

WSPÓŁCZESNE METODY PRZEPROWADZANIA BADAŃ NIENISZCZĄCYCH ZŁĄCZY SPAWANYCH. OPIS TECHNOLOGII PRZEPROWADZANIA BADAŃ, ZE SZCZEGÓLNYM UWZGLĘDNIENIEM METOD ULTRADŹWIĘKOWYCH. TRENDY W ROZWOJU BADAŃ NIENISZCZĄCYCH

MODERN METHODOLOGIES OF THE NON-DESTRUCTIVE DEFECTS DETECTION IN WELDING JOINTS. DESCRIPTION OF THE TECHNOLOGIES USED TO EXAMINE WELDING JOINTS, WITH SPECIAL FOCUS ON ULTRASONIC TESTING. THE RECENT DEVELOPMENTS IN THE FIELD OF THE NON-DESTRUCTIVE TESTING

Inż. Adam DZIEWIECKI

Centrum Rzeczoznawstwa Budowlanego Sp. z o.o., Warszawa

Artykuł recenzowany

Streszczenie

Podczas projektowania i wykonywania konstrukcji stalowych szczególnie dużą rolę przypisuje się poprawnie wykonanym złączom spawanym. Badanie spoin jest jednym z najważniejszych obszarów zastosowań metod nieniszczących.

Jedną z najczęściej stosowanych technik badania złączy spawanych jest defektoskopia ultradźwiękowa. Metoda ta pozwala na znalezienie wad trudnych do zlokalizowania przy pomocy technologii radiograficznej.

Rozwój technologii, w szczególności upowszechnianie się zautomatyzowanych systemów spawalniczych, stawia przed dyscypliną badań nieniszczących nowe wyzwania. Jedną z najszybciej rozwijających się nowych metod badań nieniszczących jest metoda TOFD, stosowana przy wyszukiwaniu defektów w spoinach złożonych konstrukcji używanych w przemyśle rafineryjnym i energetyce atomowej.

Firma CRB Sp. z o.o. wśród zebranych doświadczeń posiada projekty analiz złożonych konstrukcji stalowych, w których opierano się między innymi na wynikach badań ultradźwiękowych. Doświadczenia te posłużyły do napisaniu niniejszego artykułu.

Słowa kluczowe: badania nieniszczące, metoda ultradźwiękowa, TOFD

Summary

The proper formation of welding joints plays a very important role in the design and creation of the steel constructions. In fact, the examination of welding joints is one of the most important applications of the non-destructive testing.

One of the most frequently used techniques of welding joints examination is the ultrasonic testing (UT). This method is very useful in finding defects, whereas the radiographic technology is less effective. The development of this technology, especially the spreading use of the automated welding systems, poses new challenges for the discipline of non-destructive testing. Actually, one of the fastest developing technologies in this field is TOFD, used for finding defects in complex steel constructions of the petroleum refining industry and the nuclear power industry.

The CRB Sp. z o.o. company has carried out numerous analysis of complex steel constructions, with the use of ultrasonic testing. These experiences served as the basis for this article

Key words: non-destructive testing, ultrasonic testing, TOFD

Wprowadzenie

Główną techniką wykonywania konstrukcji stalowych jest spawanie, co sprawia, że połączenia spawane są miejscami o szczególnym znaczeniu dla poprawnej pracy i bezpieczeństwa całej konstrukcji. Niewłaściwe wykonanie spoiny może przełożyć się na znaczne zagrożenia oraz straty (finansowe, czasowe). Oczywiście praktycznie nie jest możliwe uzyskanie połączenia spawanego o właściwościach identycznych, jak w przypadku materiału rodzimego. W przypadku tworzenia spoiny zostaje zniszczona lokalnie struktura materiału wyjściowego wynikająca z dotychczasowej historii technologicznej. W efekcie złącze ma zróżnicowany skład chemiczny oraz zróżnicowaną strukturę, zawierającą liczne mikro i makro uszkodzenia – czego w praktyce nie da się uniknąć. Należy jednak mieć na uwadze, iż każda dodatkowa ilość wprowadzanego ciepła oraz materiału dodatkowego do spoiny wpływa negatywnie na jej jakość, a co za tym idzie – nośność. W przypadku, kiedy dojdzie do powstania wady w połączeniu spawanym np. niezgodności przestrzennej zmniejszającej przekrój czynny złącza lub niezgodności płaskiej jak pęknięcie, przyklejenie, czy też brak przetopu, należy zastanowić się nad przyczynami powstania wad oraz konsekwencjami pozostawienia ich w konstrukcji. Offshore Standard DNV – OS – C101 wydany przez Norweskie Towarzystwo Klasyfikacyjne – Det Norske Veritas (DNV) wyróżnia 3 rodzaje konstrukcji oraz odpowiadające im konsekwencje błędów w spoinach:

1. Specjalne – w których wady mogą powodować poważne następstwa, w tym powstawanie naprężeń powodujących kruche pęknięcie.
2. Główne – w których wady powodują poważne konsekwencje.
3. Pomocnicze – których wady nie mają znaczących konsekwencji.

