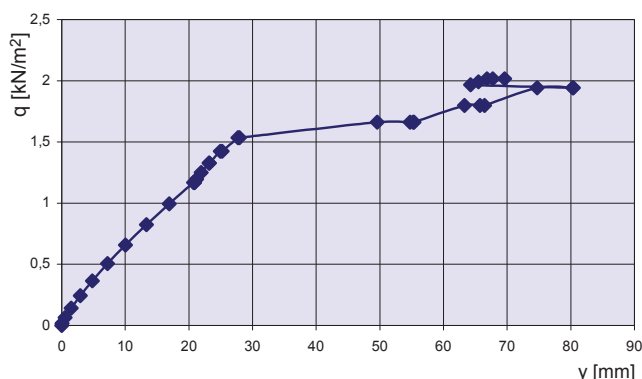


Model P12.3

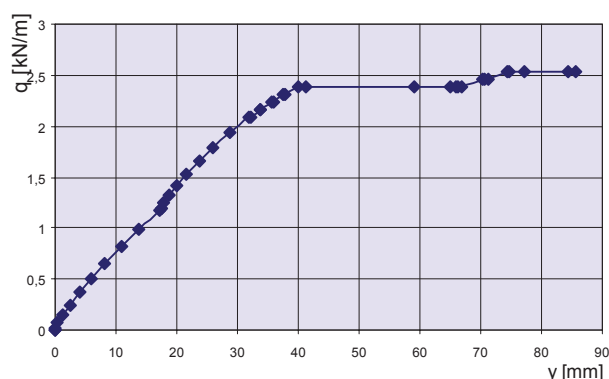


Rys. 4. Ścieżka równowagi statycznej dla modelu P12.3

Płyty dwuprzęsłowe o rozpiętości 2 x 6,0 m ulegają zniszczeniu nad podporą środkową; pojawiał się zatem plastyczny w środku i powiększał się w miarę dalszego obciążania modelu; ścieżka równowagi statycznej ma charakter nieliniowo-sprężysto-plastyczny.

Płyty z pianką poliuretanową charakteryzują się innym modelem zniszczenia niż blachy trapezowe, które to posiadają ścieżkę równowagi statycznej o charakterze nieliniowo-sprężysto-kruchym.

Model P12.6



Rys. 5. Ścieżka równowagi statycznej dla modelu P12.6

Zaproponowany model szacowania nośności i ugięć blachy trapezowej przy założeniu braku redukcji pól ściskanych pozwala oszacować SGN i SGU z dokładnością nieprzekraczającą 10,8%.

BIBLIOGRAFIA

[1] Gierczak J., Badania laboratoryjne płyt warstwowych KINSPAN w Akredytowanym Laboratorium Instytutu Budownictwa PWR, PWR., I-2, Raport serii SPR 37/2006

Pęknięcia spoin pachwinowych w połączeniach widełkowych prętów kratownic stalowych

Dr hab. inż. Eugeniusz Hołała, mgr inż. Mateusz Parzonka, Politechnika Wroclawska

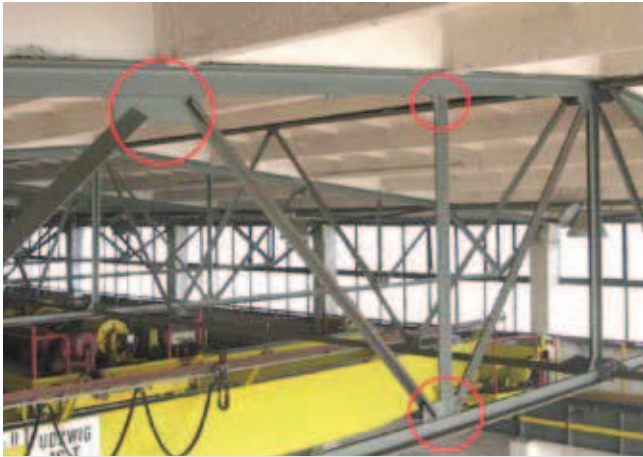
1. Wprowadzenie

W wielu kratownicach stalowych, szczególnie w konstrukcjach dachów hal przemysłowych (rys. 1), stosowane są spawane połączenia prętów tych kratownic z blachami węzłowymi w widełkowej formie konstrukcyjnej. Podłużne wycięcia w prętach wykratowania (słupkach i krzyżulcach), wykonanych z kątowników, teowników lub dwuteowników, ułatwiają wpasowanie tych elementów w blachy węzłowe podczas wytwarzania kratownic, zarówno w warsztacie, jak i na montażu.

