

Trwałość zmęczeniowa złączy spawanych na podkładce stalowej z dużym odstępem między łączonymi brzegami

Fatigue life of joints welded on steel backing strip with large gap between joined edges

Streszczenie

Według PN-EN ISO 9692-1, wykonanie złączy spawanych na podkładce stalowej wymaga dotrzymania warunku maksymalnego odstępu między łączonymi elementami. W niektórych przypadkach zwiększenie tego odstępu byłoby technicznie uzasadnione. Z tego powodu podjęto pracę mającą na celu określenie wpływu odstępu między łączonymi elementami na trwałość zmęczeniową złączy spawanych. Opracowanie podaje opis wyników przeprowadzonych badań oraz sformułowane na ich podstawie wnioski.

Słowa kluczowe: trwałość; zmęczenie; złącze; odstęp

Abstract

Making of welded joints on steel backing strip, according to PN-EN ISO 9692-1, requires meeting of the condition on maximum gap between components to be joined. In some cases increasing of this gap could be technically justified. For this reason research into the impact of the gap between welded elements on fatigue life of joints has been undertaken. This article gives the description of the results of conducted research and conclusions drawn on their basis.

Keywords: life; fatigue; joint; gap

Wprowadzenie

W praktyce spawalniczej spawanie na podkładce stalowej stosuje się zwykle wtedy, gdy uzyskanie poprawnego kształtu grani spoiny jest utrudnione lub zachowanie wymaganego odstępu między łączonymi brzegami stanowi problem techniczny. Szczególnie dotyczy to konstrukcji o dużych wymiarach i skomplikowanym kształcie, czego przykładem może być przypadek opisany w pracy [1].

Zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 9692-1, maksymalny odstęp między łączonymi brzegami podczas spawania na podkładce stalowej wynosi 15 mm. Jeżeli jest on większy, procedura naprawy przewiduje napawanie jednego brzegu, nieniszczącą kontrolę jakości warstw napawanych oraz ich szlifowanie celem wyrównania powierzchni. Jest to proces bardzo kosztowny, szczególnie jeżeli zachodzi potrzeba poprawy napoin. Zachowanie odstępu większego niż normatywny byłoby łatwiejsze i zdecydowanie tańsze w wykonaniu. Należy jednak zauważyć, że większy odstęp prowadzi do zwiększenia objętości spoiny, co z kolei zwiększa prawdopodobieństwo powstania w spoinie nieakceptowalnych niezgodności spawalniczych. W konsekwencji może to prowadzić do obniżenia trwałości eksploatacyjnej wykonanego połączenia. Z tego powodu podjęto badania, polegające

na określeniu wpływu odstępu między łączonymi elementami (brzegami) na trwałość zmęczeniową złączy spawanych na podkładce stalowej, bez jej usuwania po spawaniu. Aby osiągnąć ten cel, wykonano płyty próbne ze stali S355J2+N ze spoinami czołowymi na podkładce stalowej. Do wykonania spoin zastosowano spawanie metodą MAG drutem elektrodowym litym (proces 135) przy różnych odstępach między łączonymi brzegami.

Materiały do badań

Do badań dysponowano blachą stalową o grubości 20 mm w gatunku S355J2+N po normalizacji w stanie dostawy.

Do spawania stali S355J2+N z wykorzystaniem procesu 135 zastosowano drut w gatunku SpG4S (ISO 14341 – A: G50 5 M21 4Si1) o średnicy 1,2 mm.

Drut SpG4S zapewnia stopiwo o granicy plastyczności zbliżonej do granicy plastyczności stali S355J2. Jako gaz osłonowy podczas spawania zastosowano typową mieszankę o zawartości 80% argonu i 20% dwutlenku węgla (mieszanka ISO 14175 – M21 – ArC – 20).

Mgr inż. Janusz Czuchryj, mgr inż. Sławomir Sikora – Instytut Spawalnictwa w Gliwicach.