Konsekwencją niewłaściwie wykonanych połączeń spawanych są koszty, w skład których można zaliczyć:

- koszty wycięcia wadliwej spoiny, które można szacować na około 30% kosztów poprawnego wykonania złącza,
- koszty ponownego wykonania złącza (wykonane przez spawaczy o najwyższych kwalifikacjach),
- koszty przeprowadzenia badań NDT – dla oceny naprawionego złącza.

Biorąc pod uwagę powyższe składniki można oszacować koszt naprawy spoin na 4-krotnie wyższy od poprawnego wykonania połączeń spawanych na etapie produkcyjnym. Oczywiście kolejne koszty można ponieść również w konsekwencji przekroczonych terminów wykonania prac.

Wynika z tego wniosek, iż konieczny jest system sprawnego wykrywania i kontroli wad w połączeniach spawanych.

Kluczową normą wykorzystywaną przy ocenie jakości spoin jest PN-EN ISO 5817:2009 skupiająca się na zarówno złączach czołowych, jak i pachwinowych o grubości powyżej 0,5 mm. Norma wprowadza termin „poziom jakości” (PJA), który określa granice wymiarów niezgodności

spawalniczych odpowiadających wymaganej lub spodziewanej jakości złącza. Granice te określane są dla każdego rodzaju niezgodności i grubości spoiny. Jakość złącza sklasyfikowana została na 3-stopniowej skali i opisana literami B, C, D (wymagania ostre, średnie, łagodne). Jakość złącza spawanego określa się zatem na podstawie rzeczywistych niezgodności spawalniczych (czy też rzeczywistych odchyień od kształtu nominalnego złącza). Aby uzyskać wymiary wady w spoinie należy więc przeprowadzić odpowiednie badania nieniszczące (poza badaniami VT). Podczas takiego badania określa się poziom rejestracji (PRE) i akceptacji (PAK) dla wskazań od niezgodności. Należy również dobrać odpowiednią metodę badania NDT określanego terminem klasy badania (KL). Trzeba jednak mieć na uwadze, iż badania uznaje się za standardowe, gdy jest prowadzona kompleksowa kontrola kilkoma metodami nieniszczącymi: VT, MT, PT, UT i RT.

Podczas badań wadę charakteryzuje się poprzez podanie jej położenia w przestrzeni XYZ, jej długości oraz maksymalnej amplitudy echa (w przypadku badań UT). Ocena jakości złącza spawanego odbywa się dwuetapowo: najpierw oceniane są poszczególne wskazania, a następnie spoina jako całość.

Rodzaje badań niszczących złączy spawanych

Przy wyborze metod badań niszczących oraz poziomów klasy należy uwzględnić takie czynniki jak:

- materiał podstawowy, materiał dodatkowy, stan obróbki,
- metody spawania,
- rodzaj złącza i jego wymiary,
- poziom jakości,
- kształt elementu, jego dostępność, stan powierzchni,
- spodziewane rodzaje niezgodności spawalniczych.

Metodę wizualną (VT) można stosować do oglądania od wewnątrz wyrobów złożonych. Wymaga ona użycia przyrządów optycznych, a miejsce badania musi być oczyszczone. Jest to bardzo wszechstronna metoda (może wystarczyć jedno miejsce dostępu), jednak jest ona obciążona dużą dozą niepewności. Jest to podstawowe badanie stosowane do oceny wszelkiego rodzaju konstrukcji spawanych. Natężenie oświetlenia na powierzchnię badaną powinno wynosić, co najmniej 350 lx, jednak zaleca się, co najmniej 500 lx. Odległość między okiem badającego, a powierzchnią badaną nie powinna być większa niż 600 mm. Kąt widzenia nie powinien być mniejszy niż 30°. Podczas tego typu badań wykorzystuje się lupy, spoinomierze, endoskopy.

