

Aleksandra RACHWAŁ
Instytut Spawalnictwa, Gliwice

Radosław WOLNIAK
Politechnika Śląska
Wydział Organizacji i Zarządzania
rwolniak@polsl.pl

NIEZGODNOŚCI SPAWALNICZE I TECHNIKI ICH WYKRYWANIA

Streszczenie. W artykule zaprezentowano kwestie dotyczące analizy niezgodności spawalniczych i technik umożliwiających ich wykrywanie. Celem publikacji jest analiza technik detekcji z punktu widzenia ich wpływu na jakość produktu. Każda z opisanych metod detekcji niezgodności ma zarówno zalety, jak i pewne ograniczenia związane ze stosowaniem.

Słowa kluczowe: niezgodności, jakość, jakość produktu, zarządzanie produkcją, analiza niezgodności, wykrywanie niezgodności

INCOMPATIBILITY OF WELDING AND TECHNIQUES OF THEIR DETECTION

Abstract. The publication presents issues concerning the analysis of welding incompatibilities and techniques enabling their detection. The aim of the publication is the analysis of detection techniques from the point of view of their impact on product quality. Each of the non-compliant detection methods described in the publication has both advantages and limitations related to the use.

Keywords: non-compliance, quality, product quality, production management, non-compliance analysis, non-compliance detection

1. Wprowadzenie

Łączenie metali za pomocą procesów spawalniczych jest we współczesnej gospodarce światowej najbardziej powszechne. Jednakże z uwagi na specyfikę procesu i złożony charakter zjawisk, które mu towarzyszą, zapewnienie wymaganej jakości wykonywanego złącza staje się głównym celem nadzoru nad prawidłowym przebiegiem procesu. Spawanie jako proces specjalny wymaga nadzoru nad prawidłowym przebiegiem wykonywania złącza spawanego. Parametry i warunki spawania, które należy właściwie określić i nadzorować to między innymi: wysoka jakość i odpowiedni dobór materiałów podstawowych i dodatkowych do spawania, temperatura spawanego elementu, napięcie łuku, natężenie prądu spawania, jakość przygotowanych powierzchni przeznaczonych do spawania, wykwalifikowany i kompetentny personel wykonujący połączenia nierozłączne.

Wszelkie odstępstwa od założonej technologii spawania mogą wpłynąć na powstawanie wad i niezgodności, które osłabiają właściwości użytkowe konstrukcji lub całkowicie ją zdyskwalifikują, tym samym, powodując wzrost nakładów ekonomicznych związanych z naprawą połączenia niespełniającego wymaganych kryteriów odbiorczych¹.

2. Podstawowe pojęcia

Zgodnie z normą PN-EN ISO 9000 pojęcie wady jest definiowane, jako niespełnienie wymagania, czyli niespełnienie potrzeby lub oczekiwania, które zostało ustalone, przyjęte zwyczajowo lub jest obowiązkowe, odnoszące się do zamierzonego lub wyspecyfikowanego użytkowania. Pojęcie niezgodności natomiast oznacza niespełnienie wymagania, czyli niespełnienie potrzeby lub oczekiwania, które zostało ustalone, przyjęte zwyczajowo lub jest obowiązkowe. Różnica pomiędzy tymi pojęciami jest bardzo istotna, ponieważ ma konotacje prawne w szczególności te, które są związane z zagadnieniami odpowiedzialności za wyrób lub usługę². W zakresie prac spawalniczych norma PN-EN ISO 6520-1 definiuje niezgodność

¹ Szczucka-Lasota B., Wolniak R., Fryc M.: Identyfikacja niezgodności w procesie cięcia laserowego półproduktu. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Organizacja i Zarządzanie*, z. 105, Gliwice 2017, s. 429-438; Szcześniak B., Samek J.: Arkusz kalkulacyjny w doskonaleniu procesu analizy niezgodności produktów w przedsiębiorstwie przemysłowym. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Organizacja i Zarządzanie*, z. 63a, Gliwice 2012, s. 233-243; Szcześniak B.: Koncepcja mikronarzędzi bazujących na relacyjnym modelu danych we wspomaganie procesu analizy niezgodności wyrobów walcowanych. *Systemy Wspomagania Inżynierii Produkcji*, nr 8, 2017, s. 72-81; Zasadzień M.: Selected methods and tools for analysing product nonconformity in the automotive industry. *Systemy Wspomagania Inżynierii Produkcji*, nr 1, 2015, s. 150-160; Horodecka A.M., Wolniak R.: Valutazione delle non conformita nell'esempio di un'azienda italiana. *Systemy Wspomagania Inżynierii Produkcji*, nr 1, 2015, s. 18-31; Ligarski M., Koczaj K.: Jakie wymagania normy ISO 9001:2000 sprawiają trudności polskim przedsiębiorstwom? Wyniki badań dotyczących niezgodności wykrytych w audytach trzeciej stron. *Problemy Jakości*, nr 11, 2004, s. 29-33.

