

# Wpływ wielokrotnego naprawczego procesu spawania metodą TOPTIG długotrwale eksploatowanych ścian szczelnych na strukturę i twardość SWC złącza spawanego

## The Influence of TOPTIG Multiple Repair Welding of Long Operated Waterwall on the Structure and Hardness of Heat Affected Zone of Welded Joints

### Streszczenie

Artykuł przedstawia problematykę związaną z przygotowaniem i technologią spawania naprawczego związanego z remontami prowadzonymi na elemencie konstrukcyjnym po długotrwałej eksploatacji w przemyśle energetycznym. Określono wpływ wielokrotnego procesu spawania naprawczego pęknięć powstałych w spoinie na strukturę i twardość strefy wpływu ciepła złącza spawanego ściany szczelnej. W badaniach proces spawania przeprowadzono przy użyciu zmechanizowanego spawania TOPTIG™, będącego wysoko wydajną odmianą metody TIG.

**Słowa kluczowe:** spawanie remontowe; ściana szczelna; TOPTIG; energetyka; SWC

### Abstract

The paper presents the problems of repair welding preparation and technology of the element after long-term operation in the power industry. It has been determined the influence of multiple repair welding of cracks formed in weld on the structure and hardness of waterwall weld joint. Welding process was performed using mechanized welding TOPTIG™, which is the high-efficiency TIG method.

**Keywords:** repair welding; waterwall; TOPTIG; power engineering; HAZ

### Wstęp

Awarie spawanych instalacji energetycznych, często wynikające z dużego stopnia zużycia konstrukcji, wymagają przeprowadzenia stosownych napraw. Najlepszym rozwiązaniem jest wymiana starych konstrukcji na nowe, jednak, ze względów technicznych i ekonomicznych takie rozwiązanie nie zawsze jest możliwe. W tym celu przeprowadza się spawanie remontowe [1].

Producenci energii i instytucje odpowiedzialne za sektor energetyczny przede wszystkim podtrzymują istniejący stan obiektów i instalacji energetycznych. Działania polegają na przeprowadzaniu racjonalnej i rzetelnej diagnostyki, przeglądów, napraw i modernizacji obiektów, które znacznie przekroczyły obliczeniowy czas pracy 100 000 godzin (wynikający z zastosowanej do obliczeń czasowej wytrzymałości na pełzanie). Sytuacja jest szczególnie dramatyczna gdyż większość eksploatowanych w Polsce bloków energetycznych przekroczyło już ten czas, osiągając czas eksploatacji ponad 200 000 godzin. Decyzje o przedłużeniu eksploatacji poza ten czas są podejmowane z zastosowaniem metody oceny opartej o dane średniej czasowej wytrzymałości na pełzanie dla 200 000 godzin oraz o pozytywne wyniki kompleksowych badań diagnostycznych [2,3]. Własności elementów

konstrukcyjnych ulegają degradacji w wyniku uszkodzeń eksploatacyjnych. Wśród procesów niszczenia występujących w instalacjach energetycznych wyróżnia się pełzanie, zmęczenie cieplno-mechaniczne, korozję wysokotemperaturową, erozję i kawitację, kruche pękanie i pęknięcia eksploatacyjne i korozyjne. Uwarunkowania techniczno-ekonomiczne, ekologiczne, prawne i przede wszystkim czynniki materiałowo-technologiczne ukierunkowują rozwój technologii energetycznych. Wysokotemperaturowa wytrzymałość i trwałość (określana jako żarowytrzymałość) elementów konstrukcyjnych urządzeń ciśnieniowych są zależne od stabilności struktury materiału, technologiczności, rozwiązań konstrukcyjnych i poziomu zaawansowania technologii.

