

OBRÓBKA CIEPLNA W PROCESIE KWALIFIKOWANIA TECHNOLOGII SPAWANIA ŁUKOWEGO STALI



ARKADIUSZ MAKÓWKA

Ekspert ds. Rozwoju
Technologii Spawania
Departament Techniki
Urząd Dozoru Technicznego

Artykuł opisuje jedno ze szczególnych zagadnień związanych z kwalifikowaniem technologii – obróbkę cieplną po spawaniu, w szczególności w aspekcie wymagań dodatkowych opisanych w normach dotyczących różnych zastosowań (normach wyrobów) [2], [3], [4], [5], uznanych specyfikacjach technicznych (np. [6]) oraz raporcie technicznym ISO/TR 14745 [7].

Prezentowane i przeanalizowane przez Autora opinie nie mogą zastąpić samodzielnego przeglądu zagadnienia oraz nie stanowią oficjalnych interpretacji poszczególnych wymagań, które mogą być formułowane jedynie przez komitet ISO/TC 44/S.C. 10. Wyrażają jednak stanowisko Urzędu Dozoru Technicznego w zakresie wielu szczegółowych wymagań, które mogą wywoływać kontrowersje lub nieporozumienia podczas współpracy z firmami realizującymi proces kwalifikowania technologii.

Celem niniejszego artykułu nie jest powtarzanie zapisów norm i innych dokumentów odniesienia, dlatego też skupiono się wyłącznie na wymaganiach, które mogą powodować trudności w ich interpretacji.

NORMA PN-EN ISO 15614-1 [1] JEST JEDNYM Z PODSTAWOWYCH DOKUMENTÓW ODNIESIENIA PODCZAS KWALIFIKOWANIA TECHNOLOGII SPAWANIA ŁUKOWEGO STALI. DOKUMENT TEN NIE MOŻE BYĆ JEDNAK STOSOWANY JAKO WYŁĄCZNY, W ODNIESIENIU DO WSZYSTKICH ZASTOSOWAŃ. PODSTAWOWĄ ZASADĄ W PROCESIE KWALIFIKOWANIA TECHNOLOGII JEST UWZGLĘDNIENIE RÓWNIEŻ DODATKOWYCH WYMAGAŃ WYSTĘPUJĄCYCH PRZED WSZYSTKIM W NORMACH ORAZ UZNANYCH SPECYFIKACJACH TECHNICZNYCH DOTYCZĄCYCH ODPOWIEDNIH URZĄDZEŃ I KONSTRUKCJI.

DOKUMENTY ODNIESIENIA PRZEDSTAWIAJĄCE DODATKOWE WYMAGANIA W ZAKRESIE OBRÓBKI CIEPLNEJ PO SPAWANIU

W procesie kwalifikowania technologii spawania uwzględnić należy (w zależności od zastosowanej technologii spawania) dodatkowe wymagania dotyczące obróbki cieplnej ujęte w:

- normach dotyczących odpowiednich urządzeń i konstrukcji, np. PN-EN 13445-4 [2], PN-EN 13480-4 [3], PN-EN 12952-5 [4], -6 [5] i in.,
- uznanych specyfikacjach technicznych, np. WUDT/UC/2003 [6],
- raporcie technicznym ISO/TR 14745 [7],
- specyfikacjach wytwórców materiałów dodatkowych do spawania.

Kluczowym dokumentem odniesienia w zakresie obróbki cieplnej jest norma PN-EN 13445-4 [2]. Wiele zapisów tej normy wdrożono do normy PN-EN 13480-4 [3]. Większość wymagań raportu technicznego ISO/TR 14745 [7] jest zgodna z ujętymi w PN-EN 13445-4 [2].

Podobne podejście związane z koniecznością uwzględnienia dodatkowych wymagań występuje w procedurach kwalifikowania technologii opartych na przepisach amerykańskich. Na przykład ASME BPVC Sekcja IX stanowi wyłącznie podstawowy dokument odniesienia w zakresie kwalifikowania technologii spawania elementów urządzeń ciśnieniowych, dlatego należy uwzględnić także wymagania dodatkowe, w zależności od zastosowania technologii, ujęte w innych Sekcjach ASME BPVC, np. VIII (zbiorniki ciśnieniowe), III i XI (urządzenia wykorzystywane w elektrowniach jądrowych) i in.