² PN-EN ISO 9000:2015-10 Systemy zarządzania jakością – Podstawy i terminologia.

spawalniczą jako nieciągłość w złączu spawanym lub odchylenie od wymaganej geometrii, a wadę spawalniczą jako niedopuszczalną niezgodność spawalniczą³.

Niezgodności spawalnicze, które mogą występować w złączach spawanych można podzielić ze względu na wielkość, usytuowanie i kształt⁴. Ze względu na wielkość rozróżniamy niezgodności makroskopowe, mikroskopowe i submikroskopowe. Niezgodności makroskopowe to takie, które można wykryć okiem nieuzbrojonym (lub przy zastosowaniu układu optycznego o powiększeniu do 30 razy), do tej grupy niezgodności można zaliczyć: pęknięcie, przyklejenie, brak przetopu, wklęsnięcie grani, wtrącenie żuźla itp. Niezgodności mikroskopowe są wykrywane tylko za pomocą mikroskopu, należą do nich np. mikropęknięcia, mikroprzyklejenia czy wtrącenia fosforu. Niezgodności submikroskopowe są to niezgodności, których wykrycie wymaga zastosowania specjalistycznych metod badawczych, umożliwiających kontrolę połączenia spawanego na poziomie jego budowy atomowej. Wśród tych niezgodności możemy wyróżnić wakansy czy przestawienia sieci krystalograficznej.

Analizując występowanie niezgodności pod względem usytuowania, można wyróżnić niezgodności wewnętrzne i zewnętrzne, występują one podczas lub po spawaniu zarówno na powierzchni, jak i wewnątrz złącza spawanego. Przykładem tego typu niezgodności są: pęknięcie gorące, pęknięcie zimne, nadmierny nadlew, wyciek, gniazdo pęcherzy, jama skurczowa. Kształt niezgodności, niezależnie czy zewnętrznych czy wewnętrznych, może mieć decydujący wpływ na stabilność eksploatacyjną konstrukcji spawanej. Niezgodność płaska (np. pęknięcie, przyklejenie, międzywarstwowe wtrącenie żuźla) staje się koncentratorem naprężeń i działa jak karb, który może spowodować utratę stabilności wytrzymałościowej, co w efekcie doprowadzi do zniszczenia konstrukcji. Natomiast niezgodności objętościowe

³ PN-EN ISO 6520-1:2009 Spawanie i procesy pokrewne – Klasyfikacja geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach – Część 1: Spawanie; Rachwał A., Wolniak R.: Kompetencje twarde personelu spawalniczego w świetle wymagań normy PN-EN ISO 3834, [w:] Brzóska J., Pyka J. (red.): Nowoczesność przemysłu i usług w warunkach kryzysu i nowych wyzwań. TNOiK, Katowice 2013, s. 531-539; Rachwał A., Sędek A., Wolniak R.: Proces zakupów materiałów spawalniczych w oparciu o wymagania ZKP dla konstrukcji stalowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Organizacja i Zarządzanie, z. 73. Gliwice 2014, s. 519-530; Rachwał A., Wolniak R.: Systemy zarządzania jakością dla wytwórców konstrukcji stalowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Organizacja i Zarządzanie, z. 83. Gliwice 2015, s. 563-572; Rachwał A., Sędek A., Wolniak R.: Ocena ryzyka w procesie spawalniczym. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Organizacji i Zarządzanie, z. 93. Gliwice, 2016, s. 441-449; Rachwał A., Wolniak R.: Zapewnienie jakości procesów spawania w oparciu o systemy zarządzania jakością, [w:] Popek S., Misniakiewicz M. (red.): Wydawnictwo PTT, Kraków 2017, s. 129-139; Rachwał A., Sędek A., Wolniak R.: Wymagania nowej normy PN-EN ISO 9001:2015 a realizacja procesu spawalniczego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Organizacja i Zarządzanie, z. 108. Gliwice 2017, s. 363-372; Wolniak R.: Metody i narzędzia Lean Production i ich rola w kształtowaniu innowacji w przemyśle, [w:] Knosala R. (red.): Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji. Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2013, s. 524-534; Wolniak R., Skotnicka B.: Metody i narzędzia zarządzania jakością – Teoria i praktyka, cz. 1. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011; Wolniak R., Skotnicka-Zasadzień B.: Zarządzanie jakością dla inżynierów. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.