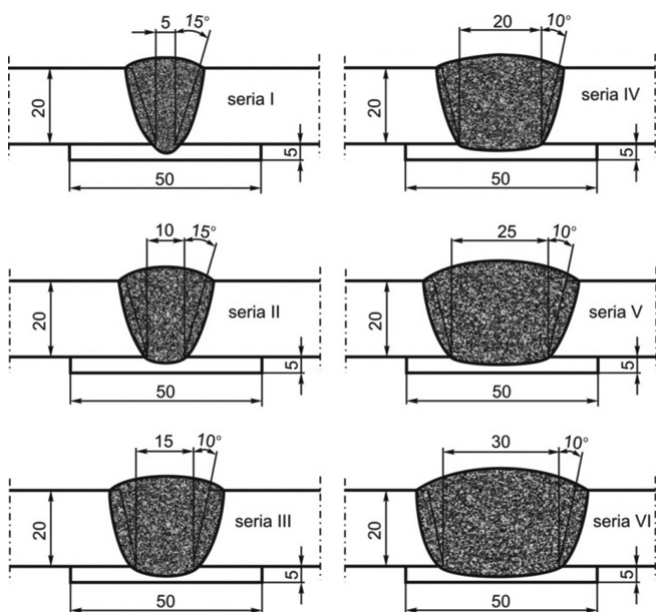
Autor korespondencyjny/Corresponding author: slawomir.sikora@is.gliwice.pl

Kształt, wymiary i wykonanie próbek

Ze stali S355J2 o grubości 20 mm wykonano złącza próbne na podkładce stalowej, o wymiarach 500 x 500 mm, charakteryzujące się zmiennym odstępem między łączonymi elementami (rys. 1), z których wycięto próbki do badań zmęczeniowych (rys. 2).

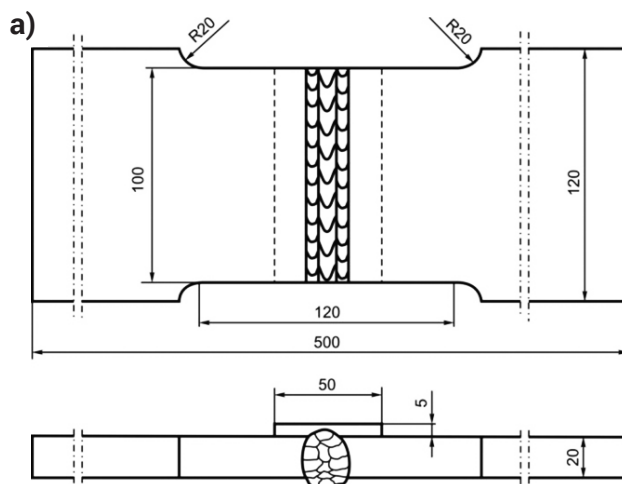
Złącza próbne na podkładce wykonano metodą MAG (prądem stałym o biegunowości dodatniej) w pozycji podłonej z wykorzystaniem zmechanizowanego stanowiska Multi Surfacer D2 produkcji Welding Alloys. Ilość wykonywanych warstw i ściegów była uwarunkowana odstępem między łączonymi brzegami. Parametry spawania poszczególnych rodzajów złączy zestawiono w tabelicy I.

Dla zminimalizowania odkształceń kątowych płyt próbnych, zastosowano przeciwokształcenia polegające na wykorzystaniu podparcia podkładki o odpowiedniej wysokości (rys. 3).



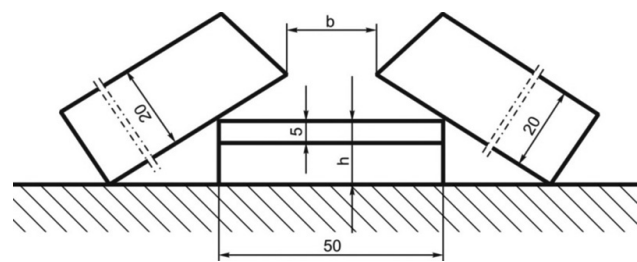
Rys. 1. Rodzaje złączy próbnych; uwaga: jako podkładkę wykorzystano płaskownik o grubości 5 mm i szerokości 50 mm ze stali S355J2

Fig. 1. Types of testing joints; note: 5 mm thick S355J2 steel flat bar of 50 mm width was used as a backing strip



Rys. 2. Kształt i wymiary próbek do badań zmęczeniowych: a) schemat próbek, b) widok próbki

Fig. 2. Shape and dimensions of samples for fatigue testing: a) sample diagram, b) view of a sample



Rys. 3. Schemat przeciwokształcenia minimalizującego odkształcenie kątowe płyty próbnej; h – wysokość podparcia, b – odstęp między łączonymi brzegami

