

Kontrola jakości połączeń lutowanych

Quality inspection of brazed joints

Streszczenie

W artykule zawarto zestawienie norm jakościowych stosowanych dla połączeń lutowanych twardym lutem. Przedstawiono najczęściej występujące niezgodności lutownicze w połączeniach lutowanych i główne przyczyny ich powstawania. Przeprowadzono przegląd klasycznych metod badań niszczących i nieniszczących oraz określono ich przydatność do badań połączeń lutowanych w zależności od ich konstrukcji. Przedstawiono wyniki badań jakości połączeń lutowanych z wykorzystaniem termografii aktywnej jako nowatorskiej metody badań nieniszczących.

Abstract

Specification of quality standards using for brazed joints. Imperfection which are most often in brazed joint and reasons for coming into existence. Review of classic of non destructive testing (NDT) and destructive (DT). Usability of NDT and DT to examination of different type of brazed joints. Results of quality examination of brazed joints with the aim of active thermography as a modern non destructive testing method.

Wstęp

Pomimo, że lutowanie należy do najstarszych metod spajania różnych materiałów, to nadal znajduje zastosowanie w wielu, nawet najbardziej rozwiniętych gałęziach przemysłu. W przypadku odpowiedzialnych połączeń lutowanych występujących w nowoczesnych produktach niezwykle istotnym problemem jest zapewnienie ich odpowiedniej jakości. Nawet nieznaczne niezgodności lub wady występujące w połączeniach lutowanych mogą powodować widoczne pogorszenie właściwości użytkowych połączeń, a tym samym całego wyrobu.

Powstawaniu połączenia lutowanego towarzyszą różne zjawiska fizyczne i chemiczne, takie jak: redukcja i dysocjacja tlenków pokrywających niemal wszystkie metale i stopy wykorzystywane w technice, zjawiska kapilarne, dyfuzja i wzajemne rozpuszczanie się składników lutu i materiału łączonego oraz krystalizacja lutownicy. Niewłaściwy przebieg któregośkolwiek z tych zjawisk może być spowodowany np. przez źle oczyszczoną powierzchnię elementów lutowanych, wadliwą konstrukcję złącza, niewłaściwie dobranym topnikiem i lutem, niewłaściwą temperaturą i czasem lutowania itp., co może prowadzić do powstawania różnego rodzaju niezgodności lub wad. Dlatego dokładną

kontrolę jakości powinno się prowadzić nie tylko dla gotowych złączy lutowanych, ale również na poszczególnych etapach ich powstawania [1].

Niezgodności lutownicze

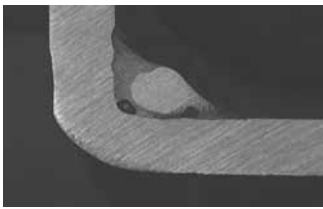
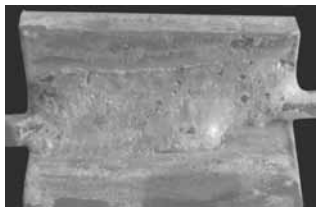
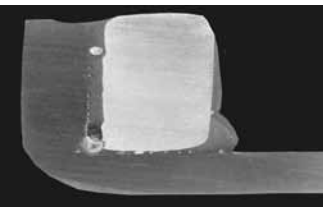

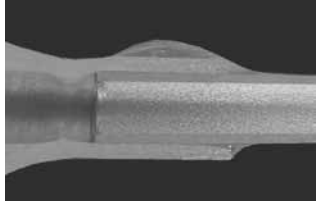

Klasyfikację i rodzaje niezgodności lutowniczych powstających w połączeniach twardo lutowanych ujmuje PN-EN ISO 18279 *Lutowanie twarde – Niezgodności w złączach lutowanych na twardo* [2]. Norma dodatkowo określa poziom jakości połączeń lutowanych w zależności od rodzaju występujących niezgodności i ich geometrii. Podobnie jak w przypadku połączeń spawanych PN-EN ISO 18279 wyróżnia trzy poziomy jakości: B – dla wymagań ostrych, C – dla wymagań pośrednich, D – dla wymagań łagodnych.