ZAGADNIENIA UJĘTE W WYMAGANIACH DODATKOWYCH

Wymagania dodatkowe ujęte w wyszczególnionych powyżej dokumentach odniesienia dotyczą następujących zagadnień:

- techniki przeprowadzania obróbki cieplnej po spawaniu,
- prędkości nagrzewania i chłodzenia,
- temperatury i czasu wygrzewania,
- ograniczeń związanych z udzielaniem zakresu kwalifikacji do wykonywania połączeń mieszanych (pomiędzy różnymi grupami/podgrupami materiałów podstawowych).

Wymagania opisane w wymienionych powyżej normach i specyfikacjach dotyczące zagadnień opisanych powyżej w pkt a) i b) nie powinny powodować problemów interpretacyjnych. Dlatego w artykule skupiono się wyłącznie na zagadnieniach wyszczególnionych w pkt c) i d).

ANALIZA ZAGADNIENIŃ UJĘTYCH W WYMAGANIACH DODATKOWYCH

Analiza tablicy 5 normy PN-EN ISO 15614-1 [1] wskazuje, że autorzy tego dokumentu odniesienia nie uwzględnili wpływu obróbki cieplnej na możliwość wykonania złączy mieszanych.

Ewidentnym przykładem jest kwalifikowanie technologii dla stali grupy 6.4 wg ISO/TR 15608 [8], np. P91.

Zakres kwalifikacji zgodnie z ww. tablicą obejmuje połączenia:

- jednorodne pomiędzy wszystkimi stalami podgrupy 6.4 i każdej podgrupy o niższym numerze,
- mieszane pomiędzy wszystkimi stalami podgrupy 6.4 i każdej podgrupy niższej w obrębie grupy 6,
- mieszane pomiędzy wszystkimi stalami grupy 6 a stalami grupy 1 lub 2.

Złącza elementów ze stali grupy 6 zasadniczo w każdym przypadku powinny być poddane obróbce cieplnej po spawaniu, dlatego analiza możliwości wykonania złącza mieszanego powinna uwzględniać w szczególności pokrywanie się zakresów temperatur wygrzewania dla poszczególnych materiałów podstawowych złącza spawanego.

W przypadku wielu rodzajów połączeń mieszanych wymienionych powyżej w pkt b) oraz c) ww. zakresy temperatur nie pokrywają się, np. 6.4-P91/6.1 – 14MoV63, 6.4 – 1, 6.4 – 2.

Analiza możliwości wykonania połączeń mieszanych dokonywana jest w normach wyrobów, np. PN-EN 13445-4 [2].

Zgodnie z wymaganiami pkt 8.4.11 normy PN-EN ISO 15614-1 [1] zakres kwalifikacji dla temperatury wygrzewania ustala się jako $\pm 20^{\circ}\text{C}$ w odniesieniu do wartości temperatury wygrzewania stosowanej podczas kwalifikowania technologii. Zakres ten nie jest właściwy w przypadku wielu nowych gatunków stali do pracy w podwyższonych temperaturach z uwagi na problemy związane z uzyskaniem wymaganej pracy łamania w poszczególnych obszarach złącza spawanego. Również niekiedy ze względu na konieczność uniknięcia ryzyka przekroczenia podczas obróbki cieplnej temperatury A_{c1} , co skutkuje wystąpieniem struktury austenitycznej i prowadzi podczas chłodzenia do wystąpienia martenzytu nieodpuszczonego.

Zgodnie z wymaganiami rozdz. 6 oraz Załącznika A ISO/TR 14475 [7] obróbka cieplna po spawaniu (w tym podczas kwalifikowania technologii) powinna być realizowana z uwzględnieniem również wymagań ujętych w normach wyrobów oraz specyfikacjach opracowanych przez wytwórców materiałów dodatkowych do spawania.