⁴ Rostecka M., Wolniak R.: Doskonalenie jakości procesów spawalniczych w wyniku wdrożenia robotyzacji. Oficyna Wydawnicza Stowarzyszenia Menedżerów Produkcji i Jakości, Częstochowa 2017; Wolniak R., Rostecka M.: The use of welding robots. „Technicka Diagnostyka”, No. 1, 2017, p. 38; Horodecka M., Wolniak R.: Narzędzie do wartościowania niezgodności w przedsiębiorstwie przemysłowym. „Problemy Jakości”, nr 1, 2017; Rostecka M., Wolniak R.: It Systems in Aid of Welding Processes Quality Management in the Automotive Industry. “Archives of Metallurgy and Materials”, No. 4, 2016, p. 1785-1792.

(np. pęcherze kuliste, kanalikowe lub podłużne oraz gniazda pęcherzy) w sposób znaczący obniżają przekrój czynny złącza spawanego, tym samym negatywnie wpływają na wytrzymałość całej konstrukcji spawanej.

W zależności od charakteru, usytuowania i rodzaju niezgodności niezgodności spawalnicze można wykryć różnymi metodami badań zarówno nieniszczących, które nie powodują żadnych zmian w kontrolowanym obiekcie, jak i niszczących, wymagających pobrania próbki z badanego obiektu; niejednokrotnie prowadzą one do zniszczenia badanego elementu, np. próba łamania. Zarówno metody badań niszczących, jak i nieniszczących pozwalają z dużą dozą pewności określić niezgodności wewnętrzne i zewnętrzne oraz ich wpływ na właściwości wytrzymałościowe złącza spawanego⁵.

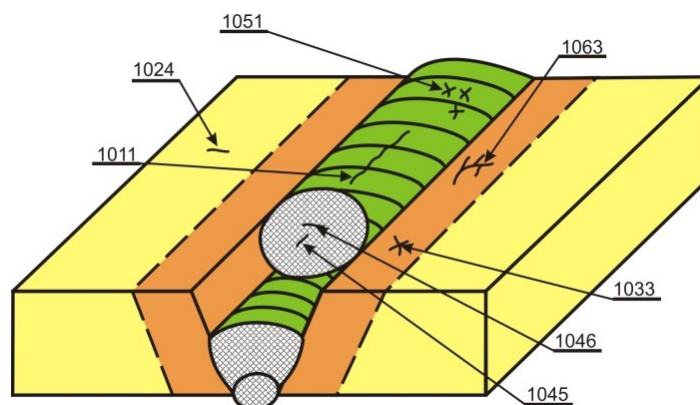
3. Niezgodności spawalnicze według normy PN-EN ISO 6520-1

Dokumentem opisującym niezgodności makro- i mikroskopowe występujące w złączach spawanych z metali jest norma PN-EN ISO 6520-1. Podaje ona zasady i wytyczne do właściwego opisu niezgodności spawalniczych. Odnosi się wyłącznie do samego faktu wystąpienia niezgodności, nie uwzględnia zaś aspektów metalurgicznych związanych z jej wystąpieniem. Aby właściwie zdefiniować niezgodność obecną w złączu zapisy normy podają dokładną charakterystykę niezgodności, jej kształt oraz umiejscowienie w złączu (spoina, strefa wpływu ciepła, materiał spawany). W celu właściwego zdefiniowania niezgodności w normie zawarto również informacje o jej kształcie w postaci dołączonych szkiców niezgodności.

Niezgodności te podzielono na sześć grup: pęknięcia, pustki, wtrącenia stałe, przyklejenia i braki przetopu, niezgodności kształtu i wymiaru oraz niezgodności spawalnicze różnorodne. Istotnym faktem jest to, że powyższa norma nie daje możliwości dokonania oceny jakości połączenia spawanego z punktu widzenia wykrytych niezgodności, a jedynie umożliwia ich zidentyfikowanie.

Przykładowy opis niezgodności typu pęknięcie, na podstawie zasad obowiązujących w normie PN-EN ISO 6520-1, przedstawiono na rysunku 1.

