

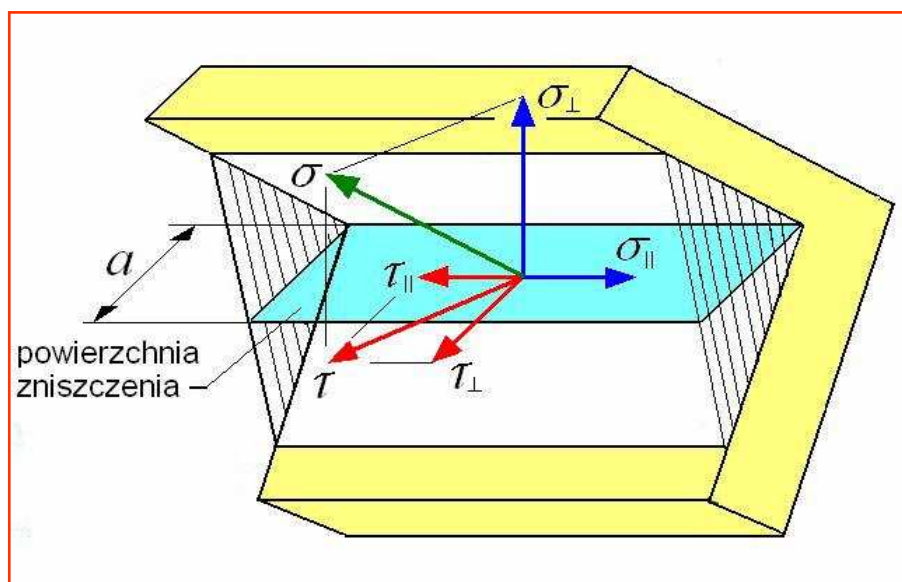


ANTONI BIEGUS

PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
WEDŁUG EUROKODU 3

CZĘŚĆ 5 – POŁĄCZENIA SPAWANE

MATERIAŁY DYDAKTYCZNE



ANTONI BIEGUS

PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH WEDŁUG EUROKODU 3
CZĘŚĆ 5 – POŁĄCZENIA SPAWANE

SPIS TREŚCI

1. Charakterystyka ogólna połączeń spawanych	4
2. Spawalność stali	6
3. Podział spoin i złączy spawanych	9
3.1. Klasyfikacja spoin	9
3.2. Spoiny czołowe	12
3.3. Spoiny pachwinowe	16
4. Obliczanie nośności połączeń spawanych	20
4.1. Założenia i zasady obliczania spoin	20
4.2. Nośność obliczeniowa spoin pachwinowych	23
4.3. Nośność obliczeniowa spoin czołowych	25
4.4. Nośność obliczeniowa spoin pachwinowych obwodowych	26
4.5. Nośność obliczeniowa spoin otworowych	26
4.6. Obliczanie połączeń zakładkowych obciążonych osiowo	27
4.7. Obliczanie złożonych połączeń ze spoinami pachwinowymi	28
4.8. Połączenia z pasem bez żeber	31
5. Uwagi końcowe	33
Literatura	35

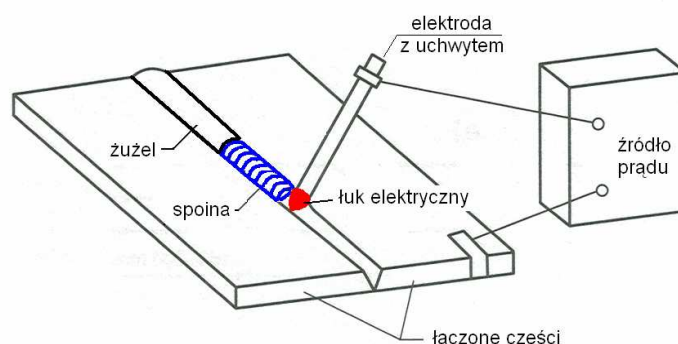
PODZIĘKOWANIE

*Autor serdecznie dziękuje Panu dr. inż. Dariuszowi Czepizakowi za trud korekty
pracy i wniesione uwagi redakcyjne oraz merytoryczne*

Połączenia spawane

1. Charakterystyka ogólna połączeń spawanych

Stalowe ustroje nośne budowli są realizowane dwuetapowo. W pierwszym etapie, w wytwórniach konstrukcji stalowych poszczególne elementy składowe konstrukcji (kształtowniki, blachy) łączy się w podzespoły montażowe, które noszą nazwę elementów wysyłkowo-montażowych. Podział ustroju nośnego na podzespoły montażowe wynika z ograniczeń gabarytów środków transportowych oraz skrajni drogowych i kolejowych. W drugim etapie, po przetransportowaniu elementów wysyłkowo-montażowych na plac budowy, są one scalane w docelowy ustrój nośny. Połączenia montażowe elementów wysyłkowo-montażowych na budowie są najczęściej typu rozbieralnego i wykonuje się je na śruby. Łączenie elementów składowych (kształtowników walcowanych, blach, itp.) w podzespoły montażowe w wytwórniach konstrukcji stalowych uzyskuje się przede wszystkim w wyniku spawania, (w przypadku konstrukcji cienkościennych również przez zgrzewanie) i są to połączenia nierozbieralne. Spawanie jest jedną z podstawowych technik wytwarzania konstrukcji stalowych.



Rys. 1. Schemat procesu powstawania spoiny

Spawanie jest procesem łączenia, w którym przez działanie skoncentrowanego źródła ciepła następuje lokalne stopienie łączonych elementów metalowych po obu stronach linii złącza. Zazwyczaj podczas spawania następuje także dodanie spoiwa, którym jest metal o składzie chemicznym zbliżonym do składu chemicznego spawanych elementów. Spoiwo ulega stopieniu i wymieszaniu z ciekłym materiałem rodzimym, tworząc tzw. jeziorko spawalnicze. Po odjęciu (lub przemieszczeniu) źródła ciepła jeziorko spawalnicze wychładza się i krystalizuje, przekształcając się w spoinę, która trwale i w sposób nierozłączny zespala elementy ze sobą.

Takie spajanie materiału wymaga użycia skoncentrowanego źródła ciepła, wytwarzającego temperaturę przewyższającą topienie stali – wiązki energii cieplnej za pomocą spawalniczych źródeł ciepła (temperatura topienia stali to około $1400\div 1534^{\circ}\text{C}$). Współcześnie stosowanymi źródłami ciepła przy spawaniu są łuk elektryczny, strumień plazmy bądź promień lasera. W przeszłości stosowano również płomień powstający w wyniku spalania gazów palnych w atmosferze tlenu.

Jeśli pod wpływem wysokiej temperatury brzegi łączonych elementów ulegają stopieniu (tj. są doprowadzone do stanu płynnego) mówi się o spawaniu, jeśli zaś tylko do stanu plastycznego („ciastowatego”) i połączenie wymaga docisku, to mamy do czynienia ze zgrzewaniem.

Spawanie wymaga zazwyczaj doprowadzenia dodatkowego materiału o składzie chemicznym zbliżonym do materiału części łączonych, zgrzewanie zaś nie. Złącze powstałe z metalu stopionego podczas procesu spawania nazywa się spoiną. Materiał elementów łączonych jest nazywany materiałem rodzimym. Dodatkowy metal doprowadzony do spawania nazywa się spoiwem, otrzymany ze spoiwa, nosi nazwę stopiwa. Spoina obejmuje przetopiony materiał rodzimy oraz dodatkowy (stopiwo).

Celem spawania jest uzyskanie złącza spajanych elementów o właściwościach mechanicznych, fizycznych i chemicznych zbliżonych do materiału rodzimego. Dlatego też zaleca się, aby dodawane do spawania spoiwo miało odpowiednio lepsze właściwości, zwłaszcza odnoszące się do plastyczności. Wówczas wytrzymałość poprawnie wykonanego połączenia spawanego przy obciążeniu statycznym jest nie mniejsza od wytrzymałości materiału rodzimego. Wytrzymałość zmęczeniowa spoin, ze względu na nieuniknione w złączu karby postaciowe i strukturalne, jest z reguły mniejsza. Zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej spoin uzyskuje się przez obróbkę cieplną (normalizację i wyżarzanie odprężające) oraz mechaniczną (młotkowanie, zeszlifowanie nadlewu spoiny czołowej lub odpowiednie zakończenia spoiny pachwinowej).

Spawanie jest obecnie najbardziej rozpowszechnionym sposobem łączenia wyrobów stalowych. Połączenia spawane charakteryzują się licznymi zaletami w porównaniu z innymi metodami łączenia. Do najważniejszych zalet należą:

- łatwość i szybkość wykonania połączeń wskutek mniejszej pracochłonności (brak trawienia, wiercenia otworów itp., które występuje w połączeniach na śruby),
- możliwość pełnej automatyzacji procesu łączenia elementów i uniwersalność zastosowania do wszystkich rodzajów konstrukcji,

- wysoka wytrzymałość i niezawodność połączeń – łatwe uzyskiwanie złącz, których nośność jest równa nośności łączonych elementów; wykonawstwo w warsztacie umożliwia przemysłową kontrolę jakości, gwarantującą wysoką niezawodność,
- możliwość zwiększenia asortymentu przekrojów poprzecznych prętów w konstrukcjach (przekroje rurowe, skrzynkowe, teowe itp.),
- mniejszy ciężar łączników w porównaniu z połączeniami nitowymi i śrubowymi,
- zmniejszenie liczby nakładek, blach węzłowych itp. w połączeniach,
- łatwość wykonania zabezpieczeń antykorozyjnych i przeciwpożarowych,
- łatwość wzmocnienia zrealizowanych konstrukcji.

Natomiast do wad połączeń spawanych należy zaliczyć:

- trudności związane ze spawaniem stali o dużej zawartości węgla oraz niektórych stali stopowych, a także grubych blach,
- wprowadzanie energii cieplnej w spawany materiał zmienia strukturę materiału powodując niejednorodność strukturalną i mechaniczną złącza,
- powstawanie dodatkowych naprężeń i odkształceń spawalniczych,
- konieczność wykonywania spoin przez wykwalifikowanych spawaczy i pod stałą kontrolą nadzoru technicznego,
- wysoki koszt materiałów i urządzeń stosowanych przy spawaniu.

2. Spawalność stali

Różne stale reagują w odmienny sposób na proces spawania. Zdolność stali do utworzenia połączenia spawanego spełniającego wymagania eksploatacyjne nazywa się spawalnością. Połączenia spawane będą bezpieczne nie tylko wtedy, gdy stal jest spawalna, ale również gdy zastosuje się właściwą technologię spawania, a także odpowiednią konstrukcją złącza. Istotnym zagadnieniem jest problem spawalności, czyli najogólniej biorąc przydatności stali na konstrukcje spawane. Jest to cecha związana nie tylko z rodzajem spawanego materiału (m.in. jego składu chemicznego) ale zależy także od intensywności wprowadzania ciepła podczas spawania, szybkości chłodzenia elementu po procesie spawania, technologii spawania oraz parametrów konstrukcyjnych złącza (grubości elementu, sztywności konstrukcji itp.).

