przegląd SPAWALNICTWA Welding Technology Review

DOI: http://dx.doi.org/10.26628/ps.v89i11.835

Trwałość eksploatacyjna złączy spawanych z nadmierną szerokością spoiny

Service life of welded joints with excessive width of the weld

Streszczenie

W złączach spawanych z metali dość częstym zjawiskiem jest występowanie niezgodności spawalniczej w postaci nadmiernej szerokości spoiny czołowej, oznaczonej w normie PN-EN ISO 6520-1 numerem odniesienia 5212.

W opracowaniu przedstawiono opis badań mających na celu określenie wpływu tej niezgodności na trwałość eksploatacyjną złączy spawanych. Przeanalizowano wyniki otrzymanych badań oraz sformułowano wnioski w zakresie wpływu nadmiernej szerokości lica na trwałość złączy spawanych.

Słowa kluczowe: trwałość; eksploatacja; złącze; niezgodność

Abstract

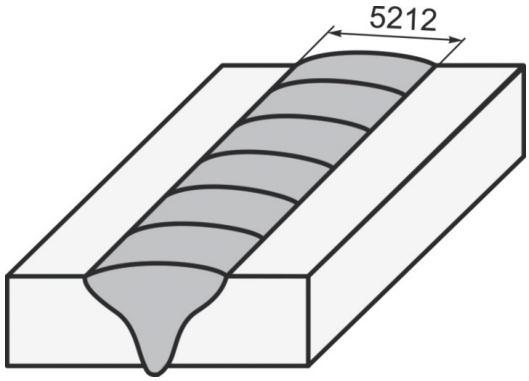
In joints welded in steel, a welding imperfection of excessive width of a butt weld, denoted as number 5212 in PN-EN ISO 6520-1 standard can occur quite frequently.

This article presents the description of research aimed at determination of this imperfection impact on service life of welded joints. The results of research have been analysed and conclusions on the influence of the excessive weld width on the service life of welded joints have been drawn.

Keywords: life; service; joint; imperfection

Wprowadzenie

Niezgodności spawalnicze występujące w złączach spawanych z metali sklasyfikowano w PN-EN ISO 6520-1 przez ich zaszeregowanie do sześciu grup. Spośród tych niezgodności liczną grupę stanowią niezgodności dotyczące kształtu i wymiarów wykonywanych połączeń, zaliczone do grupy piątej. W grupie tej występuje, między innymi, często spotykana w praktyce spawalniczej niezgodność w postaci nadmiernej szerokości spoiny czołowej, oznaczona numerem odniesienia 5212 (rys. 1) [1].



Rys. 1. Nadmierna szerokość spoiny
Fig. 1. Excessive weld width

Jak wynika z rysunku 1, nadmierna szerokość spoiny jest niezgodnością zewnętrzną, wykrywaną za pomocą badań wizualnych [2,3]. Jednak w PN-EN ISO 5817, zgodnie z wymaganiami której ocenia się jakość złączy spawanych z metali metodą wizualną, wartości granicznych tej niezgodności nie ustalono. Zatem nie wpływa ona na ostateczną ocenę połączenia. Niemniej należy zauważyć, że geometria spoiny z nadmierną szerokością znacznie różni się od przewidywanej. Może to znacząco wpływać na rozkład naprężeń w złączu i obniżać jego przydatność eksploatacyjną. Ponadto, ze wzrostem objętości spoiny rośnie prawdopodobieństwo powstania innych, niepożądanych niezgodności spawalniczych. Ich oddziaływanie na złącze jest zwykle negatywne. Z tego powodu podjęto badania wpływu nadmiernej szerokości spoiny na przydatność eksploatacyjną złączy spawanych. Do określenia tego wpływu przyjęto kryterium najostrzejsze z możliwych, a mianowicie kryterium zmęczeniowe.

Materiały do badań

Do badań zmęczeniowych dysponowano blachą stalową o grubości 12 mm w gatunku S355J2+N po normalizacji w stanie dostawy.