⁵ Czuchryj J., Sikora S.: Niezgodności spawalnicze w złączach spawanych z metali i termoplastycznych tworzyw sztucznych. Wydawnictwo Instytutu Spawalnictwa, Gliwice 2016; Klimpel A., Szymański A.: Kontrola jakości w spawalnictwie. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1992; Czuchryj J., Sikora S., Staniszewski K.: Problemy oceny jakości złączy spawanych różnymi metodami oraz wykonanych z różnych materiałów konstrukcyjnych. „Biuletyn Instytutu Spawalnictwa”, nr 1, 2011.



Rys. 1. Przykłady pęknięć różnie usytuowanych względem podłużnej osi spoiny oraz różnie położonych w złączu spawanym (PN-EN ISO 6520-1): 1011 – pęknięcie podłużne w metalu spoiny, 1024 – pęknięcie poprzeczne w materiale podstawowym, 1033 – pęknięcie promieniowe w strefie wpływu ciepła, 1045 – podłużne pęknięcie w kraterze, 1046 – poprzeczne pęknięcie w kraterze, 1051 – grupa oddzielnych pęknięć w metalu spoiny, 1063 – pęknięcie rozgałęzione w strefie wpływu ciepła.

Z uwagi na charakter badań, złącza spawane wchodzące w skład konstrukcji przeznaczonej do eksploatacji mogą być kontrolowane jedynie metodami nieniszczącymi. Wśród metod NDT (Non-Destructive Testing) największe zastosowanie w przemyśle mają takie metody badawcze jak badania: wizualne, penetracyjne, magnetyczno-proszkowe, ultradźwiękowe i radiograficzne.

4. Metody badania złączy spawanych

Podstawową metodą badań złączy jest metoda wizualna, polegająca na dokładnej obserwacji powierzchni badanej zarówno od strony lica, jak i grani złącza spawanego. Metoda ta umożliwia jednakże wykrycie niezgodności występujących jedynie na zewnątrz złącza spawanego, niezależnie, czy będzie to technika badań bezpośrednich (ścieżka optyczna od badanej powierzchni do oka obserwatora jest nieprzerwana) czy też będzie zastosowana tzw. technika badań zdalnych (ścieżka optyczna od powierzchni badanej do oka obserwatora jest przerwana, np. zastosowanie kamer wideo). Badania tego typu uważane są za najprostszy, ale również w wielu przypadkach za najskuteczniejszy sposób kontroli wyrobów spawanych.

Badania wizualne umożliwiają wykrycie praktycznie każdej niezgodności położonej na powierzchni złącza spawanego. Najliczniejsza grupa niezgodności wykrywana tą metodą zawarta jest w grupie niezgodności dotyczących geometrii złącza wg normy PN-EN ISO 6520-1. Pozostałe niezgodności, jeżeli tylko „wychodzą” na powierzchnię, mogą być wykryte za pomocą tej metody⁶.

⁶ Czuchryj J., Sikora S.: Badania wizualne złączy spawanych. Wydawnictwo Instytutu Spawalnictwa, Gliwice 2017.

Przykładowe niezgodności wykrywane metodą badań wizualnych przedstawiają rysunki 2 i 3.



Rys. 2. Wykryte niezgodności podczas badania wizualnego złącza spawanego od strony lica spoiny: 5012 – podtopienie przerywane, 511 – niewypełnienie rowka spawalniczego, 517 – złe ponowne rozpoczęcie spawania



Rys. 3. Wykryte niezgodności podczas badania wizualnego złącza spawanego od strony grani spoiny: 2017 – por powierzchniowy, 4021 – niepełne przetopienie grani, 504 – wyciek

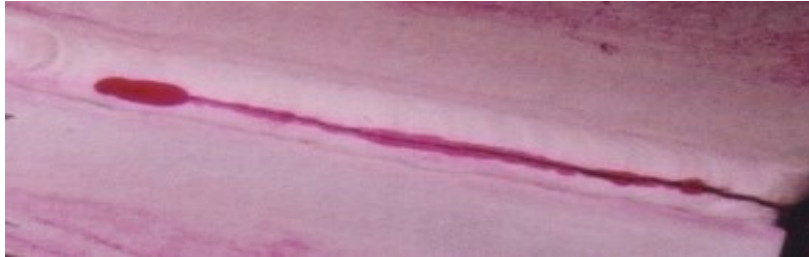
Inną metodą badań, które mogą być przeprowadzone w celu wyznaczenia jakości złącza spawanego, są badania penetracyjne. Opierają się one na wykorzystaniu zjawiska włoskowatości, które polega na wnikanii cieczy do wąskich przestrzeni i wznoszeniu się w nich nawet wbrew sile ciężkości. Badania penetracyjne mogą być wykonywane w wariacie techniki barwnej lub techniki fluorescencyjnej.