Fig. 3. Diagram of the counter-strain minimizing the angle strain of a testing plate; h – height of bearing, b – distance between edges being joined

Tablica I. Parametry spawania złączy próbnych na podkładce stalowej
Table I. Welding parameters of test joints on steel backing

Parametry / Rodzaj złącza	I	II	III	IV	V	VI
Liczba warstw i ściegów	13	19	22	22	31	39
Natężenie prądu, A	220÷250	220÷240	220÷255	230÷245	230÷250	225÷275
Prędkość podawania drutu, m/min	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Napięcie łuku, V	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5
Wylot drutu elektrodowego, mm	18÷22	18÷22	17÷20	15÷18	15÷20	16÷20
Przepływ gazu osłonowego, l/min	20	20	20	18÷22	18÷20	20
Prędkość spawania warstwy lub ściegu, mm/min	350÷500	400÷450	400	400	400	400÷450
Temperatura międzyściegowa, °C	200	200	200	200	200	200

W przypadku złącza oznaczonego cyfrą I wykorzystano podparcie o wysokości 16 mm, w przypadku złączy II, III, IV i V o wysokości 25 mm, natomiast w przypadku złącza VI o wysokości 30 mm.

Elementy płyt próbnych ustalono względem siebie do spawania za pomocą spoin szczepnych. Spoiny szcpe wykonane w obrębie rowka spawalniczego (w miejscu ułożenia spoiny).

Z każdej płyty próbnej wycięto za pomocą piły taśmowej 3 sztuki elementów, z których za pomocą obróbki mechanicznej skrawaniem wykonano próbki do badań zmęczeniowych.

Kontrola próbek

Złącza spawane próbek do badań zmęczeniowych poddano kontroli powierzchniowej za pomocą badań wizualnych i penetracyjnych oraz kontroli objętościowej za pomocą badań radiograficznych.

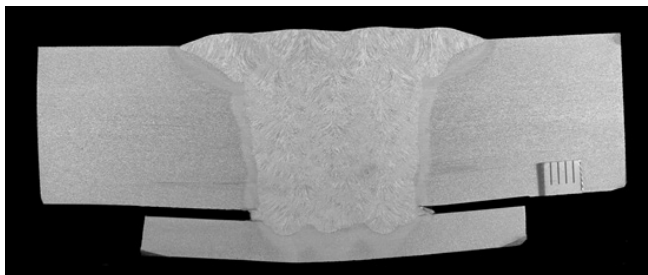
Badania wizualne złączy próbek przeprowadzono zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 17637, natomiast ocenę jakości ich wykonania zgodnie z PN-EN ISO 5817. Badania nie wykazały obecności pęknięć na badanych powierzchniach. Ze względu na występujące na powierzchni niezgodności spawalnicze sklasyfikowano złącza na poziomie jakości B.

Badania penetracyjne złączy próbek, przeprowadzone zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 3452-1 i ocenione zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 23277, nie wykazały obecności na badanych powierzchniach ani wskazań liniowych, ani nielinowych. Zgodnie z PN-EN ISO 17635 badane złącza sklasyfikowano na poziomie jakości wykonania B. Jak widać, wyniki badań penetracyjnych potwierdzają wyniki kontroli złączy próbek do badań zmęczeniowych za pomocą badań wizualnych.

Badania radiograficzne złączy próbek przeprowadzono zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 5579 oraz PN-EN ISO 17636-1. Ocenę jakości złączy na podstawie badań radiograficznych przeprowadzono zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 10675-1. Badania radiograficzne wykazały w objętości badanych złączy obecność rozproszonych pęcherzy gazowych, których wymiar graniczny umożliwia sklasyfikowanie połączeń na poziomie akceptacji 1, co z kolei jest tożsamy z poziomem jakości ich wykonania B.

Podsumowując, można stwierdzić, że złącza próbek do badań zmęczeniowych, kontrolowane za pomocą badań nieniszczących, charakteryzowały się wysoką jakością wykonania, czego dowodem było ich sklasyfikowanie na poziomie jakości B wg wymagań PN-EN ISO 5817.