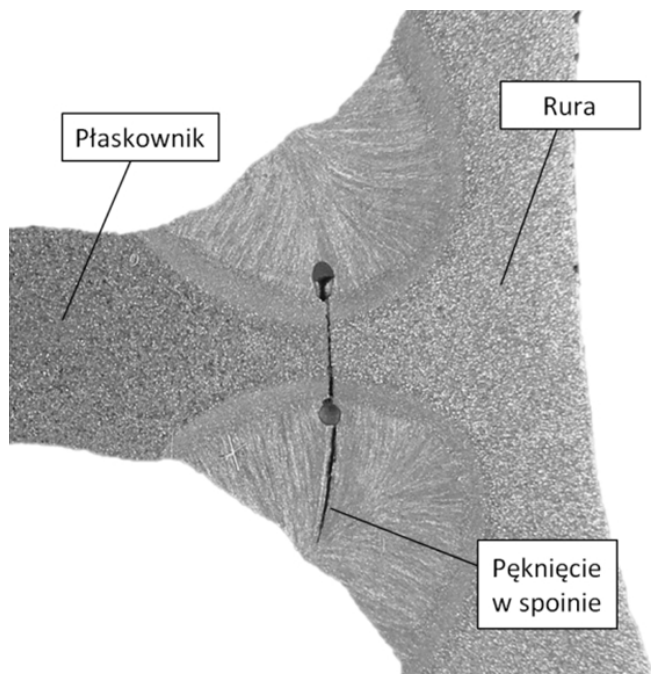
Elementy konstrukcyjne w przemyśle energetycznym są eksploatowane w warunkach lokalnej kumulacji oddziaływania niejednorodnych i niestacjonarnych pól temperatury oraz obciążeń mechanicznych, środowiska, zmian i niejednorodności struktury materiału. W związku z tym mogą występować zmiany własności mechanicznych, a przy okresowych, losowych przeciążeniach powstawać lokalne odkształcenia plastyczne i uszkodzenia, występujące zwykle w strefach spiętrzenia naprężeń wywołanych karbami me-

Mgr inż. Janusz Pikuła, dr hab. inż. Mirosław Łomozik, dr inż. Tomasz Pfeifer – Instytut Spawalnictwa w Gliwicach.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: janusz.pikula@is.gliwice.pl

chanicznymi, karbami strukturalnymi oraz dużym gradientem temperatury. Zmiany struktury, geometria i naprężenia pozostające w złączach spawanych powodują koncentrację naprężeń zmniejszając tym samym wytrzymałość zmęczeniową [4]. Szczególnie strefa wpływu ciepła (SWC) jako obszar o zróżnicowanej mikrostrukturze, jest podatna na inicjację pęknięć [5].

Jednym z elementów komory paleniskowej kotła jest ściana szczelna, której zadaniem jest zagwarantowanie szczelności kotła po stronie spalin i zwiększenie ogólnej sprawności kotła. Szeroko stosowane są rury opletkowane składające się z rur gładkich, do których są przyspawane płaskowniki lub kształtowniki [6]. W wyniku eksploatacji ścian szczelnych występują różne wady, m.in. takie jak [7]: wykrzywienie panelu o ponad  $\pm 50$  mm, przelotowe (na wskroś grubości) pęknięcia wzdłuż płetwy, nieprzelotowe pęknięcia w złączach spawanych wzdłuż płetw z wyjściem na ściankę rury (rys. 1), pęknięcia w materiale podstawowym rur, rozwarstwienia materiału rur wychodzące na powierzchnię i wyrwania zmniejszające grubości ścianki rury. Nieprzelotowe pęknięcia w złączach spawanych wzdłuż płetw z wyjściem na ściankę rury wykrywa się podczas kontroli wizualnej lub badań magnetyczno-proszkowych. Wadę usuwa się poprzez wymianę odcinka rury z pęknięciem. Naprawa takich pęknięć może zostać wykonana poprzez wycięcie jedynie fragmentu spoiny, a następnie ponowne ułożenie spoiny [7]. Wycinana część materiału powinna być odpowiednio głęboka i długa, aby usunąć całą niezgodność, a na końcach kraterów powinien zostać wykonany łagodny skos od dna do powierzchni metalu spawanego [8]. Nie można wykluczyć możliwości powstawania pęknięć w spoinie w tym samym miejscu ściany szczelnej i związanych z tym ponownych napraw. Dlatego jedną z głównych idei badań było określenie wpływu wielokrotnego spawania remontowego na strukturę i twardość złączy naprawczych ścian szczelnych.