Technikę barwną realizuje się za pomocą penetranta barwnego w kolorze czerwonym. Wskazania, oglądane w świetle białym, są silnie kontrastowe w porównaniu z białym tłem wywoływacza. W technice fluorescencyjnej stosuje się penetrant zawierający luminofor który pod wpływem promieniowania ultrafioletowego emituje promieniowanie widzialne. Wskazania widoczne są jako jaskrawe nacieki na ciemnofioletowym tle⁷.

Specyfika tej metody powoduje, że uzyskany wynik badania w postaci wskazania liniowego bądź nieliniowego nie informuje jednoznacznie o rodzaju wykrytej niezgodności. Jednakże można ogólnie stwierdzić, że wskazania liniowe powstają w wyniku istnienia niezgodności szczelinowych typu pęknięcie czy przyklejenie natomiast wskazania nieliniowe powstają

⁷ Czuchryj J., Sikora S.: Podstawy badań penetracyjnych wyrobów przemysłowych. Wydawnictwo Instytutu Spawalnictwa, Gliwice 2007.

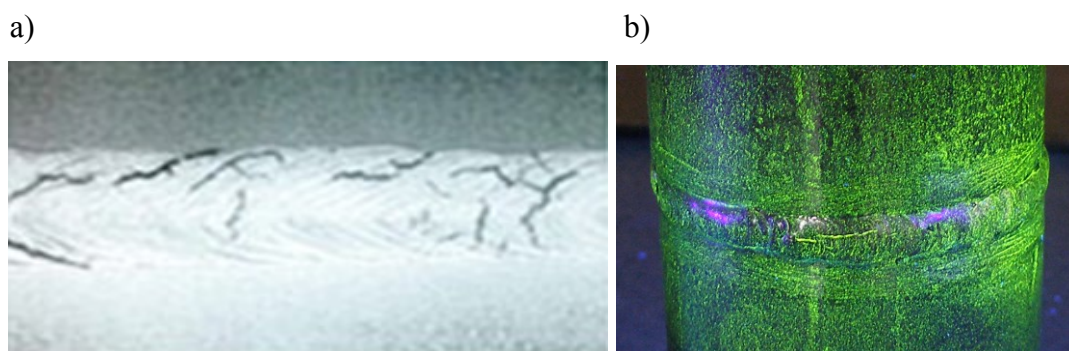
w wyniku obecności niezgodności objętościowych typu pustki, a w tym szczególnym przypadku pustki w postaci pora powierzchniowego. Przykład badań penetracyjnych został pokazany na rysunku 4.



Rys. 4. Wskazanie penetracyjne liniowe uzyskane za pomocą techniki barwnej

Kolejną metodą pozwalającą wykryć powierzchniowe, ale również podpowierzchniowe niezgodności spawalnicze jest metoda magnetyczno-proszkowa. Polega ona na wzbudzeniu w badanym elemencie z materiału ferromagnetycznego pola magnetycznego i poszukiwaniu tzw. lokalnych, magnetycznych pól rozproszenia, powstających nad powierzchnią obiektu w miejscu występowania niezgodności. W metodzie tej detektorem magnetycznych pól rozproszenia jest drobnoziarnisty proszek ferromagnetyczny, który może być w postaci czarnego proszku, a utworzone dzięki niemu defektogramy magnetyczne obserwowane są w białym świetle oraz proszku ferromagnetycznego z domieszką luminoforu, gdzie wskazania obserwowane są w świetle ultrafioletowym⁸.

Podobnie jak w metodzie penetracyjnej, wskazania uzyskane dzięki zmianie gęstości pola magnetycznego nad niezgodnością mogą mieć charakter liniowy, gdzie generatorem będą niezgodności typu pęknięcie lub przyklejenie oraz nieliniowy pochodzący od niezgodności objętościowych. Przykładowe badania metodą magnetyczno-proszkową pokazano na rysunku 5.