Spawalność jest pojęciem złożonym, gdyż zależy od dużej liczby czynników, tak że ujęcie ich wpływu w sposób syntetyczny nie jest możliwe. Jest to kompleksowa charakterystyka metalu rodzimego i dodatkowego oraz technologii łączenia. Jednocześnie spawalność jest poję-

ciem względnym, tzn. niektóre stale mogą być nieprzydatne na konstrukcje spawane jedną metodą, a stają się przydatne przy spawaniu inną metodą. Podobnie na przykład zawartość jednego składnika w stali może być ze względu na użycie jednego gatunku elektrod uznana za niedopuszczalną, podczas gdy w przypadku innego gatunku elektrod zawartość tego składnika nie będzie przeszkadzać. Niekiedy dzięki zabiegom dodatkowym, na przykład podgrzewaniu podczas spawania, można wykonać połączenia stali, w standardowych warunkach uznawanej za nie spawalną. Dlatego zamiast rozpatrywać pojęcie spawalności ogólnej, praktyczniej jest rozważać je w zakresie szczegółowym. Wtedy spawalność można klasyfikować jako: metalurgiczną, konstrukcyjną i technologiczną.

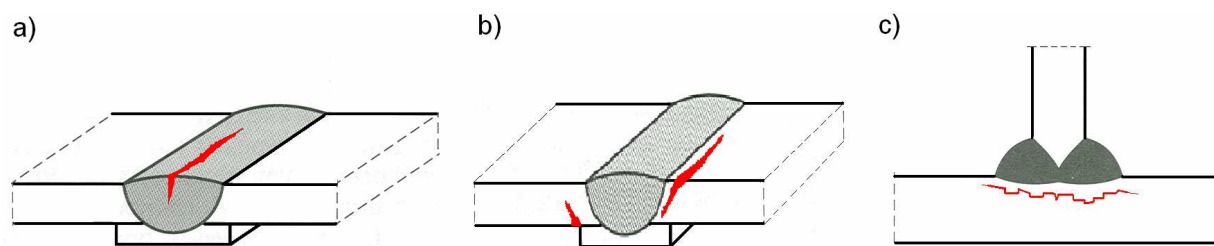
Spawalność metalurgiczna zależy od sposobu wytworzenia stali, jej składu chemicznego i struktury, stopnia uspokojenia, sposobu obróbki elementów, rodzaju spoiwa itp.

Spawalność konstrukcyjna jest związana z szeregiem innych cech, do których można zaliczyć: stopień sztywności konstrukcji i możliwość swobody odkształceń elementów spawanych, grubość tych elementów oraz grubość, długość i rozmieszczenie spoin, sposób kształtowania węzłów i elementów z wyeliminowaniem miejsc podatnych na pęknięcia, zapewnienie możliwości wstępnego podgrzewania i wyżarzania elementów łączonych.

Spawalność technologiczna określa wymagania dotyczące wyboru procesów spawania, doboru parametrów spawania, przyjęcia kolejności wykonywania spoin, a także zastosowania metody obróbki cieplnej i mechanicznej spoin.

Najczęściej operuje się pojęciem spawalności metalurgicznej stali, zależnej od składu chemicznego. Jeśli stal ma nieodpowiedni skład chemiczny, to złącze spawane staje się skłonne do kruchych pęknięć.

W przypadku stali konstrukcyjnych pojęcie spawalności jest zwykle upraszczane do zagadnienia uzyskania spawanego złącza bez pęknięć. W zależności od technologii spawania rozróżnia się pęknięcia gorące (krystalizacyjne), pęknięcia zimne, pęknięcia lamelarne, pęknięcia zmęczeniowe i kruche (rys. 2).



Rys. 2. Pęknięcie: a) gorące, b) zimne, c) lamelarne

Pęknięcia gorące (krystalizacyjne) są pęknięciami międzykrystalicznymi zachodzącymi w temperaturze około $1200 \div 1350^{\circ}\text{C}$ zbliżonej do temperatury krystalizacji jeziora spawalniczego. Najczęściej są to pęknięcia w linii środkowej spoiny. Przyczyną ich powstawania są zanieczyszczenia związkami siarki i fosforu krystalizującej spoiny. W początkowej fazie stygnięcia spoiny, (gdy zakończył się proces krystalizacji ciekłego materiału a na granicach ziarn pozostała ciekła eutektyka stopu Fe-S) powstające naprężenia skurczowe powodują rozrywanie materiału, zaczynając, od miejsca eutektyki, nie stawiającej żadnego oporu mechanicznego. Unikanie nisko topliwej eutektyki polega na neutralizowaniu siarki za pomocą manganu. Stal jest odporna na pęknięcia gorące wtedy, gdy stosunek zawartości manganu do siarki jest w niej nie mniejszy od 25, a wskaźnik odporności na pęknięcie gorące $H_{CS} < 4$, przy czym

$$H_{CS} = 1000 \frac{S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100}}{3Mn + Cr + Mo + V}, \quad (1)$$

gdzie: C, Mn, Cr, ... – poszczególne pierwiastki stopowe w procentach..

Pęknięcia zimne powstają po całkowitym skrzepnięciu roztopionego metalu – w końcowej fazie stygnięcia lub tuż po całkowitym ostygnięciu, lub po upływie pewnego czasu po zakończeniu spawania (tzw. pęknięcia zimne). Występują one najczęściej obok spoiny w strefie wpływu ciepła materiału lub też w strefie wtopienia. Ich nazwa bierze się stąd, że pojawiają się one dopiero po ostygnięciu złącza, a czasami nawet kilka godzin po spawaniu (stąd kontrole spoin należy przeprowadzać dopiero po 16 godzinach od ukończenia spawania). Przyczyną ich pojawienia się jest równoczesne występowanie trzech czynników:

- wzrostu twardości i spadku ciągliwości w obszarze strefy wpływu ciepła,
- występowanie wodoru w spoinie,
- występowanie pospawalniczego stanu naprężeń i odkształceń.

Miarą odporności stali na pęknięcia zimne jest równoważnik węgla

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + V}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024t, \quad (2)$$

gdzie:

C, Mn, Cr, ... – poszczególne pierwiastki stopowe w procentach,

t – uśredniona grubość elementów łączonych w milimetrach.

Skłonność stali do tworzenia twardej struktury martenzytu podczas stygnięcia austenitu ro-

śnie ze wzrostem zawartości węgla. Jeżeli $C < 0,20\%$ i $C_e < 0,4$, to stal jest dobrze spawalna, a jeżeli $C_e > 0,6$, to stal nie jest spawalna. Dla wartości pośrednich równoważnika, tzn. $C_e = 0,4 \div 0,6$, stal jest spawalna warunkowo. Należy wówczas zastosować odpowiednią technologię spawania, spowalniającą odpływ ciepła, jak np. poprzez zwiększoną energię spawalniczego źródła ciepła lub wstępne podgrzewanie materiału wzdłuż brzegów łączonych.

Pęknięcia lamelarne powstają, gdy naprężenia skurczowe działają w kierunku po grubości blach. Mają one najczęściej postać uskokową (schodkową). Na ich tworzenie się wpływa istnienie naprężeń prostopadłych do powierzchni blachy i skłonność blach do tego typu pęknięcia, wywołana najczęściej wtrąceniami niemetalicznymi. Jednym z podstawowych sposobów zapobiegania takiej postaci zniszczenia jest odpowiednie ukształtowanie spoiny, a przede wszystkim wybór odpowiedniego gatunku stali na konstrukcje obiektu. Zagadnienie doboru stali ze względu na ciągliwość międzywarstwową omówiono w PN-EN 1993-1-10: 2007 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych - Część 10: Dobór stali ze względu na odporność na kruche pęknięcie i ciągliwość międzywarstwową.

Pęknięcia zmęczeniowe i kruche nie należą ściśle do uszkodzeń technologicznych związanych ze spawaniem. Zależą one głównie od sposobu obciążenia konstrukcji, choć proces spawania ma wpływ na odporność (trwałość) zmęczeniową.

Spawalność stali konstrukcyjnych zależy przede wszystkim od ich gatunku. Stale niestopowe wg PN-EN 10025-2 można uważać za stale łatwo spawalne, gdy grubość spawanych części nie przekracza 25 mm. W przypadku większych grubości elementów wykonanych z takich stali należy stosować odpowiednią technologię spawania. Również spawanie stali konstrukcyjnych, drobnoziarnistych po normalizowaniu lub walcowaniu normalizującym wg PN-EN 10025-3 wymaga stosowania odpowiedniej technologii spawania.

W zależności od spawalniczego źródła ciepła spawanie dzieli się na gazowe i elektryczne. W pierwszym przypadku ciepło wytwarza spalający się gaz (acetylen, wodór, metan), natomiast w drugim – łuk elektryczny, strumień plazmy, strumień elektronów, strumień fotonów.

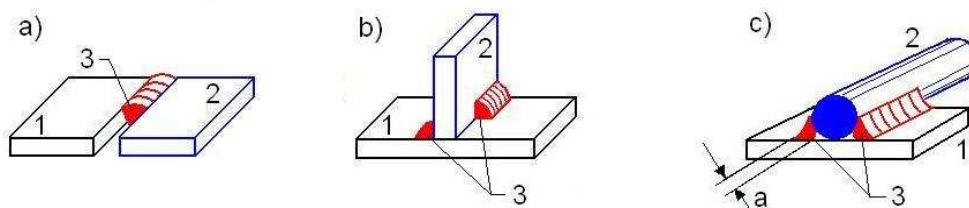
3. Podział spoin i złączy spawanych

3.1. Klasyfikacja spoin

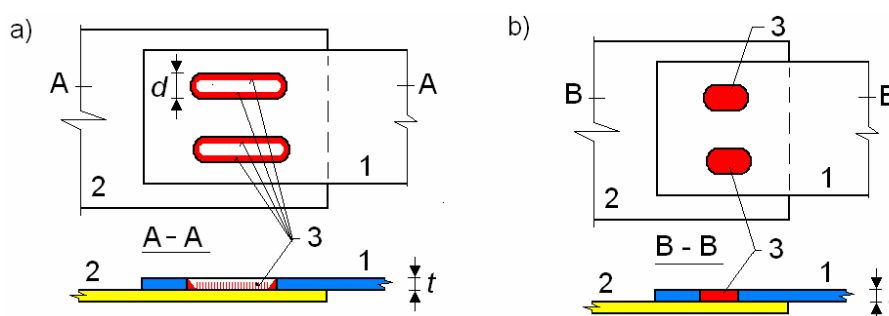
Spoiny klasyfikuje się w zależności od konstrukcji, sposobu wykonania, położenia i pracy.

Pod względem konstrukcyjnym oraz z uwagi na kształt przekroju poprzecznego rozróżnia się następujące rodzaje spoin: czołowe (rys. 3a), pachwinowe (rys. 3b), szerokobruzdowe

(rys. 3c) i obwodowe (rys. 4a) i otworowe (rys. 4b). Najważniejsze z punktu widzenia konstrukcyjnego są spoiny czołowe i pachwinowe.