W PN-EN ISO 18279 niezgodności lutownicze sklasyfikowane są w sześciu grupach:

- I – pęknięcia,
- II – pustki,
- III – wtrącenia stałe,
- IV – brak połączenia,
- V – niezgodności kształtu i wymiaru,
- VI – niezgodności różne.

We wszystkich grupach do każdej niezgodności przyporządkowany jest odpowiedni symbol cyfrowo-literowy (np. 1AAAC – pęknięcie w strefie dyfuzji).

Dr inż. Maciej Róžański – Instytut Spawalnictwa, Gliwice.

		
Obszerny pęcherz gazowy Oznaczenie wg normy: 2LIAA	Niezgodność kształtu Oznaczenie wg normy: 5AAAA	Wtrącenia topnikowe Oznaczenie wg normy: 3CAAA
		
Pęknięcie Oznaczenie wg normy: 1AAAB	Nadmiar lutowniny twardej Oznaczenie wg normy: 6BAAA	Erozja spoiwem Oznaczenie wg normy: 5FABA

Rys. 1. Przykładowe niezgodności lutownicze oraz ich oznaczenia wg PN-EN ISO 18279

Fig. 1. Examples of brazed joints imperfections and their designation acc. to PN-EN ISO 18279

Przykładowe niezgodności lutownicze wraz z ich oznaczeniem wg PN-EN ISO 18279 przedstawiono na rysunku 1.

Badania niszczące złączy lutowanych wg PN-EN 12797 [3]

Oprócz badań metalograficznych, pozostałe badania niszczące dają informacje jedynie właściwościach mechanicznych badanych połączeń. Tylko na podstawie oględzin przełomu (fraktogramu) itp. można określić ewentualne występowanie niezgodności mogących wpływać na właściwości mechaniczne złącza. Należy zawsze pamiętać, że kryteria oceny jakości połączeń lutowanych mogą być różne. W pewnych przypadkach wytrzymałość samego połączenia będzie miała znaczenie drugorzędne – ważniejsza będzie jego szczelność lub przewodność elektryczna i wówczas zwykle nie będzie wymagane badanie wytrzymałości.

W przypadku połączeń lutowanych rozróżnia się dwa podstawowe typy połączeń: **zakładkowe** i **doczołowe**. Przy czym w przypadkach, w których wymaga się pewnego poziomu wytrzymałości, połączenia powinny być projektowane jedynie jako połączenia zakładkowe, tak aby lutownina przenosiła obciążenia ścinające. Rodzaje i sposoby prowadzenia badań niszczących podano w PN-EN 12797 *Lutowanie twarde. Badania niszczące złączy lutowanych na twardo*, w której opisano następujące metody badań:

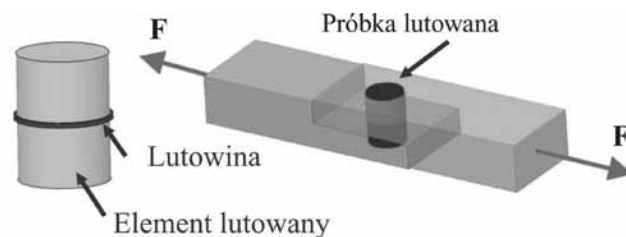
- statyczna próba na ścinanie,
- statyczna próba na rozciąganie,
- badania metalograficzne,
- pomiary twardości,
- próba odrywania,
- próba zginania.

Zaznaczono przy tym, że dla pewnych przypadków żadna z wymienionych metod badań może nie być przydatna i wówczas wymagane będzie opracowanie badań dostarczających wymaganych informacji o właściwościach połączenia.

Statyczna próba na ścinanie. Norma określa przykładowe rodzaje próbek do badań (jedną z nich przedstawiono na rysunku 3a), przy czym jest to tylko propozycja, od której dopuszczalne są odstępstwa. Z normy jednak wynika, że konstrukcja próbek powinna zapewnić występowanie jedynie naprężeń ścinających w lutowninie.

Najłatwiejsza w realizacji, zapewniająca czyste ścinanie lutowniny i oszczędne dysponowanie materiałem lutowanym jest próba ścinania połączenia lutowanego elementów walcowych lutowanych do czoła (rys. 2). Choć nie jest ona znormalizowana, to prostota realizacji zachęca do jej powszechnego stosowania.