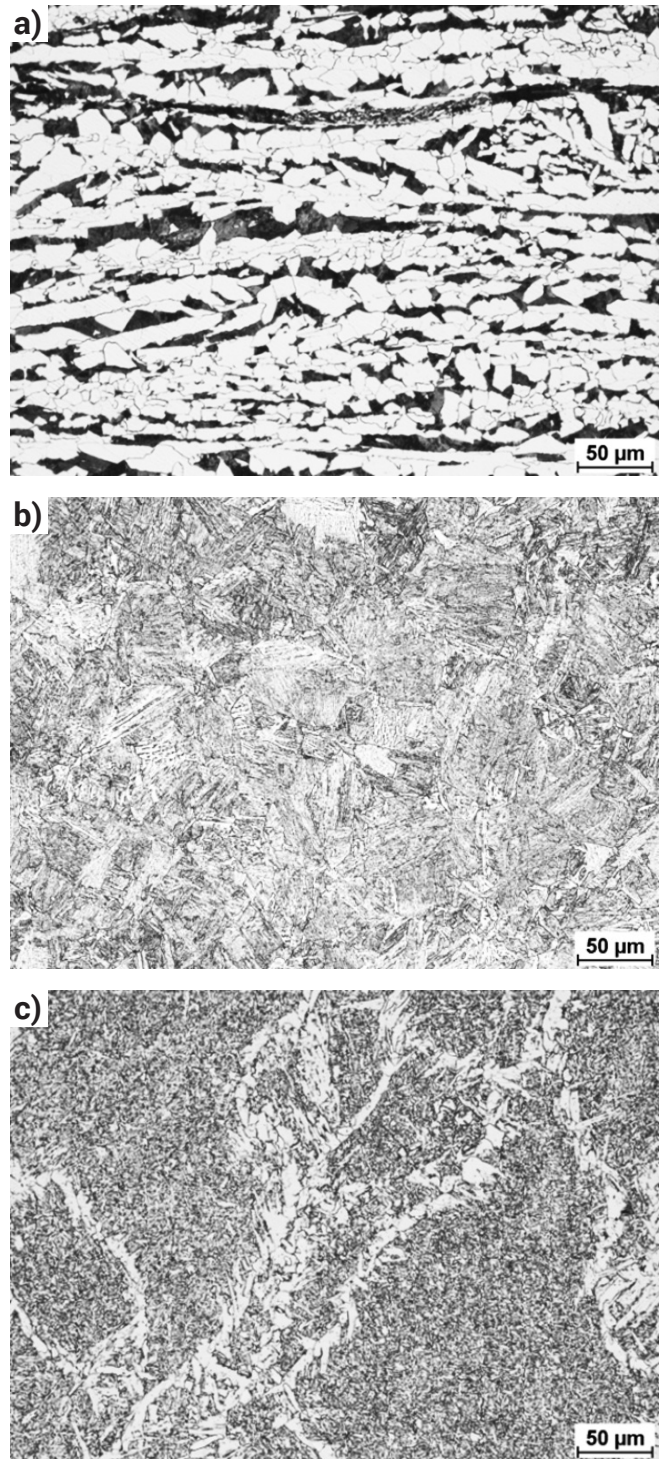
Prawidłowość ułożenia warstw i ściegów oraz struktury poszczególnych stref złączy na podkładce stalowej określono na podstawie badań metalograficznych [2]. Z wykonanych złączy próbnych wycięto elementy, z których wykonano zgłady makroskopowe (rys. 4) i mikroskopowe (rys. 5).



Rys. 4. Przykład zgładu makroskopowego złącza wykonanego na podkładce stalowej z odstępem między połączonymi brzegami równym 20 mm

Fig. 4. Example of macroscopic microsection of a joint made on steel backing with the 20 mm distance between joined edges

Z analizy rysunku 4 wynika, że wykonane złącza charakteryzowały się prawidłowym ułożeniem poszczególnych warstw i ściegów w objętości spoiny. Również ich wtopienie w podkładkę i brzegi rowka spawalniczego nie budzi zastrzeżeń. Natomiast pokazane na rysunku 5 struktury są zgodne z oczekiwaniami. Stanowi to dodatkowe potwierdzenie prawidłowości wykonania próbek do badań zmęczeniowych.