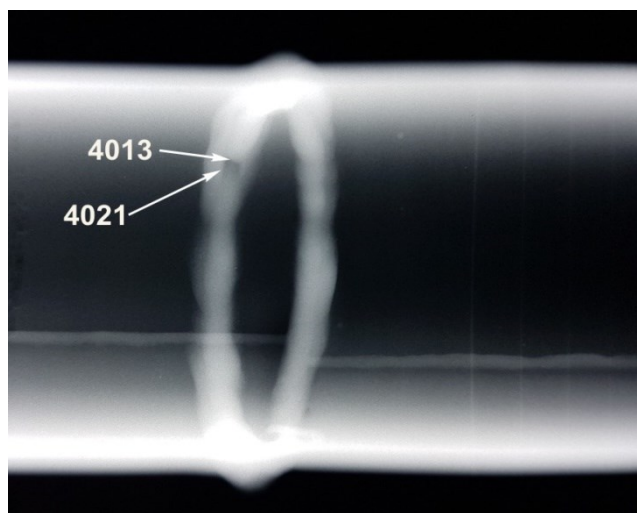


Rys. 5. Wskazania liniowe w badaniach magnetyczno-proszkowych: a) widok wskazań w technice czarno-białej, b) widok wskazań w technice fluorescencyjnej

⁸ Dobrzański L.A.: Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego. WNT, Warszawa 2002.

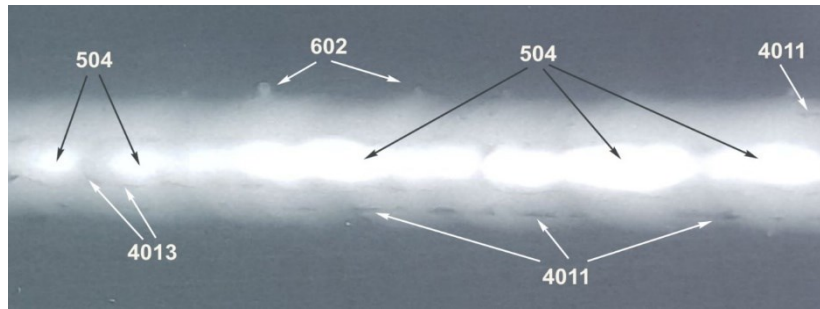
Do wykrywania wewnętrznych niezgodności spawalniczych często stosowane są badania ultradźwiękowe. Ich niewątpliwą zaletą jest również możliwość wykrycia powierzchniowych i podpowierzchniowych niezgodności oraz określenie liczby, wielkości i rozmieszczenia wykrytych wskazań. W metodzie tej wykorzystuje się zjawiska towarzyszące rozchodzeniu się fali akustycznej o częstotliwości większej od 20 000 Hz. Przeprowadzenie badań polega na wprowadzeniu do badanego złącza fal ultradźwiękowych z jednoczesnym skanowaniem powierzchni za pomocą głowicy ultradźwiękowej i detekcji fal „odbitych” od niezgodności. Dzięki wykorzystaniu efektu piezoelektrycznego, energia fali odbitej zamieniana jest w głowicy na impuls elektryczny, który przez odpowiednie układy przekształcony zostaje na zobrazowanie wyświetlone na ekranie defektoskopu ultradźwiękowego. Rozmiar i charakter tegoż impulsu, dzięki odpowiedniej analizie, pozwalają określić charakter niezgodności występującej w badanym złączu. Można z całą stanowczością stwierdzić, że każdy rodzaj niezgodności zostanie wykryty badaniami ultradźwiękowymi, jeżeli tylko będzie odpowiednio dużym reflektorem dla fali ultradźwiękowej⁹.

Badania radiograficzne, podobnie jak ultradźwiękowe, umożliwiają wykrycie niezgodności wewnętrznych, ale również i zewnętrznych. Badania te polegają na wykorzystaniu wysokoenergetycznego promieniowania elektromagnetycznego X lub gamma do uzyskania na błonie radiograficznej obrazu niezgodności występujących w prześwietlanym złączu spawanym. Przykładowe obrazy radiograficzne z widocznymi niezgodnościami przedstawiono na rysunkach 6-8.