Rys. 1. Pęknięcie w spoinie ściany szczelnej w stanie po długotrwałej eksploatacji

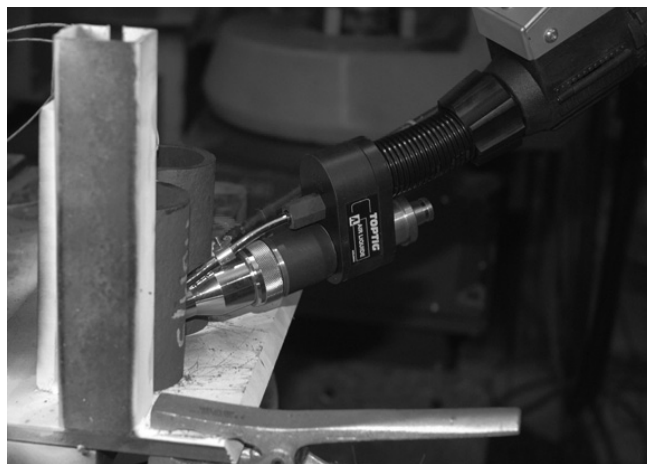
Fig. 1. The crack in the waterwall weld after long-term operation

Spawanie remontowe instalacji energetycznych przeprowadza się przede wszystkim elektrodami otulonymi (MMA), natomiast w niektórych przypadkach znajduje zastosowanie metoda TIG. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań spawania naprawczego przy użyciu wysokowydajnego

automatycznego i robotyzowanego spawania metodą TIG - TOPTIG™. W standardowej mechanizacji spawania metodą TIG z dodatkiem drutu, drut jest podawany w sposób ciągły lub pulsujący i doprowadzany w tylną strefę jeziora spawalniczego bezpośrednio za łukiem, pod kątem  $40^{\circ}$ -  $60^{\circ}$ . W metodzie TOPTIG system zmechanizowanego podawania drutu zintegrowano z dyszą gazową w sposób umożliwiający uzyskanie tylko  $20^{\circ}$  kąta odchylenia drutu od osi elektrody wolframowej. Metodę TOPTIG opracowano w celu uzyskania wysokiej prędkości spawania, spoin wysokiej jakości bez wad lub niezgodności spawalniczych i spawania bez rozprysku [9÷11].

## Spawanie naprawcze metodą TOPTIG

Badania przeprowadzono na wyciętych fragmentach ściany szczelnej ze stali kotłowej w gatunku P265GH. Ściana szczelna, z której wycięto próbki była eksploatowana przez 180 000 godzin i wymagała naprawy ze względu na korozję niskotlenową. Próbki do badań oczyszczono z korozji przy użyciu procesu piaskowania. Naprawianą spoinę usuwano przy użyciu procesu frezowania. Frezowanie stosowano każdorazowo przed kolejnym spawaniem naprawczym, aby usunąć spoinę pierwotną (spoinę, która pracowała w kotle), a następnie kolejne spoiny naprawcze. Na potrzeby badań przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych, zastosowanie procesu frezowania umożliwiło w trakcie przygotowania próbek zmniejszenie wpływu występujących zmiennych czynników na wymiar i kształt obszaru przygotowanego do przeprowadzenia spawania naprawczego (m.in. głębokość rowka) oraz ewentualne przegrzanie materiału w trakcie usuwania spoiny przy użyciu szlifierki kątowej. Do spawania zastosowano urządzenie AIR LIQUIDE TOPTIG 220 DC oraz robot ROMAT 310 firmy Cloos (rys. 2).