Badania penetracyjne (PT) wykorzystywane są do wykrywania nieciągłości spawalniczych wychodzących na powierzchnię badanego materiału. Stanowią następny etap badań po przeprowadzeniu oględzin metodą VT. Badana powierzchnia powinna być oczyszczona i wysuszona. Następnie na powierzchnię nanosi się kolejne penetranty, które wnikają w nieciągłości. Po upływie odpowiedniego czasu z powierzchni usuwa się nadmiar penetranta i nanosi

wywoływacz. Wchłania on penetrant, który wniknął i pozostał w nieciągłościach, dzięki czemu pojawia się łatwo widoczne powiększone wskazanie nieciągłości.

Badanie metodą magnetyczno – proszkową (MT) używa do wykrycia wad w spoinach ferromagnetycznych złączy spawanych. Po oczyszczeniu spoiny następuje magnesowanie, które dokonuje się za pomocą elektromagnesów jarzmowych, źródła prądu wzbudzającego z elektrodami stykowymi lub przewodników przylegających. W większości spawalnych materiałów ferromagnetycznych zaleca się zastosowanie natężenia magnetycznego pola stycznego na poziomie od 2kA/m do 6kA/m. Kolejną czynnością jest nanoszenie środków wykrywających, np. za pomocą natryskiwania lub napyłania. Czas potrzebny do utrzymania namagnesowanego elementu powinien być wystarczający do utworzenia wskazań. Rejestrację wskazań można przeprowadzić za pomocą szkiców, fotografii lub elektrooptycznego skanowania.

Badania prądami wirowymi (ET) wykorzystywane jest do badania złączy spawanych, głównie w elementach osiowych, tj. pręty, druty, rury o przekroju kołowym, itp. W badaniach ET zmiana strumienia magnetycznego powstaje na skutek zasilania cewek indukcyjnych przetwornika prądem przemiennym. Natężenie prądów wirowych jest największe na powierzchni obiektu i maleje do wartości zerowej w jego rdzeniu (naskórkowość). Dzięki temu metoda ta nadaje się do wykrywania niezgodności geometrycznych i strukturalnych istniejących na powierzchni i podpowierzchniowych. Za pomocą badań prądami wirowymi można wykryć rodzaje niezgodności spawalniczych, które zwykle występują na powierzchni, a są to: pęknięcia przyklejenia, braki przetopu, porowatość, pęcherze kanałkowe, wyciek stopiwa, wady geometryczne w spoinach czołowych.

Badania radiologiczne (RT) jest jedną z najbardziej rozpowszechnionych metod kontroli jakości złączy spawanych. Technologia ta charakteryzuje się dobrą wykrywalnością niezgodności wewnętrznych, prostą interpretacją wyników badań oraz radiogramem, jako produkt końcowy badania, który może być następnie poddany wielokrotnej analizie. W badaniach najczęściej wykorzystuje się badanie X lub g. Kontrola radiologiczna polega na wykonaniu radiogramów badanych złączy, następnie opisaniu zaobserwowanych na otrzymanych radiogramach niezgodności (miejsz o różnym zaciemnieniu) i ocenie, na ich podstawie, jakości złączy. Różnice w zaciemnieniu są wynikiem zmiany natężenia promieniowania, które zostało zaabsorbowane przez materiał w różnym stopniu – zależnym od wymiaru „grubości” wady.

Zaleca się, aby metoda radiologiczna była używana podczas badania wyrobów o małej grubości ścianki, natomiast metoda ultradźwiękowa preferowana jest bardziej w przypadku elementów o większych grubościach.

Defektoskopia ultradźwiękowa

Defektoskopia ultradźwiękowa polega na impulsowym wysłaniu do badanego materiału fal ultradźwiękowych. Fale wytworzone są w przetworniku piezoelektrycznym na skutek drgań po doprowadzeniu do jego powierzchni prądu o znacznej częstotliwości, przeważnie od 0,5 do 15 MHz. Następnie fale wprowadzane są do badanego materiału przez głowicę i odpowiedni płyn, np. olej, wodę (z ewentualną domieszką innego środka, np. zwilżającego, niezamarzającego inhibitora korozji), roztwór kleju do tapet, pasta kontaktowa, smar, pasta celulozowa z domieszką wody. Tym samym tworzy się sprzężenie akustyczne.