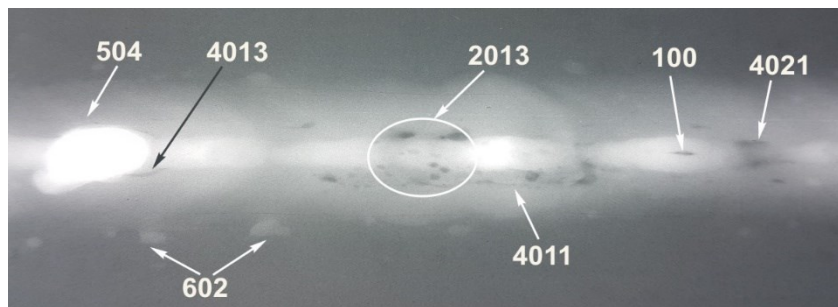


Rys. 6. Radiogram złącza obwodowego spoiny jednostronnej z wykrytymi niezgodnościami: 4013 – przyklejenie graniowe, 4021 – brak przetopu grani

⁹ Czuchryj J., Sikora S.: Niezgodności spawalnicze w złączach spawanych z metali i termoplastycznych tworzyw sztucznych. Wydawnictwo Instytutu Spawalnictwa, Gliwice 2016.



Rys. 7. Radiogram złącza wzdłużnego spoiny jednostronnej z wykrytymi niezgodnościami: 4011 – przyklejenie brzegowe, 4013 – przyklejenie graniowe, 504 – wyciek, 602 – rozpryski



Rys. 8. Radiogram złącza wzdłużnego spoiny jednostronnej z wykrytymi niezgodnościami: 100 – pęknięcie, 2013 – gniazdo pęcherzy, 4011 – przyklejenie brzegowe, 4013 – przyklejenie graniowe, 4021 – brak przetopu, 504 – wyciek, 602 – rozpryski

5. Podsumowanie

Każda z opisanych w artykule metod detekcji niezgodności ma zarówno zalety, jak i pewne ograniczenia związane ze stosowaniem. Metoda wizualna ogranicza się do zastosowania wyłącznie na złączach spawanych, które są dostępne dla oka obserwatora, a wykrycie niezgodności prowadzi się wyłącznie na zewnątrz złącza spawanego. Badania penetracyjne wymagają, aby niezgodność była otwarta do powierzchni, każde zanieczyszczenie zaburzające zwilżalność powierzchni penetrantem powoduje zagrożenie błędnego wykonania badania. Metoda magnetyczno-proszkowa ogranicza się wyłącznie do materiałów ferromagnetycznych. Metody ultradźwiękowa i radiograficzna praktycznie nie mają ograniczeń związanych z rodzajem materiału, jednakże ich zastosowanie jest związane z koniecznością wyszkolenia na wysokim poziomie personelu obsługi. Dodatkowo stosowanie badań radiograficznych związane jest z zagrożeniem, jakie powoduje promieniowanie X lub gamma w odniesieniu do organizmów żywych¹⁰.

¹⁰ Czuchryj J., Sikora S.: Niezgodności spawalnicze w złączach spawanych z metali i termoplastycznych tworzyw sztucznych. Wydawnictwo Instytutu Spawalnictwa, Gliwice 2016.

Wybór odpowiedniej metody badawczej decyduje o zidentyfikowaniu poszczególnych rodzajów niezgodności, które w istotny sposób mogą wpływać na właściwości wytrzymałościowe i eksploatacyjne konstrukcji spawanych. Określenie właściwego kryterium odbioru, jest nierozdzielnie związane z ekonomicznymi aspektami wytworzenia konstrukcji spawanej. Narzucenie zbyt wysokiego poziomu jakości, nieodpowiedniego do potrzeb, w wielu przypadkach skutkuje zwiększeniem nakładów inwestycyjnych związanych z procesem wytwórczym oraz z wymaganym zakresem badań.

