

Bezpieczne i ekonomiczne konstruowanie ekranów wymienników ciepła ze stali i innych stopów o ograniczonej spawalności

Safety and economical heat exchanger walls construction made of steels and other alloys with low weldability

Streszczenie

W artykule wskazano możliwość ekonomicznego konstruowania bezpiecznych w eksploatacji ścian szczelnych z wyciskanych rur kształtowych. Konstrukcja taka zmniejsza czterokrotnie liczbę spoin i wielokrotnie zmniejsza naprężenia własne. Przedstawiono liczne zalety takiego rozwiązania, zmniejszającego awaryjność kotłów.

Słowa kluczowe: ściana szczelna, stal energetyczna, rura wymiennika ciepła

Abstract

The work presents the possibility of economical construction of safe in exploitation leak tight walls that are made of extruded pipes of dedicated shape. The suggested construction process reduces the number of welds fourfold and reduces significantly residual stresses. The work presents the numerous advantages of the solution that increase the reliability of boilers.

Keywords: leak tight wall, power engineering steel, heat exchange pipe

Wstęp

Niniejsze opracowanie poświęcone jest możliwości pokonania głównych trudności konstrukcyjno-materiałowych i technologicznych podczas wykonania lub remontów ścian szczelnych. Ogromne problemy, prowadzące do wyłączenia 11 bloków w Niemczech, Czechach i Holandii [1], powstały podczas wdrażania stosunkowo nowej i pozornie łatwospawalnej stali T24 (7CrMoVTiB10-10) [2÷5].

Próby jej wmontowywania do instalacji ciepłowniczych doprowadziły do wielkich kłopotów wykonawczych, opóźnień w uruchamianiu i osiągnięciu

docelowych parametrów nowo instalowanych w Europie kotłów, znacznych strat finansowych, a wskutek tego do odwracania się od tej, a być może innych stali nowej generacji [6÷11].

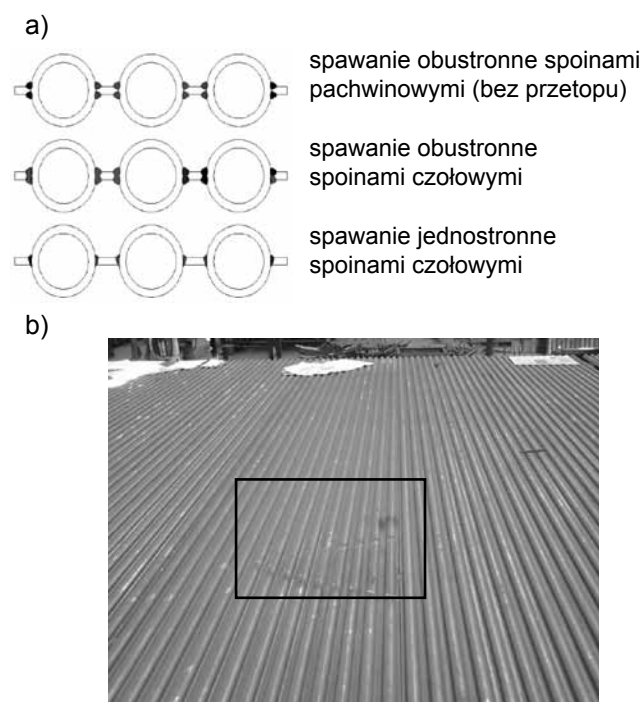
Dlatego też nowoczesne instalacje ciepłownicze wymagają oprócz poszukiwań w sferze materiałowej również rewizji poglądów dotyczących konstrukcji i technologii wykonywania ich elementów [12]. Udoskonalane są technologie spawania i zgrzewania, materiały dodatkowe, lecz konstrukcje ekranów poza wdrażaniem technologii gwarantujących pogłębiony przetop i uzyskiwanie spoin czołowych (np. metodą spawania hybrydowego) od wielu lat pozostają niezmiennione.