Ten typ badań oparty jest na zjawisku rozchodzenia się fal ultradźwiękowych w ciałach stałych. W badanej próbce rozprzestrzeniające się fale dają sygnał przepuszczalny (technika przepuszczania/cienia) lub sygnał odbity od powierzchni lub od nieciągłości (technika echa), który wraca do głowicy i po przetworzeniu na drgania elektryczne jest obserwowany jako impulsy na ekranie oscyloskopu bądź rejestrowany w pamięci komputera sprzężonego z defektoskopem. Odbicia wiązki fal ultradźwiękowych od powierzchni przedmiotu lub od wewnętrznych nieciągłości materiału są uwidaczniane na ekranie defektoskopu w postaci tzw. „echa dna”, lub „echa wady”. Znając geometrie badanego elementu oraz charakterystykę głowicy, można na podstawie odległości impulsu „echa wady” ustalić położenie „wady” w rzeczywistości.



Rysunek 1. Aparat wykorzystywany do wyświetlenia sygnału odbieranego przez głowicę

Źródło: Jedną z analiz konstrukcji stalowych wykonywaną przez Centrum Rzeczoznawstwa Budowlanego Sp. z o.o.

Badania takie mogą być prowadzone w fazie wytwarzania, np. przy produkcji seryjnej. Mogą być również prowadzone w fazie eksploatacji – w diagnostyce elementów przemysłowych celem określenia przydatności do dalszej eksploatacji, kontroli niektórych procesów technologicznych. Metody badań ultradźwiękowych umożliwiają wykrywanie różnych wewnętrznych wad w złączach spawa-

nych i materiale podstawowym. Dają one możliwość lokalizowania i rejestrowania wykrytych niezgodności na głębokości i szerokości złącza, które mogłyby być trudne do wykrycia metodą radiologiczną. Dzięki temu można badać materiały o znacznej grubości. W celu prawidłowej interpretacji wad występujących w spoinach, należy uwzględnić technologię spawania, związany z tym rodzaj możliwych wad oraz miejsce ich występowania. Z uwagi na to, że amplituda echa wady naturalnej może zależeć od kierunku padającej na nią wiązki fal ultradźwiękowych i wielkości wskazań tej samej wady, wyznaczone z różnych powierzchni wyniki badań mogą być różne. Dlatego rozmiary wad należy traktować z ostrożnością, biorąc pod uwagę, że mogą one nieco różnić się od rozmiarów rzeczywistych. Wykrytej wadzie z różnych powierzchni przypisuje się zawsze wartość największą.

Wyróżnia się dwie podstawowe metody badan UT:

- metodę przepuszczania (cienia),
- metodę echa.

W metodzie przepuszczania stosuje się dwie głowice o jednakowych parametrach, z których jedna jest nadajnikiem, a druga odbiornikiem. Przy ustawieniu głowic naprzeciwko siebie sygnał wysłany przez głowicę nadawczą dociera do odbiornika. Jeżeli w badanej próbce występuje nieciągłość większa od szerokości wiązki ultradźwiękowej, fala wysłana przez głowicę nadawczą nie dociera do głowicy odbiorczej. W skrajnych przypadkach, gdy wyeliminuje się możliwość braku sprzężenia akustycznego między głowicami a materiałem, uzyskujemy jednoznaczny wynik badania: pozytywne – negatywne. Można również stosować wariant zwierciadlany, tzw. „tandem”, ustawiając dwie głowice skośnie, po tej samej stronie materiału. Głowice te muszą być ustawione w ściśle określony sposób i w odpowiedniej odległości tak, aby wiązka fal ultradźwiękowych wysłana przez nadajnik, po odbiciu od materiału, trafiła do odbiornika.



Rysunek 2. Badanie przeprowadzane metodą echa przy udziale pojedynczej głowicy.

Źródło: Projekt analizy konstrukcji stalowej przygotowywany przez firmę Centrum Rzeczoznawstwa Budowlanego Sp. z o.o.

Do badań ultradźwiękowych spoin zalicza się również **metoda echa**. Używa się tu jednej głowicy, która początkowo stanowi nadajnik impulsów, a następnie, po odbiciu od materiału je odbiera. Sygnał wysłany przez głowicę do materiału, odbija się od nieciągłości lub od przeciwległej powierzchni i wraca do głowicy. Mierząc czas upływający od momentu wysłania impulsu do momentu jego powrotu można określić, znając prędkość fali ultradźwiękowej w materiale, odległość głowicy od nieciągłości. Na podstawie wysokości echa na ekranie defektoskopu można określić jej przybliżony wymiar. W metodzie echa z głowicą prostą fale ultradźwiękowe wchodzi w badaną próbkę pod kątem prostym. Metodę tę stosuje się najczęściej do badania spoin czołowych w złączach teowych, krzyżowych i kątowych, płaskich napoin oraz rozwarstwień blach. Podczas przeszukiwania badanej spoiny w celu znalezienia nieciągłości przy pomocy głowicy kątowej należy zwrócić uwagę, aby odchylenie w lewo lub prawo od wymaganego kierunku nie wynosiło więcej niż 10°.