Statyczna próba na rozciąganie polega na obciążeniu próbek tak, aby w złączu lutowanym generować jedynie naprężenia rozciągające bez zginania. W normie przedstawiono przykładowe złącze próbne, które może być zmienione w zależności od potrzeb (rys. 3b). Należy pamiętać, że wyniki uzyskane w próbie wytrzymałości na rozciąganie nie dają żadnych informacji o wytrzymałości badanego złącza w próbie ścinania.



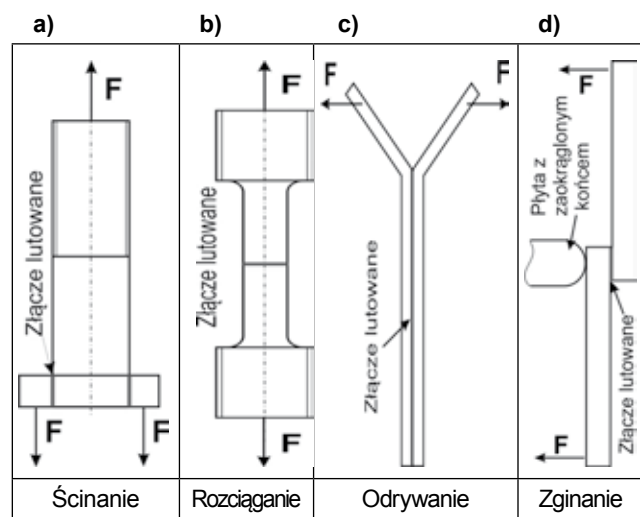
Rys. 2. Statyczna próba „czystego” ścinania połączenia lutowanego

Fig. 2. Static shearing test of brazed joint

Próba odrywania stanowi jedną z najprostszych metod badań mechanicznych, a jej podstawowym celem jest określenie stopnia wypełnienia szczeliny lutem przez pomiar powierzchni miejsc niezwiązanych. W PN-EN 12797 podano sposób wykonania próbek i metodę jej odrywania (rys. 3c). Ponadto przy zastosowaniu maszyny wytrzymałościowej próbę można traktować jako pólnościową, dającą pewne wartości liczbowe wyrażające wytrzymałość połączenia lutowanego.

Próba zginania daje informacje o zdolności złącza do przenoszenia momentu gnącego podczas eksploatacji. W tej próbie złącze lutowane jest odkształcane przez zginanie w celu określenia ciągliwości i odporności na pęknięcie strefy wpływu ciepła, materiałów podstawowych i całej konstrukcji lutowanej. Norma dopuszcza dwa sposoby realizacji próby zginania: przez zginanie swobodne lub zginanie kontrolowane wokół trzpienia (płyta z zaokrąglonym końcem) o odpowiednim, określonym uprzednio promieniu (rys. 3d). Badaniu poddaje się przeważnie złącza zakładkowe blach, ale również złącza doczołowe i skośne elementów o przekroju okrągłym.

Badania metalograficzne dzieli się na: *badania makroskopowe* przy powiększeniu do 30x i *badania mikroskopowe* przy powiększeniach od 50 do 2000x.



Rys. 3. Sposoby przygotowania próbek do badań
Fig. 3. Shapes of specimen for testing

Badania makroskopowe umożliwiają określenie wad i niezgodności w złączach, takich jak np. pęcherze gazowe, wtrącenia topnika i pęknięcia, kształt geometryczny lutowiny oraz stopień wypełnienia szczeliny lutowniczej lutem. Badania metalograficzne mikroskopowe umożliwiają wykrycie obecności wszelkiego rodzaju wtrąceń niemetalicznych, drobnych pęcherzy gazowych, mikropęknięć, ocenę struktury lutowiny i materiału podstawowego, szerokości strefy dyfuzyjnej, obecności faz międzymetalicznych, wielkości ziaren i innych. PN-EN 12797 zaleca, aby próbki do badań metalograficznych przygotować tak, żeby złącze lutowane wykazywało zmienną szerokość, co ułatwia badanie metalograficzne.