Rys. 3. Rodzaje spoin: a – czołowe, b – pachwinowe, c – szerokobruzdowe;
1, 2 – łączone elementy, 3 – spoina

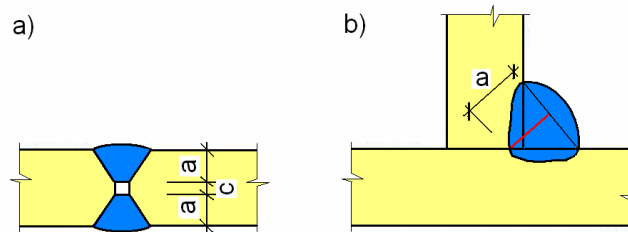


Rys. 4. Spoiny obwodowe (a) i otworowe (b): 1, 2 – łączone elementy, 3 – spoina pachwinowa

Spoiny czołowe (rys. 3a) są najczęściej układane w specjalnych rowkach utworzonych w zukosowanych brzegach łączonych elementów. Uzyskuje się je podczas łączenia elementów, położonych zwykle w jednej płaszczyźnie, w wyniku wypełnienia przestrzeni między nimi, gdy brzeg przynajmniej jednego z łączonych elementów jest przetopiony na całej grubości.

Spoinę czołową z pełnym przetopem definiuje się jako spoinę, która ma całkowity przetop i jest wtopiona w materiał rodzimy na całej grubości t złącza. Spoina czołowa z niepełnym przetopem (rys. 5a) ma głębokość mniejszą od całkowitej grubości t materiału rodzimego. Spoiny czołowe przerywane nie powinny być stosowane.

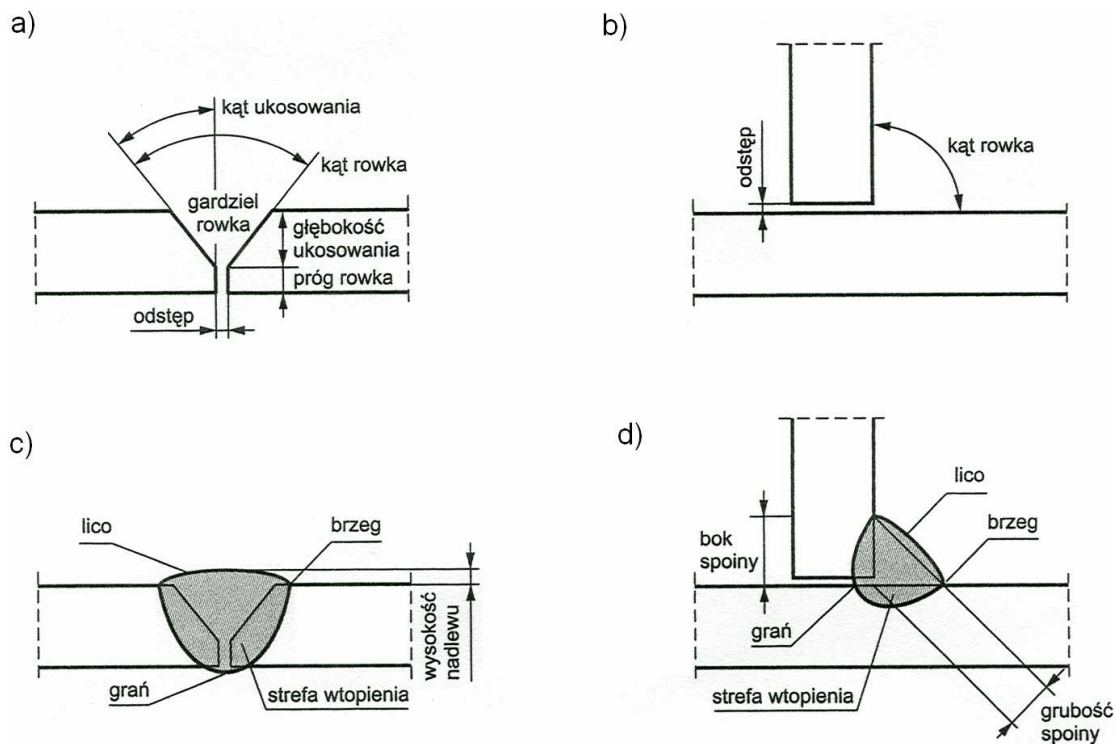
Spoiny pachwinowe (rys. 3b) układa się w rowkach naturalnych, powstających między powierzchniami łączonych elementów. Są one z reguły łatwe do wykonania, gdyż nie wymagają ukosowania brzegów. Jednak w porównaniu ze spoinami czołowymi praca złącza, w którym zastosowano spoiny pachwinowe jest gorsza (szczególnie w konstrukcjach obciążonych dynamicznie) z uwagi na nierównomierny rozkład naprężeń w połączeniu.



Rys. 5. Spoina: czołowa z niepełnym przetopem (a) oraz pachwinowa z głębokim przetopem (b)

W przypadku spoin pachwinowych obwodowych (rys. 4a) średnica otworu okrągłego d lub szerokości otworu owalnego spoiny pachwinowej obwodowej nie powinna być mniejsza od czterokrotnej grubości t blachy z otworem: $d > 4t$. Spoinę otworowe (czopowe) mogą być stosowane jako ścinane, w celu zapobieżenia wybrzuszeniu lub separacji części zakładkowych lub jako złącza pośrednie w elementach złożonych. Średnica otworu okrągłego spoiny otworowej powinna być, co najmniej o 8 mm większa niż grubość blachy zawierającej otwór.

Na rys. 6 pokazano nazwy poszczególnych stref połączeń spawanych, w fazie przygotowania brzegów oraz wykonanym

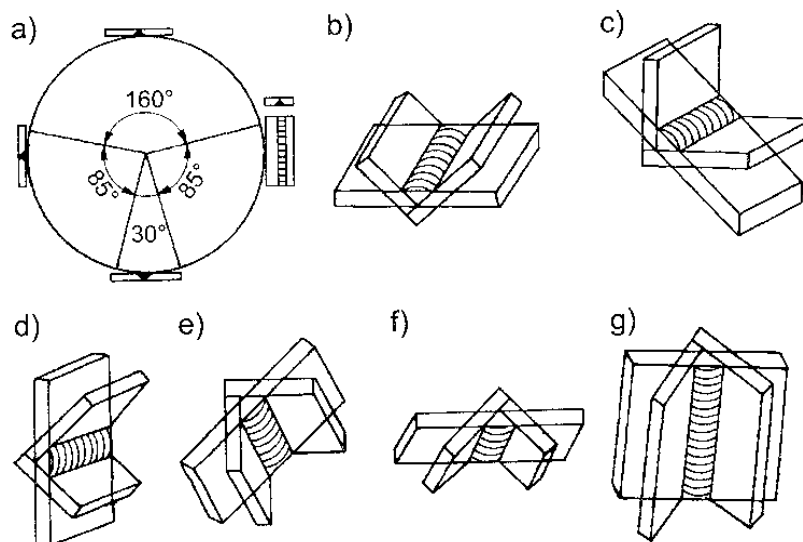


Rys. 6. Elementy złącza przed i po wykonaniu

Podział spoin ze względu na pozycję w czasie spawania (rys. 7a) jest następujący: podolna (rys. 7b), naboczna (rys. 7c), naścienna (rys. 7d), okapowa (rys. 7e), pułapowa (rys. 7f), pionowa (rys. 7g). Najdogodniejszą do wykonania spoiny jest pozycja podolna, zapewniająca dobrą jakość spoiny, natomiast najtrudniejsza jest pozycja pułapowa (sufitowa), w której trudno jest zapewnić dobrą jakość spoiny.

Z uwagi na charakter pracy (wyteżenia) spoin można wyróżnić dwie kategorie: spoiny nośne (konstrukcyjne, które przenoszą siły wewnętrzne w łączonym przekroju i należy je obliczać) oraz spoiny szczipne (o wymiarach minimalnych, służące do montażowego łączenia elementów, których nie oblicza się).

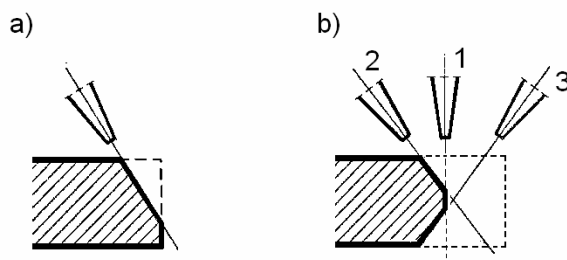
Ze względu na sposób wykonania spoin pachwinowych można wyróżnić spoiny ciągłe tj. ułożone bez przerw między nimi i przerywane – z przerwami między nimi. Spoiny czołowe wykonuje się tylko jako ciągłe.



Rys. 7. Pozycje spawania – usytuowanie spoin (opis w tekście)

3.2. Spoiny czołowe

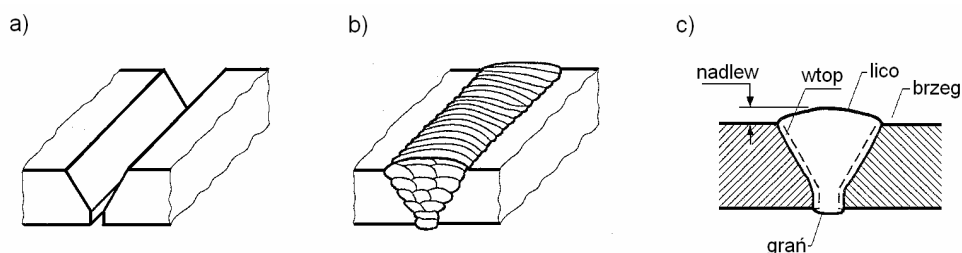
Spoiny czołowe powstają podczas łączenia elementów, położonych zwykle w jednej płaszczyźnie, w wyniku wypełnienia przestrzeni między tymi elementami, gdy brzeg przynajmniej jednego z dwu łączonych elementów jest przetopiony na całej grubości. W celu przetopienia elementu na całą grubość za pomocą minimalnej ilości energii cieplnej należy odpowiednio zukosować jego brzeg (rys. 8). Kształt ukosowania zależy od grubości elementu t oraz od tego czy będzie podczas spawania swobodny dostęp do tego brzegu z obydwu stron.