W takich połączeniach stosowane są najczęściej spoiny pachwinowe na całej linii kontaktu krawędzi wycięcia pręta z blachą węzłową (rys. 2). Wykonuje się więc podstawowe pachwinowe spoiny podłużne W1 (rys. 2), zakoń-

zione krótkimi spoinami poprzecznymi W2 i W5. Spoiny poprzeczne wyraźnie ograniczają zdolność do odkształceń plastycznych spoin podłużnych, a ponadto przyczyniają się do powstania niedopuszczalnych niezgodności spawalniczych (szczególnie pęknięć) w rejonie ich występowania. Przykłady takich pęknięć przedstawiono w dalszej części pracy.

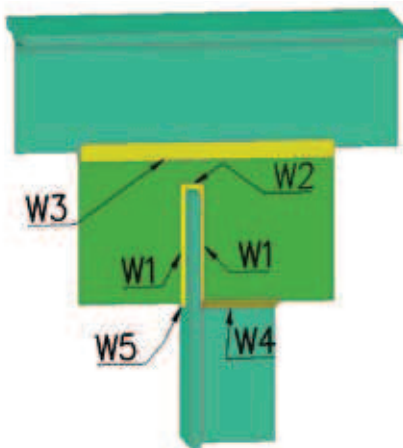
W lekkich kratownicach dachowych, wykonanych z prętów walcowanych o stosunkowo małych przekrojach, występowanie pęknięć w należycie wykonanych spoinach poprzecznych W2 i W5 (rys. 2) nie jest zjawiskiem powszechnym. Inna sytuacja ma jednak miejsce w przypadku kratownic o znacznych rozpiętościach, w których stosuje się elementy o dużym polu przekroju, odprowadzające bardzo intensywnie ciepło ze spoin i SWC (strefy



Rys. 1. Widok fragmentu kratownicy dachowej z widelkowymi połączeniami pojedynczych kątowników i blachami węzłowymi

wpływu ciepła) podczas stygnięcia w przypadku niezastosowania zabiegów spawalniczych proces chłodzenia. Kumulacja tego zjawiska wraz z ograniczeniem zdolności do odkształceń plastycznych spoin (będącym efektem wykonania krótkich odcinków poprzecznych W2 i W5) może prowadzić do powstania w nich pęknięć, które jako niedopuszczalne niezgodności spawalnicze stanowią przeszkodę podczas odbioru konstrukcji, a ich usunięcie jest dość trudne.

Pęknięcia w rejonie koncentracji naprężeń spawalniczych, a więc szczególnie w rejonie spoin W2, powodują odprężenie tych stref połączeń i w niektórych przypadkach mogą nie mieć wyraźnego wpływu na nośność całego połączenia spawanego poddanego obciążeniom statycznym. Zagadnienia te nie były do tej pory przedmiotem kompleksowych badań, gdyż zgodnie z [6] występowanie pęknięć (nr 100,104 wg [5]) dla poziomów jakości B, C i D uznaje się za niedopuszczalne. Autorzy niniejszej pracy podjęli próbę oceny zachowania się i nośności widelkowych połączeń spawanych z pęknięciami w spoinach poprzecznych, poddanych



Rys. 2. Przykład spawanego połączenia widelkowego teownika (1/2IPE) z blachą węzlową. Zaznaczono spoiny pachwinowe W1, W2, W5 oraz spoiny czołowe W3, W4