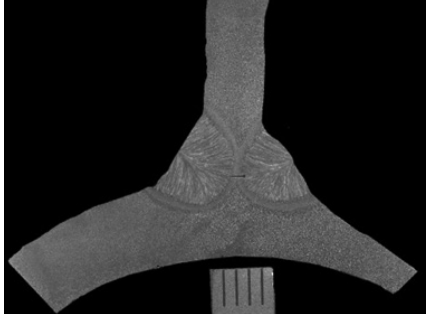
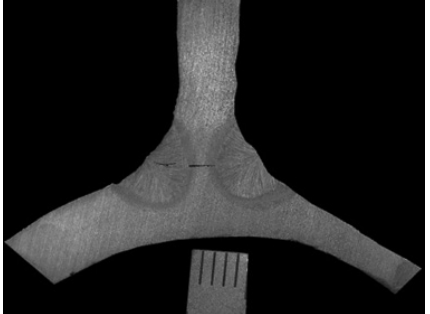
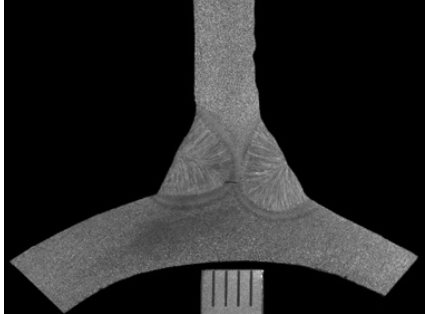
Rys. 2. Stanowisko spawalnicze na którym przeprowadzono wielokrotny proces spawania naprawczego

Fig. 2. Welding station used in carrying out a multiple repair welding process

Jednokrotny proces spawania naprawczego obejmował usunięcie spoiny i proces spawania naprawczego, dwukrotny proces obejmował usunięcie spoiny, proces spawania naprawczego, ponowne usunięcie spoiny i ponowne spawanie naprawcze. Analogicznie przeprowadzono trzy-, cztero- i pięciokrotne spawanie naprawcze. W badaniach założono wykonanie spoiny naprawczej o wymiarach zbliżonych i nie mniejszych niż wymiary spoiny pierwotnej (usuwanej). Na podstawie badań metalograficznych makroskopowych złączy wyciętych z 3 losowych miejsc fragmentów ściany szczelnej, stwierdzono brak powtarzalności pod względem

**Tablica I.** Makrostruktura spoin pierwotnych, s - grubość lewej i prawej spoiny pachwinowej z głębokim przetopem zgodnie z PN-EN ISO 2553:2014-03 [12]

**Table I.** The primary welds microstructure, s - thickness of left and right deep penetration fillet welds according to PN-EN ISO 2553:2014-03 [12]

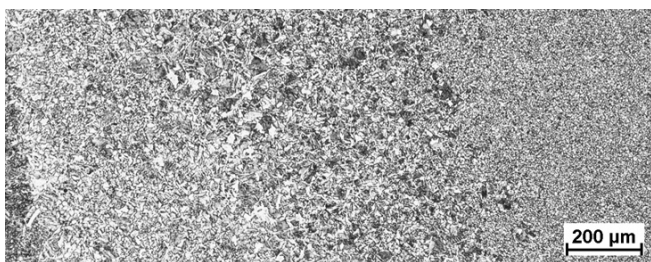
		
<b>Próbka 1,</b> $s_{lewa}=4,2\text{ mm}, s_{prawa}=3,5\text{ mm}$	<b>Próbka 2,</b> $s_{lewa}=3,8\text{ mm}, s_{prawa}=3,4\text{ mm}$	<b>Próbka 3,</b> $s_{lewa}=4,7\text{ mm}, s_{prawa}=4,0\text{ mm}$

kształtu i wymiarów spoin pierwotnych wykonanych w procesie produkcji (tablica I). Na tym etapie stwierdzono, że mogą występować różnice struktury i kształtu SWC złączy spawanych wykonanych w procesach naprawczych.