Rys. 8. Cięcie i ukosowanie: a – pojedynczym palnikiem, b – głowicą trójpalnikową (numery palników oznaczają kolejność cięcia)

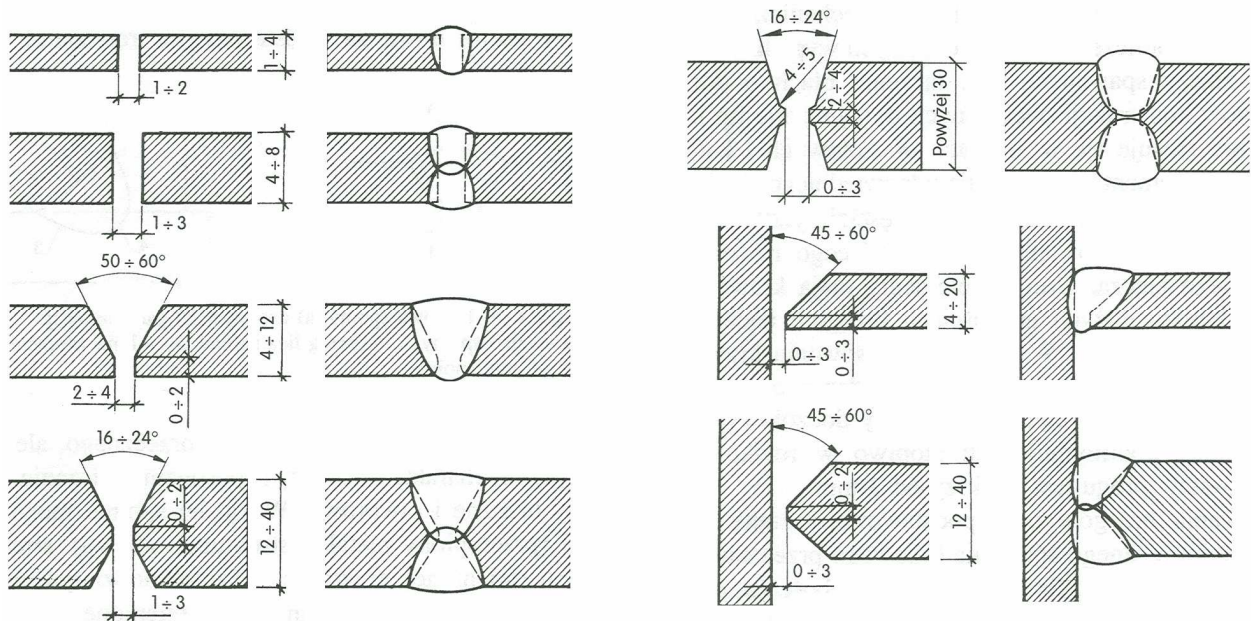
Gdy podczas spawania możliwy jest dostęp tylko z jednej strony, wówczas taką spoinę nazywa się spoiną jednostronną, a jeżeli będzie dostęp z obu stron – spoiną dwustronną. Blachy cienkie (o grubości $t < 4$ mm przy jednostronnym dostępie oraz $t < 8$ mm przy dwustronnym dostępie) nie wymagają ukosowania brzegów. Utworzona spoina nosi nazwę spoiny typu I. Kształt ukosowania w przekroju poprzecznym przez złącze zależy głównie od grubości blachy. Najczęściej jest to odcięcie przyzmatu jednostronnego lub dwu przyzmatów od brzegu za pomocą palnika acetylenowo-tlenowego, przesuwanego mechanicznie. Stosuje się też ukosowanie za pomocą obróbki skrawaniem. Po zestawieniu obydwu elementów do spawania z pewnym prześwitem otrzymuje się jeden lub dwa rowki spawalnicze (rys. 8).

Rowek zapełnia się stopiwem, tzn. materiałem natopionym ze spoiwa. Powierzchnię spoiny od strony spawania nazywa się licem spoiny, a od strony gardzieli rowka – granią spoiny (rys. 9c). Spoiny czołowe, łączące elementy o grubości większej od 6 mm wykonuje się wielowarstwowo (rys. 9b), przy czym w miarę wzrostu szerokości warstwy wykonuje się ją wielościgowo (warstwa graniowa i kilka następnych są wykonywane jako jednościgowe). Głębokość przetopienia materiału rodzimego przy ściankach rowka nazywa się wtopem spoiny. Spoiny wykonywane jednostronnie mogą mieć wady w postaci nieprzetopienia grani, co jest związane z niemożnością odpowiedniego dojścia elektrody.



Rys. 9. Oznaczenia: a – rowka spawalniczego i b – spoiny

Aby uzyskać dobre przetopienie na całej grubości łączonych elementów należy odpowiednio ukosować ich krawędzie. Kształt ukosowania krawędzi blach zależy przede wszystkim od grubości i rodzaju spawanego złącza. Rodzaje ukosowań i oznaczenia spoin czołowych przedstawiono na rys. 10. Na rysunkach wykonawczych spoiny czołowe oznacza się symbolami I, V, Y, 2V, X, U, 2U, K adekwatnie do kształtu ukosowanie łączonych krawędzi elementów.

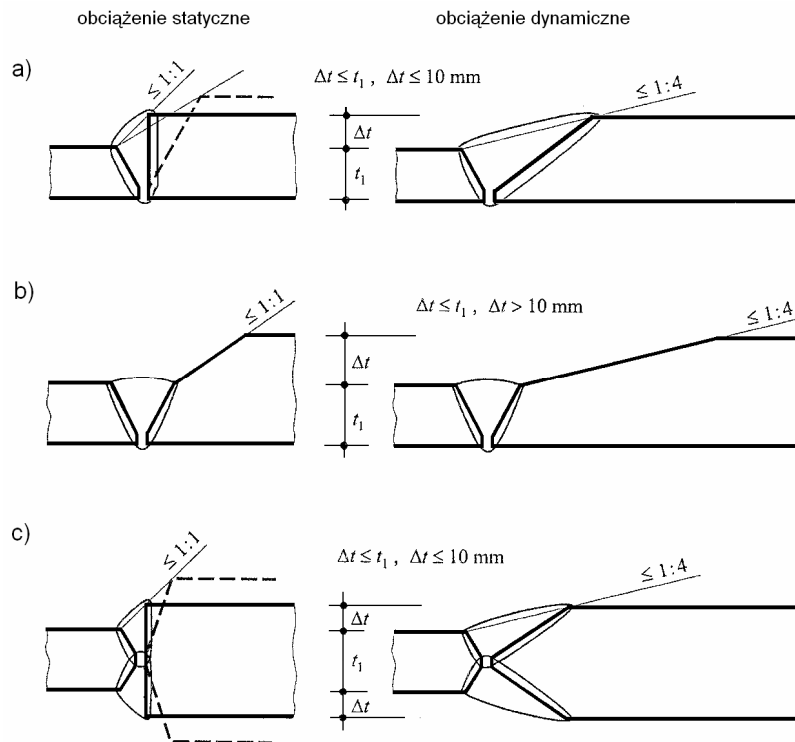


Rys. 10. Rodzaje ukosowań i oznaczenia spoin czołowych

Łącząc elementy o różnych grubościach stosuje się albo spoinę niesymetryczną, gdy różnica grubości jest nie większa niż 10 mm, albo stosuje się podwójne ukosowanie grubszej blachy, gdy różnica grubości jest większa niż 10 mm (rys. 11).

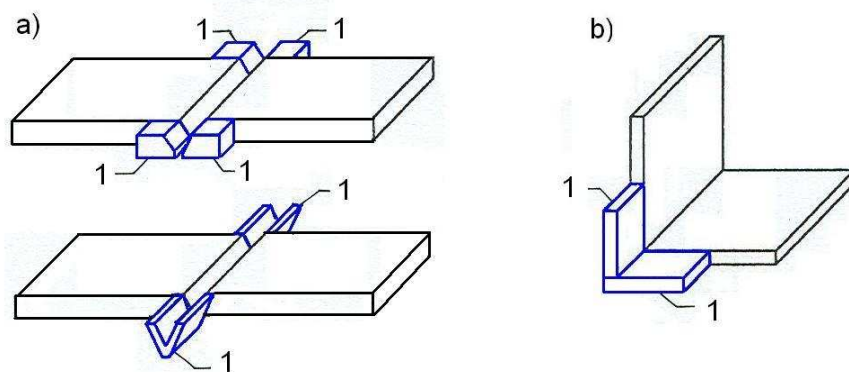
Nachylenie płaszczyzny przechodzącej przez krawędzie górne rowka lub nachylenie drugiej płaszczyzny ukosu wynosi nie więcej niż 1:1 w konstrukcjach obciążonych statycznie oraz 1:4 w konstrukcjach obciążonych dynamicznie (rys. 11). Podwójnego ukosowania grubszej blachy można uniknąć, jeśli można elementy połączyć współosiowo. Wykonuje się wówczas obustronną spoinę symetryczną.

Na początku i końcu spoiny czołowej, od strony lica powstają zawsze wgłębienia nazywane kraterem. Jest ono wynikiem ciśnienia gazów z elektrody na roztopiony metal. Ze względu na niepełną grubość spoiny w tych miejscach traktuje się je jako wadliwe o małej nośności.



Rys. 11. Spoiny czołowe blach o różnej grubości

Zapobieganie kraterom polega na stosowaniu płytek wybiegowych, które mocuje się pro-wizorycznie spoinami szepnymi (rys. 12). Wykonanie spoiny rozpoczyna się i kończy na płytkach wybiegowych, które następnie się usuwa (odcinając płomieniem acetylenowo-tlenowym lub piłą, a brzegi szlifuje się).



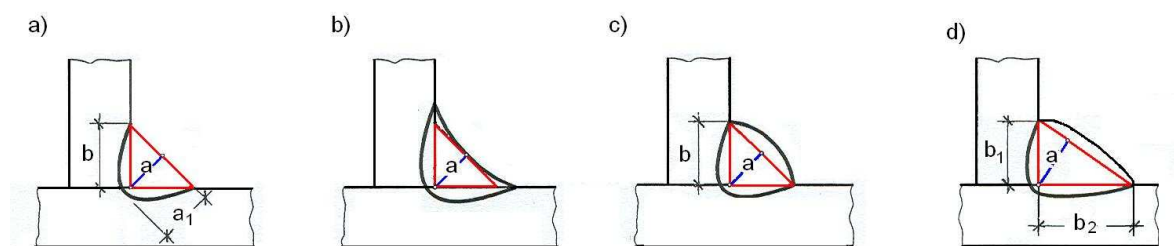
Rys. 12. Sposoby zapobiegania kraterom spoin czołowych (a) oraz spoin pachwinowych (b),

1 – element wybiegowy

3.3. Spoiny pachwinowe

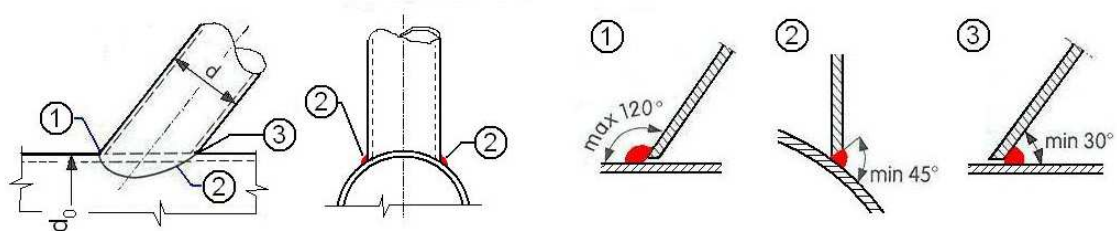
W porównaniu do spoin czołowych spoiny pachwinowe są z reguły łatwiejsze do wykonania (nie wymagają ukosowania brzegów). Układają się one w naturalnym rowku między ściankami łączonych elementów. Zazwyczaj przygotowanie przed spawaniem polega na dokładnym oczyszczeniu pasm przykrawędziowych (które będą łączone) z rdzy, tłuszczów, zgorzeliiny walcowniczej itp.). Jednak w porównaniu z spoinami czołowymi praca złącza w którym zastosowano spoiny pachwinowe jest gorsza (szczególnie w konstrukcjach obciążonych dynamicznie) z uwagi na nierównomierny rozkład naprężeń w połączeniu.

W zależności od lica spoiny rozróżnia się spoiny pachwinowe płaskie (rys. 13a – zasadniczo o kształcie równoramiennego trójkąta z minimalnym nadlewem), wklęsłe (rys. 13b), wypukłe (rys. 13c). Niekiedy spoina pachwinowa może być niesymetryczna (rys. 13d).