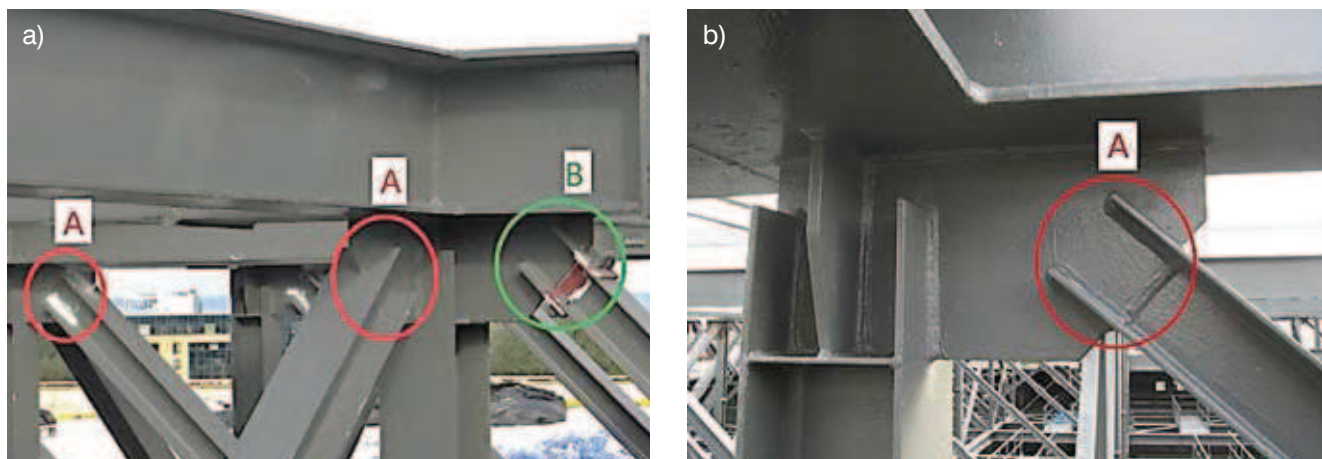
obciążeniom statycznym jednokrotnym. Przewiduje się również badania takich połączeń z pęknięciami w warunkach niewielkiej liczby cykli obciążeń obliczeniowych. Zaprezentowano wstępne rezultaty prowadzonych aktualnie badań.

2. Pęknięcia spoin w połączeniach widelkowych

W spawanych połączeniach węzłów kratownic mogą wystąpić różnorodne defekty, będące skutkiem niewłaściwego ukształtowania połączenia, bądź błędów w procesie technologicznym spawania. Wady takie są kwalifikowane na podstawie normy [5] do jednej z 6 grup. Największą grupę stanowią różnorodne pęknięcia, które ze względu na ich kształt można podzielić na podłużne, poprzeczne i promieniowe. Biorąc za podstawę klasyfikacji lokalizację ich występowania, można wyróżnić pęknięcia w materiale podstawowym, w SWC oraz w metalu spoiny (w szczególności w kraterze, gdzie ich obecność jest dość częsta). Jeśli weźmiemy pod uwagę moment inicjacji tych defektów, a także procesy zastosowane podczas, bądź po spawaniu, można wyróżnić m.in.: pęknięcia gorące przy krzepnięciu oraz pęknięcia zimne, spowodowane obniżoną plastycznością (pęknięcia kruche), a także pęknięcia wywołane starzeniem (dyfuzją azotu). Kolejną grupą niezgodności spawalniczych są pustki, m.in.: pustki gazowe, pęcherze gazowe, skupiska porowatości, jamy skurczowe oraz kraterki. Wśród niezgodności spawalniczych wyróżnia się również wtrącenia stałe w postaci żużła, topnika, tlenku, niemetaliczne oraz warstewki tlenków. Odrębny zbiór defektów stanowią przyklejenia i braki przetopu, w których wyodrębnia się przyklejenia, niepełny przetop oraz wtopienia kolcowe. Oddzielnie klasyfikowane są niezgodności kształtu i wymiarów (podtopienia, nadlewy, asymetria itp.) oraz inne nieprawidłowości w miejscu zajarzenia łuku, szlifowania spoiny itp.

