

Maciej **KOCHEL**
Dariusz **PASIEKA**

NIENISZCZĄCE BADANIA KONSTRUKCJI SPAWANYCH

Streszczenie. W artykule opisano metody służące do nieniszczących badań połączeń spawanych, ze szczególnym uwzględnieniem konstrukcji wysoko wytrzymałych. Przedstawiono przykłady przebadanych w OBRUM Sp. z o.o. węzłów konstrukcyjnych, z uzasadnieniem użytej metody badawczej. W podsumowaniu odniesiono się do ograniczeń metod badawczych i możliwych do wystąpienia błędów w ocenie poprawności spawanych konstrukcji.

Słowa kluczowe: konstrukcje spawane, badania nieniszczące, badania połączeń spawanych, wady połączeń spawanych.

1. WSTĘP

Działalność Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Urządzeń Mechanicznych „OBRUM” sp. z o.o. obejmuje głównie zagadnienia projektowania, modernizacji, badań i eksploatacji sprzętu pancernego oraz rozwoju urządzeń i sprzętu wojskowego. Zasadnicza tematyka prac w Ośrodku dotyczy sprzętu dla wojsk lądowych (pancernych i zmechanizowanych) oraz inżynierskich [1].

Zrealizowane projekty to w większości konstrukcje o innowacyjnych rozwiązaniach obejmujące złożone procesy projektowania, wykorzystujące komputerowe wspomaganie prac (prototypowanie przestrzenne 3D). Opracowane konstrukcje, zwłaszcza przenoszące znaczne siły i naprężenia (konstrukcje wysoko wytrzymałe), już na etapie projektowania poddawane są weryfikacji z wykorzystaniem obliczeń wytrzymałościowych metodą MES (metoda elementów skończonych). Kilkuetapowa weryfikacja konstrukcji ma miejsce w cyklu prac badawczo-rozwojowych, podczas badań modelu, prototypu oraz partii próbnej. W zrealizowanych konstrukcjach pojazdów, maszyn, urządzeń czy też podzespołów wykorzystywane są różne technologie wykonania:

- połączenia klejone;
- połączenia złączne – śrubowe;
- połączenia zgrzewane;
- połączenia spawane;
- inne – mieszane, które łączą wyżej wymienione technologie.

W opracowanych w Ośrodku wyrobach szczególne miejsce zajmują konstrukcje spawane o bardzo wysokim stopniu skomplikowania i dotyczące szerokiej gamy spawanych materiałów - od zwykłych stali węglowych, poprzez stale wysoko wytrzymałe (ReH- min. 1100 MPa, Rm-1200–1500 MPa) [2], stale pancerne - ARMSTAL 500T [3], ARMOX 500T [2], do aluminium oraz łączenia /spawania tworzyw sztucznych.

Na poniższych rysunkach (rys. 1, 2, 3 i 4) pokazano wybrane przykłady zastosowań połączeń spawanych.

a)



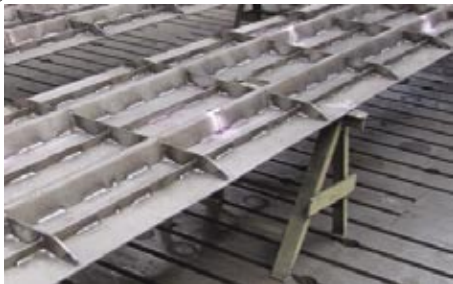
b)



Rys. 1. Fragment ramowego układu wsporczy stacji radiolokacyjnej JBR-15

a) widok połączeń spawanych; b) stacja JBR-15 (widok)

a)



b)



Rys. 2. Przęsło mostowe PM-20

a) widok połączeń spawanych; b) przęsło (widok)

a)



b)



Rys. 3. Tuba wysuwna żurawia maszyny inżynieryjno-drogowej MID

a) widok połączeń spawanych; b) MID (widok)