Rys. 13. Kształty spoin pachwinowych: a) płaska, b) wklęsła, c) wypukła, d) niesymetryczna płaska

Spoiny pachwinowe można stosować do łączenia części, których ścianki tworzą kąt od 60° do 120° . Kąty mniejsze są dopuszczalne przy założeniu, że spoina będzie traktowana jako czołowa z niepełnym przetopem (np. rys. 14). Przy kątach większych od 120° nośność spoin pachwinowych określa się eksperymentalnie według zasad przedstawionych w Załączniku D do PN-EN 1990.



Rys. 14. Połączenie spawane o zmiennej grubości spoiny

Jako efektywną grubość spoiny pachwinowej a przyjmuje się wysokość największego trójkąta (z równymi lub nierównymi ramionami) wpisanego w obrys przekroju poprzecznego spoiny, mierzona prostopadłe do zewnętrznego boku tego trójkąta (rys. 13). W przypadku spoiny pachwinowej z głębokim przetopem, którą pokazano na rys. 5b, można uwzględniać jej dodatkową grubość, o ile wstępne badania wykażą, że wymagana głębokość wtopienia może być regularnie uzyskiwana.

Grubość spoiny pachwinowej należy przyjmować w zależności od grubości łączonych elementów i powinna mieścić się w przedziale

$$0,2t_{\max} \leq a_w \leq 0,7t_{\min} \quad \text{oraz} \quad 2,5 < \text{mm } a_w \leq 16 \text{ mm}, \quad (3)$$

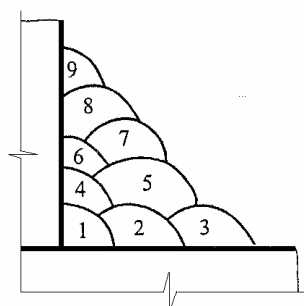
gdzie:

t_{\max} – grubość grubszego elementu łączonego,

t_{\min} – grubość cieńszego elementu łączonego.

Powyższe warunki są podyktowane koniecznością wprowadzenia odpowiedniej ilości ciepła, gwarantującej dobrą jakość spoiny pachwinowej.

Jeżeli bok spoiny pachwinowej b jest większy niż 8 mm, wówczas spoinę wykonuje się jako wielościęgową, co pokazano na rys. 15.



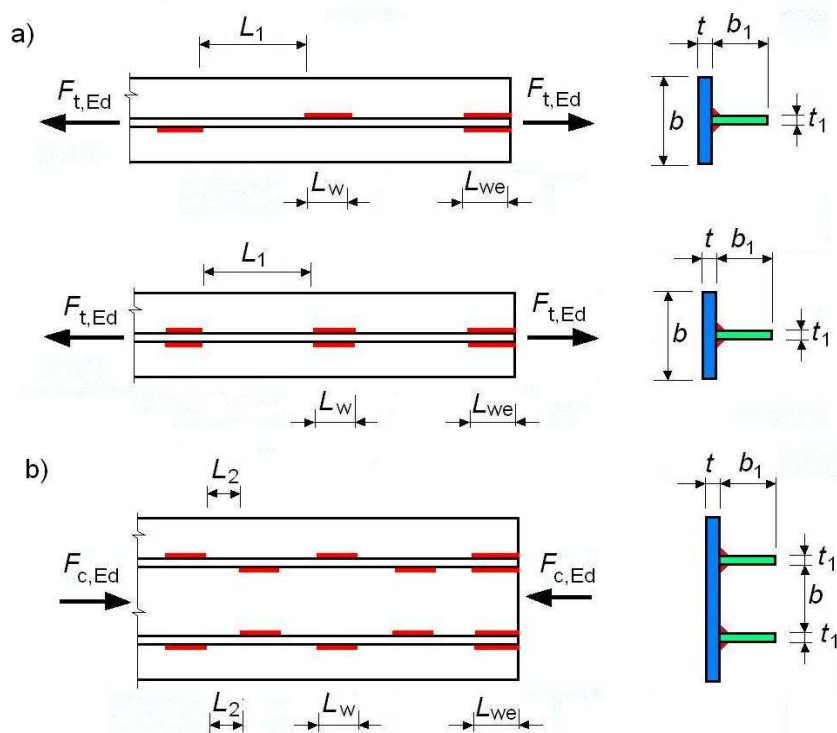
Rys. 15. Spoina pachwinowa wielościęgowa (numery oznaczają kolejność układania ściągów)

Na początku i końcu spoiny pachwinowej powstają kratery (odcinki wadliwe o małej nośności). Zapobieganie występowaniu kraterów w połączeniach spoin pachwinowych polega na stosowaniu korytek wybiegowych (rys. 12b).

Jako efektywną długość spoiny l_{eff} przyjmuje się długość, na której spoina ma pełny przekrój. Można ją przyjmować jako długość całkowitej spoiny, zmniejszonej o dwie efektywne grubości spoiny a . Jeśli spoina ma pełny przekrój na swojej długości łącznie z początkiem i końcem, redukcja długości efektywnej (ze względu na początek i koniec) nie jest wymagana.

Nie należy stosować spoin pachwinowych o długości efektywnej mniejszej niż 30 mm, ani sześciokrotnej grubości spoiny a_w .

Spoiny pachwinowe mogą być wykonane jako ciągłe lub przerywane. Wymagania dotyczące przerw (L_1 , L_2) pomiędzy sąsiednimi odcinkami L_w spoin pachwinowych przerywanych pokazano na rys. 16. Przyjmuje się je jako wartość mniejszą z odległości pomiędzy końcami spoin po przeciwległych stronach i odległości pomiędzy końcami spoin po tej samej stronie. W każdym ściegu przerywanej spoiny pachwinowej jej odcinek skrajny wykonuje się zawsze na każdym końcu łączonych części. W elementach złożonych, w których blachy łączą się spoinami przerywanymi, zalecane są ciągłe spoiny pachwinowe na każdym końcu i z każdej strony blachy na długości nie mniejszej niż 3/4 szerokości węższej z łączonych blach.



Elementy spawane rozciągane: $L_1 \leq \min(16t, 16t_1 \text{ i } 200 \text{ mm})$

Elementy spawane ściskane lub ścinane: $L_2 \leq \min(12t, 12t_1, 0,25b \text{ i } 200 \text{ mm})$

Rys. 16. Spoiny pachwinowe przerywane: a – rozciągane, b – ściskane

Nie należy zakładać spoin pachwinowych w wewnętrznych narożach kształtowników walcowanych na gorąco (rys. 17a, b) ponieważ są to miejsca o podwyższonej zawartości węgla

siarki fosforu, a więc o gorszej spawalności. Również należy unikać zakładania spoin w strefach zgniotu materiału kształtowników giętych na zimno (rys. 17c), gdy

$$\frac{r}{t} < \sqrt{\frac{tf_y}{600}}, \quad (4)$$

gdzie

r – promień gięcia blachy (rys. 17c),

t – grubość blachy (rys. 17c),

f_y – granica plastyczności stali blachy.

gdyż strefy te mają obniżoną ciągliwość i mogą w nich powstać pęknięcia złączy (rys. 17c).

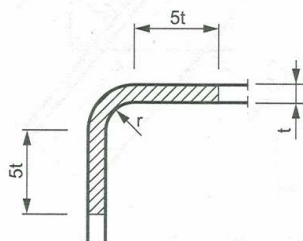


Rys. 17. Miejsca w których nie należy zakładać spoin pachwinowych

Spawanie w strefie odkształconej na zimno przez gięcie jest dopuszczalne co do proporcji promienia gięcia w stosunku do grubości blachy r/t , które przedstawiono w tabl. 1.

Tablica 1. Warunki umożliwiające układanie spoin w strefie odkształconej na zimno

r/t	Wydłużenie przy formowaniu na zimno (%)	Największa grubość (mm)		
		ogólnie		stal całkowicie uspokojona ($Al \geq 0,02\%$)
		obciążenie przeważająco statyczne	dominujące zmęczenie	
≥ 25	≤ 2	dowolna	dowolna	dowolna
≥ 10	≤ 5	dowolna	16	dowolna
$\geq 3,0$	≤ 14	24	12	24
$\geq 2,0$	≤ 20	12	10	12
$\geq 1,5$	≤ 25	8	8	10
$\geq 1,0$	≤ 33	4	4	6



4. Obliczanie nośności połączeń spawanych

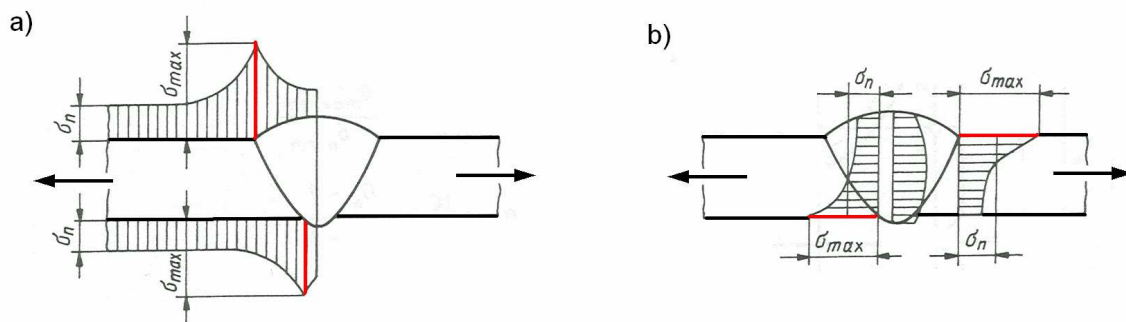
4.1. Założenia i zasady obliczania spoin

W wymiarowaniu spoin i połączeń spawanych, obciążonych przeważająco statycznie przyjmuje się zazwyczaj następujące założenia:

- spoiny i materiał rodzimy są elementami jednorodnymi (izotropowymi),
- nie uwzględnia się efektu spiętrzenia naprężeń i działania naprężeń własnych – rozpatruje się jedynie naprężenia nominalne od przyłożonych obciążeń,
- łączone spoinami części są sztywne, a ich odkształcenia są pomijalnie małe, co pozwala przyjmować liniowe rozkłady naprężeń w spoinach.

Wymienione założenia są możliwe pod warunkiem zachowania właściwej konstrukcji i technologii kształtowania połączeń spawanych. Dodatkowo wymagany jest poziom jakości spoin C według PN-EN ISO 5817. Powyższe założenia umożliwiają przyjęcie równomiernego rozkładu naprężeń w spoinach zarówno na ich grubości jak i na długości, podczas gdy w rzeczywistości nie są one równomierne.

Rzeczywisty rozkład linii sił w połączeniu spawanym jest zaburzony z powodu spiętrzenia naprężeń (rys. 18, 19). Jeśli w spoinie czołowej usunie się lico i grań (obrobić mechanicznie) to spiętrzenie naprężeń w złączu nie wystąpi. Najmniejsze spiętrzenie naprężeń występuje w złączach doczołowych (rys. 18), znacznie większe zaś w połączeniach ze spoinami pachwinowymi (co jest zrozumiałe gdy rozważy się ich geometrię – rys. 19). Mierzy się je stopniem spiętrzenia, definiowanym jako stosunek naprężeń maksymalnych σ_{max} do naprężeń średnich σ_n (rys. 18). Pojawiające się spiętrzenie naprężeń wywołuje powstanie i rozwinięcie się stref odkształconych plastycznie, które umożliwiają plastyczną redystrybucję sił w całej spoinie.