Rysunek 3. Głowica podczas badania trzymana pod odpowiednim kątem. Jako nośnika fal użyto specjalnego preparatu. Źródło: Jedna z analiz technicznych konstrukcji stalowych wykonywana przez Centrum Rzeczoznawstwa Budowlanego Sp. z o.o.

Podczas badania należy zwrócić uwagę na zalecenie, iż powierzchnia przesuwu głowicy powinna być gładka i czysta (bez wgłębień, odprysków, farby, rdzy, itp.), a grubość badanego elementu niezmienna. Ponadto powierzchnia powinna być dostatecznie duża, aby można było w pełni przebadać całą spoinę. W przypadku falistości powierzchni należy dopilnować, aby pomiędzy głowicą a badaną spoiną nie występowała szczelina większa niż 0,5 mm. Dla spełnienia tego wymagania należy dla pewności obrobić powierzchnie badanej spoiny. Według normy PN-EN 1714 powierzchnie przeszukiwania oraz powierzchnie odbijające wiązkę uważa się za zdadne do badania, jeżeli chropowatość ich obrobionej powierzchni nie przekracza $R_a = 6,3 \mu\text{m}$.



Rysunek 4. Odpowiednio przygotowana do badań spoina.
Źródło: Jedna z analiz konstrukcji stalowych wykonywanych przez Centrum Rzeczoznawstwa Budowlanego Sp. z o.o.

Graniczna najmniejsza wielkość niezgodności, jaką możemy wykryć metodą ultradźwiękową zależy od długości fali, czyli od częstotliwości drgań przetwornika głowicy. Jeśli wymiary nieciągłości są mniejsze od połowy długości fali, to fala ultradźwiękowa „omija” tę nieciągłość prawie się nie odbijając, a tylko nieznacznie ulegając rozproszeniu.

Wykrywalność nieciągłości materiału zależy także od ich odległości od głowicy. Zjawisko to wynika z charakterystyki wiązki fali ultradźwiękowej w materiale oraz z tłumienia. W niewielkiej odległości od głowicy w tzw. „polu dalekim” wiązka fali jest rozbieżna i ciśnienie fali spada wraz ze wzrostem odległości. Jeżeli dodatkowo uwzględnimy wpływ tłumienia fali w materiale, to okaże się, że nieciągłości (wady) znajdujące się za daleko od głowicy są niemożliwe do wykrycia, podobnie jak te, które znajdują się za blisko.

Bardzo ważnym parametrem badania metodą echa określającym jego efektywność jest czułość, czyli minimalny wymiar „wady”, który można wiarygodnie wykryć przy kontroli. Za granicę czułości można uważać wadę, która jest prostopadła do osi wiązki ultradźwiękowej i której średnica jest równa połowie długości fali. W praktyce w celu otrzymania zauważalnego odbicia konieczne jest, aby wymiar „wady” był porównywalny z długością fali.

Kontrola ultradźwiękowa pozwala wykrywać takie „wady”, które nie zawsze mogą być wykryte metodą radiograficzną. Nieciągłościami takimi mogą być przyklejenia i pęknięcia, przy niekorzystnym usytuowaniu w stosunku do źródła promieniowania mogą nie „wyjść” na radiogramie, natomiast badania ultradźwiękowe ujawniają nawet najmniejsze pęknięcia czy przyklejenia. Radiografia nie nadaje się również do kontroli złączy spawanych teowych, krzyżowych oraz spoin pachwinowych. W tym przypadku znacznie lepsze są badania ultradźwiękowe.

Badania UT są najtrudniejszą metodą badań nieniszczących, dlatego wymagają od operatora dużej wiedzy i doświadczenia. Personel wykonujący badania nieniszczące musi posiadać kwalifikacje odpowiedniego stopnia i w

właściwym sektorze przemysłowym zgodnie z normą PN-EN 473. Jednostką certyfikującą osoby w zakresie badań nieniszczących jest jednostka certyfikująca Urzędu Dozoru Technicznego UDT-CERT. Uprawnienia do przeprowadzania takich badań uzyskuje się w jednym z 3 stopni. Uprawnienia obowiązują m.in. dla badań przed- i eksploatacyjnych złączy spawanych.