Rys. 4. Kadłub pojazdu gaśnicowego UMPG / PLC (Anders)

a) widok połączeń spawanych; b) pojazd Anders (widok)

2. TECHNOLOGIA POŁĄCZEŃ SPAWANYCH

Dla oceny oraz poprawy jakości produkcji konstrukcji stalowych wykonywane są w procesach wytwarzania kontrolne procesy międzyoperacyjne, obejmujące zwłaszcza połączenia spawane. Wykonywane są badania zarówno na stanowiskach produkcyjnych, przy wykorzystaniu dostępnych metod i środków, jak również badania w specjalistycznych laboratoriach, gdzie wymagana już jest specjalistyczna aparatura i oprzyrządowanie.

2.1. Klasyfikacja niezgodności spawalniczych

Proces spawania zgodnie z normą PN-EN ISO 3834 [4] jest procesem specjalnym, czyli procesem, na którego wynik wpływa wiele czynników determinujących jego końcowy efekt. Ośrodek Badawczo Rozwojowy Urządzeń Mechanicznych „OBRUM” sp. z o.o. ma wdrożony system zarządzania jakością zgodny z normą PN-EN ISO 9001 [5] i wymaganiami AQAP 2110 [6]. Zgodnie z powyższym stwierdzeniem, aby zapewnić jakość w procesach spawalniczych trzeba stosować plany spawania uwzględniające zatwierdzone technologie spawalnicze. W planach spawania należy uwzględnić kontrole jakości wykonywanych połączeń. Połączenia spawane można poddać ocenie za pomocą badań niszczących i nieniszczących. Badania nieniszczące w złączach spawanych mają na celu wykrycie wad i niezgodności spawalniczych będących efektem natury materiałowej i metalurgicznej, konstrukcyjnej i technologicznej złącza.

Każdemu ze złączy spawanych można nadać wymagany poziom jakości zgodnie z normą PN-EN ISO 5817 [7]. Wyróżniamy wymagania jakościowe ostre B, średnie C oraz łagodne D. Na wymagania te wpływa ocena wykonanych spoin. Możliwą klasyfikację niezgodności występujących w spoinach opisuje norma PN-EN ISO 6520-1 [8]. Poniżej wymieniono ich podział zgodnie z normą:

- pęknięcia;
- pustki;
- wtrącenia stałe;
- przyklejenia i brak przetopu;
- niezgodności spawalnicze dotyczące kształtu i wymiarów;
- niezgodności spawalnicze różne.

Niezgodność przekształca się w wadę konstrukcyjną, kiedy powoduje ona problem w spełnieniu przez złącze spawane założeń konstrukcyjnych. Rodzaje badań nieniszczących powinny być wybrane pod kątem wykrywania niezgodności powierzchniowych, jak i wewnętrznych - zgodnie z aktualnymi normami.

2.2. Kontrola połączeń spawanych

Do oceny jakości połączeń spawalniczych stosuje się następujące badania nieniszczące [9]:

- VT – wizualne;
- PT – penetracyjne;
- MT – magnetyczne;
- RT – radiograficzne;
- UT – ultradźwiękowe;
- ET – prądami wirowymi.

Na wybór odpowiedniej metody ma wpływ szereg czynników, takich jak: materiał podstawowy i dodatkowy typ złącza, jego geometria i wymiary oraz ukształtowanie złącza.