Na przykład według zaleceń firmy Böhler zakres kwalifikacji dla temperatury wygrzewania złączy ze stali P91, P92, E911 wynosi: $+0/-10^{\circ}\text{C}$, a dla stali VM12 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ w odniesieniu do temperatury wygrzewania stosowanej podczas kwalifikowania technologii (zalecanej przez tego wytwórcę materiałów dodatkowych do spawania).

Czas wygrzewania nie jest zmienną zasadniczą według wymagań normy PN-EN ISO 15614-1 [1], przy czym wprowadzono następujący zapis w pkt 8.4.11 tego dokumentu odniesienia: „Jeżeli jest to wymagane, to prędkość nagrzewania, prędkość chłodzenia i czas wygrzewania powinny być dostosowane do wyrobu”. Niestety w najnowszym wydaniu normy PN-EN 12952-5 [4] nie wprowadzono zasad związanych z koniecznością analizy wpływu czasu wygrzewania na własności złącza.

Czas wygrzewania jest zmienną zasadniczą na podstawie zapisów ujętych w:

- normach wyrobów, np. PN-EN 13445-4 [2], PN-EN 13480-4 [3],
- raporcie technicznym ISO/TR 14745 [7].

Wpływ temperatury oraz czasu wygrzewania na własności mechaniczne (wytrzymałość na rozciąganie, granicę plastyczności, udarność) określa się w normie PN-EN 13445-4 [2] poprzez wprowadzenie parametru Hollomona-Jaffe'a:

$$P = T_s (20 + \lg t) 10^{-3},$$

gdzie:

T_s – temperatura wygrzewania [K],

t – czas wygrzewania [h].

Przyjmując wartość temperatury wygrzewania oraz wartość krytyczną (P_{crit}) parametru P na podstawie tablicy 11.1-1 normy PN-EN 13445-4 [2], można wyznaczyć czas obróbki cieplnej, którego przekroczenie związane jest z koniecznością ponownego przeprowadzenia badań własności mechanicznych (m.in. próba rozciągania, próba udarności) w ramach procedury kwalifikowania technologii.

W normie PN-EN 13445-4 [2] wprowadzono szereg istotnych wymagań dodatkowych w odniesieniu do temperatury i czasu wygrzewania (ujętego poprzez parametr Hollomona-Jaffe'a), w szczególności niżej wskazanych.

a) Dla materiałów grup 1.1 i 1.2 (z wyjątkiem stanu dostawy M) negatywny efekt związany z obniżeniem wytrzymałości na rozciąganie (R_m) i granicy plastyczności ($R_{p0,2}$), a także udarności może nie być rozpatrywany, jeżeli parametr Hollomona-Jaffe'a wyznaczony na podstawie rzeczywistych wartości temperatury i czasu wygrzewania jest mniejszy lub równy 17,5.

Uwaga: dla wielu gatunków materiałów należących do grup 1.1 i 1.2 wartości P_{crit} określone w tabelicy 11.1-1 normy różnią się od podanych w PN-EN 10028-2 [9].

b) Gdy $17,5 < P \leq 18,5$ dla materiałów grup 1.1 i 1.2, to wpływ obróbki cieplnej na własności mechaniczne może być określony poprzez:

- weryfikację na podstawie dokumentu kontroli materiału w celu ustalenia, że własności mechaniczne określone przez R_m , $R_{p0,2}$ oraz pracę łamania przekraczają wartości minimalne określone w odpowiedniej normie odpowiednio o co najmniej:

(I) 5%, 8% oraz 23J, jeżeli $17,5 < P \leq 18,0$,

(II) 10, 12 oraz 30J, jeżeli $18,0 < P \leq 18,5$

lub

- przedstawienie dowodu, że własności materiału po obróbce cieplnej były badane i spełniają określone minimalne wymagania. Może to być realizowane poprzez:

(I) elementy próbne poddane obróbce cieplnej wraz z urządzeniem ciśnieniowym lub

(II) elementy próbne poddane symulowanej obróbce cieplnej przez dostawcę materiału, lub

(III) elementy próbne poddane symulowanej obróbce cieplnej przez wytwórcę urządzenia ciśnieniowego.

c) Dla wszystkich innych materiałów (niż wymienione w pkt b) maksymalna rzeczywista temperatura wygrzewania powinna być niższa o co najmniej 30°C od minimalnej rzeczywistej temperatury odpuszczania, a wartość P_{crit} określona w tabelicy 11.1-1 nie może być przekroczona.