Projektant konstrukcji ma istotny wpływ na ryzyko wystąpienia niezgodności spawalniczych, które w części warunkowane są ukształtowaniem węzłów spawanych w niej wstępujących. W przypadku konstrukcji poddanych obciążeniom zmiennym lub narażonych na kruche pęknięcia, szczególną uwagę powinien zwracać na to, aby minimalizować spiętrzenia naprężeń. Efekt karbu spowodowany jest m.in. nadmiernym skupieniem spoin, ich krzyżowaniem oraz zbyt małą odległością między nimi. Łącząc elementy o znacznej różnicy grubości trzeba pamiętać, iż ich różna pojemność cieplna może być przyczyną powstania wad w postaci przyklejeń w części masywnej lub przepaleń w części cienkiej. Należy także preferować spoiny czołowe, a w przypadku konieczności zastosowania spoin pachwinowych – wykonywać je jako dwustronne.

W przypadku występowania kratownic o dużych rozpiętościach, bądź przy znacznych obciążeniach, przekroje prętów są odpowiednio większe, a więc stosowanie połączeń widelkowych zwiększa ryzyko powstania wad spoin pachwinowych, z uwagi na szybkie odprowadzanie cie-



Rys. 3. Przykład spawanych połączeń widelkowych w węzłach ruszta kratownicowego konstrukcji dachu o rozpiętości 72 m

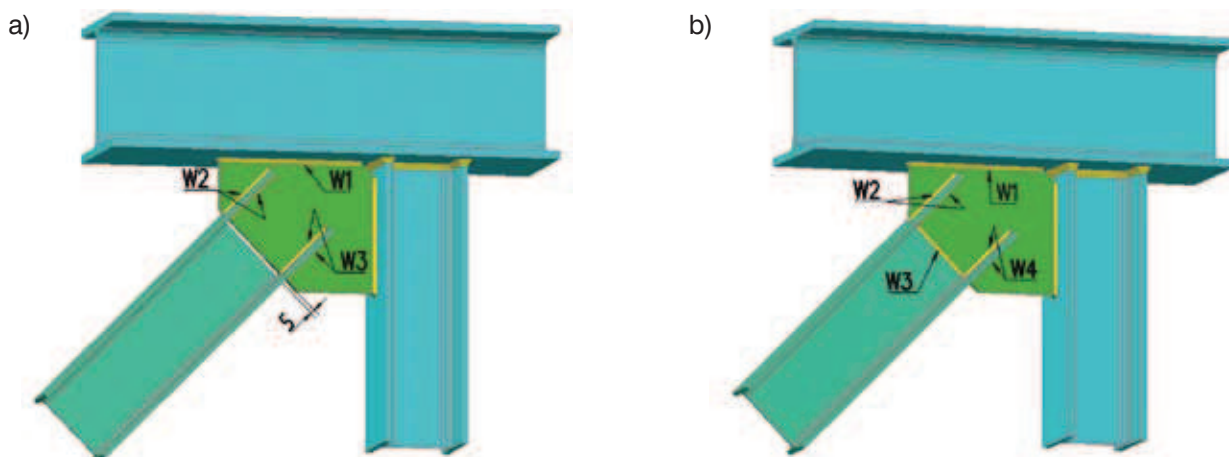
pla z tych spoin do prętów o dużej pojemności cieplnej. Ten niepożądany efekt jest wyraźnie większy, jeśli zastępuje się obwodowe spawanie wokół widelkowych wycięć prętów (spoiny W2, W5 na rysunku 2), a także w przypadku bliskiej odległości spoin W2 i W3.

Na rysunku 3 przedstawiono widelkowe połączenia spawane prętów wykratowania w ruszcie dachowym o masywnych prętach. W połowie węzłów wykonano spoiny czołowe środników dwuteowych krzyżulców z blachą węzłową (typ A na rysunku 3), a w pozostałych (typ B na rysunku 3) nie wykonywano takich połączeń, co schematycznie przedstawiono również na rysunku 4. W połączeniach tych wykryto podczas montażu konstrukcji dachowej pęknięcia spoin w ponad 60% węzłów. Defekty te występowały głównie w rejonie krótkich spoin poprzecznych, zlokalizowanych na zakończeniach podłużnych spoin pachwinowych W2, W3 i W4 (rys. 4). Widok takich pęknięć w jednym z węzłów, wykrytych podczas badań magnetyczno-proszkowych, wykonywanych wg normy [9], przedstawiono na rysunku 5. Pęknięcia te występowały pod dość grubą warstwą farby ogniochronnej.