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

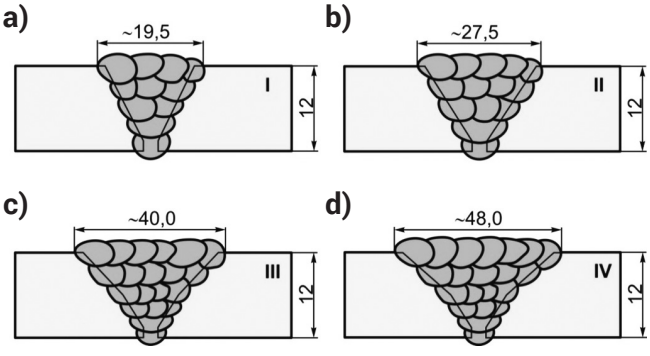
Autor korespondencyjny/Corresponding author: slawomir.sikora@is.gliwice.pl

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 materiału podstawowego. Jako gaz osłonowy zastosowano typową mieszankę o zawartości 80% argonu i 20% dwutlenku węgla (mieszanka ISO 14175 – M21 – ArC – 20).

Kształt, wymiary i wykonanie próbek

Ze stali S355J2 o grubości 12 mm wykonano 4 złącza próbne ukosowane na Y, na podkładce ceramicznej typu PS-52F20, o wymiarach 500 x 500 mm, charakteryzujące się zmienną szerokością lica wykonanych spoin (rys. 2).



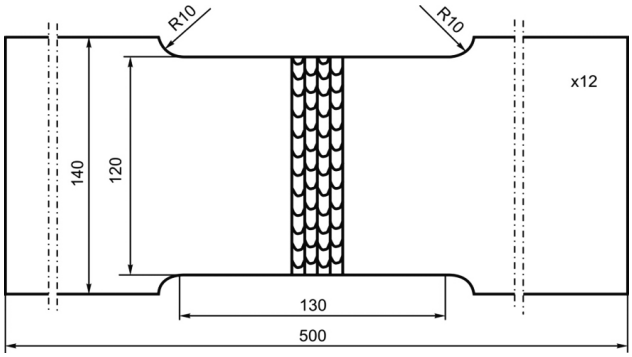
Rys. 2. Złącza próbne ze zmienną szerokością lica spoiny
Fig. 2. Testing joints having variable weld face width

Złącza próbne wykonano metodą MAG, prądem stałym o biegunowości dodatniej, w pozycji podolnej z wykorzystaniem stanowiska Multi Surfacer D2 produkcji Welding Alloys. Ilość wykonywanych warstw i ściegów była uwarunkowana szerokością lica wykonywanej spoiny. Parametry spawania poszczególnych rodzajów złączy zestawiono w tablicy I.

Ze złączy próbnych wycięto próbki do badań zmęczeniowych, których kształt i wymiary pokazano na rysunku 3.

Dla zminimalizowania odkształceń kątowych płyt próbnych zastosowano przeciwodkształcenie polegające na wykorzystaniu podparcia podkładki ceramicznej o wysokości 10 mm.

Elementy płyt próbnych ustalono względem siebie do spawania za pomocą spoin sczepnych. Spoiny sczepne wykonano w obrębie rowka spawalniczego (w miejscu układania spoiny).



Rys. 3. Kształt i wymiary próbek do badań zmęczeniowych
Fig. 3. Shape and dimensions of the samples for fatigue testing

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 za pomocą badań wizualnych, penetracyjnych i radiograficznych.

Badania wizualne złączy próbek przeprowadzono zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 17637, natomiast ocenę jakości ich wykonania zgodnie z normą PN-EN ISO 5817. Badania nie wykazały pęknięć na badanych powierzchniach. Uwzględniając przedmiot badań zmęczeniowych, w sposób szczegółowy przeprowadzono kontrolę wizualną niezgodności spawalniczych w postaci nadmiernej szerokości spoin. Wyniki pomiarów szerokości lica wykonanych spoin, wysokości ich nadlewu oraz klasyfikację jakości wykonania zestawiono w tablicy II.