Analizę spoin powinien przeprowadzać wykwalifikowany personel z aktualnymi uprawnieniami na dany typ badań. Możemy wyróżnić 3 stopnie kwalifikacji personelu badań nieniszczących:

- Osoba ze stopniem pierwszym może wykonywać badania nieniszczące zgodnie, z opracowaną instrukcją, pod nadzorem personelu z aktualnymi kwalifikacjami w stopniu drugim i trzecim. Ponadto osoba taka może brać udział w czynnościach takich jak: nastawianie aparatury badawczej, rejestrowanie wyników badań na podstawie pisemnych kryteriów, raportowanie wyników badań.
- Osoba ze stopniem drugim posiada kompetencje do wykonywania badań zgodnie z ustalonymi procedurami. Osoba taka jest odpowiedzialna za dobór techniki badania dla stosowanej metody, określenia ograniczeń w stosowaniu metody, nastawiania i weryfikacji nastaw oprzyrządowania, wykonywania i analizy badań, przygotowania pisemnych instrukcji, zestawień i raportów z badań.
- Osoba ze stopniem trzecim jest odpowiedzialna za wykonywanie i kierowanie działaniami w procesie badań nieniszczących. Personel z tym stopniem może zostać upoważniony do przejęcia pełnej odpowiedzialności za laboratorium badawcze. Osoba ta jest odpowiedzialna za ustalanie i zatwierdzanie instrukcji i procedur nieniszczących, interpretowania norm, przepisów, procedur i specyfikacji oraz ustalania szczególnych metod badań nieniszczących w ramach swoich uprawnień.

Typowa kontrola konstrukcji spawanych zakłada, że przed przystąpieniem do badań należy sprawdzić obecność i poprawność usytuowania wszystkich spoin. W ramach kontroli jakości procesu spawania pod uwagę należy wziąć także przygotowanie detali do spawania, przygotowania rowka spawalniczego oraz samo wykonanie spoiny – szepianie oraz spawanie. Wymagania szczegółowe w tym zakresie opisuje norma PN-EN ISO 3834: 2007 [4]. Wszystkie spoiny powinny być zbadane za pomocą badań wizualnych (VT) zgodnie z normą, pod względem zgodności ich wykonania z zakładanym poziomem jakości. Spoiny należy kontrolować na całej ich długości wraz ze strefami rozprysku materiału dodatkowego. Po badaniach wizualnych należy wykonać badania penetracyjne (PT) lub magnetyczno-proszkowe (MT) w zakresie 30% wykonanych spoin. Następnie wykonać badania radiograficzne (RT) lub ultradźwiękowe (UT) w zakresie 30%. Zakres badań może być także zależny od klasy

obciążenia. Spoiny naprawiane powinny być poddane badaniom w szerszym zakresie, w 100% w zakresie wykonywanej naprawy.

Każdorazowo technolog powinien wykonać analizę przyczyn powstawania niezgodności technologicznych. Analiza ta powinna być wykorzystana podczas wprowadzania działań korygujących, poprawiających jakość wykonywanych prac spawalniczych. Osoby odpowiedzialne za nadzór i przedstawiciel Kontroli Jakości zakładu są odpowiedzialne za prowadzenie rejestru niezgodności i związanych z nim działań korygujących.

3. BADANIA NIENISZCZĄCE POŁĄCZEŃ SPAWANYCH

Procesy kontroli połączeń spawanych i ich miejsca oraz rodzaje są spisane w stosownej technologii. W zależności od węzła konstrukcyjnego, realizującego określoną funkcję i wymagań technologicznych wykorzystywane są wybrane badania kontrolne.

W Ośrodku Badawczo-Rozwojowym „OBRUM” sp. z o.o. najczęściej stosowane konkretne metody badań nieniszczących to: badanie wizualne, badanie penetracyjne i badanie magnetyczno-proszkowe. Badania te mają tę zaletę, iż są szybkie i nie wymagają specjalistycznego oprzyrządowania do ich wykonania.

3.1. Badania wizualne (VT)

Badania wizualne VT są podstawowymi i najczęściej wykonywanymi badaniami nieniszczącymi. Metoda ta wykorzystywana jest do kontroli połączeń spawanych okiem nieuzbrojonym; dopuszczalne jest stosowanie przyrządów optycznych o przybliżeniu do 20x. Często metoda ta jest brana za podstawę do określania obszarów do badań metodami bardziej zaawansowanymi. Obszar poddany badaniom należy oczyścić mechanicznie lub chemicznie z zanieczyszczeń, tak by odsłonić możliwe wady powierzchniowe pod nimi ukryte. Badany obszar powinien być odpowiednio oświetlony, tak aby uzyskać odpowiedni kontrast i natężenie światła. Kontrast zależy do kąta padania światła i kąta obserwacji. Natężenie światła powinno wynieść minimum 350 lx; w praktyce stosuje się oświetlenie w zakresie od 500 do 1000 lx.