Rys. 5. Przykład struktur złącza wykonanego na podkładce stalowej z odstępem między połączonymi brzegami równym 20 mm:

a) struktura stali S355J2: ferryt + perlit, traw.: nital, pow.: 200 x;

b) struktura strefy wpływu ciepła: bainit, traw.: nital, pow.: 200 x;

c) struktura spoiny: bainit w siatce ferrytu, traw.: nital, pow.: 200 x

Fig. 5. Example of the structures of a joint made on steel backing with the 20 mm distance between joined edges:

a) structure of S355J2 steel: ferrite + perlite, etching: nital, mag. 200 x;

b) structure of heat affected zone: bainite, etching: nital, mag. 200 x;

c) structure of a weld: bainite in a ferrite network; etching: nital, mag. 200 x;

Przeprowadzone badania i ich wyniki

Badania zmęczeniowe próbek ze złączami doczołowymi na podkładce stalowej i zmiennym odstępem między połączonymi elementami przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej MTS 810 produkcji amerykańskiej, na jednym poziomie naprężenia σ_{max} równym 225 MPa. Do badań przyjęto współczynnik asymetrii obciążenia $R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = +0,2$. Zatem obciążenie próbek podczas badań wynosiło: $\sigma_{max} = 225$ MPa, $\sigma_{min} = 45$ MPa. Wyniki badań zmęczeniowych zestawiono w tabelicy II i w sposób poglądowy pokazano na rysunku 6.

Wyniki badań zmęczeniowych poddano analizie statystycznej. W oparciu o rozkład t – Studenta [3÷5] wyznaczono, 90% przedziały ufności, w których zawarte są średnie generalne „m” wyników badań oraz 90% przedziały ufności, w których zawarte są poszczególne wyniki „N” badań. Granice przedziałów ufności dla średnich generalnych określa się z zależności:

$$\bar{N} - \zeta < m < \bar{N} + \zeta \quad (1)$$

gdzie:

$\bar{N} = \sum_{i=1}^n N_i / n$ – średnia arytmetyczna próby,

$\zeta = t_\alpha \cdot s / \sqrt{n}$ – dokładność próby,

N_i – wartości poszczególnych pomiarów,

t_α – wartość rozkładu t – Studenta określona dla liczby stopni swobody $k = n - 1$ i 90% poziomu ufności,

$s = \sqrt{1/(n-1) \sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}$ – odchylenie standardowe,

natomiast dla poszczególnych wyników z zależności:

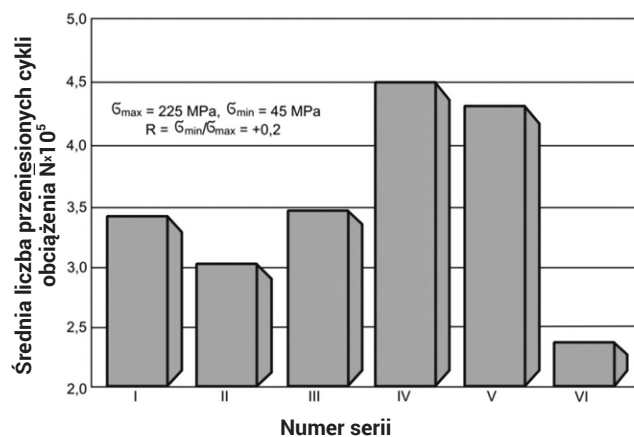
$$\bar{N} - \zeta_N < N < \bar{N} + \zeta_N \quad (2)$$

gdzie:

$\zeta_N = t_\alpha \cdot s$ – dokładność próby.

Wyniki analizy statystycznej, w postaci graficznej, pokazano na rysunku 7.

Z analizy tabelicy II oraz rysunków 6 i 7 wynika, że najwyższą trwałością zmęczeniową charakteryzują się próbki serii IV (próbki z odstępem między połączonymi elementami



Rys. 6. Poglądowe zobrazowanie średnich wartości żywotności próbek ze złączami na podkładce i o różnym odstępem między połączonymi elementami