Ze względu na występujące niezgodności spawalnicze, wszystkie złącza próbek do badań zmęczeniowych sklasyfikowano na poziomie jakości wykonania „B".

Badania penetracyjne złączy spawanych próbek przeprowadzono zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 3452-1 i oceniono zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 23277. Badania nie wykazały obecności na kontrolowanych powierzchniach ani wskazań liniowych, ani nieliniowych. Zgodnie z korelacją podaną w normie PN-EN ISO 17635 badane złącza sklasyfikowano na poziomie jakości wykonania „B".

Tablica I. Parametry spawania złączy próbnych ze stali S355J2 o grubości 12 mm
Table I. Welding parameters of the test joints made of S355J2 steel with a thickness of 12 mm

RODZAJ ZŁĄCZA / PARAMETRY	I	II	III	IV
Liczba warstw i ściegów	7	7	10	12
Natężenie prądu spawania, A	230÷260	208÷251	230÷260	232÷240
Napięcie łuku, V	19,8÷26,5	20,0÷26,0	21,0÷27,5	21,0÷27,5
Prędkość podawania drutu, m/min	6,5÷7,5	6,5÷7,5	6,5÷7,5	6,5÷7,5
Wylot drutu elektrodowego, mm	14÷16	14÷16	14÷16	14÷16
Przepływ gazu osłonowego, l/min	12÷14	12÷14	12÷14	12÷14
Prędkość spawania, cm/min	20÷55	20÷40	20÷55	20÷50
Temperatura międzyściegowa, °C	220	220	220	220

Tablica II. Wyniki pomiarów szerokości lica i wysokości nadlewu spoin czołowych próbek do badań zmęczeniowych
Table II. Measurements of the face width and padding weld height of the butt joint of samples for fatigue tests

Lp.	Numer próbki	Szerokość lica próbki b, mm	Wartość średnia $\overline{b}$, mm	Wysokość nadlewu h, mm	Wartość średnia $\overline{h}$, mm	Poziom jakości wg PN-EN ISO 5817
SERIA I						
1 2 3	1 2 3	19,6; 19,4; 19,4; 19,2; 19,3; 19,3; 19,5; 19,4; 19,4;	19,47 19,27 19,43	2,9; 2,8; 2,9; 2,9; 2,9; 2,9; 2,8; 2,9; 2,9;	2,87 2,90 2,87	B B B
SERIA II						
4 5 6	1 2 3	27,8; 27,8; 27,8; 27,4; 27,7; 27,4; 27,5; 27,7; 27,8;	27,80 27,50 27,67	2,9; 3,1; 3,2; 3,1; 3,0; 3,1; 3,0; 3,3; 3,4;	3,07 3,07 3,23	B B B
SERIA III						
7 8 9	1 2 3	40,0; 39,3; 40,0 40,3; 39,5; 40,3; 39,5; 40,0; 39,8;	39,77 40,03 39,77	3,5; 3,6; 3,6; 3,6; 3,7; 3,6; 3,5; 3,6; 3,7;	3,57 3,63 3,60	B B B
SERIA IV						
10 11 12	1 2 3	48,1; 48,3; 48,7; 47,3; 48,4; 48,2; 48,0; 47,4; 47,6;	48,37 47,97 47,67	3,1; 3,3; 3,3; 3,3; 3,0; 3,3; 3,0; 3,3; 3,1;	3,23 3,20 3,13	B B B

Jak widać, wyniki badań penetracyjnych złączy próbek potwierdzają wyniki uzyskane za pomocą ich badań wizualnych.