Rys. 5. Wady spoin ujawnione metodą VT – widoczne niezgodności spawalnicze dotyczące kształtu i wymiarów, pustki, przyklejenia i brak przetopu

3.2. Badania penetracyjne (PT)

Badania penetracyjne PT służą głównie do wykrywania niezgodności powierzchniowych połączeń metali magnetycznych i niemagnetycznych. Najczęstszymi wadami wykrywanymi za pomocą tej metody są pęknięcia, braki przetopu lub pęcherze gazu pojawiające się na powierzchni. Podstawowym zjawiskiem, na którym opiera się ta metoda

badan jest zjawisko kapilarności. Penetrant jest substancją o wysokich właściwościach zwilżenia, która wnika w szczeliny badanej powierzchni. Typowe badanie metodą PT składa się z następujących czynności: oczyszczenie badanej powierzchni, naniesienie na powierzchnię penetranta i pozwolenie mu na wnikięcie, oczyszczenie powierzchni z penetranta i jej osuszenie, na osuszone miejsce nakłada się wywoływacz. Po odpowiednim czasie działania wywoływacza następuje analiza wyników i końcowe oczyszczenie badanej powierzchni.



Rys. 6. Przykłady wyników badań spoin metodą PT – widoczne niezgodności spawalnicze w postaci pęknięć

3.3. Badania magnetyczno-proszkowe (MT)

Badania magnetyczno-proszkowe MT polegają na wykrywaniu wad materiałów ferromagnetycznych z użyciem pola magnetycznego. Pole magnetyczne, napotykając wady ulega rozproszeniu. Linie pola magnetycznego rejestruje się za pomocą proszku ferromagnetycznego. Metoda ta jest stosowana zarówno do wykrywania wad powierzchniowych, jak i do wykrywania przypowierzchniowych wad wewnętrznych. Procedura badań magnetyczno-proszkowych składa się z następujących etapów: przygotowanie powierzchni - oczyszczenie i rozmagnesowanie elementu, magnesowanie, nałożenie proszku magnetycznego, oględziny i rejestracja wyników badań, rozmagnesowanie i oczyszczenie powierzchni.



Rys. 7. Przykłady wyników badań spoin metodą MT – widoczne niezgodności spawalnicze w postaci pęknięć

Drugą grupą stosowanych badań są badania ultradźwiękowe i radiograficzne, wymagające specjalistycznego oprzyrządowania. Badania takie Ośrodek zleca wyspecjalizowanym laboratoriom.

3.4. Badanie radiograficzne (RT)

Badania radiograficzne RT są najczęściej wykonywane do wykrywania wad wewnętrznych w połączeniach spawanych. Cechuje je prostota w rejestracji i ocenie wyników pomiarów. Do badań wykorzystuje się zjawisko pochłaniania promieniowania rentgenowskiego i gamma przez różne materiały. Promienie te przechodząc przez badaną spoinę padają na błonę rentgenowską, tworząc obraz badanego złącza w postaci rzutu płaskiego. Powstały obraz można analizować pod kątem wad powierzchniowych i wewnętrznych.