Zgłady do badań metalograficznych makroskopowych trawiono przy użyciu odczynnika Adlera, natomiast mikroskopowych trawiono dwuetapowo (3 i 2 sekundy) odczynnikiem Nital.

Badania metalograficzne mikroskopowe wykonanych złączy naprawczych wykazały występowanie zjawiska oddziaływania kolejnych cykli cieplnych wynikających z wielokrotnego procesu spawania naprawczego, w efekcie czego w SWC tworzą się strefy struktur odpuszczonych i następuje rozdrobnienie ziarna, podobnie jak w procesie spawania wielowarstwowego, w którym kolejne cykle cieplne wywierają wpływ na mikrostrukturę [1].

Na rysunku 3 przedstawiono efekt zjawiska niecałkowitego rozdrobnienia gruboziarnistego obszaru SWC drugiego złącza naprawczego, co jest efektem mniejszej głębokości wtopienia spoiny naprawczej. Wynika z tego kolejność ułożenia poszczególnych obszarów SWC począwszy od spoiny: gruboziarnisty, średnioziarnisty, drobnoziarnisty, średnioziarnisty i drobnoziarnisty. Zaobserwowano również zjawisko występowania w SWC w równej odległości od linii wtopienia stref o różnej strukturze i rozmiarze ziarn (rys. 4).

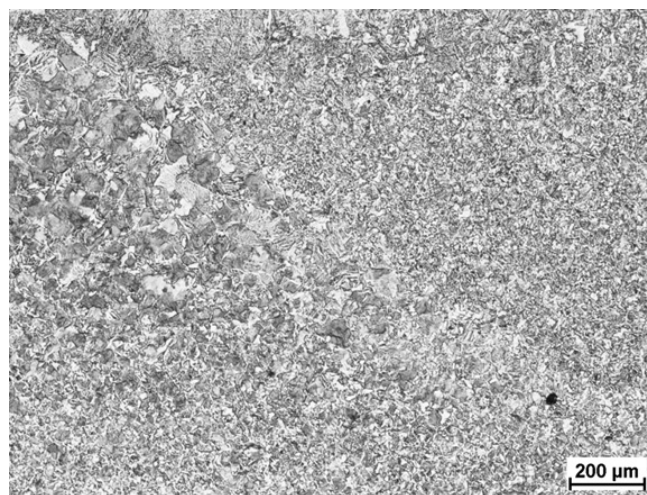


**Rys. 3.** Rozmieszczenie stref SWC, drugie złącze naprawcze, metoda TOPTIG, spoina po lewej stronie

**Fig. 3.** Distribution of HAZ zones, second repair joint, TOPTIG method, weld on the left side

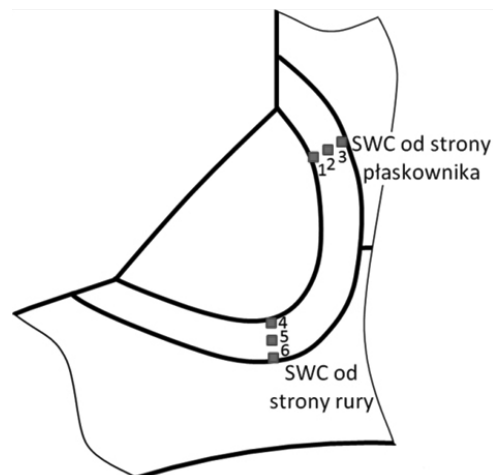
Obserwację mikrostruktury złącza w SWC i pomiar twardości wykonano w 6 obszarach przedstawionych na rysunku 5. Mikrostruktura złączy naprawczych SWC wykonanych metodą TOPTIG była zróżnicowana pod względem fazowym. W obszarze 1 i 4 SWC (przy linii wtopienia) występował bainit, ferryt ziarnisty i płytkowy, jednak w niektórych złączach stwierdzono występowanie większej ilości ferrytu. W obszarach 2 i 5 w większości złączy stwierdzono występowanie ferrytu ziarnistego, ale występowały złącza

w których w tych obszarach przeważał bainit. W obszarze SWC najdalej oddalonym od linii wtopienia (obszary 3 i 6) główną fazą był ferryt ziarnisty w mieszaninie z bainitem lub perlitem.