Badania radiograficzne złączy próbek do badań zmęczeniowych wykonano zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 5579 oraz zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 17636-1. Ocenę jakości złączy na podstawie badań radiograficznych przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 10675-1. Badania radiograficzne wykazały w objętości badanych spoin obecność rozproszonych pęcherzy gazowych, których wymiar graniczny umożliwia sklasyfikowanie połączeń na poziomie akceptacji 1, co z kolei jest tożsame z poziomem jakości ich wykonania „B". Można zatem stwierdzić, że złącza próbek do badań zmęczeniowych, kontrolowane za pomocą badań nieniszczących, charakteryzowały się wysoką jakością wykonania, czego dowodem było ich sklasyfikowanie, w każdym przypadku, na poziomie jakości „B" według wymagań normy PN-EN ISO 5817.

Przeprowadzone badania i ich wyniki

Badania zmęczeniowe próbek ze złączami doczołowymi o zmiennej szerokości lica spoiny przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej MTS 810 produkcji amerykańskiej, na jednym poziomie naprężenia σ_{max}=225 MPa. Do badań przyjęto współczynnik asymetrii obciążenia $R=\sigma_{min}/\sigma_{max}=+0,2$. Zatem obciążenie próbek podczas badań wynosiło: σ_{max}=225 MPa, σ_{min}=45 MPa. Wyniki badań zmęczeniowych zestawiono w tablicy III.

Tablica III. Wyniki badań zmęczeniowych doczołowych złączy spawanych ze stali S355J2, o zmiennej szerokości lica spoiny, badanych przy obciążeniu: σ_{max}=225 MPa i σ_{min}=45 MPa
Table III. Results of fatigue tests of butt welded joints made of S355J2 steel, with variable width of weld face, tested at load: σ_{max}=225 MPa and σ_{min}=45 MPa

Lp.	Oznaczenie serii próbek	Oznaczenie próbki	Liczba przeniesionych cykli obciążenia, N	Średnia liczba przeniesionych cykli obciążenia, N	Uwagi
1 2 3	I	1 2 3	456 939 644 144 468 233	523 105	Inicjacja pęknięcia w przejściu grani spoiny do materiału podstawowego.
4 5 6	II	1 2 3	754 924 894 178 746 988	798 697	Inicjacja pęknięcia w przejściu grani spoiny do materiału podstawowego.
7 8 9	III	1 2 3	312 752 424 613 420 007	385 791	Inicjacja pęknięcia w przejściu lica spoiny do materiału podstawowego.
10 11 12	IV	1 2 3	313 214 359 920 316 877	330 004	Inicjacja pęknięcia w przejściu lica spoiny do materiału podstawowego.

Wyniki przeprowadzonych badań poddano analizie statystycznej. W oparciu o rozkład t – Studenta [4÷6] 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,
$s=\sqrt{(1/(n-1)\sum_{(i=1)}^{n}(N-\bar{N}))^2}$ – odchylenie standardowe,

natomiast dla poszczególnych wyników z zależności:

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

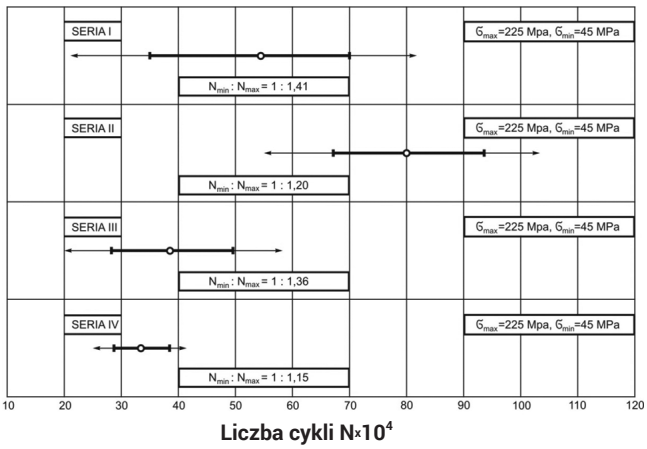
gdzie:
$\zeta_N = t_\alpha \cdot s$ – dokładność próby.