Jeżeli jednak co najmniej jedno z ww. wymagań nie może być spełnione, to należy przedstawić dowód, że własności materiału po spawaniu i obróbce cieplnej były badane i spełniają określone minimalne wymagania. Może to być realizowane poprzez:

- elementy próbne poddane obróbce cieplnej wraz z urządzeniem ciśnieniowym lub

- elementy próbne poddane symulowanej obróbce cieplnej przez dostawcę materiału, lub

- elementy próbne poddane symulowanej obróbce cieplnej przez wytwórcę urządzenia ciśnieniowego.

d) W przypadku połączeń mieszanych, jeżeli maksymalna temperatura wygrzewania (wg tabelicy 11.1-1 normy) wymagana dla gatunku materiału o mniejszej zawartości składników stopowych jest równa lub większa od minimalnej wymaganej temperatury wygrzewania dla drugiego gatunku materiału (o większej zawartości składników stopowych – np. połączenie 16Mo3/13CrMo4-5), to obróbka cieplna powinna być przeprowadzona w najniższej temperaturze dopuszczalnej dla materiału o większej zawartości składników stopowych.

Rozważyć należy wpływ ww. temperatury i czasu wygrzewania na własności mechaniczne materiału o niższej zawartości składników stopowych.

Jeżeli maksymalna dopuszczalna temperatura wygrzewania (wg tabelicy 11.1-1) dla materiału o mniejszej zawartości składników stopowych jest mniejsza od minimalnej wymaganej temperatury wygrzewania dla materiału o większej zawartości składników (np. połączenie 13CrMo4-5/P91), to należy wybrać jeden z opisanych poniżej sposobów postępowania.

• Należy wykonać obróbkę cieplną po spawaniu połączenia mieszanego, stosując temperaturę wygrzewania równą minimalnej wymaganej temperaturze wygrzewania dla materiału o większej zawartości składników stopowych oraz symulowaną obróbkę cieplną (z zastosowaniem tej samej temperatury wygrzewania) dla materiału o mniejszej zawartości składników stopowych w celu określenia własności mechanicznych na etapie projektowania. Oprócz próby rozciągania zakres badań powinien obejmować również badania udarności oraz mikrostruktury.

• Należy dokonać zmian w projekcie uwzględniających wprowadzenie materiału pośredniego (np. 13CrMo4-5/10CrMo9-10/ P91).

• Należy przeprowadzić napawanie powierzchni czotowych połączenia mieszanego z zastosowaniem spoiwa o strukturze austenitycznej (składzie odpowiadającym stali austenitycznej lub stopowi niklu), a następnie wykonać odpowiednią obróbkę cieplną odrębnie dla każdego z elementów, które będą podlegały łączeniu. Spawanie elementów napawanych należy przeprowadzić z zastosowaniem spoiwa o strukturze austenitycznej bez obróbki cieplnej po spawaniu.

Podjęcie oparte na wykorzystaniu parametru Hollomona-Jaffe'a jest również wprowadzane do innych norm zharmonizowanych z dyrektywą ciśnieniową (PED), np. PN-EN 13480-4 [3]. W najnowszym wydaniu normy PN-EN 12952-5 [4] parametr ten niestety nie jest ujęty. Podkreślić jednak należy, że zaleca się stosowanie parametru Hollomona-Jaffe'a również w przypadku obróbki cieplnej złączy spawanych elementów kotłów wodnorurowych. Pogląd ten znajduje potwierdzenie również w wymaganiach opisanych w raporcie technicznym ISO/TR 14745 [7].

Praktyczne zastosowanie parametru Hollomona-Jaffe'a ilustrują zamieszczone poniżej przykłady.