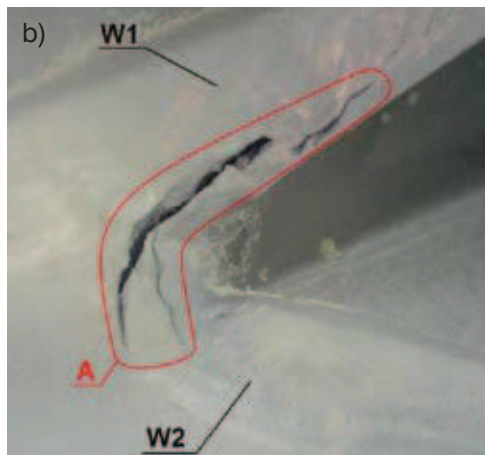
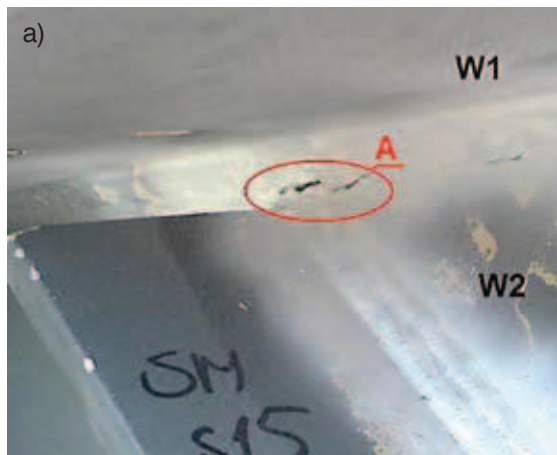
Stwierdzone bardzo liczne pęknięcia (rys. 5) występowały nie tylko w rejonie stosunkowo blisko położonych spoin W1 (rys. 4, 5), ale także w większej odległości nich, a więc na końcach spoin W3 i W4 (rys. 4). Konieczne było wykonanie poważnych napraw uszkodzeń i wzmocnienie konstrukcji dachowej, gdyż trudno było przewidzieć czy po usunięciu tych licznych wad nie nastąpi ponowny rozwój pęknięć, podczas przewidywanego (znacznie większego w porównaniu z fazą montażu) obciążenia eksploatacyjnego.

3. Badania nośności spoin w połączeniach widelkowych

Pęknięcia spoin poprzecznych W2 (rys. 2) na końcach pachwinowych spoin podłużnych W1 w połączeniach o konstrukcji widelkowej mogą w niektórych przypadkach powodować odprężenie w rejonie takiego karbu. Nie można wykluczyć, że nośność spoin podłużnych W1 przy obciążeniach statycznych nie będzie mniejsza w przypadku całkowitej rezygnacji z wykonywania spoin W2. Może się też okazać, że przy braku obciąż-



Rys. 4. Różne rozwiązania konstrukcji połączenia widelkowego krzyżulca w ruszcie kratowym: a) bez spoiny środnika z blachą węzłową, b) ze spoiną czołową środnika W3



Rys. 5. Pęknięcia pachwinowych spoin poprzecznych na końcach spoin podłużnych W2 (fot. archiwum PS DRACO s.c.)

żeń cyklicznych, propagacja istniejących po spawaniu pęknięć nie będzie następowała na spoiny podłużne, co prowadziłoby do utraty ich nośności. Przygotowano więc program badań połączeń widelkowych, w których podłużne spoiny pachwinowe zakończone zostały krótkimi spoinami poprzecznymi (rys. 6 i 7a) oraz bez takich spoin poprzecznych (rys. 6 i 7b).

W pierwszej serii badań spoiny pachwinowe o grubości projektowanej $a = 3 \div 5$ mm wykonywano w temperaturze otoczenia $T = 0 \div -10^\circ\text{C}$. Płaskowniki w badanych modelach miały grubość $t = 16$ lub 20 mm. Nośność obliczeniowa układu spoin rzeczywistych po jednej stronie próbki wynosiła $100 \div 200$ kN (w zależności od uzyskanej geometrii spoin). Grubość i długość spoin projektowanych wchodzących w skład badanych połączeń zdeterminowane zostały maksymalnymi wartościami sił N (rys. 6), jakie można było uzyskać na stanowisku badawczym. Badania nośności podobnych spoin w temperaturach $T > 0^\circ\text{C}$ są aktualnie prowadzone. Modele połączeń wykonane były ze stali S235JR oraz S355J2, a do spawania elementów modeli wykorzystano metodę GMAW. Parametry niezbędne z punktu widzenia instrukcji technologicznej spawania (WPS) przyjęto na podstawie wieloletnich doświadczeń spawaczy. Nie stosowano podgrzewania wstępnego łączonych płaskowników.