**Rys. 4.** Różnica mikrostruktury SWC w tej samej odległości od linii wtopienia (struktura gruboziarnista z lewej, drobnoziarnista z prawej, spoina – górna część rysunku), trzecie złącze naprawcze, metoda TOPTIG, powiększenie x200

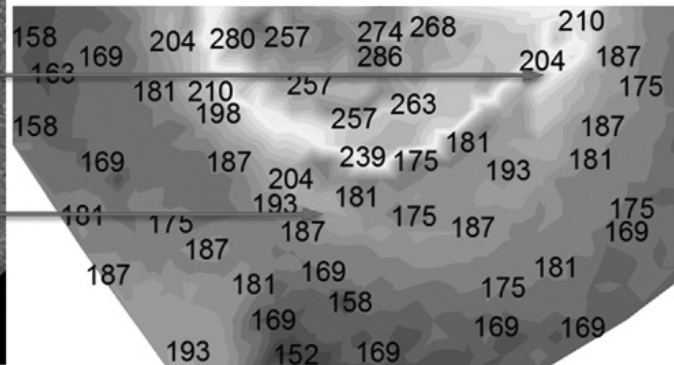
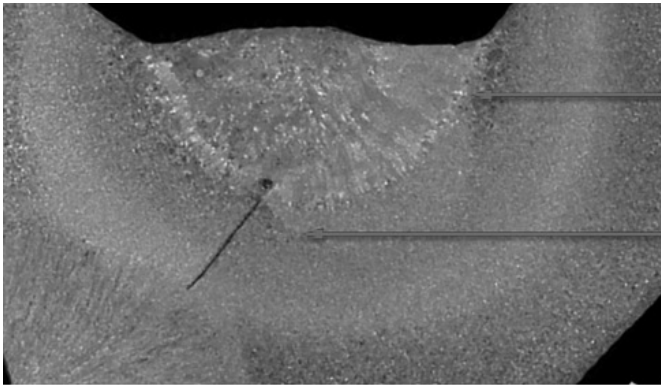
**Fig. 4.** The difference in the microstructure of the HAZ at the same distance from the fusion line (coarse-grained structure on the left, fine-grained on the right, weld on the top of figure), third repair joint, TOPTIG method, magnification x200



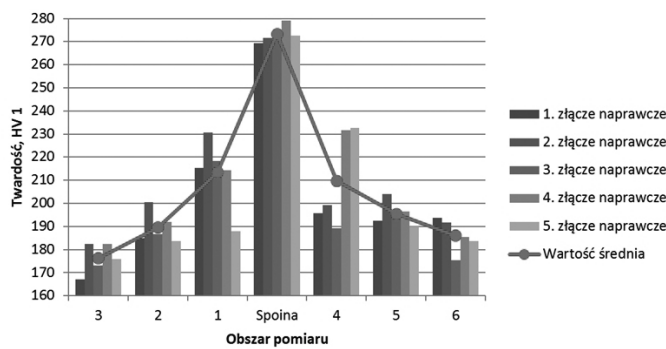
**Rys. 5.** Obszary obserwacji mikrostruktury i pomiaru twardości  
**Fig. 5.** Areas of microstructure observation and hardness measurement

Nieregularność struktury w SWC wynikająca z procesu spawania naprawczego miała bezpośredni wpływ na rozkład twardości w SWC, co wskazano strzałkami na rysunku 6. Kolejne procesy spawania naprawczego i wynikające z nich

cykle cieplne powodowały różnice w twardościach poszczególnych obszarów SWC, co widoczne jest w wynikach pomiaru twardości w obszarze 4, w którym w czwartym i piątym złączu naprawczym stwierdzono wyższe twardości (rys. 7).