Niezgodności przedstawione są jako ciemne pola na tle jasnej spoiny bądź w strefie wtopienia i wpływu ciepła. Jedynie wtrącenia wolframu i wyciek są koloru jaśniejszego niż spoina. Poddane badaniom złącza powinny być oczyszczone z zanieczyszczeń i oznakowane w sposób trwały. Przy spoinie powinien znajdować się wskaźnik jakości obrazu, a gdy badane spoiny są długie błony powinny nachodzić na siebie i być dodatkowo oznaczone wskaźnikami. Kierunek padania promieni powinien być prostopadły do czoła spoiny. Metoda jest rekomendowana głównie do badania złącz czołowych. Obszar badań powinien być odpowiednio chroniony poprzez ekranowanie promieniowania rozproszonego.

3.5. Badania ultradźwiękowe (UT)

Badania ultradźwiękowe UT polegają na wykorzystaniu zjawiska odbicia i dyfrakcji fal o częstotliwości powyżej 20 kHz. Metoda ta wykorzystuje zjawisko odbicia fal akustycznych od nieciągłości materiału w objętości badanych złączy. Dzięki zastosowaniu badania UT jesteśmy w stanie określić rodzaj i wymiary niezgodności. Do badań UT wykorzystuje się defektoskopy. Fale wytwarzane są w specjalnych głowicach. W zależności od kierunku padania fal wyróżniamy głowice normalne i kątowe. Rodzaj i wielkość wady rejestrowany jest za pomocą amplitudy echa przy dynamicznym ruchu głowicy. Powierzchnie przeszukiwania dobiera się tak, by badania objęły spoinę strefę wpływu ciepła i materiał rodzimy. Szczelina między głowicą, a badanym materiałem nie powinna przekroczyć 0,5 mm; przestrzeń pomiędzy elementem powinna być pokryta substancją sprzęgającą.

4. PODSUMOWANIE

4.1. Wykrywalność wad w zależności od metody badań nieniszczących

Zjawiska fizyczne, na jakich bazują poszczególne metody badań nieniszczących, definiują ich stosowanie w określonych przypadkach.

Podczas badań powierzchniowych głównym czynnikiem wyboru metody są właściwości magnetyczne badanego połączenia oraz występujące na jego powierzchni zjawisko włoskowatości. Badając stale ferrytyczne możemy wykorzystać metody badań wizualnych (VT), penetracyjne (PT) i magnetyczno-proszkowe (MT). Stale austenityczne i metale nieżelazne z uwagi na ich magnetyzm będziemy badać tylko metodami wizualnymi (VT) i penetracyjnymi (PT).

Tablica 1. Zastosowanie metod nieniszczących powierzchniowych

Metoda badań	Zastosowanie	Typ wady	Wady możliwe do wykrycia
Wizualna (VT)	Brak przeciwwskazań	Powierzchniowe	<ul style="list-style-type: none"> • podtopienie • wgłębienie w kraterze • wkłknięcie, zbyt duży nadlew lica • brak przetopu • pęknięcia
Penetracyjna (PT)	Brak przeciwwskazań	Powierzchniowe	<ul style="list-style-type: none"> • pęknięcia
Magnetyczno–proszkowa (MT)	Materiały ferromagnetyczne	Powierzchniowe, przypowierzchniowe	<ul style="list-style-type: none"> • przyklejenia • pęknięcia • brak przetopu

W ramach metod nieniszczących predefiniowanych dla wad podpowierzchniowych główną uwagę należy zwrócić na usytuowanie i wielkość badanej powierzchni oraz na typ niezgodności jaki chcemy zarejestrować.

Tablica 2. Zastosowanie metod nieniszczących powierzchniowych i podpowierzchniowych

Metoda badań	Zastosowanie	Typ wady	Wady możliwe do wykrycia
Ultradźwiękowa (UT)	Brak przeciwwskazań	Powierzchniowe, podpowierzchniowe	<ul style="list-style-type: none"> • pęcherze • wtrącenia żużła • wtrącenia obcego metalu • przyklejenia • podtopienia • brak przetopu • pęknięcia
Rentgenowska (RT)	Brak przeciwwskazań	Powierzchniowe, podpowierzchniowe	<ul style="list-style-type: none"> • pęcherze • wtrącenia żużła • wtrącenia obcego metalu • przyklejenia • wyciek • podtopienia • geometria lica • brak przetopu • pęknięcia