Wyniki analizy statystycznej pokazano, w postaci graficznej, na rysunku 4.

Z analizy tablicy III i rysunku 4 wynika, że pod względem miejsca inicjacji pęknięcia zmęczeniowego badane złącza spawane można podzielić na dwie grupy. Pierwszą stanowią złącza serii I i II, w których pęknięcie zostało zainicjowane w przejściu grani spoiny do materiału podstawowego (rys. 5).

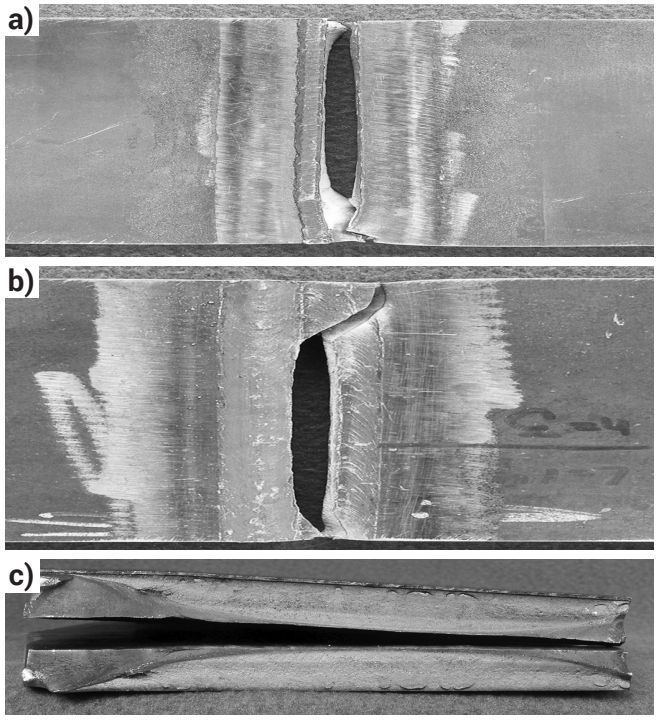
Drugą grupę stanowią złącza serii III i IV, w których inicjacja pęknięcia nastąpiła w przejściu lica spoiny do materiału podstawowego (rys. 6).

Na tej podstawie można wyciągnąć wniosek, że wyniki badań obu grup złączy należy rozpatrywać oddzielnie jako zupełnie różne zbiory liczb. Potwierdzenie tego wniosku można również uzyskać na podstawie analizy rysunku 4. Przedziały ufności dla wartości średnich żywotności badanych próbek wzajemnie się nakładają zarówno w przypadku serii próbek I i II, jak i III oraz IV. Nakładanie się natomiast przedziałów ufności próbek serii I z przedziałami ufności próbek serii III i IV nie może być brane pod uwagę ze względu na ich przynależność do różnych zbiorów wyników.