Pomiar twardości umożliwia określenie stanu metalurgicznego materiału podstawowego, a w przypadku przeprowadzonej obróbki cieplnej daje informację o jej skuteczności. Pomiar twardości jest badaniem standardowym, stosowanym np. w celu zbadania charakterystyki dyfuzyjnej spoiwa oraz obecności faz międzymetalicznych, często decydujących o jakości złącza. Norma nie narzuca sposobu pomiaru twardości, ale zapisano w niej, że wyniki uzyskane różnymi metodami badań nie zawsze są porównywalne.

Badania nieniszczące złączy lutowanych wg PN-EN 12799 [4]

Badania nieniszczące, podobnie jak w przypadku połączeń spawanych, stanowią bardzo przydatne narzędzia pomagające określić jakość połączeń uzyskanych w procesie lutowania. W PN-EN 12799 *Lutowanie twarde – Badania nieniszczące złączy lutowanych na twardo* do połączeń lutowanych wyznaczono następujące badania nieniszczące: wizualne, ultradźwiękowe, radiograficzne, penetracyjne, szczelności, na obciążenie, termograficzne (termografia aktywna).

Badania wizualne stanowią podstawową, najtańszą, a często najskuteczniejszą metodę oceny jakości połączeń lutowanych. Należy jednak pamiętać, że metoda ta umożliwia wykrycie tylko takich niezgodności lub wad w połączeniu lutowanym, które wychodzą na jego powierzchnię. Podstawowe niezgodności lub wady wykrywane za pomocą badań wizualnych to: pory powierzchniowe, pęcherze powierzchniowe, przemieszczenie kątowe elementów, erozja powierzchni złącza w wyniku oddziaływania lutu, niedobór lutu, nadmiar lutu, liniowe przemieszczenie elementów, nieregularna wypływka pachwinowa lutowiny itp. PN-EN 12799 wskazuje dodatkowo inne określone jako różne niezgodności i wady powierzchni, takie jak: pozostałości topnika na powierzchni lutowiny, odpryski lutu na powierzchni materiałów łączonych, nadmierne rozplątanie lutu, nieusunięte pozostałości topnika.

W normie tej podano niezbędne informacje i wytyczne dotyczące sposobu prowadzenia badań wizualnych, warunków technicznych oraz zapisu z badań.

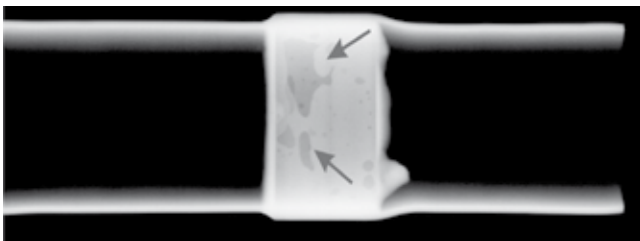
Badania ultradźwiękowe wg PN-EN 12799 prowadzone są najczęściej techniką echa, choć norma dopuszcza również realizację badań techniką przepuszczania. W przypadku badań ultradźwiękowych, inaczej jak w przypadku badań wizualnych, możliwe jest wykrycie takich niezgodności lub wad jak: niepełne wpłynięcie lutu do szczeliny kapilarnej, duże pęcherze gazowe lub wtrącenia żużla, podłużne pęknięcia, małe pęcherze, niepełne zwilżenie powierzchni materiału podstawowego i pęknięcia poprzeczne. Przykład badania ultradźwiękowego instalacji rurowej metodą echa przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Badania ultradźwiękowe połączeń mufowych instalacji rurowej [5]

Fig. 4. Ultrasonic testing of bush joints in pipeline [5]

Badania radiograficzne – ich podstawą jest wykorzystanie promieniowania rtg lub γ do wykrywania niezgodności w złączach lutowanych, co umożliwia rozpoznawanie krytycznych wewnętrznych niezgodności. Intensywność przenikania promieniowania zostaje zmieniona przy przejściu przez materiał i przez niezgodność w materiale. Wykonanie badań radiograficznych może być trudne, gdy współczynnik pochłaniania promieniowania X przez spoiwo jest podobny do współczynnika pochłaniania tego promieniowania przez materiał podstawowy. Wówczas kontrast w miejscach występowania ewentualnych niezgodności może być bardzo nieznaczny. Przykładowe wyniki badań przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Radiogram połączenia mufowego rur z widocznymi pęcherzami gazowymi lub wtrąceniami topnika [6]