Dr inż. Jacek Michalczyk, dr inż. Kwiryn Wojsyk – Politechnika Częstochowska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: kwiryn@gmail.com

Konstrukcje konwencjonalnych ekranów ciepłowniczych

Budowane obecnie ściany szczelne składają się z rur połączonych płaskownikami (rys. 1) [13].



Rys. 1. Konstrukcje ścian szczelnych: a) konstrukcje typowych ekranów rura-płetwa, b) widok przygotowanej do prostowania części ekranu

Fig. 1. The membrane wall structure: a) typical leak tight wall welding scheme, b) view of leak tight wall

Stosowane są dwa zasadnicze rozwiązania konstrukcyjne różniące się możliwymi do uzyskania podczas spawania głębokościami wtopienia, a w konsekwencji rodzajami spoin.

Płaskownik do rury może być przyspawany dwoma spoinami pachwinowymi lub jedną spoiną czołową. Daje to odpowiednio cztery lub dwie spoiny na podziałkę szerokości ekranu.

Konstrukcje te mają liczne strukturalne wady:

- znaczną liczbę i objętość spoin przypadającą na jednostkowy odcinek ekranu,
- wysoki poziom wzdłużnych i poprzecznych naprężeń spawalniczych,
- uzyskiwanie wyprężonych, trudno odkształcalnych, a niekiedy kruchych ekranów wymagających w dalszych etapach wytwarzania dodatkowej, często złożonej obróbki cieplnej,
- konieczność złożonego korygowania istotnych odkształceń końcowych,
- wprowadzenie dodatkowej objętości i masy stopiwa do konstrukcji przez stosowanie spoin pachwinowych lub pogrubionych czołowych,

- konieczność wykonywania spoin w pozycji nabocznej (PB), co nie tylko obniża wydajność spawania, ale zwiększa też prawdopodobieństwo wystąpienia podtopień, a nawet przetapiania (przepalania) ścianek rur. Podtopienia stanowią karby na przejściu płaskownik-lico spoiny lub rura-spoina, co oprócz wzrostu lokalnych naprężeń przyspiesza procesy erozyjne [14],
- niską wydajność wykonania ekranu związaną ze znaczną liczbą spoin (4 lub 2 na podziałkę poprzeczną ekranu) oraz koniecznością obracania ekranów międzyoperacyjnie podczas spawania,
- utrudnioną kontrolę jakości spoin.

Łączenie płaskowników z rurami spoinami czołowymi jest konstrukcyjnie korzystniejsze, gdyż powstałe złącze nie zawiera wewnętrznego karbu kształtu oraz karbu strukturalnego (zwykle z dodatkową koncentracją wodoru dyfundującego). Ich wykonywanie ze względu na konieczność dokładnego zestawiania łączonych elementów [13], ukosowania lub stosowania metod głęboko wtapiających i podkładek jest jednak droższe od wykonania spoin pachwinowych.

Ekranu łączone są nabocznie z międzyoperacyjnym obrotem. Wariant ten stwarza prawdopodobieństwo powstawania podtopień i może pozostawić karb wewnątrz złącza (w przypadku uzyskania spoin pachwinowych). Ściana szczelna łączona spoinami czołowymi w miejscu rura-płaskownik nie wymaga wprowadzenia międzyoperacyjnego obrotu, lecz konieczna jest ochrona i formowanie grani spoiny. I w tym przypadku mogą występować podtopienia ścianek rur, niezależnie od tego, czy spawanie jest jednostronne, czy dwustronne.