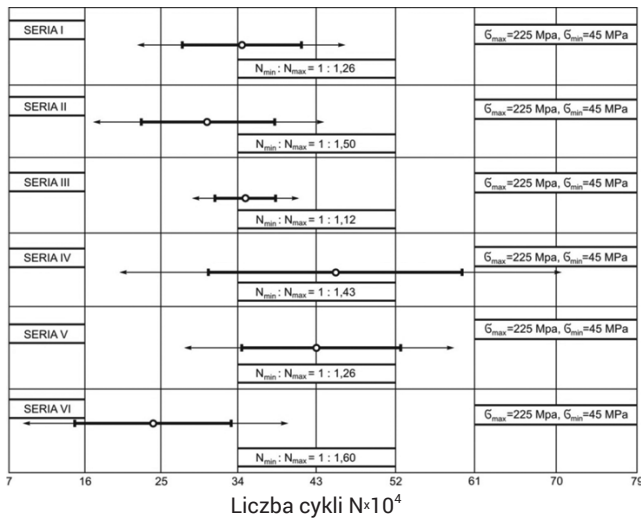
Fig. 6. Pictorial presentation of medium life of samples with joints on a backing and various distance between components being joined

równym 20 mm), natomiast najniższą próbki serii VI (próbki z odstępem między połączonymi elementami równym 30 mm). Należy jednak zauważyć, że wyliczone przedziały ufności dla wartości średnich żywotności próbek serii I, II, III, IV i V wzajemnie się nakładają, co oznacza nieistotność występujących między nimi różnic. Zatem wyniki badań próbek serii I do V stanowią ten sam zbiór. W porównaniu do serii V wyniki żywotności próbek serii VI nieco się różnią (przedziały ufności tych serii się nie nakładają). Występuje zatem między nimi niewielka różnica. Jednak porównanie wyników żywotności próbek serii VI z pozostałymi seriami wykazuje nieistotność występujących różnic, ponieważ przedziały ufności w tym przypadku nakładają się. W konsekwencji można wnioskować, że wyniki badań żywotności próbek wszystkich serii należą do tego samego zbioru. Wniosek ten potwierdza analiza rozrzutu wyników badań zmęczeniowych ($N_{min} : N_{max}$) próbek różnych serii (rys. 7). Mieści się

Tabela II. Wyniki badań zmęczeniowych złączy spawanych na podkładce, ze stali S355J2, z różnym odstępem między połączonymi elementami

Table II. Results of fatigue tests of joints welded on a backing, made of S355J2 steel, with various distance between the joined elements

Lp.	Odstęp między połączonymi elementami, mm	Numer serii	Numer próbki	Liczba przeniesionych cykli obciążenia n	Średnia liczba przeniesionych cykli obciążenia N	Uwagi
1	5	I	1	330622	343845	Inicjacja pęknięcia w przejściu grani spoiny czołowej do materiału spawanego i podkładki.
2			310700			
3			390212			
4	10	II	1	239609	304267	Inicjacja pęknięcia w przejściu grani spoiny czołowej do materiału spawanego i podkładki.
5			358714			
6			314477			
7	15	III	1	339004	348171	Inicjacja pęknięcia w przejściu grani spoiny czołowej do materiału spawanego i podkładki.
8			332817			
9			372692			
10	20	IV	1	419639	451760	Inicjacja pęknięcia w przejściu grani spoiny czołowej do materiału spawanego i podkładki.
11			385417			
12			550223			
13	25	V	1	393936	433267	Inicjacja pęknięcia w przejściu grani spoiny czołowej do materiału spawanego i podkładki.
14			411308			
15			494557			
16	30	VI	1	282964	237939	Inicjacja pęknięcia w przejściu grani spoiny czołowej do materiału spawanego i podkładki.
17			254354			
18			176499			