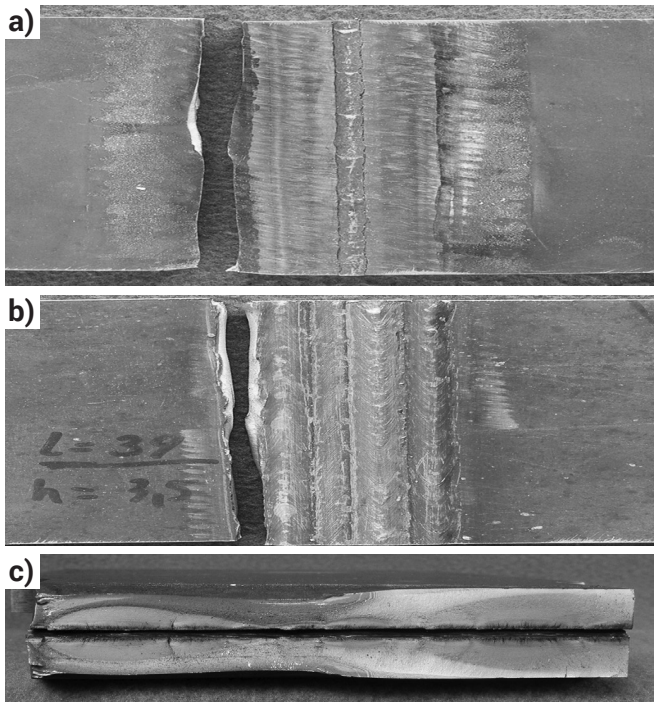


Rys. 4. Przedziały ufności dla wartości średnich żywotności i wyników żywotności próbek ze złączami o nadmiernej szerokości spoiny: — – 90% przedział ufności dla wartości średniej; ↔ – 90% przedział ufności dla wyników badań; ◦ – wartość średnia
Fig. 4. Confidence intervals for mean value of life and live results of the samples having excessive weld width: — – 90 % confidence interval for mean value; ↔ – 90% confidence interval for testing results; ◦ – mean value

Z analizy wartości średnich żywotności badanych serii próbek (tabl. III, rys. 4) wynika jednoznacznie, że trwałość zmęczeniowa próbek serii I i II jest wyraźnie wyższa od trwałości zmęczeniowej próbek serii III i IV. Fakt ten spowodowany jest zdecydowaną zmianą geometrii spoiny w jej



Rys. 5. Przykład inicjacji pęknięcia zmęczeniowego w przejściu grani spoiny czołowej do materiału podstawowego (próbka nr 3 serii I): a) widok od strony grani, b) widok od strony lica, c) widok przełomu zmęczeniowego
Fig. 5. An example of fatigue crack initiation in the area of transition of butt joint root into parent material (sample no. 3 of series I): a) from a root side, b) from a face side, c) fatigue fracture



Rys. 6. Przykład inicjacji pęknięcia zmęczeniowego w przejściu lica spoiny czołowej do materiału podstawowego (próbka nr 3 serii III): a) widok od strony grani, b) widok od strony lica, c) widok przełomu zmęczeniowego
Fig. 6. An example of fatigue crack initiation in the area of transition of butt joint root into parent material (sample no. 3 of series III): a) from a root side, b) from a face side, c) fatigue fracture

przekroju poprzecznym (serie III i IV) z powodu nadmiernej szerokości spoiny. Obecność niezgodności spawalniczej w postaci nadmiernej szerokości spoiny powoduje, że karbem determinującym zainicjowanie, a następnie rozwój pęknięcia zmęczeniowego, jest przejście lica spoiny do materiału podstawowego (rys. 6b). Z tego też powodu różnica między wartościami średnimi żywotności próbek serii III i IV jest niewielka. Inaczej przedstawia się problem w przypadku próbek serii I i II. Ich wyższa trwałość zmęczeniowa (w porównaniu do trwałości próbek serii III i IV) wynika z kompensującego oddziaływania wysokości nadlewu spoiny w płaszczyźnie karbu, jaki stanowi przejście grani do materiału podstawowego, oraz wyższej wytrzymałości stopiwa spoiny w porównaniu do wytrzymałości materiału podstawowego. Przy spawaniu techniką wielościegową, efekt ten może być osłabiany wpływem obecnych w licu spoiny „rowków" (nierówności), spowodowanych nakładaniem się poszczególnych ściegów spoiny (rys. 5b). Stanowi to również wyjaśnienie znaczącej różnicy między wartościami średnimi żywotności próbek serii I i II.

Podsumowanie i wnioski

W złączach spawanych odpowiedzialnych konstrukcji stalowych obserwuje się, w niepokojąco wielu przypadkach, obecność niezgodności spawalniczej w postaci nadmiernej szerokości spoiny czołowej. W normie odbiorowej PN-EN ISO 5817 nie określono wpływu tej niezgodności na jakość wykonanego połączenia, a w związku z tym na jego przydatność eksploatacyjną. Z tego powodu podjęto badania zmęczeniowe próbek, umożliwiających wyjaśnienie przedstawionego zagadnienia.