Wspólną cechą opisanych wyżej wariantów konstrukcyjnych jest znaczne zagęszczenie spoin, realne niebezpieczeństwo wywołania podtopień spawalniczych oraz przetopienia ścianek rur podczas wystąpienia niewłaściwych wartości parametrów spawania. Utrudniona jest kontrola, a naprawa źle wykonanych spoin ryzykowna ze względu na możliwość otrzymania dodatkowych pocieniń ścianek. Natomiast po rezygnacji z obróbki mechanicznej po spawaniu trzeba liczyć się z miejscowym, intensywniejszym zużyciem ekranu, co również nieuchronnie prowadzi do perforacji ścianek rur i w efekcie – stanów awaryjnych kotła [14]. Przyspieszonym procesom niszczenia sprzyja wysoki poziom naprężeń spawalniczych.

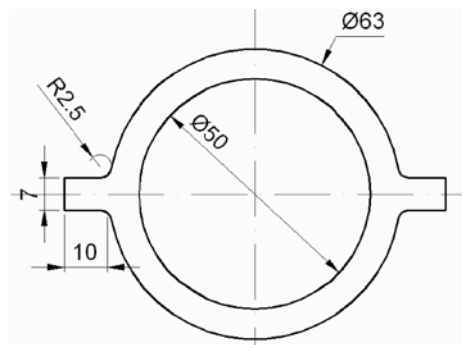
W wielu przypadkach konieczne jest stosowanie dodatkowej, końcowej obróbki cieplnej [7], co istotnie spowalnia i podraża proces produkcji ekranu.

Niezbędne jest zatem poszukiwanie rozwiązań obejmujących zarówno ulepszenie technologiczne, jak i konstrukcyjne.

W produkcji ekranów należy rozważyć np. wprowadzenie zgrzewania rezystancyjnego lub indukcyjnego, tworzących łagodniejsze niż spawanie cykle cieplne, a zatem niepowodujące znacznych naprężeń i zmian morfologicznych w spajanych materiałach.

Proponowana konstrukcja ekranów ciepłowniczych

Jeżeli zakłada się, że jedną z przyczyn występowania trudności we wdrożeniu nowych materiałów na urządzenia ciepłownicze są ograniczenia spawalności nowo wprowadzanych stali, należy je ostrożnie wprowadzać [15]. Możliwym i bezpiecznym rozwiązaniem jest zastosowanie rur z dwoma wypustkami, którego przykład pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Profil wyciskanej rury do konstrukcji ekranów
Fig. 2. The profile of extrusion forging pipe for membrane wall

Ta pozornie niewielka zmiana kształtu rury powoduje poważne konsekwencje w konstrukcji ekranu ciepłego. Podstawowe zalety zastosowania rury z bocznymi wypustkami do produkcji ekranów to:

- dwukrotne lub czterokrotne zmniejszenie liczby spoin, a zatem proporcjonalne obniżenie ich koncentracji w polu pracy ekranu,
- możliwość zmniejszenia podziałki pomiędzy osiami poszczególnych rur, co prowadzi do zwiększenia powierzchni czynnej ekranów,
- obniżenie poziomu wzdłużnych i poprzecznych naprężeń spawalniczych oraz obniżenie stanu naprężeń końcowych mierzonego naprężeniami zastępczymi H_{MH}, a przez to zmniejszenie kruchości ekranu,
- zwiększenie zapasu plastyczności ekranu i ułatwienie przeprowadzania dalszego kształtowania plastycznego,
- zmniejszenie prawdopodobieństwa – ze względu na liczbę spoin – wystąpienia niezgodności spawalniczych i kłopotów eksploatacyjnych z tym związanych,
- przyspieszenie i potaniecie spawania albo jego wyeliminowanie w przypadku zastosowania zgrzewania indukcyjnego, rezystancyjnego lub tarcowego z przemieszaniem,
- częściowa lub całkowita eliminacja międzyoperacyjnego obracania elementów,
- zastąpienie spoin pachwinowych – czołowymi co zwiększa wytrzymałość zespołu.
- niewytwarzanie wewnętrznych karbów kształtu wokół spoin pachwinowych,
- umożliwienie stosunkowo prostej, mającej na celu likwidację karbów kształtu obróbki mechanicznej lic i grani spoin lub zgrzein czołowych,