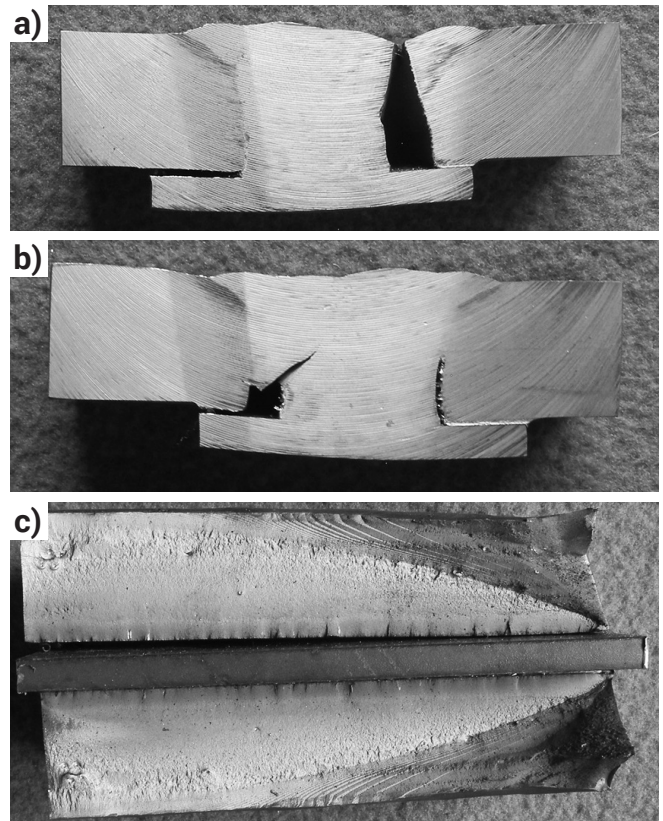
Rys. 7. Przedziały ufności dla wartości średnich żywotności i wyników żywotności próbek ze złączami na podkładce i o różnym odstępie między połączonymi elementami: — — 90% przedział ufności dla wartości średniej; \leftrightarrow — 90% przedział ufności dla wyników badań; \circ — wartość średnia

Fig. 7. Confidence intervals for mean value of life and live results of the samples with joints on a backing and various distance between components being joined: — — 90% confidence interval for mean value; \leftrightarrow — 90% confidence interval for testing results; \circ — mean value

on w zakresie od 1 : 1,12 do 1 : 1,60. Jest to rozrzut niewielki i świadczy o poprawności uzyskanych wyników badań.

We wszystkich przypadkach badanych próbek pęknięcia zmęczeniowe inicjowane były od przejścia grani spoiny do materiału spawanego i podkładki (rys. 8).

Miejsca inicjacji pęknięć i płaszczyzny rozwoju tych pęknięć są zgodne z oczekiwaniami [6]. Przejście grani spoiny do podkładki i materiału spawanego charakteryzuje się zdecydowanie wyższą koncentracją naprężeń niż koncentracja spowodowana obecnością niewielkich pęcherzy gazowych,



Rys. 8. Miejsca inicjacji pęknięć zmęczeniowych badanych próbek: a), b) widok pęknięć na przekroju poprzecznym złącza, c) widok przełomu zmęczeniowego z widocznym ogniskiem pęknięcia
Fig. 8. An example of fatigue crack initiation in samples being tested: a), b) view of cracks in cross-section of a joint, c) view of fatigue fracture with visible cracking centre

rozproszonych w objętości spoiny (podczas kontroli radiograficznej złącza zakwalifikowano do poziomu jakości wykonania B) i jest w tym przypadku cechą dominującą.

Podsumowanie i wnioski

W niektórych przypadkach konstrukcji stalowych, zwykle o dużych wymiarach i pracujących w warunkach zmiennego stanu obciążenia, zachodzi konieczność spawania brzegów ich elementów konstrukcyjnych na podkładce stalowej, czasami z odstępem większym niż to przewidują normy dotyczące stosowania. Jednak ze wzrostem odstępów rośnie objętość wykonywanej spoiny oraz liczba potencjalnych inicjatorów pęknięcia zmęczeniowego i statystyczne prawdopodobieństwo jego zainicjowania. Z tego powodu podjęto badania zmęczeniowe próbek ze złączami doczołowymi na podkładce stalowej i ze zmiennym odstępem (5÷30 mm) między łączonymi brzegami. Intencją przeprowadzania badań było uzyskanie dodatkowych wskaźników, umożliwiających łatwiejsze i tańsze wykonawstwo konstrukcji spawanych pracujących pod obciążeniami zmiennymi, przy wysokim bezpieczeństwie tych konstrukcji podczas eksploatacji.

Wykonane złącza próbne poddano kontroli nieniszczącej, polegającej na przeprowadzeniu badań wizualnych, penetracyjnych i radiograficznych. Zarówno badania wizualne, jak i penetracyjne nie wykazały obecności pęknięć na badanych powierzchniach. Zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 5817, złącza sklasyfikowano na poziomie jakości wykonania B. Identyfikacyjny wynik kontroli uzyskano po przeprowadzeniu badań radiograficznych. Na radiogramach zarejestrowano obecność niewielkich pęcherzy rozproszonych, których liczba i wielkość spełniają wymagania obowiązujące dla poziomu jakości wykonania B. Uzyskane wyniki kontroli świadczą o poprawności zastosowanej do spawania złączy próbnych technologii spawania oraz wykazują wysoką jakość ich wykonania.