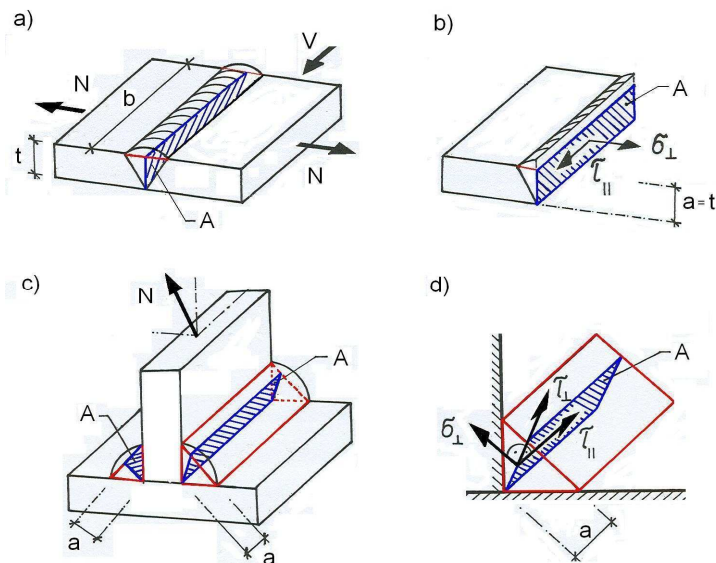
Rys. 18. Spiętrzenie naprężeń w złączu doczołowym: a) na powierzchni, b) na grubości

	Schemat połączenia	Przeptyw sił w połączeniu	Rozkład naprężeń w przekroju A-A blachy
Spoina czołowa			
Spoiny pachwinowe			

Rys. 19. Rzeczywisty rozkład naprężeń sprężystych w połączeniach spawanych

Ocenę bezpieczeństwa tj. stanu granicznego nośności połączenia spawanego przeprowadza się analizując stan wyężenia w punkcie złącza, w którym występują maksymalne naprężenia materiału spoiny. W tym celu należy wyznaczyć siły przekrojowe (M_{Ed} , N_{Ed} , V_{Ed}) w przekroju połączenia. Następnie należy ustalić potencjalną (teoretyczną) powierzchnię zniszczenia spoiny i jej wymiary obliczeniowe, tzn. grubość obliczeniową a_w oraz długość obliczeniową l_w . Sprawdzenie stanu granicznego nośności spoiny polega na analizie naprężenia maksymalnego w jej przekroju obliczeniowym (potencjalnej płaszczyźnie zniszczenia) według elementarnych wzorów wytrzymałości materiałów.

W spoinie czołowej potencjalna powierzchnia zniszczenia przechodzi przez środek spoiny i jest prostopadła do jej lica (rys. 20a, b). Jako grubość obliczeniową spoiny przyjmuje się grubość cieńszego z łączonych elementów t_{min} , natomiast jako długość l_{eff} przyjmuje się szerokość elementu b , gdy zastosowano płytki wybiegowe, lub szerokość elementu b minus dwie grubości obliczeniowe spoiny a_w (są to umowne długości kraterów końcowych), gdy nie zastosowano płytek wybiegowych.



Rys. 20. Potencjalne powierzchnie zniszczenia A oraz ogólny układ naprężeń w spoinie: czołowej (a, b) oraz pachwinowej (c, d)

W spoinie pachwinowej za potencjalną powierzchnię zniszczenia przyjmuje się powierzchnię ukośną, przechodzącą przez wysokość a_w trójkąta wpisanego w obrys spoiny (rys. 20c, d). Jako jej długość obliczeniową l_{eff} przyjmuje się długość zakładu elementów, gdy zastosowano korytka wybiegowe (rys. 12b) lub przedłużono spoiny poza długość zakładu na sąsiednie krawędzie elementów na dwie grubości spoiny a_w . W przeciwnym przypadku należy od długości zakładu odjąć dwie grubości spoiny a_w , jako długości kraterów końcowych.

Spoinę pachwinową uważa się za nośną, gdy jej długość obliczeniowa l_w na odcinku prostoliniowym spełnia warunek

$$l_w \geq \min(6a_w, 30 \text{ mm}). \quad (5)$$

Postanowienia PN-EN 1993-1-8 dotyczą nośności połączeń spawanych elementów ze stali spawalnych, które są przywoływane w PN-EN 1993-1-1, o grubości materiału nie mniejszej niż 4 mm (w przypadku mniejszych grubości elementów należy stosować PN-EN 1993-1-3). W takich połączeniach materiał spoiny musi mieć właściwości mechaniczne spoiwa porównywalne z właściwościami materiału rodzimego. Ponadto wymagane jest, aby spoiny były

wykonane na odpowiednim poziomie jakości; zazwyczaj jest to poziom jakości C wg PN-EN ISO 5817.

Jako kryterium oceny nośności spoin jest stosowane porównanie naprężeń w spoinie w stosunku do obliczeniowej nośności spoiny (metoda kierunkowa wg PN-EN 1993-8) lub alternatywnie porównanie siły działającej na jednostkę długości do nośności obliczeniowej spoiny o jednostkowej długości (metoda uproszczona wg PN-EN 1993-1-8).

W metodzie kierunkowej ocenę stanu granicznego nośności połączenia bada się analizując stan jego wyętwienia w punkcie, w którym występują maksymalne naprężenia materiału spoiny. W tym celu należy wyznaczyć obliczeniowe siły wewnętrzne (M_{Ed} , N_{Ed} , V_{Ed}) w przekroju połączenia. Następnie ustala się potencjalną powierzchnię zniszczenia spoiny A (rys. 20) i jej wymiary obliczeniowe, tzn. grubość obliczeniową spoiny a_w oraz długość obliczeniową spoiny l_{eff} .

4.2. Nośność obliczeniowa spoin pachwinowych

Zgodnie z PN-EN 1993-1-8 nośność obliczeniowa spoin pachwinowych może być określona za pomocą metody kierunkowej lub metody uproszczonej.

Metoda kierunkowa jest metodą ogólną, odwzorowującą najwierniej wyętwienie spoin pachwinowych pod wpływem obciążenia. Siły przenoszone przez spoinę o długości jednostkowej rozkłada się na składowe równoległe i prostopadłe do osi podłużnej spoiny oraz składowe normalne i styczne do płaszczyzny jej przekroju. Następnie wyznacza się naprężenia w przekroju spoiny pachwinowej, które pokazano na rys. 20d oraz rys. 21. W obliczeniach przyjmuje się równomierny rozkład naprężeń w przekroju spoiny i wyznacza się naprężenia składowe:

- normalne prostopadłe do przekroju spoiny σ_{\perp} ,
- normalne równoległe do przekroju spoiny σ_{\parallel} ,
- styczne (w płaszczyźnie przekroju) prostopadłe do osi spoiny τ_{\perp} ,
- styczne (w płaszczyźnie przekroju) równoległe do osi spoiny τ_{\parallel} .

Wg PN-EN 1993-1-8 nośność obliczeniowa spoiny pachwinowej (rys. 21; tj. sprawdzenie wytrzymałości w złożonym stanie naprężenia) jest wystarczająca, gdy spełnione są zależności

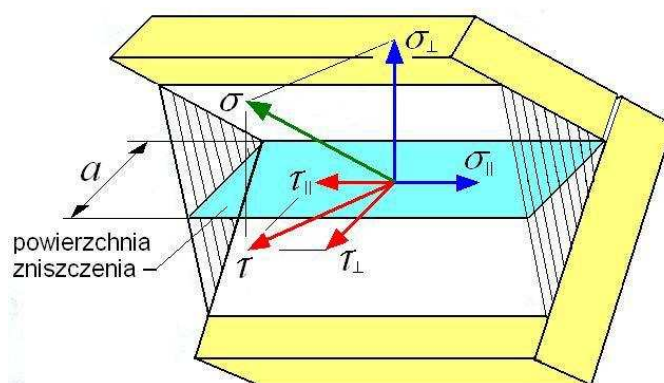
$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad \text{oraz} \quad \sigma_{\perp} \leq \frac{0,9 f_u}{\gamma_{M2}}, \quad (6)$$

gdzie:

f_u – nominalna wytrzymałość na rozciąganie stali słabszej z łączonych części,

β_w – współczynnik korekcyjny uwzględniający wyższe właściwości mechaniczne materiału spoiny w stosunku do materiału rodzimego; wartość współczynnika β_w podano w tabl. 2,

$\gamma_{M2} = 1,25$ – częściowy współczynnik bezpieczeństwa nośności spoin.



Rys. 21. Składowe naprężeń w przekroju spoiny pachwinowej

Tabl. 2. Współczynniki korekcyjne β_w spoin pachwinowych

Gatunek stali	S235	S275	S355	S420, S460
Współczynnik korekcyjny β_w	0,80	0,85	0,90	1,00

Według wzoru (6) można obliczać spoiny pachwinowe dowolnie zorientowane względem działającego obciążenia. Sprawdzenie nośności w tym przypadku opiera się na wytrzymałości materiału na rozciąganie f_u .

Według postanowień PN-EN 1993-1-8 alternatywną do metody kierunkowej jest metoda uproszczona obliczania nośności spoin pachwinowych. W tej metodzie, niezależnie od położenia płaszczyzny przekroju spoiny względem działającej siły, obliczeniową nośność spoiny na jednostkę jej długości $F_{w,Rd}$ określa się ze wzoru

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} a . \quad (7)$$

We wzorze (7) a jest grubością spoiny, a $f_{vw,d}$ jest obliczeniową wytrzymałością spoiny na ścinanie, którą wyznacza się ze wzoru

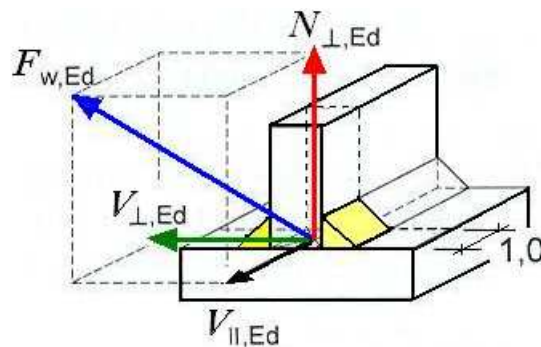
$$f_{vw,d} = \frac{f_u \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}}, \quad (8)$$

gdzie f_u , β_w - jak we wzorze (6).

Warunek obliczeniowej nośności spoiny jest spełniony, gdy w każdym jej punkcie wypadkowa $F_{w,Ed}$ wszystkich sił ($N_{\perp,Ed}$, $V_{\perp,Ed}$, $V_{II,Ed}$ – o wartościach obliczeniowych; rys. 22) przenoszona przez jednostkę długości spoiny spełnia warunek

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} \cdot \quad (9)$$

Na rys. 22 pokazano graficzną interpretację warunku nośności (9) w metodzie uproszczonej wyężenia spoiny pachwinowej.