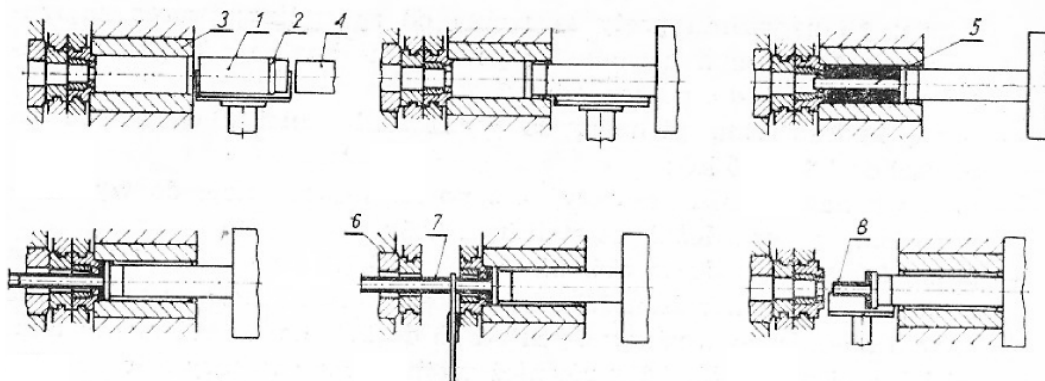
- możliwość w miarę dowolnego kształtowania płynnego przejścia powierzchni tworzącej rury do wypustek, co skutecznie i trwale eliminuje karby geometryczne w newralgicznych miejscach,
- ułatwienie utrzymania i zagwarantowanie stałej podziałki pomiędzy osiami poszczególnych rur,
- zastąpienie spawania w pozycji nabocznej (PB) spawaniem w dogodnej pozycji podolnej (PA) zwiększającej szybkość spawania i obniżającej ilość niezgodności spawalniczych lub zgrzewaniem,
- zmniejszenie liczby potencjalnych ognisk korozyjnych i miejsc wzmożonej turbulencji na zewnętrznej powierzchni ściany szczelnej,
- oddalenie niebezpieczeństwa perforacji ścianek rur zarówno podczas spajania jak i dalszej eksploatacji przez odsunięcie spawania od wewnętrznych ścianek rur,
- zmniejszenie objętości, a zatem i masy ściany szczelnej,
- ułatwienie i przyspieszenie kontroli złączy, w tym zastosowanie kontroli automatycznej, zsynchronizowanej z procesem spajania,
- ułatwienie ewentualnego przeprowadzenia obróbki cieplnej złączy.

O ile w przypadku użycia stali konwencjonalnych ekrany ciepłe obecnie rzadko pękają w czasie wytwarzania wskutek stosowania technologii spawalniczych, o tyle doświadczenia wykonywania ich ze stali nowej generacji są, jak wskazuje dotychczasowa praktyka [6÷11], bardzo ryzykowne. Jest to spowodowane ograniczoną spawalnością tych stali i znacznymi naprężeniami pospawalniczymi wynikającymi z wysokiej sztywności konstrukcji. Ekrany te są kruche, łatwo pękające miejscowo i na dłuższych odcinkach, zarówno bezpośrednio po spawaniu, jak i podczas transportu, montażu oraz eksploatacji. Należy zaznaczyć, że koszty napraw i obniżenia docelowych parametrów eksploatacyjnych instalacji ciepłowniczych są ogromne, co wykazała dotychczasowa praktyka stosowania stali T24. Opłacalność wdrożenia do powszechnego użycia specjalnych, przeznaczonych wyłącznie do budowy ciepłowniczych ścian szczelnych rur ekranowych oraz najbardziej ekonomicznego i pewnego ich spajania uzależniona jest od możliwości wykonania i jakości rur o proponowanym kształcie.