PRZYKŁAD 1

Podczas kwalifikowania technologii z obróbką cieplną po spawaniu wg wymagań norm PN-EN ISO 15614-1 [1] oraz PN-EN 13445-4 [2] wykonano doczołowe złącze próbne rur w gat. 13CrMo4-5 o średnicy zewnętrznej 273,0 mm oraz nominalnej grubości ścianki $e_n = 20$ mm (spawanie wielościęgowe). Technologia spawania ma być stosowana podczas wytwarzania zbiorników ciśnieniowych zgodnie z PN-EN 13445-4 [2].

Określić należy czas i temperaturę wygrzewania złącza próbnego.

ROZWIĄZANIE

Zgodnie z tablicą 7 PN-EN ISO 15614-1 [1] uzyskany zakres grubości ścianki wynosi 10–40 mm.

Zgodnie z tablicą 11.1-1 PN-EN 13445-4 [2] temperatura wygrzewania dla ww. stali wynosi 620–680°C, a czas wygrzewania 30 min dla grubości ścianki $t \leq 15$ mm oraz $2e_n$ dla $15 < t \leq 60$ mm.

Podczas określania minimalnego czasu obróbki cieplnej złącza próbnego należy uwzględnić:

- maksymalną grubość z oczekiwanego zakresu kwalifikacji, która dla podanego przykładu kwalifikowania technologii wynosi 40 mm;
- konieczność przeprowadzenia napraw (z kolejną obróbką cieplną).

Norma wyrobu PN-EN 13445-4 wprowadza zastrzeżenia w zakresie dopuszczalnej wartości parametru Hollomona-Jaffe'a (P_{crit}). Dla stali 13CrMo4-5 $P_{crit} = 18,5$.

Przyjmując temperaturę wygrzewania 650°C, można wyznaczyć dopuszczalny czas wygrzewania (bez konieczności ponownego badania własności mechanicznych).

$$18,5 = (650 + 273)(20 + \lg t)10^{-3}$$

$$t = 1 \text{ h} = 60 \text{ min.}$$

W celu spełnienia wymagań PN-EN 13445-4 [2] należy dla przewidywanego zakresu grubości, tj. do max 40 mm, przyjąć minimalny czas wygrzewania złącza próbnego:

- 80 min, gdy nie uwzględnia się konieczności przeprowadzenia naprawy,
- 160 min, gdy zakłada się konieczność przeprowadzenia jednej naprawy złącza (na całej grubości) z następną obróbką cieplną,
- 240 min, gdy zakłada się konieczność przeprowadzenia dwukrotnej naprawy złącza (na całej grubości) z następną obróbką cieplną.

Ewentualne naprawy w trakcie eksploatacji złączy spawanych powinny być przeprowadzane po uwzględnieniu odpowiedniego czasu wygrzewania podczas badania technologii.

UWAGA

Odpowiedzialność za dobór odpowiednio długiego czasu wygrzewania elementu próbnego podczas kwalifikowania technologii powinna spoczywać na wytwórcy, który powinien przewidywać liczbę napraw na etapie wytwarzania oraz ewentualnie eksploatacji.

Inspektor UDT zwraca uwagę wytwórcy na etapie kwalifikowania technologii na czynniki wpływające na dobór czasu wygrzewania, a podczas oceny na etapie wytwarzania, naprawy lub modernizacji przeprowadza walidację Protokołu Kwalifikowania Technologii Spawania (WPQR) oraz Instrukcji Technologicznej Spawania (WPS) i ustala, czy czas wygrzewania dla danego zastosowania znajduje odzwierciedlenie w procesie kwalifikowania technologii.

PRZYKŁAD 2

Podczas kwalifikowania technologii z obróbką cieplną po spawaniu wg wymagań norm PN-EN ISO 15614-1 [1] oraz PN-EN 13445-4 [2] wykonano doczołowe złącze próbne rur w gat. P265GH o średnicy zewnętrznej 273 mm oraz nominalnej grubości ścianki $e_n = 36$ mm (spawanie wielościęgowe). Technologia spawania ma być stosowana podczas wytwarzania zbiorników ciśnieniowych zgodnie z PN-EN 13445-4 [2].

Określić należy czas i temperaturę wygrzewania złącza próbnego.