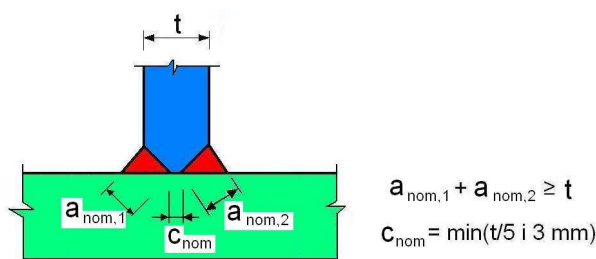
Rys. 22. Składowe sił wewnętrznych w przekroju spoiny pachwinowej

4.3. Nośność obliczeniowa spoin czołowych

Nośność obliczeniową spoin czołowych o pełnym przetopie, z odpowiednim poziomem jakości wykonania, przyjmuje się równą nośności obliczeniowej słabszej z łączonych części, pod warunkiem, że będzie wykonana z odpowiedniego materiału wykazującego w próbie rozciągania spoiny minimalną granicę plastyczności i minimalną wytrzymałość na rozciąganie nie mniejszą od wartości nominalnych tych parametrów materiału rodzimego.

Nośność obliczeniową spoin czołowych z niepełnym przetopem (rys. 5a) wyznacza się stosując metodę dla spoin pachwinowych z głębokim przetopem. Ich grubość przyjmuje się nie większą od głębokości przetopu, jaka może być regularnie uzyskiwana.

Nośność obliczeniową czołowego złącza teowego, z dwiema spoinami czołowymi z niepełnym przetopem i nadbudowanymi spoinami pachwinowymi (rys. 23) można wyznaczyć jak w przypadku spoin czołowych z pełnym przetopem, pod warunkiem, że całkowita nominalna grubość spoiny (z wyłączeniem niezespawanej szczeliny) jest nie mniejsza niż grubość t średnika złącza teowego, oraz że szerokość niezespawanej szczeliny jest nie większa niż mniejsza z wartości $t/5$ i 3 mm. Jeśli nie są spełnione te wymagania, to ich grubość ustala się jak dla spoin pachwinowych z głębokim przetopem, a nośność obliczeniową spoin należy obliczać jak w przypadku spoin czołowych z niepełnym przetopem.



Rys. 23. Efektywny pełny przetop w czołowym złączu teowym

4.4. Nośność obliczeniowa spoin pachwinowych obwodowych

Nośność obliczeniowa spoin pachwinowych obwodowych (wieńczących, ułożonych dookoła obwodu otworu wyciętego w jednej z blach w złączu zakładkowym – rys. 4a) określa się jak dla spoin pachwinowych.

4.5. Nośność obliczeniowa spoin otworowych

Nośność obliczeniową spoin otworowych $F_{w,Rd}$ (rys. 4a) określa się z wzoru

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} A_w, \quad (10)$$

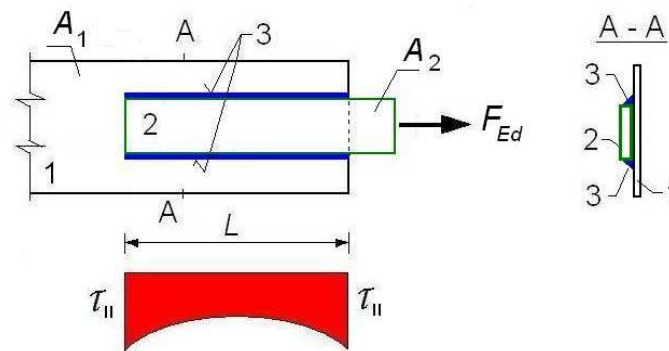
gdzie:

$f_{vw,d}$ – obliczeniowa wytrzymałość spoiny na ścinanie według wzoru (8),

A_w – przekrój obliczeniowy spoiny, przyjmowany jako pole powierzchni otworu, który wypełnia spoina.

4.6. Obliczanie połączeń zakładkowych obciążonych osiowo

W połączeniach zakładkowych obciążonych osiowo rozkład ścinających naprężeń jest nierównomierny (rys. 24). Największe śpiętrzenia występują na końcach spoin. Mierzy się je stopniem śpiętrzenia, definiowanym jako stosunek naprężeń na skraju spoiny (maksymalnych) do naprężeń średnich. Stopień śpiętrzenia naprężeń wzrasta wprost proporcjonalnie do stosunku długości spoiny do jej grubości l_w/a_w , a także jest uzależniony od proporcji pola przekroju poprzecznego łączonych elementów A_1/A_2 (rys. 24). Wyrównanie naprężeń na całej długości spoiny występuje dopiero po pojawieniu się plastycznych odkształceń na ich końcach, w miarę wzrostu obciążenia. Według PN-EN 1993-1-8 przyjmuje się, że całkowite wyrównanie naprężeń w spoinie występuje gdy jej długość nie przekracza $l_w = 150a_w$.



Rys. 24. Wytyczenie w „długich” połączeniach zakładkowych; 1, 2 – łączone elementy, 3 – spoina

Jeśli długość spoiny nie przekracza $150a_w$, wówczas można przyjmować obliczeniowo równomierny rozkład naprężeń na długości spoiny i składowe naprężeń we wzorze (6) przyjmując następujące wartości:

$$\tau_{II} = \frac{F_{Ed}}{\sum a_w l_w}, \quad (11)$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = 0, \quad (12)$$

gdzie:

F_{Ed} – obliczeniowa wartość siły działającej w spoinie,

a_w, l_w – odpowiednio grubość i długość spoiny pachwinowej.

Wzór (6) przybiera wówczas następującą postać

$$\sqrt{3\tau_{II}^2} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}}. \quad (13)$$

Ze względu na nierównomierny rozkład naprężeń na długości w tzw. „długich” połączeniach zakładkowych tj. gdy $l_w > 150a_w$ (rys. 24) nośność obliczeniową spoin zmniejsza się stosując współczynnik redukcyjny β_{Lw} .

Współczynnik redukcyjny β_{Lw} przyjmuje się:

- w przypadku połączeń zakładkowych dłuższych niż $150a_w$

$$\beta_{Lw,1} = 1,2 - \frac{0,2L_j}{150a_w}, \quad (14)$$

- w przypadku spoin pachwinowych dłuższych niż 1,7 m łączących żebra poprzeczne w elementach spawanych z blach

$$\beta_{Lw,2} = 1,1 - \frac{L_w}{17} \quad \text{lecz} \quad 0,6 \leq \beta_{Lw,2} \leq 1,0, \quad (15)$$

gdzie:

L_j – całkowita długość zakładki w kierunku przekazywania siły,

$L_{Lw,2}$ – długość spoiny (w metrach).

4.7. Obliczanie złożonych połączeń ze spoinami pachwinowymi

W połączeniach doczołowych, teowych lub zakładkowych obciążonych mimośrodowo spoiny podlegają w ogólnym przypadku jednoczesnemu wyteżeniu od siły osiowej, siły poprzecznej, momentu zginającego i momentu skręcającego. Wówczas są one nierównomiernie wyteżone. Procedura obliczeń (na podstawie sprężystego rozkładu naprężeń) tak wyteżonych połączeń spawanych przedstawia się następująco:

- określenie kądu spoin,
- sprowadzenie obciążeń do środka ciężkości układu spoin,

- znalezienie w układzie spoin punktu, w którym składowe naprężenia będą największe (niekiedy należy przeanalizować stan naprężeń w kilku punktach),
- wyznaczenie w przyjętych do obliczeń punktach naprężeń: normalnych, stycznych (od działania sił wewnętrznych) i sprawdzenie ich wypadkowych ze wzoru (6).

W przypadku wyęźnienia spoiny od siły podłużnej, sił poprzecznych i dwukierunkowego zginania naprężenia normalne σ oraz styczne τ wyznacza się ze wzorów:

$$\sigma = \frac{F_{Ed}}{A_w} + \frac{M_{y,Ed}}{I_y} z + \frac{M_{z,Ed}}{I_z} y, \quad (16)$$

$$\tau_z = \frac{V_{z,Ed}}{A_{w,v}}, \quad (17)$$

$$\tau_y = \frac{V_{y,Ed}}{A_{w,v}}, \quad (18)$$

gdzie:

F_{Ed} – obliczeniowa siła podłużna, prostopadła do kładu spoin,

$M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$ – obliczeniowe momenty zginające względem odpowiednich osi przekroju,

$V_{y,Ed}$, $V_{z,Ed}$ – obliczeniowe siły poprzeczne względem odpowiednich osi przekroju,

A_w – pole przekroju poprzecznego kładu spoin,

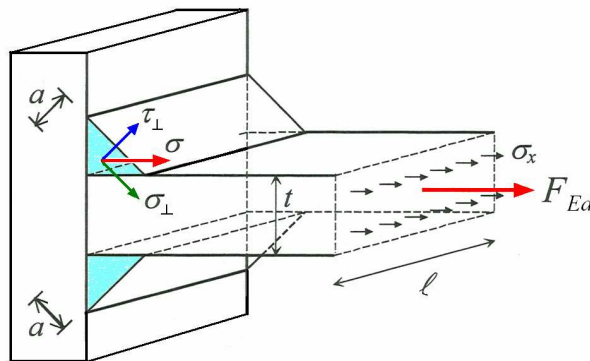
$A_{w,v}$ – pole przekroju poprzecznego kładu spoin ułożonych obok ścianek kształtownika, stanowiących pole przekroju czynnego przy ścinaniu mocowanego kształtownika,

I_y , I_z – momenty bezwładności kładu spoin względem osi głównych,

y , z – współrzędne punktu, w którym określa się naprężenia.

Naprężenia normalne σ obliczone ze wzoru (16) (rys. 21, 25) są nachylone pod kątem 45° do powierzchni obliczeniowej (zniszczenia). Sprawdzając nośność spoiny według wzoru (6) należy naprężenia σ rozłożyć na składowe naprężeń prostopadłych do płaszczyzny zniszczenia σ_\perp i składowe naprężeń równoległych do płaszczyzny zniszczenia $\sigma_\parallel = \tau_\perp$. Oblicza się je ze wzoru

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}}. \quad (19)$$



Rys. 25. Rozkład naprężeń w spoinie pachwinowej

Jeśli kład spoin jest wyłożony obciążeniem skręcającym, to naprężenia styczne w rozpatrywanym punkcie oblicza się ze wzoru

$$\tau_M = \frac{M_{o,Ed} r}{I_o}, \quad (20)$$

gdzie:

$M_{o,Ed}$ – moment skręcający,

I_o – biegunowy moment bezwładności kładu spoin,

r – odległość rozpatrywanego punktu od środka ciężkości spoin.

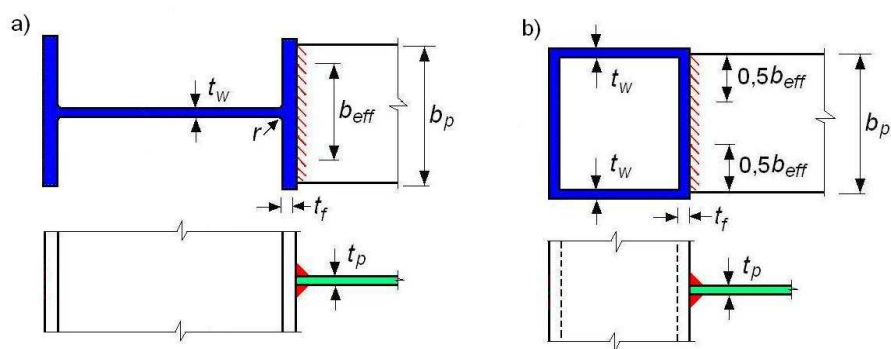
W obliczenia nośności spoin przydatne są charakterystyki geometryczne różnych układów spoin, które podano w tabl. 3.