Opracowanie procesu wytwarzania rur do konstrukcji ekranów ciepłowniczych

Procesy walcowania rur, pomimo wielu zalet takich jak duża wydajność związana z długością otrzymywanych wyrobów oraz wysoka jakość rur, mają też ograniczenia wynikające z kształtu, jaki mogą nadać wykroje walców tego rodzaju wyrobu.

Do wytwarzania rur o skomplikowanych kształtach opracowano procesy wyciskania, początkowo na



Rys. 3. Wyciskanie rur w prasie hydraulicznej: 1 – nagrany pręt, 2 – przetłoczką, 3 – pojemnik, 4 – tłoczek, 5 – trzpień, 6 – zamek matrycy, 7 – rura, 8 – końcówka rury

Fig. 3. The tube extruding in a hydraulic press: 1 – heated rod, 2 – overpress, 3 – container, 4 – piston rod, 5 – pin, 6 – matrix fastener, 7 – tube, 8 – tip of the tube

prasach mechanicznych, a obecnie na prasach hydraulicznych. Wyciskanie na prasach hydraulicznych doskonale sprawdza się przy wyciskaniu rur stalowych o średnicach od 50 do 650 mm i długościach od 6 do 25 m.

Wyciskanie rur stalowych na prasach hydraulicznych ma wiele zalet w porównaniu z wyciskaniem na prasach mechanicznych. Do głównych należą: stała prędkość wyciskania w czasie pełnego cyklu produkcyjnego (na prasach mechanicznych prędkość ta jest zmienna, co ma związek z układem korbowodu). Ponadto prędkości wyciskania hydraulicznego dochodzą do 400 mm/s, a na prasach mechanicznych do 240 mm/s. Dzięki znacznie większemu skokowi pras hydraulicznych możliwe jest stosowanie prętów wsadowych długości 1500 mm, wobec używanych do pras mechanicznych – maks. 470 mm. Na rysunku 3. przedstawiono proces wyciskania na prasie hydraulicznej [16-18].

W celu zademonstrowania możliwości wykonania rur kształtowych (rys. 2) z dwoma zewnętrznymi wypustkami umożliwiającymi bezpośrednie łączenie spoiną czołową z sąsiednimi rurami, zbudowano numeryczny model procesu ich wyciskania.

Założenia do numerycznego modelowania procesu wyciskania

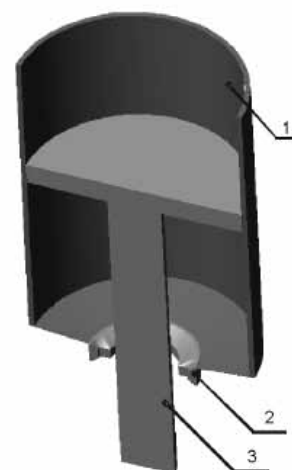
Do realizacji procesu wytwarzania profilu wytypowano sposób współbieżnego wyciskania z wsadu okrągłego z uprzednio rozwierconym otworem na trzpień. Jako materiał modelowy użyto stal kotłową P91 (X10CrMoVNb9-1) przystosowaną do pracy w podwyższonej temperaturze. Ze względu na swoją żarowytrzymałość,

używana jest ona do wyrobu odpowiedzialnych części i osprzętu w budowie turbin parowych, wałów wirnikowych, śrub, nakrętek oraz również stosowana jest do budowy urządzeń grzewczych i ciśnieniowych. Skład chemiczny stali P91 zawarto w tablicy I, natomiast właściwości mechaniczne w tablicy II.

Wartości współczynników niezbędnych do obliczenia naprężenia uplastyczniającego pobrano z bazy programu Forhe[®]3D.

Na rysunku 4. przedstawiono model narzędzia do realizacji procesu wytwarzania rur z „płetwami”.