Trendy w rozwoju nieniszczących metod badań złączy spawanych

Jednym z czynników mających największy wpływ na kierunek rozwoju współczesnych badań nieniszczących jest upowszechnianie się zautomatyzowanych systemów spawalniczych. Technologie te znajdują zastosowanie min przy budowie rurociągów dalekiego zasięgu, konstrukcji stalowych używanych w przemyśle rafineryjnym, czy też przemyśle energii atomowej. Wymuszają one na osobach odpowiedzialnych za badania nieniszczące zwiększenie szybkości oraz wydajności pracy, jak również poprawę efektywności i precyzji w wykrywaniu wad.

Jedną z nowoczesnych technologii badania nieniszczącego jest metoda TOFD (Time-Of-Flight Diffraction). Metoda TOFD opiera się na odmiennych zasadach, niż metoda echa. Oprócz zjawiska odbicia wykorzystuje ona dyfrakcję fal ultradźwiękowych. W czasie badania rejestrowane są impulsy fal ultradźwiękowych rozproszone dyfrakcyjnie na krawędziach nieciągłości. Podstawą układu pomiarowego są dwie głowice skośne fal podłużnych ustawione po obu stronach spoiny.

Biorąc pod uwagę sukces, jaki odniosła metoda TOFD min. w obszarze nieniszczących badań rurociągów, należy mieć nadzieję, że znajdzie ona w niedalekiej przyszłości zastosowanie w różnych sektorach polskiego przemysłu.

Wnioski końcowe

Badania ultradźwiękowe stanowią jedną z najczęściej stosowanych metod badań nieniszczących połączeń spawanych. Pozwalają one na precyzyjne określenie położenia wady, jednak wymagają od operatora sporych kwalifikacji. W odpowiedzi na zapotrzebowanie rozwijającego się pod względem technologicznym rynku osoby zajmujące się badaniami nieniszczącymi wprowadziły wciąż ulepszane nowe sposoby pomiarów, które są bardziej wydajne i mniej czasochłonne. W najbliższym czasie należy spodziewać się większej popularyzacji technologii takich jak TOFD również na rynku polskim.

Literatura:

1. Baryłka A., *Wprowadzenie do inżynierii bezpieczeństwa obiektów budowlanych*. Chłodnictwo 4,5/2015, Spawalnictwo 4/2015.
2. Baryłka A., *Zagadnienia katastrofy budowlanej w ustawie Prawo budowlane*, Referat na VIII Międzynarodowej Konferencji „Bezpieczeństwo pożarowe obiektów budowlanych”, Warszawa – Józefów 2014.

3. Baryłka A., Baryłka J., *Samodzielne funkcje techniczne w budownictwie. Przewodnik po prawie z komentarzem*. POLCEN, Warszawa, 2016.
4. Ustawa z dnia 07.07.1994 r. *Prawo budowlane (Dz. U. 2010.243.1623 j.t., z późn. zm.)*.
5. Offshore Standard DNV-OS-C101, October 2008,
6. PN-EN ISO 5817:2009 „Spawanie – Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką) – Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych”
7. Saperski J., Wińcza M. „Jakość prac spawalniczych, a problemy ekonomiczne wytwarzania”
8. Mackiewicz S., Kopiński J. „Nowoczesne metody badań nieniszczących złączy spawanych” <http://www.ndt-imb.com>
9. Michnowski W., Mierzwa J., „Współczesne wybrane metody badań ultradźwiękowych”; <http://www.ultraso-nic.home.pl/pdf/publikacje/WybraneBadSpn.pdf>
10. Mackiewicz S., Zgutka M.; „Ultradźwiękowe badania złączy spawanych techniką Phased Array”, XXI Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”, Zakopane marzec 2015
11. Mackiewicz S., Kopiński J.; „Doświadczenia z zastosowań ultradźwiękowej techniki TOFD”; <http://www.ndt-imb.com>

KOMPLEKSOWA MODERNIZACJA POWIERZCHNI BIUROWYCH



PROJEKTUJ | BUDUJ prace budowlane | sanitarne | elektryczne | niskoprądowe

tel: +48 607 319 449
info@mt-service.com.pl
www.mt-service.com.pl



M&T SERVICE POLAND
Al. Witosa 31/ 201a
00-710 Warszawa