalu zaprojektowano układ trójosiowy z płynną regulacją w każdej osi, dzięki czemu uzyskano możliwość dokładnej regulacji położenia głowicy laserowej, automatycznego szepiania taśmy przed rozpoczęciem procesu spawania oraz automatycznego odcinania taśmy wiązką laserową po zakończeniu procesu spawania. Do podgrzewania rur przed spawaniem zaprojektowano system indukcyjny, który w stosunku do podgrzewania gazowego ma tę zaletę, że pozwala na pełną regulację i kontrolę temperatury podgrzewania wstępnego. System ten jest zintegrowany z całą linią i umożliwia nagrzewanie rury o średnicy 44,5 mm i grubości ścianki 5 mm do temperatury 300°C, przy prędkości liniowej posuwu 5 m/min (rys. 8b). Przewaga proponowanego rozwiązania nad obecnie stosowanym to możliwość zastosowania go do wysokowydajnego spawania rur ożebrowanych (8-krotny wzrost wydajności w stosunku do spawania metodą MAG), przy spełnieniu wszystkich wymagań przepisów technicznych.

W Energoinstalu przeprowadzono próby spawania laserowego rur ze stali P235GH z żebrem nacinanym ze stali X2CrTi12 wiązką o mocy 4÷4,5 kW. Prędkość obrotowa rury wyniosła 100÷250 obr/min, spawanie prowadzono w osłonie argonu przy natężeniu wypływu 5 l/min.

Badania wizualne wykonane zgodnie z wymaganiami EN ISO 17637 wykazały, że złącze jest ciągłe na całej długości rury (rys. 9a). Spoina charakteryzuje się

równomiernym licem i pełnym przetopem (rys. 9b). Na tej podstawie złącze zakwalifikowano do poziomu jakości B wg PN-EN ISO 13919.

Analiza mikrostruktury złącza wykazała obecność struktur ferrytyczno-martenzytycznych w wąskiej (50÷100 µm) strefie wpływu ciepła oraz martenzytycznych w spoinie (rys. 9b). Pomiary twardości wykonane metodą Vickersa przy obciążeniu 9,8 N (HV1) nie ujawniły wzrostu twardości połączenia powyżej wymaganego przez PN EN 15614-11 poziomu 380 HV (rys. 10a).

Uzupełnieniem oceny jakości połączenia rura-płaskownik była technologiczna próba odrywania żebra (rys. 10b). Do próby przygotowano fragmenty złącza żebra z rurą, które wycięto z rury produkcyjnej. Próba rozciągania była wykonana na maszynie wytrzymałościowej firmy Cometech w uchwytach, które umożliwiają prostopadłe zamocowanie próbki. Stwierdzono, że we wszystkich badanych połączeniach zerwanie następuje poza złączeniem, co wskazuje, że wytrzymałość całego połączenia jest większa od wytrzymałości żebra. Zatem wykonane połączenie laserowe rura-płaskownik spełnia wymagania konstrukcyjne. Wyniki badań strukturalnych oraz pomiary twardości wykazały, że złącza spawane laserem rury z płaskownikiem (żebrem) spełniają wymagania poziomu jakości B wg PN-EN ISO 13919, zatem technologia może być kwalifikowana zgodnie z PN-EN ISO 15614-11.

Podsumowanie

Zastosowanie spawanych rur ożebrowanych w urządzeniach energetycznych prowadzi do oszczędności energii i obniżki kosztów w procesie eksploatacji kotłów przemysłowych, odzyskiwania ciepła kondensacji i jego celowego wykorzystania oraz minimalizacji strat energii przez obniżenie temperatury gazów spalinowych. Opracowano kilka technologii wytwarzania rur ożebrowanych dla przemysłu energetycznego. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć wytwarzanie w procesie przeróbki plastycznej, zgrzewanie prądami wysokiej częstotliwości, spawanie łukiem elektrycznym w procesie MAG. Metody te jednak pomimo swoich zalet, do których zaliczyć należy przede wszystkim uzyskanie połączenia ciągłego rura-żebro, co znacz-

nie podwyższa sprawność cieplną, charakteryzują się małą wydajnością oraz możliwością występowania niezgodności spawalniczych typu: przyklejenia, braki przetopienia, odpryski itp.

W Energoinstalu SA opracowano innowacyjną technologię wysokowydajnego spawania laserowego rur ożebrowanych, która zapewnia uzyskanie złącza na poziomie jakości B PN-EN ISO 13919, przy 8-krotnym wzroście wydajności wytwarzania.

Wykonane złącza charakteryzują się ciągłą spoiną z pełnym przetopem na całej długości rury, a twardość złącza nie przekracza 380 HV, co wskazuje, że technologia ta może być kwalifikowana do stosowania w przemyśle energetycznym.

Literatura

- [1] Breeze P.: Raising steam plant efficiency – Pushing the steam cycle boundaries. PEI Magazine, Vol. 20, Iss. 4, April, 2012.
- [2] Huseman R.: Advanced (700°C) PF Power Plant. A Clean Coal European Technology. Advanced Material for AD700 Boilers, Cesi Auditorium, Milano, 2005.
- [3] Najgebauer E. Patrycy A.: Zobowiązania polskiej energetyki wobec EU. www.geoland.pl
- [4] Dziemidowicz Z., Szyszka P., Krupa I.: Bloki na horyzoncie. Wymagania techniczne nowych jednostek wytwórczych w PGE Elektrowni Opole S.A. Energetyka Ciepła i Zawodowa 11/2011.
- [5] Kokot G., John A., Kus W.: New Possibility in Welding Simulation by Finite Element Method, Mechanika 2010: Proceedings of 15th International Conference, Kaunas, 2010, 251-256.
- [6] MSC. Marc Volume A: Theory of user information, ver 2005.
- [7] Goldak J. Chakravarti A., Bibby M.: A new finite element model for welding heat sources, Metallurgical Transactions B, Vol. 15B, June 1984.
- [8] Gawrysiuk W., Adamiec J., Więcek M.: Możliwości spawania laserowego i hybrydowego ścian szczelnych oraz rur ożebrowanych, Konferencja Spawanie w Energetyce, Opole – Jarosławów 2008.
- [9] Adamiec J., Gawrysiuk W., Więcek M.: Zautomatyzowane stanowisko do spawania rur ożebrowanych laserem dyskowym. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 5/2010, Gliwice.

Podziękowanie

Praca finansowana w ramach projektu PBS1/A5/13/2012, pt.: „Technologia spawania laserem rur ożebrowanych ze stali austenitycznych i stopów niklu przeznaczonych do pracy w kotłach o parametrach nadkrytycznych i ultranadkrytycznych” przez NCBiR.