Rys. 6. Zdjęcie makroskopowe (z lewej) i mapa twardości HV1 (z prawej) trzeciego złącza naprawczego wykonanego metodą TOPTIG  
Fig. 6. Macroscopic picture (left) and HV1 map hardness (right) of the third repair joint, TOPTIG method



Rys. 7. Wartości twardości w spoinie i poszczególnych obszarach SWC kolejnych złączy naprawczych, punkty pomiaru wg schematu na rysunku 5  
Fig. 7. Weld and HAZ hardness of repair joints, measurement points according to figure 5

## Wnioski

Przygotowując parametry spawania naprawczego należy wziąć pod uwagę ewentualne różnice w wymiarach spoin naprawianych (usuwanych) i rowka wykonanego w procesie wycinania.

Wielokrotny proces spawania naprawczego powoduje zróżnicowanie mikrostruktury SWC pod względem udziału poszczególnych faz i wielkości ziarn. Podobnie jak w procesie spawania wielowarstwowego, w równej odległości od linii wtopienia mogą wystąpić strefy o różnej strukturze i rozmiarze ziarn, co wynika z oddziaływania kolejnych cykli cieplnych spawania.

Występuje prawdopodobieństwo powstania karbów strukturalnych wynikające z dużego gradientu twardości naprawczych złączy spawanych metodą TOPTIG, w których twardość spoiny może być nawet o 45% większa od twardości SWC przy linii wtopienia.

W wielokrotnych złączach naprawczych nie występują niebezpieczne strefy bardzo wysokich twardości, jednak należy brać pod uwagę nieregularność pola twardości w SWC wynikającą z rozdrobnienia ziarn przy linii wtopienia i ewentualne karby strukturalne powstałe w tych obszarach.

## Literatura

- [1] Łomozik M.: Rozprawy monografie 172, Morfologia i własności plastyczne obszarów strefy wpływu ciepła w stalowych złączach spawanych w aspekcie użycia ściągów odpuszczających. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2007.
- [2] Dobrzański J.: Materiałoznawcza interpretacja trwałości stali dla energetyki. Open Access Library, tom 3, 2011.
- [3] Hernas A., Dobrzański J.: Trwałość i niszczenie elementów kotłów i turbin parowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2003.
- [4] Biłous P., Łagoda T.: Structural notch effect in steel welded joints. Materials & Design, tom 3, nr 10, 2009, s. 4562–4564.
- [5] Ahiale G.K., Oh Y.-J.: Microstructure and fatigue performance of butt-welded joints in advanced high-strength steels. Materials Science and Engineering: A, nr 597, 2014, s. 342–348.
- [6] Glinkowski B., Drygalski E., Szczepny T.: Technologia robót kotlarskich. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1968.
- [7] Бурганов А.Д., Ленин Л.М., Бабич Б.Г.: Ремонт газоплотных паровых котлов. Москва, Энергоатомиздат, 1985.
- [8] Słania J., Urbańczyk P.: Technologia wytwarzania oraz plan kontroli jakości przegrzewacza pary kotła parowego wg PN-EN 12952-5. Przegląd Spawalnictwa, nr 5, 2012, s. 29-41.
- [9] Grundmann J.: Wysoko wydajne spawanie cienkich blach – TOPTIGTM. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, nr 5, 2008, str. 69-71.
- [10] Turyk E., Grobosz W., Kuzio T., Dudek S., Riabcew I.A.: Warunki technologiczne zmechanizowanego spawania TIG z użyciem różnych systemów regulacji parametrów prądowych i podawania drutu. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, nr 5, 2015, s. 28-33.
- [11] Fortain J.M., Guiheux S., Opderbecke T.: TOPTIG alternative to weld very thin sheet.. IIW Doc. No. XII-1885-06.
- [12] PN-EN ISO 2553:2014-03 Spajanie i procesy pokrewne - Umowne przedstawianie na rysunkach - Złącza spajane.