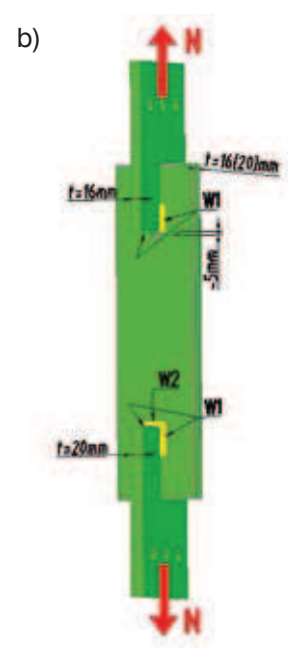
Jednym z celów prowadzonych badań jest ocena wpływu rozwiązań konstrukcyjnych połączeń widelkowych na powstawanie pęknięć w spoinach pachwinowych. Przedmiotem szczególnej uwagi jest wpływ zastosowania spoin poprzecznych (rys. 6b, 7a) oraz temperatury otoczenia podczas ich wykonywania na powstawanie ww. niezgodności. Istotnym poszukiwanym rezultatem badań jest ocena wpływu powstałych pęknięć w spoinach W2 (rys. 6b i 7a) na nośność połączeń przy obciążeniach statycznych lub przy występowaniu niewielkiej liczby cykli obciążeń obliczeniowych ($n < 100$).

Badania nieniszczące spoin w wykonanych próbkach po spawaniu i w trakcie narastania obciążenia na stanowisku badawczym prowadzono na podstawie norm [5], [6], [7], [8] i [9]. Dotychczasowe wyniki badań wskazują na to, że w wielu przypadkach pęknięcia w spoinach

poprzecznych W2 (rys. 6b) mogą mieć charakter odciążenia w rejonie ostrego karbu i nie wpływają istotnie na nośność spoin podłużnych W1 poddanych działaniu obciążeń statycznych, a także przy niewielkiej liczbie ich cykli. Nie dostrzega się również zmniejszenia nośności spoin, będącego konsekwencją występowania niewielkich pęknięć w kraterach spoin podłużnych W1 (rys. 7b), co potwierdza powierzchnia ścięcia podczas zniszczenia próbek, która nie zawsze przechodziła przez te defekty.

Nie stwierdzono wyraźnego wpływu rodzaju zastosowanej stali oraz temperatury spawania w zakresie $0 \div -10^\circ\text{C}$ na zwiększenie powstawania pęknięć w rejonach poprzecznych spoin pachwinowych.

Wyniki wstępnych badań zachęcają do ich kontynuowania i pogłębiania, a bardziej miarodajne rezultaty na podstawie większej liczby zbadanych próbek przedstawione zostaną wkrótce.



Rys. 6. Badania nośności spoin pachwinowych w połączeniach widelkowych: a) model połączenia podczas próby rozciągania, b) spoiny W1, W2 w badanych modelach.



Rys. 7. Pęknięcia spoin pachwinowych w badanych połączeniach widelkowych płaskowników: a) w spoinie poprzecznej W2, b) w kraterze spoiny podłużnej W1