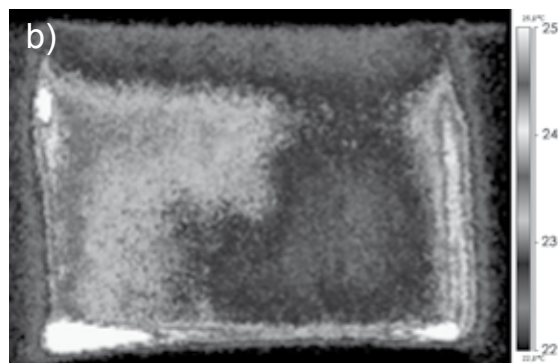
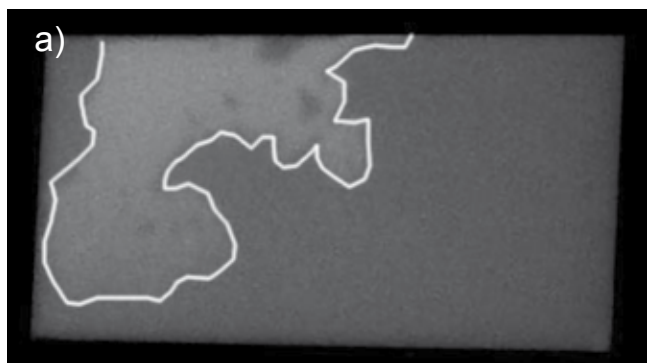
Fig. 5. Radiogram of pipes brazed joint with visible gas cavities and flux inclusions

Badania penetracyjne umożliwiają wykrycie niezgodności wychodzących na powierzchnię lutownicy, przy czym rozdzielczość metody, ze względu na obraz niezgodności znacznie większy niż jej rzeczywisty rozmiar, jest znacznie większa niż w badaniach wizualnych. Na rysunku 1 widać pęknięcie w połączeniu lutowanym, które w zasadzie było niewykrywalne za pomocą badań wizualnych i dopiero napełnienie badanego elementu penetrantem wskazało miejsce występowania niezgodności (pęknięcia). Tak

więc badania penetracyjne stanowią również wartościowe narzędzie kontroli szczelności połączeń lutowanych. Norma wskazuje na problem całkowitego usunięcia odczynników z powierzchni elementów po badaniach, szczególnie gdy powierzchnia ta jest np. porowata. Wówczas podczas ponownego lutowania (jeżeli jest dozwolone) mogą występować utrudnienia związane z pogorszoną zwilżalnością powierzchni przez lut lub może dojść do powstania porowatości. Zwrócono również uwagę na konieczność dokładnego usunięcia pozostałości potopnikowych z powierzchni lutowanych przed badaniem, gdyż przeważnie wykazują one dużą porowatość i są przyczyną niewłaściwych wskazań podczas badania.

Badanie szczelności prowadzone jest w celu określenia całkowitego natężenia przecieku obiektu lub złącza lutowanego, albo usytuowania miejsca przecieku. Norma rozróżnia dwie podstawowe metody badań szczelności: wykrywania wypływania gazu z obiektu przez złącze lutowane – *badanie ciśnieniowe* i wykrywania wpływania gazu do obiektu przez złącze lutowane na twardo – *badanie próżniowe*. Czułość drugiej metody jest o 10 rzędów wielkości większa niż pierwszej. Badania próżniowe prowadzi się z wykorzystaniem helu jako gazu znakującego i spektrometru masowego jako wykrywacza nieszczelności. Badania ciśnieniowe wykonuje się metodą pęcherzykową.