Symulacje komputerowe procesu współbieżnego wyciskania profilu (rys. 2) przeprowadzono dla



Rys. 4. Model narzędzia do wyciskania profilu rury wg. rys. 1: 1 – pojemnik z dnem, 2 – matryca, 3 – trzpień

Fig. 4. Model of tool for pipe extrusion with profile by fig. 1: 1 - a container with a bottom, 2 – matrix, 3 – pin

Tablica I. Skład chemiczny stali P91 wg PN-EN 10216-2

Table I. Chemical composition of P91 steel acc. to PN-EN 10216-2

C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	V	Inne
0,08÷0,12	0,2÷0,5	0,3÷0,6	8÷9,5	0,85÷1,05	0,06÷0,1	0,18÷0,25	N=0,03÷0,07

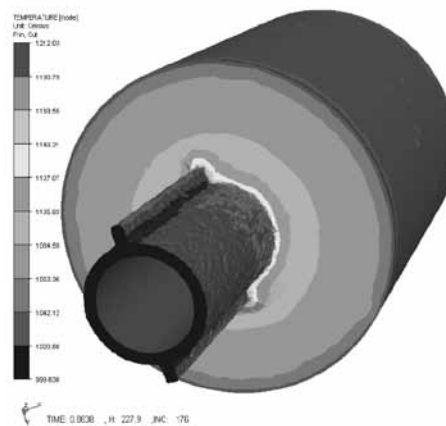
Tablica II. Właściwości mechaniczne stali P91

Table II. Mechanical properties of P91 steel

R_e , MPa	R_m , MPa	A_{min} , %
450	630	19

temperatury początkowej wsadu 1150°C i prędkości posuwu trawersy 25 mm/s. Wsad miał kształt walca o wymiarach $\phi 100 \times 250$ mm z wywierconym otworem na trzpień $\phi 26$ mm.

W symulacjach komputerowych zastosowano model tarcia wg Treski. Pojemnik podczas procesu nagrany był do temperatury 350°C.



Rys. 5. Widok przekroju otrzymanego profilu rury
Fig. 5. View of the section of the pipe profile

Wyniki badań numerycznych

Modelowanie numeryczne procesu wytwarzania rur przeznaczonych do konstrukcji ekranów ciepłowniczych miało na celu zaproponowanie metodyki otrzymywania wyrobów mających pożądane właściwości. Jak wspomniano wcześniej, ideą tej koncepcji jest radykalne ograniczenie liczby spoin podczas łączenia poszczególnych modułów rurowych, odsunięcie spoin od ścianek zewnętrznych oraz stosowanie w konstrukcji wyłącznie spoin czołowych. Zaproponowany sposób wyciskania współbieżnego z użyciem trzpienia pozwala uzyskać wyrób o założonych kształtach i wymiarach oraz wymaganej długości (min 12 m).

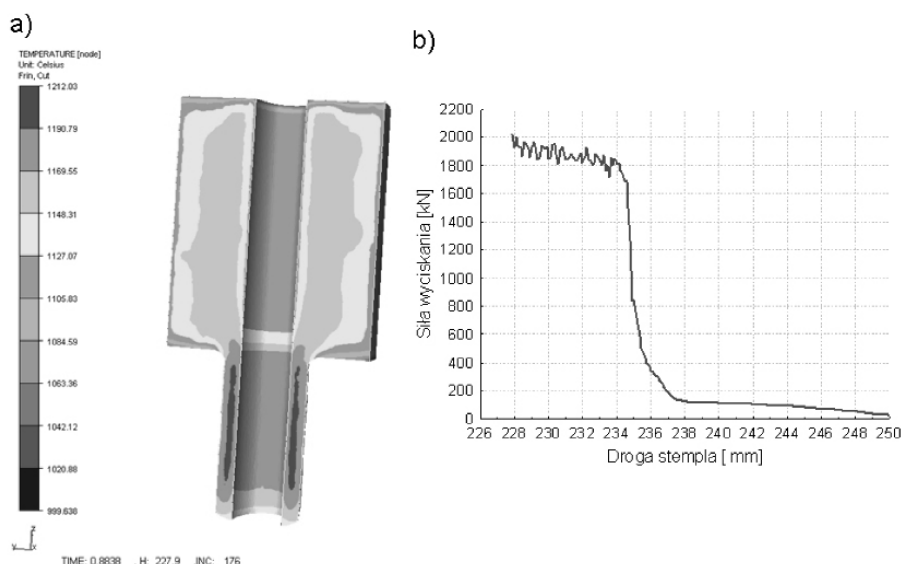
Na rysunku 5 przedstawiono przykładowy rozkład intensywności naprężeń uzyskany w wyniku modelowania oraz odpowiadający mu kształt przekroju.