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. Identyczny wynik kontroli uzyskano po przeprowadzeniu badań radiograficznych. Na radiogramach zarejestrowano niewielkie pęcherze rozproszone, których liczba i wielkość spełniają wymagania obowiązujące dla poziomu jakości wykonania B. Jak widać, wyniki kontroli świadczą o poprawności zastosowanej do spawania złączy próbnych technologii spawania oraz wykazują ich wysoką jakość wykonania.

Badania zmęczeniowe próbek z nadmierną szerokością spoiny przeprowadzono na jednym poziomie naprężenia σ_{max}=225 MPa i przy tym samym 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 4. Z analizy rysunku 4 i tablicy III wynika, że próbki serii I i II stanowią jeden zbiór wyników, natomiast próbki serii III i IV zbiór drugi. Ze względu na nakładanie się na siebie przedziałów ufności dla wartości średnich żywotności obu grup próbek należy wnioskować o nieistotności występujących między nimi różnic.

W konsekwencji przedstawionych zależności można stwierdzić, że obecność w złączach spawanych niezgodności spawalniczej w postaci nadmiernej szerokości spoiny czołowej powoduje znaczne obniżenie ich trwałości zmęczeniowej. Dla badanych złączy spadek ten mieści się w granicach od ok. 26% do ok. 59%. Uśredniony spadek wynosi ok. 42,5%. Jak widać, jest to spadek zdecydowanie obniżający trwałość zmęczeniową złączy spawanych, a w związku z tym również ich własności eksploatacyjne. Z punktu widzenia bezpieczeństwa konstrukcji spawanej jest to zjawisko niedopuszczalne.

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Złącza spawane z nadmierną szerokością spoiny, przeznaczone do badań zmęczeniowych, charakteryzowały się wysoką jakością wykonania, umożliwiającą ich sklasyfikowanie na poziomie jakości „B" wg wymagań PN-EN ISO 5817.
2. Obecność w złączach spawanych niezgodności spawalniczej w postaci nadmiernej szerokości spoiny czołowej powoduje znaczne obniżenie ich trwałości zmęczeniowej, a w związku z tym własności eksploatacyjnych wykonanych połączeń.
3. Dla badanych złączy spadek trwałości zmęczeniowej próbek z nadmierną szerokością spoiny mieści się w zakresie od ok. 26% do ok. 59%; uśredniona wartość tego spadku wynosi ok. 42,5%.
4. Z punktu widzenia bezpieczeństwa konstrukcji spawanej podczas jej eksploatacji, obecność niezgodności w postaci nadmiernej szerokości spoiny należy uznać za niedopuszczalną.
5. Wyniki przeprowadzonych badań mogą stanowić dodatkowy wskaźnik podczas ustalania kryteriów odbiorowych dla konstrukcji pracujących w warunkach zmiennego stanu obciążenia.

Literatura

[1] Czuchryj J., Papkala H., Winiowski A.: Niezgodności w złączach spajanych, Wydawnictwo Instytutu Spawalnictwa, Gliwice, 2005.

[2] Czuchryj J., Sikora S.: Metody i techniki badań nieniszczących złączy spawanych. Wydanie I, Wydawnictwo Instytutu Spawalnictwa, Gliwice, 2014.

[3] Czuchryj J., Sikora S.: Badania wizualne złączy spawanych, Wydawnictwo Instytutu Spawalnictwa, Gliwice, 2009.

[4] Dyląg Z., Orłoś Z.: Wytrzymałość zmęczeniowa materiałów, WNT, Warszawa, 1962.

[5] Czerwiński J., Iwasiewicz A., Peszek Z., Sikorski A.: Metody statystyczne w doświadczalnictwie chemicznym, PWN, Warszawa, 1970.

[6] Praca zbiorowa, Poradnik niezawodności. Podstawy matematyczne, WPM „WEMA", Warszawa, 1982.