ROZWIĄZANIE

Zgodnie z tablicą 7 PN-EN ISO 15614-1 uzyskany zakres grubości ścianki wynosi 18–72 mm.

Zgodnie z tablicą 11.1-1 PN-EN 13445-4 [2] temperatura wygrzewania dla ww. stali P265GH wynosi 550–600°C, a czas wygrzewania: $e_n - 5$ dla $35 < t \leq 90$ mm.

Podczas określania minimalnego czasu obróbki cieplnej złącza próbnego należy uwzględnić:

- maksymalną grubość z oczekiwanego zakresu kwalifikacji, która dla podanego przykładu kwalifikowania technologii wynosi 72 mm;
- konieczność przeprowadzenia napraw (z kolejną obróbką cieplną).

Norma wyrobu PN-EN 13445-4 [2] wprowadza zastrzeżenia w zakresie dopuszczalnej wartości parametru Hollomona-Jaffe'a (P_{crit}). Dla stali P265GH $P_{crit} = 17,5$.

Przyjmując temperaturę wygrzewania 600°C, można wyznaczyć dopuszczalny czas wygrzewania (bez konieczności ponownego badania własności mechanicznych)

$$17,5 = (600 + 273)(20 + \lg t)10^{-3}$$

$$t = 1,1 \text{ h} = 66 \text{ min.}$$

W celu spełnienia wymagań PN-EN 13445-4 [2] należy dla przewidywanego zakresu grubości, tj. do max 72 mm, przyjąć minimalny czas wygrzewania złącza próbnego:

- 67 min, gdy nie uwzględnia się konieczności przeprowadzenia naprawy;
- 134 min, gdy zakłada się konieczność przeprowadzenia jednej naprawy złącza z następną obróbką cieplną;
- 201 min, gdy zakłada się konieczność przeprowadzenia dwukrotnej naprawy złącza (na całej grubości) z następną obróbką cieplną.

Ewentualne naprawy w trakcie eksploatacji złączy spawanych powinny być przeprowadzane po uwzględnieniu odpowiedniego czasu wygrzewania podczas badania technologii.

Przyjmując temperaturę wygrzewania 570°C, można w tym przypadku w znaczący sposób skrócić czas wygrzewania złącza egzaminacyjnego oraz zapewnić możliwość zwiększenia czasu wygrzewania w warunkach produkcyjnych (np. w przypadku stosowania napraw):

$$17,5 = (570 + 273)(20 + \lg t)10^{-3}$$

$$t = 5,7 \text{ h} = 342 \text{ min.}$$

Przyjęcie mniejszej wartości temperatury wygrzewania z dopuszczalnego zakresu dla stali P265GH umożliwia znaczące zwiększenie czasu wygrzewania w warunkach produkcyjnych bez konieczności ponownego kwalifikowania technologii (badania własności mechanicznych). Dla złącza egzaminacyjnego (o grubości 36 mm) można przyjąć czas wygrzewania np. 45 min (w celu spełnienia kryterium: en -5), natomiast w warunkach produkcyjnych można zwiększyć czas wygrzewania aż do 342 min bez konieczności ponownego kwalifikowania technologii (badania własności mechanicznych).

WARTO ZAUWAŻYĆ

Czas wygrzewania w tym przypadku może być zwiększony na podstawie zapisów normy wskazujących na możliwość przyjęcia wyższych wartości parametru Hollomona-Jaffe'a, jeżeli zgodnie z odpowiednim świadectwem odbioru R_m , $R_{p0,2}$ oraz praca łamania przekraczają określone wartości minimalne.