Podczas projektowania narzędzia do wyciskania wy-

miary matrycy zostały określone zgodnie z rysunkiem 2. Gdy proces uzyskał stan ustalonego płynięcia i wykres zależności siły wyciskania od drogi stempla ustabilizował się, wyznaczono największą siłę wyciskania, jaką należy zastosować, aby pokonać opór odkształcania.

Stan ustalonego płynięcia na przykładzie rozkładu temperatury wraz z wykresem przedstawiono na rysunku 6.

Jak wynika z wykresu (rys. 6b) siła wyciskania rury o profilu wg rysunku 2 ze stali P91 (X10CrMoVNb9-1) odkształcanej w temperaturze początkowej 1150°C z prędkością posuwu stempla 25 mm/s nie przekracza 2000 kN. Doświadczenie z porównania modelowania numerycznego procesów wyciskania z późniejszą ich weryfikacją doświadczalną pozwala przypuszczać, że różnice w otrzymanych parametrach siłowych uzyskanych metodą numeryczną i weryfikacją doświadczalną nie powinny różnić się o więcej niż 10%.



Rys. 6. Proces w stanie ustalonego płynięcia: a) rozkład temperatury, b) siła wyciskania
Fig. 6. The process in the steady flow state: a) the distribution of temperature, b) extruding force

Podsumowanie

Jak wynika z przeprowadzonych analiz w programie obliczeniowym Forge@3D, zaproponowana metodyka wytwarzania profili rurowych do ekranów ciepłowniczych jest odpowiednia z punktu widzenia otrzymania oczekiwanego profilu rury z materiału modelowego P 91 o rzeczywistych parametrach fizycznych. Otrzyma-
ne parametry siłowe mogą być podstawą do dalszych badań doświadczalnych, które można wykonać w warunkach laboratoryjnych i półprzemysłowych na prasie hydraulicznej o nacisku 2500 kN.

– Ze względu na wprowadzenie materiałów o coraz ostrzejszych reżimach spawania [19] bezwzględne jest zrewidowanie konstrukcji ścian szczelnych, by nie powtórzyły się problemy związane z próbami stosowania stali T24.

- Wprowadzenie proponowanego rozwiązania rur ekranowych nie tylko przyspieszy produkcję wymienników, lecz wskutek lepszej ich jakości spowoduje bezpieczniejszą eksploatację całej instalacji cieplnej.
- Wskutek zmiany konstrukcji ekranów umożliwione będzie osiągnięcie wyższych, docelowych parametrów ciśnieniowo-temperaturowych instalacji ciepłowniczych. Mimo podniesienia obciążeń zmniejszy się prawdopodobieństwo interwencji remontowo-naprawczych.
- Jeżeli zostaną wdrożone technologie zgrzewania indukcyjnego lub rezystancyjnego rur kształtowych, łagodniejsze cykle cieplne spowodują znacznie mniejsze ich zmiany metalurgiczne w obrębie złączy, co może wyeliminować konieczność przeprowadzania obróbki cieplnej po spawaniu.