4.2. Wnioski

Poddanie wykonanych w procesie produkcyjnym połączeń spawanych ocenie za pomocą badań nieniszczących umożliwia wykrycie wad i niezgodności spawalniczych będących efektem natury materiałowej i metalurgicznej, konstrukcyjnej i technologicznej złącz. Opisane w artykule metody badawcze pozwalają na ciągłe dążenie do wyeliminowania wad

poprzez wprowadzenie działań korygujących pozwalających uniknąć powstawania podobnych wad w przyszłości.

Wykorzystane w „OBRUM” sp. z o.o. metody badawcze połączeń spawanych pozwalają wykrywać niezgodności powstałe w procesie spawania już na etapie wytwórczym, co w większości pozwala uniknąć kosztów napraw realizowanych w trakcie późniejszej eksploatacji sprzętu oraz ryzyka wyłączenia sprzętu z eksploatacji. Badania opisane w niniejszym artykule są wystarczająco skuteczne, zaś ich dobór do potrzeb poszczególnych projektów jest realizowany w taki sposób, aby wpływ na przebieg realizacji produkcji był optymalny i nie wydłużał znacząco czasu realizacji, spełniając przy tym wymagania dokumentacji stawiane w warunkach technicznych odbioru lub w założeniach taktyczno-technicznych.

W artykule podano wszystkie podstawowe badania nieniszczące konstrukcji spawanych jakie wykorzystuje się w „OBRUM” sp. z o.o. Badania nieniszczące są powszechną metodą analizy konstrukcji na każdym z etapów cyklu życia produktu. Wybór odpowiedniej metodologii i metod badania wpływa na wykrywalność wad danego rodzaju. Jedne metody bardziej nadają się do wykrywania danego typu wad niż inne. Jakość kontroli jakości produktu zależy od opracowanego planu badań, który powinien być powiązany z instrukcją spawania.

5. LITERATURA

- [1] OBRUM Sp. z o.o. - www.obrum.gliwice.pl [dostęp:10.02.2017].
- [2] Materiały informacyjne firmy SSAB S.A. - <http://www.ssab.pl> [dostęp: 10.02.2017].
- [3] Materiały informacyjne firmy Huty Stali Jakościowych S.A. <http://hsjsa.pl/pl/> [dostęp: 10.02.2017].
- [4] PN-EN ISO 3834-2:2007. Wymagania jakości dotyczące spawania materiałów metalowych – Część 2. Pełne wymagania jakości.
- [5] PN-EN ISO 9001:2015-10. Systemy zarządzania jakością – Wymagania.
- [6] AQAP 2110 – Wymagania NATO dotyczące zapewnienia jakości w projektowaniu, pracach rozwojowych i produkcji.
- [7] PN-EN ISO 5817:2014-05. Spawanie – złącza spawane ze stali, niklu tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązek) – Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych.
- [8] PN-EN ISO 6520-1:2009. Spawanie i procesy pokrewne – klasyfikacja geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach – Część 1: Spawanie.
- [9] Goćkowski S. (red.): Poradnik spawalniczy. WNT. Warszawa 1970.
- [10] Szustakowski J.: Poradnik spawacza elektrycznego. WNT. Warszawa 1985.
- [11] Pilarczyk J.: Poradnik inżyniera. Spawalnictwo. Tom 1. WNT. Warszawa 2004.

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF WELDED STRUCTURES

Abstract. The article describes methods for non-destructive testing of welded joints, with particular focus on structures of high strength. Examples of structural units tested at OBRUM are presented along with the justification of the choice of the test method applied. In summary, reference is made to the limitations of the test methods and to possible errors in the assessment of the correctness of the welded structures.

Keywords: welded structures, non-destructive testing, welded joint testing, welded joint defects.