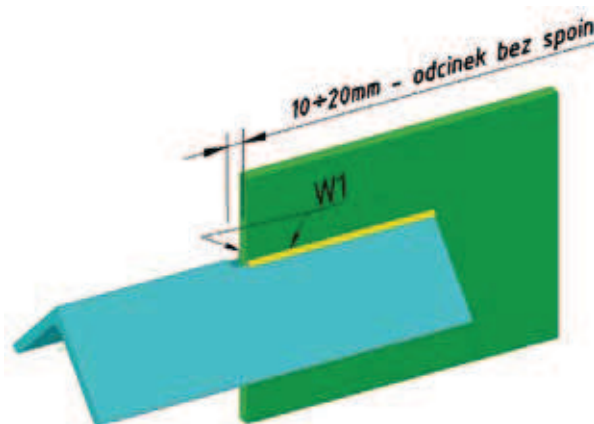
4. Podsumowanie

Stwierdzone bardzo liczne pęknięcia spoin w połączeniach widelkowych masywnych kratownic były powodem podjęcia obszernych badań doświadczalnych określających nośność takich węzłów. Badany jest wpływ karbu, powstałego w związku z zastosowaniem spoin poprzecznych W2 (rys. 2, 6b), na powstanie tych niezgodności spawalniczych. Analizowany jest także wpływ odległości spoin W1 od spoin W2 (rys. 4, 5) na możliwość wystąpienia takich pęknięć.

Wielu autorów [1], [2], [3], [4] analizuje ryzyko i przedstawia przykłady pęknięć spoin lub blach węzłowych w połączeniach prętów kratownic stalowych. Istnieje wiele zaleceń dotyczących kształtowania takich połączeń, a w szczególności w zakresie minimalnych odległości pomiędzy spoinami. W celu zredukowania niekorzystnego wpływu spoin poprzecznych W2 na zdolność do odkształceń plastycznych podstawowych spoin podłużnych W1, zalecane jest niestosowanie spoin poprzecznych W2 (rys. 8). Preferowana jest także rezygnacja ze spoin pachwinowych na rzecz spoin czołowych. W połączeniach dwuteowników, pokazanych na rysunkach 3 i 4, proponuje się rezygnację z wykonywania spoin czołowych W3 (rys. 4a) średników

z blachami węzłowymi, aby nie ograniczać swobody odkształceń podłużnych spoin pachwinowych. Ograniczenie swobody podłużnych odkształceń w spoinach podczas ich stygnięcia może prowadzić do powstania w nich pęknięć, dyskwalifikujących te połączenia.

Nie są znane do tej pory badania uwzględniające wpływ pęknięć w rejonach karbu przy spoinach poprzecznych W2 (rys. 6b, 7a), a także ich zachowanie (propagacja rys) podczas obciążania. Niewiadomą jest również nośność takich uszkodzonych połączeń przy obciążeniach statycznych. Dotychczasowe wyniki badań nie wykazują zauważalnego wpływu powstałych pęknięć w strefach silnej koncentracji naprężeń (karb konstrukcyjny i spawalniczy) na nośność statyczną spawanych połączeń widelkowych. Trzeba jed-



Rys. 8. Zalecane kształtowanie połączeń widelkowych – bez poprzecznych spoin pachwinowych na końcach spoin podłużnych W1

nak podchodzić do uzyskanych wyników jeszcze z pewną rezerwą, ze względu na stosunkowo niewielką liczbę (około 30) zbadanych modeli połączeń widelkowych. Prowadzone przez autorów badania mogą dać interesujące wyniki i przyczynić się do oceny wpływu tych stosunkowo niewielkich, lecz niedopuszczalnych przez normę [6], pęknięć spoin pachwinowych na bezpieczeństwo połączeń widelkowych w kratownicach stalowych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Rykaluk K., Pęknięcia w konstrukcjach stalowych, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2000
- [2] Ferenc J. Ferenc K., Konstrukcje spawane. Projektowanie połączeń. WNT, Warszawa, 2000
- [3] Kocańda S., Zmęczeniowe pękanie metali, WNT, Warszawa, 1985
- [4] Gurney T., Cumulative damage of welded joints, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2006
- [5] PN-EN ISO 6520-1:2009. Spawanie i procesy pokrewne. Klasyfikacja geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach. Część 1: Spawanie.
- [6] PN-EN ISO 5817:2009. Spawanie. Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązek). Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych
- [7] PN-EN ISO 17635:2010. Badania nieniszczące spoin. Zasady ogólne dotyczące metali
- [8] PN-EN ISO 17637:2011. Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania wizualne złączy spawanych
- [9] PN-EN ISO 17638:2010. Badanie nieniszczące spoin. Badanie magnetyczno-proszkowe