Literatura

- [1] Zasuń R.: Pech energetyki: kocioł pęka, woda sika. Gazeta Wyborcza 23.09.2011, s. 26.
- [2] Urzyncok M., Kwieciński K., Słania J.: Właściwości złączy spawanych ze stali bainitycznej 7CrMoVTiB10-10 (T24) stosowanej w elektrowniach pracujących przy parametrach nadkrytycznych. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 6/2009, s.63-68.
- [3] Urzyncok M., Kwieciński K., Słania J.: Doświadczenia przy wykonywaniu połączeń doczołowych rur ze stali 7CrMoVTiB10-10 (T24), s.171-183. Praca zbiorowa pod redakcją Adama Hernasa: Materiały i technologie do budowy kotłów nadkrytycznych i spalarni odpadów. SliTPH Katowice 2009.
- [4] Pańcikiewicz K., Kwiecień S., Tasak E.: Właściwości połączeń spawanych stali 7CrMoVTiB10-10. Przegląd Spawalnictwa 8/2010, s.8-14.
- [5] Golański G., Kępa J.: Nowoczesne stale dla energetyki. Charakterystyka. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa 2011.
- [6] Szczepańska M.: EDF Nie boi się pękającej stali. Rzeczpospolita 09.12.2011.
- [7] Pańcikiewicz K., Kwiecień S., Tasak E.: Właściwości połączeń spawanych stali 7CrMoVTiB10-10 (T24) po obróbce cieplnej. Przegląd Spawalnictwa 1/2012, s.15-17.
- [8] Ziewiec A., Pańcikiewicz K., Tasak E.: Pęknięcie spoin w stali 7CrMoVTiB10-10 (T24) w czasie spawania, uruchamiania i eksploatacji bloków energetycznych. Przegląd Spawalnictwa 5/2012, s. 2-7.
- [9] Adamiec J., Hernas A. Experiences in welding of membrane panels made of 7CrMoVTiB10-10 (T24) steel. 14th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2010, Mediterranean Cruise, 11-18 September 2010, s.57-60.
- [10] Nowack R., Götte Ch., Heckmann S.: Quality management at RWE using T24 boiler material as an example. VGB PowerTech International Journal for Electricity and Heat Generation – English version of a paper published in German in 11/2011, s.1-5.
- [11] Newell W. F. Jr.: Heat treatment is not optional. Superheat FGH. Business Update. Reprinted from the October 2007 issue of BIC magazine.
- [12] Słania J., Urbańczyk P.: Technologia wytwarzania gazoszczelnych ścian rurowych kotła pyłowego. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 6/2009 s. 59+63
- [13] PN-EN 12952-5: 2005 Kotły wodnorurkowe i urządzenia pomocnicze – Część 5 : Wytwarzanie i budowa części ciśnieniowych kotłów.
- [14] Kudła K., Wojsyk K.: Possibilities of Constructing Safe and Cort – Effective Shields for Heat Exchangers. Polish Journal of Environmental Studies. Vol. 22 No. 6A 2013 s. 26+29.
- [15] Kudła K., Wojsyk K.: Łączne i nośne funkcje spoin w nowoczesnych konstrukcjach spawanych, Spajanie 3 – 4/2010 s. 26+28.
- [16] Devjatow V.V., Michalczyk J., Rajczyk J.: Teoretyczne podstawy i technologia procesów wyciskania. Wyd. PCz. Seria Monografie Nr 218. Częstochowa 2011.
- [17] Hoderny B., Korek Z.: Rury Stalowe – wytwarzanie i stosowanie. Wydawnictwo Śląsk Katowice 1976.
- [18] Libura W. Płynięcie metalu w procesie wyciskania. AGH. Kraków 2008.
- [19] Kudła K., Wojsyk K.: Metody poprawy właściwości eksploatacyjnych złączy spawanych. Przegląd Spawalnictwa 5/2012 s. 49+51.

Podziękowanie

PBadania realizowane w ramach Projektu „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”, Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.