Badania termograficzne w ostatnim dziesięcioleciu cieszą się coraz większym zainteresowaniem jako metoda badań materiałów inżynierskich wykorzystująca wymuszony nieustalony przepływ ciepła, określana często jako *termografia aktywna*. Metoda ta znajduje zastosowanie również w badaniach połączeń lutowanych. Termografia aktywna jest skuteczną i efektywną metodą badań umożliwiającą wykrycie obszaru połączenia lutowanego, w którym doszło do nieprawidłowego (lub niecałkowitego) wypełnienia szczeliny lutowniczej. Metoda jest oparta na zasadzie nieustalonego przepływu ciepła (na drodze przewodzenia) przez lutownicę łączącą dwa elementy, przy czym skutkiem tego przepływu ciepła jest przejściowy rozkład temperatury na zewnętrznej powierzchni elementu znajdującego się po stronie przeciwległej do strony, na której powierzchnia jest nagrzewana. Nagrzewanie powierzchni jednego z elementów odbywa się w sposób impulsowy celem wywołania nieustalonego przepływu ciepła, natomiast uzyskany przejściowy rozkład temperatury na zewnętrznej powierzchni elementu analizowany jest z zastosowaniem kamery termowizyjnej. Wyniki badań przykładowych złączy lutowanych prowadzonych z wykorzystaniem termografii aktywnej przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Wyniki badań stopnia wypełnienia szczeliny lutowniczej z wykorzystaniem: a) badań radiograficznych, b) termowizji aktywnej [7]
Fig. 6. Results of the degree of brazing gap filling by solder with the use of: a) radiographic examination, b) active thermography examination

Podsumowanie

Niezgodności występujące w połączeniach lutowanych w większym lub mniejszym stopniu wpływają na ich właściwości użytkowe. Istotne z punktu widzenia jakości połączeń jest zatem umiejętne rozpoznanie występujących w nich niezgodności i oszacowanie ich wpływu na te właściwości. Klasyfikacji niezgodności lutowniczych dokonano w PN-EN ISO 18279 *Lutowanie twarde. Niezgodności w złączach lutowanych na twardo*. Określono w niej również zależność pomiędzy geometrią niezgodności i jej wielkością a poziomem jakości

połączenia lutowanego. Pomocne w rozpoznawaniu rodzaju niezgodności są metody badań nieniszczących, których zasady określa PN-EN 12799 *Lutowanie twarde. Badania nieniszczące złączy lutowanych na twardo*. Z kolei oceny właściwości mechanicznych połączeń lutowanych można dokonać na podstawie PN-EN 12797 *Lutowanie twarde. Badania niszczące złączy lutowanych na twardo*, określającej zasady prowadzenia badań niszczących połączeń lutowanych.

Literatura

- [1] Ciszewski A., Radomski T.: Obróbka oraz łączenie tytanu i jego stopów, WNT, Warszawa 1984.
- [2] PN-EN ISO 18279:2008P Lutowanie twarde. Niezgodności w złączach lutowanych na twardo.
- [3] PN-EN 12797:2002 Lutowanie twarde. Badania niszczące złączy lutowanych na twardo.
- [4] PN-EN 12799:2003 Lutowanie twarde. Badania nieniszczące złączy lutowanych na twardo.

- [5] www.olympus-ims.com, 24.06.2013
- [6] www.cemosxray.com, 24.06.2013
- [7] Pawlak S., Różański M., Muzia G.: Zastosowanie termografii aktywnej do badań nieniszczących połączeń lutowanych, Przegląd Spawalnictwa, nr 2/2013, s. 24-28.

Zapowiedź wydawnicza

Jerzy Nowacki, Janusz Grabian, Sławomir Krajewski

Problemy lutowania pian aluminiowych

Komórkowa struktura i wyjątkowe cechy pian aluminiowych są przyczyną problemów ich cięcia i spajania. W referacie przedstawione metody wytwarzania, strukturę, właściwości i zastosowania aluminiowych pian metalicznych. Scharak-

teryzowano również sposoby cięcia pian wodą i elektroiskrową, jako metod przygotowania krawędzi do lutowania oraz technik łączenia pian: mechanicznych i spawalniczych ze szczególnym naciskiem na ich lutowanie miękkie i twarde.

Referat wygłoszony na 4. Międzynarodowej Konferencji Naukowo Technicznej *Postęp w technologiach lutowania*, Politechnika Wrocławska, Wrocław, 23-25 września 2013 r. Artykuł zostanie opublikowany w numerze 1/2014 Przeglądu Spawalnictwa.