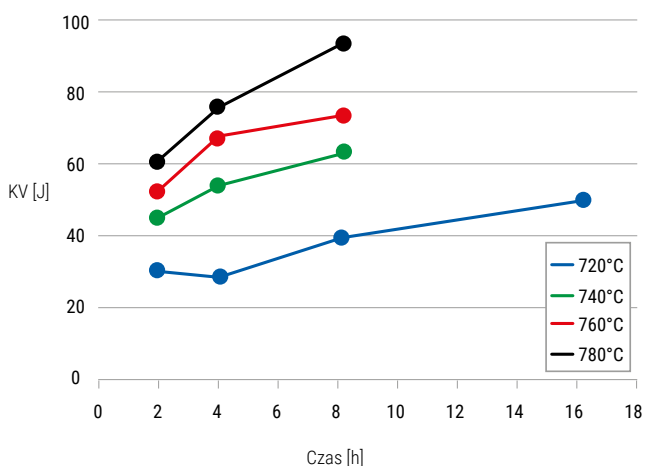
Ze stosowaniem parametru Hollomona-Jaffe'a związane są następujące zasadnicze zagadnienia:

UWAGA

- parametr ten uwzględnia wpływ długiego czasu na własności mechaniczne,
- parametr ten nie uwzględnia zagadnienia minimalnego czasu wygrzewania niezbędnego do uzyskania wymaganej pracy łamania (w odpowiednio niskich temperaturach).

Zgodnie z tablicą 11.1-1 PN-EN 13445-4 [2] oraz ISO/TR 14475 [7] parametr Hollomona-Jaffe'a nie jest określony dla niektórych stali, np. grupy 6.4, w tym m.in. P92, X20CrMoV11-1. W przypadku ww. gatunków stali wpływ czasu wygrzewania na własności mechaniczne, w szczególności wartości pracy łamania, jest bardzo złożony (rys. 2) w porównaniu z innymi gatunkami stali, np. P91 (rys. 1). Zasadne wydaje się dlatego podejście związane z badaniem wpływu czasu wygrzewania wyrażone w ASME BPVC Sekcji IX (QW-407.1 i 407.2).

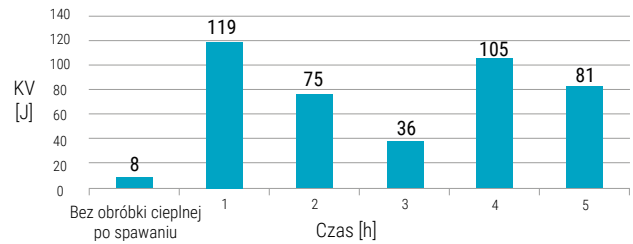
Gatunek elektrody otulonej: Thermanit Chromo 9V



Rys. 1. Wpływ czasu wygrzewania podczas obróbki cieplnej po spawaniu na pracę łamania w spoinie elementów ze stali gat. P91 [10]

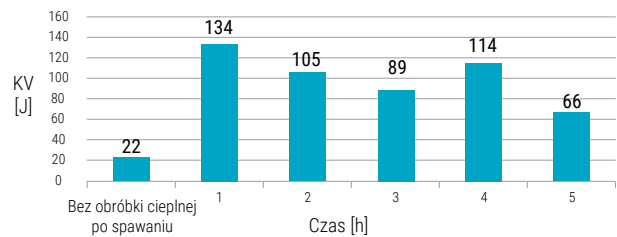
a)

Wartości średnie pracy łamania w spoinie, temperatura wygrzewania 760°C



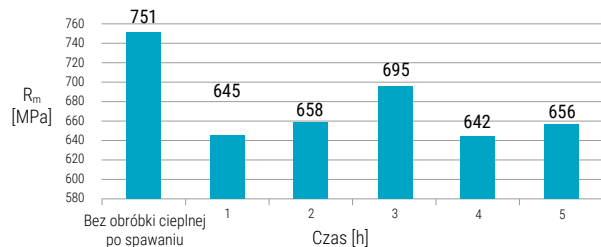
b)

Wartości średnie pracy łamania w strefie wpływu ciepła, temperatura wygrzewania 760°C



c)

Wartości średnie wytrzymałości na rozciąganie, temperatura wygrzewania 760°C



Rys. 2. Wpływ czasu wygrzewania podczas obróbki cieplnej po spawaniu na własności złączy spawanych ze stali gat. P92: a) praca łamania w spoinie, b) praca łamania w SWC, c) wytrzymałość na rozciąganie [10]

PODSUMOWANIE

Kwalifikowanie technologii z obróbką cieplną po spawaniu nie może być przeprowadzone bez uwzględnienia wymagań ujętych w normach dotyczących zastosowania (normach wyrobów) lub uznanych specyfikacjach technicznych.