Sformułowany wniosek potwierdza przeprowadzone badania makroskopowe złączy próbnych. Na ich podstawie stwierdzono prawidłowe wtopienie pierwszej warstwy w materiał podstawowy i podkładkę oraz prawidłowe ułożenie warstw wypełniających rowek spawalniczy. Struktury materiału podstawowego, strefy wpływu ciepła i spoiny złączy próbnych określono na podstawie badań mikroskopowych. Są one zgodne z oczekiwaniami, co stanowi dodatkowe potwierdzenie prawidłowości przyjętej technologii spawania tych złączy.

Badania zmęczeniowe próbek z różnym odstępem między połączonymi elementami przeprowadzono na jednym poziomie naprężenia $\sigma_{max}=225 \text{ MPa}$ i przy współczynniku asymetrii obciążenia $R=+0,2$. Wyniki badań poddano analizie

statystycznej, polegającej na wyznaczeniu 90% przedziałów ufności, w których zawarte są średnie generalne wyników badań oraz 90% przedziały ufności, w których zawarte są poszczególne wyniki badań. Wyniki analizy w postaci graficznej pokazano na rysunku 7. Z rysunku 7 wynika, że najwyższą trwałością zmęczeniową (żywością) charakteryzują się próbki z odstępem między połączonymi elementami równym 20 mm (seria IV), natomiast najniższą próbki z odstępem równym 30 mm (seria VI). Jak również widać, przedziały ufności dla średnich generalnych poszczególnych serii próbek wzajemnie się na siebie nakładają. Można stąd wnioskować o nieistotności występujących między nimi różnic. Zatem wyniki badań zmęczeniowych wszystkich próbek należą do tego samego zbioru.

We wszystkich przypadkach próbek z różnym odstępem między połączonymi elementami pęknięcia zmęczeniowe inicjowane były od przejścia grani spoiny do materiału podstawowego i podkładki. Płaszczyzna przełomów przebiegała prostopadle do osi podłużnej próbek. Jest to zgodne z oczekiwaniami, ponieważ przejście to w złączu na podkładce stalowej charakteryzuje się najwyższą koncentracją naprężeń. Natomiast przebieg płaszczyzny przełomów zmęczeniowych jest charakterystyczny dla elementów poddanych jednostronnemu rozciąganiu.

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Złącza spawane na podkładce stalowej, przeznaczone do badań zmęczeniowych, charakteryzowały się wysoką jakością wykonania, umożliwiającą ich sklasyfikowanie na poziomie jakości „B” wg wymagań normy PN-EN ISO 5817.
2. Trwałość zmęczeniowa złączy spawanych na podkładce stalowej z odstępem w grani spoin w zakresie 5÷30 mm jest taka sama.
3. Podczas wykonywania złączy spawanych na podkładce stalowej, można stosować w grani odstępów między łączonymi elementami w zakresie 5÷30 mm.
4. Wyniki przeprowadzonych badań mogą stanowić dodatkowy wskaźnik podczas projektowania konstrukcji spawanych pracujących w warunkach zmiennego stanu obciążenia.

Literatura

- [1] Praca badawcza Instytutu Spawalnictwa nr Id – 75: Nadzór naukowy nad procesem spawania przy realizacji Mostu Toruńskiego w Warszawie.
- [2] Łomozik M.: Metaloznawstwo i badania metalograficzne połączeń spawanych, Wydawnictwo Instytutu Spawalnictwa, Gliwice, 2005.
- [3] Dyląg Z., Orłowski Z.: Wytrzymałość zmęczeniowa materiałów, WNT, Warszawa, 1962.
- [4] Czerwiński J., Iwasiewicz A., Paszek Z., Sikorski A.: Metody statystyczne w doświadczeniach chemicznych, PWN, Warszawa, 1970.
- [5] Praca zbiorowa: Poradnik niezawodności. Podstawy matematyczne, WPM „WEMA”, Warszawa, 1982.
- [6] Robakowski T.: Wpływ wad w złączach spawanych na własności eksploatacyjne konstrukcji spawanych, Wydawnictwo Instytutu Spawalnictwa, Gliwice, 1997.