Bibliografia

1. Czuchryj J., Sikora S., Staniszewski K.: Problemy oceny jakości złączy spawanych różnymi metodami oraz wykonanych z różnych materiałów konstrukcyjnych. „Biuletyn Instytutu Spawalnictwa”, nr 1, 2011.
2. Czuchryj J., Sikora S.: Badania wizualne złączy spawanych. Wydawnictwo Instytutu Spawalnictwa, Gliwice 2017.
3. Czuchryj J., Sikora S.: Niezgodności spawalnicze w złączach spawanych z metali i termoplastycznych tworzyw sztucznych. Wydawnictwo Instytutu Spawalnictwa, Gliwice 2016.
4. Czuchryj J., Sikora S.: Podstawy badań penetracyjnych wyrobów przemysłowych. Wydawnictwo Instytutu Spawalnictwa, Gliwice 2007.
5. Dobrzański L.A.: Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego. WNT, Warszawa 2002.
6. Horodecka A.M., Wolniak R.: Valutazione delle non conformita nell'esempio di un'azienda italiana. “Systemy Wspomagania Inżynierii Produkcji”, nr 1, 2015.
7. Horodecka M., Wolniak R.: Narzędzie do wartościowania niezgodności w przedsiębiorstwie przemysłowym. „Problemy Jakości”, nr 1, 2017.
8. Klimpel A., Szymański A.: Kontrola jakości w spawalnictwie. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1992.
9. Ligarski M., Koczaj K.: Jakie wymagania normy ISO 9001:2000 sprawiają trudności polskim przedsiębiorstwom? Wyniki badań dotyczących niezgodności wykrytych w audytach trzeciej stron. „Problemy Jakości”, nr 11, 2004.
10. PN-EN ISO 6520-1:2009 Spawanie i procesy pokrewne – Klasyfikacja geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach – Część 1: Spawanie.
11. PN-EN ISO 9000:2015-10 Systemy zarządzania jakością – Podstawy i terminologia.
12. Rachwał A., Sędek A., Wolniak R.: Ocena ryzyka w procesie spawalniczym. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Organizacja i Zarządzanie, z. 93. Gliwice 2016.

13. Rachwał A., Sędek A., Wolniak R.: Proces zakupów materiałów spawalniczych w oparciu o wymagania ZKP dla konstrukcji stalowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Organizacja i Zarządzanie, z. 73. Gliwice 2014.
14. Rachwał A., Sędek A., Wolniak R.: Wymagania nowej normy PN-EN ISO 9001:2015 a realizacja procesu spawalniczego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Organizacja i Zarządzanie, z. 108. Gliwice 2017.
15. Rachwał A., Wolniak R.: Kompetencje twarde personelu spawalniczego w świetle wymagań normy PN-EN ISO 3834, [w:] Brzóska J., Pyka J. (red.): Nowoczesność przemysłu i usług w warunkach kryzysu i nowych wyzwań. TNOiK, Katowice 2013.
16. Rachwał A., Wolniak R.: Systemy zarządzania jakością dla wytwórców konstrukcji stalowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Organizacja i Zarządzanie”, z. 83. Gliwice 2015.
17. Rachwał A., Wolniak R.: Zapewnienie jakości procesów spawania w oparciu o systemy zarządzania jakością, [w:] Popek S., Misniakiewicz M. (red.): Narzędzia doskonalenia jakości. Analiza ryzyka wyrobów i usług. Wydawnictwo PTT, Kraków 2017.
18. Rostecka M., Wolniak R.: Doskonalenie jakości procesów spawalniczych w wyniku wdrożenia robotyzacji. Oficyna Wydawnicza Stowarzyszenia Menedżerów Produkcji i Jakości, Częstochowa 2017.
19. Rostecka M., Wolniak R.: IT Systems in Aid of Welding Processes Quality Management in the Automotive Industry. “Archives of Metallurgy and Materials”, No. 4, 2016.
20. Szczęśniak B., Samek J.: Arkusz kalkulacyjny w doskonaleniu procesu analizy niezgodności produktów w przedsiębiorstwie przemysłowym. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Organizacja i Zarządzanie, z. 63a. Gliwice 2012.
21. Szczęśniak B.: Koncepcja mikronarzędzi bazujących na relacyjnym modelu danych we wspomaganie procesu analizy niezgodności wyrobów walcowanych. „Systemy Wspomagania Inżynierii Produkcji”, nr 8, 2017.
22. Szczucka-Lasota B., Wolniak R., Fryc M.: Identyfikacja niezgodności w procesie cięcia laserowego półproduktu. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Organizacja i Zarządzanie”, z. 105. Gliwice 2017.
23. Wolniak R., Rostecka M.: The use of welding robots. “Technicka Diagnostica”, nr 1, 2017.
24. Wolniak R., Skotnicka B.: Metody i narzędzia zarządzania jakością – Teoria i praktyka, cz. 1. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
25. Wolniak R., Skotnicka-Zasadzień B.: Zarządzanie jakością dla inżynierów. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
26. Wolniak R.: Metody i narzędzia Lean Production i ich rola w kształtowaniu innowacji w przemyśle, [w:] Knosala R. (red.): Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji. Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2013.
27. Zasadzień M.: Selected methods and tools for analysing product nonconformity in the automotive industry. “Systemy Wspomagania Inżynierii Produkcji”, nr 1, 2015.