Wielkość P_{crit} parametru Hollomona-Jaffe'a nie powinna być interpretowana jako wartość graniczna, która nie może być przekroczona. W warunkach produkcyjnych, a niekiedy nawet na etapie kwalifikowania technologii spawania wytwórca bardzo często musi stosować wartości temperatury i czasu wygrzewania (charakterystyczne dla danego gatunku stali i grubości ścianki), które powodują przekroczenie wartości P_{crit} . Przypadki te dotyczą zwłaszcza stali o większej zawartości składników stopowych oraz grubości ścianki. Wielkość P_{crit} powinna być interpretowana w ten sposób, że przekroczenie tej wartości skutkuje ko-

niecznością przeprowadzenia ponownego badania wpływu temperatury i czasu wygrzewania na własności wytrzymałościowe oraz plastyczne. Innymi słowy, jeżeli czas wygrzewania w warunkach produkcyjnych lub na etapie naprawy/modernizacji musi być dłuższy od stosowanego na etapie kwalifikowania technologii spawania oraz przekracza wartość wyznaczoną ze wzoru Hollomona-Jaffe'a (na podstawie przyjętej wartości temperatury wygrzewania i parametru P_{crit} dla danego gatunku stali), to należy zrealizować ponowne badanie technologii obejmujące wpływ tego dłuższego czasu wygrzewania na ww. własności.

Charakterystyczna cecha wzoru Hollomona-Jaffe'a polega na tym, że dla określonej wartości P_{crit} niewielka zmiana wartości temperatury wygrzewania w ramach zakresu dopuszczalnego powoduje znaczącą zmianę wartości czasu wygrzewania, której przekroczenie wymaga ponownego badania technologii.

Brak danych dotyczących wartości P_{crit} dla niektórych gatunków stali wynika ze złożoności wpływu temperatury oraz czasu wygrzewania na własności wytrzymałościowe i plastyczne. Innymi słowy, dla niektórych materiałów podstawowych i ich złączy spawanych nie można określić jednoznacznej tendencji zmian ww. własności. W tych szczególnych przypadkach podczas kwalifikowania technologii należy określić wpływ różnych wartości temperatur i czasów wygrzewania stosowanych w warunkach produkcyjnych (lub podczas naprawy/modernizacji) na własności wytrzymałościowe i plastyczne.

Literatura:

1. PN-EN ISO 15614-1:2017+A1:2019 – Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali – Badanie technologii spawania – Część 1: Spawanie łukowe i gazowe stali oraz spawanie łukowe niklu i stopów niklu.
2. PN-EN 13445-4:2021 – Nieogrzewane płomieniem zbiorniki ciśnieniowe – Część 4: Wytwarzanie.
3. PN-EN 13480-4:2017 – Rurociągi przemysłowe metalowe – Część 4: Wykonanie i montaż.
4. PN-EN 12952-5:2022 – Kotły wodnorurowe i urządzenia pomocnicze – Część 5: Wytwarzanie i budowa części ciśnieniowych kotłów.
5. PN-EN 12952-6:2022 – Kotły wodnorurowe i urządzenia pomocnicze – Część 6: Badania podczas wytwarzania, sporządzanie dokumentacji i znakowanie części ciśnieniowych kotłów.
6. WUDT/UC/2003:2017 – Urządzenia ciśnieniowe – Warunki Urzędu Dozoru Technicznego.
7. ISO/TR 14745:2015 – Welding – Post – heat treatment parameters for steels.
8. ISO/TR 15608:2017 – Welding – Guidelines for metallic materials grouping system.
9. PN-EN 10028-2:2017 – Wyroby płaskie ze stali na urządzenia ciśnieniowe – Część 2: Stale niestopowe i stopowe o określonych własnościach w podwyższonych temperaturach.
10. P. Mohyla, K. Foldynowa, M. Lindowsky, A. Zapletalova, *Investigation of mechanical properties of P92 welded joints made by MMAW*, Metal 2013, 15–17.05.2013 r., Brno.