Tablica 3. Charakterystyki geometryczne różnych układów spoin

Układ spoin	A_w	I_y	I_o
	$A_w = a_w h$	$I_y = a_w \frac{h^3}{12}$	$I_o = a_w \frac{h^3}{12}$
	$A_w = a_w 2h$	$I_y = a_w \frac{h^3}{6}$	$I_o = a_w \frac{h^3 + 3hb^2}{6}$
	$A_w = a_w 2h$	$I_y = a_w \frac{bh^2}{2}$	$I_o = a_w \frac{b^3 + 3bh^2}{6}$
	$A_w = a_w 2(h + b)$	$I_y = a_w \frac{h^3 + 3bh^2}{6}$	$I_o = a_w \frac{(h + b)^3}{6}$
	$A_w = a_w (2b + h)$ $(y_c = \frac{b^2}{2b + h})$	$I_y = a_w \frac{h^3 + 6bh^2}{12}$	$I_o = a_w \left(\frac{(2b + h)^3}{12} - \frac{b^2(h + b)^2}{2b + h} \right)$
	$A_w = a_w (2h + b)$ $(z_c = \frac{h^2}{2h + b})$	$I_y = a_w \frac{b^4 + 2hb^3}{3(2b + h)}$	$I_o = a_w \left(\frac{(2h + b)^3}{12} - \frac{h^2(h + b)^2}{2h + b} \right)$
	$A_w = a_w (h + b)$ $(z_c = \frac{h^2}{2(h + b)})$ $(y_c = \frac{b^2}{2(h + b)})$	$I_y = a_w \frac{h^4 + 4bh^3}{12(h + b)}$	$I_o = a_w \frac{(h + b)^4 - 6h^2b^2}{12(h + b)}$
	$A_w = a_w \pi d$	$I_y = a_w \frac{\pi d^3}{8}$	$I_o = a_w \frac{\pi d^3}{4}$
	$A_w = a_w 2(2b + h)$	$I_y = a_w \left(\frac{h^3}{6} + bh^2 \right)$	$I_o = a_w \left(\frac{h^3 + 6bh^2 + 2b^3}{6} \right)$

4.8. Połączenia z pasem bez żeber

W przypadku spawanego połączenia poprzecznej blachy z nieuzębowanym pasem kształtownika o przekroju dwuteowym (rys. 26a) lub skrzynkowym (rys. 26b), ze względu na odkształcalność pasa i nierównomierny rozkład naprężeń w spoinie, należy zredukować szerokość pasa (blachy) do szerokości efektywnej b_{eff} .



Rys. 26. Efektywna szerokość w złączeniu teowym bez żeber

Zredukowaną (współpracującą) szerokość efektywną nieuzębrowanego kształtownika I lub H (rys. 26) oblicza się ze wzoru

$$b_{eff} = t_w + 2s + 7kt_f, \quad (21)$$

gdzie $s = r$ w przypadku dwuteowników walcowanych na gorąco, a $s = \sqrt{2a}$ w przypadku kształtowników spawanych (a - grubość spoiny łączącej pas ze środkami).

Współczynnik k w zależności (21) oblicza się ze wzoru

$$k = \frac{t_f f_{y,f}}{t_p f_{y,p}} \leq 1,0, \quad (22)$$

gdzie: $f_{y,f}$, $f_{y,p}$ - granica plastyczności stali odpowiednio pasa kształtownika i blachy łączonej z pasem.

Można nie stosować żeber w połączeniu jak na rys. 26, gdy spełniony jest warunek

$$b_{eff} \geq \frac{f_{y,p}}{f_{u,p}} b_p, \quad (23)$$

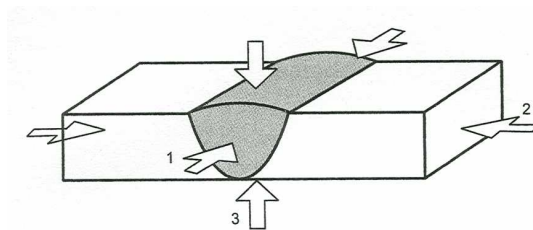
gdzie: f_u jest wytrzymałością na rozciąganie stali blachy przyspawanej do kształtownika, a b_p jest szerokością tej blachy.

5. Uwagi końcowe

Spawanie stali jest procesem złożonym, którym zajmuje się dział techniki *spawalnictwo*. Dlatego projekt budowlanej konstrukcji stalowej zaleca się konsultować pod względem technologicznym ze specjalistami z dziedziny spawalnictwa.

Spawanie stali może wpływać negatywnie na parametry wytrzymałościowe i użytkowe budowlanych konstrukcji stalowych.

Podczas spawania tylko niewielka część elementu podlega intensywnemu nagrzananiu, aż do temperatury topnienia stali, podczas, gdy cała jego reszta pozostaje w temperaturze otoczenia. Gdy temperatura w spoinie zaczyna spadać następuje jej skurcz (rys. 27). Jest on jednak uniemożliwiany przez zamocowanie spoiny w sztywnych ściankach mniej ogrzanej części elementu, czego skutkiem są odkształcenia spawalnicze łączonych elementów, a przede wszystkim powstanie w nich naprężeń spawalniczych. Skurcz spoin powoduje utworzenie się przestrzennego stanu naprężeń spawalniczych.

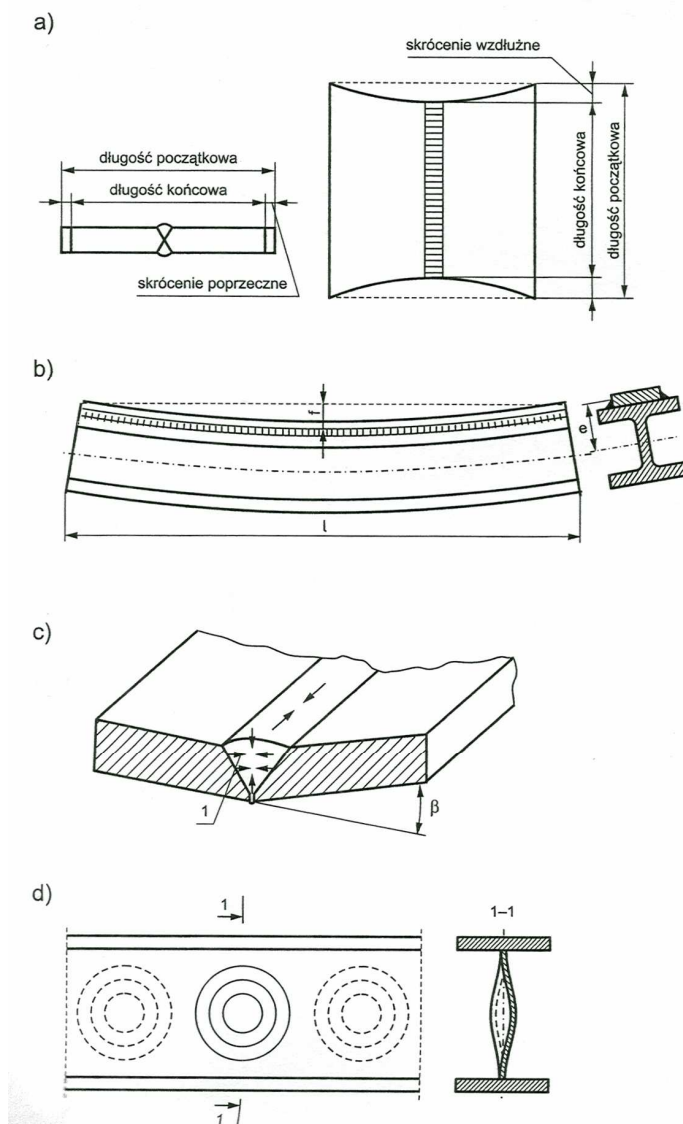


Rys. 27. Skurcz przestrzenny spoiny

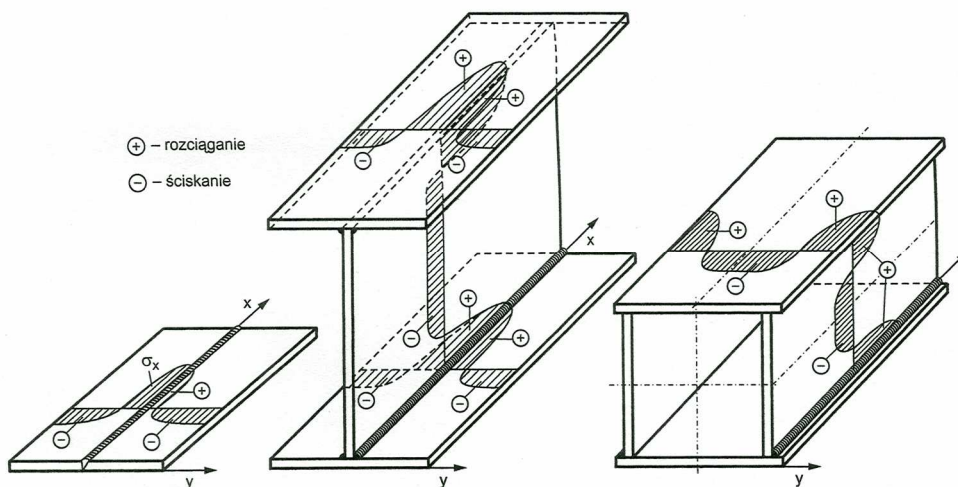
Skutkiem odkształceń spawalniczych konstrukcji może być: skrócenie podłużne (rys. 28a), wygięcie względne (rys. 28b), wygięcie kątowe (rys. 28c), utrata stateczności lokalnej (rys. 28d).

Na rys. 29 pokazano przykłady rozkładu naprężeń spawalniczych w elementach o różnych kształtach. Naprężenia spawalnicze są naprężeniami własnymi, tzn. istnieją w elemencie jeszcze przed przyłożeniem do niego jakichkolwiek obciążeń i są one zrównoważone w przekroju elementu. Ich wpływ objawia się dopiero w trakcie eksploatacji obiektu budowlanego.

Występowanie w konstrukcji naprężeń spawalniczych jest zdecydowanie negatywne w odniesieniu do jej nośności, gdyż mogą się one sumować z naprężeniami od oddziaływań zewnętrznych, doprowadzając do wyczerpania nośności materiału. Aby zmniejszyć ich negatywne skutki należy stosować właściwe rozwiązania konstrukcyjne i odpowiednie technologie spawania oraz zabiegi po spawaniu [3], [14].



Rys. 28. Przykłady odkształceń spawalniczych: a) skrócenie podłużne, b) wygięcie względne, c) wygięcie kątowe, d) utrata stateczności lokalnej



Rys. 29. Przykłady rozkładu naprężeń spawalniczych w elementach o różnych kształtach

Literatura

- [1] Biegus A.: Nośność graniczna stalowych konstrukcji prętowych. PWN, Warszawa – Wrocław, 1997.
- [2] Biegus A.: Obliczanie spoin według Eurokodu 3. Builder nr 11/2009.
- [3] Bródka J., Kozłowski A., Ligocki I., Łaguna J., Ślęczka L.: Projektowanie i obliczanie połączeń i węzłów konstrukcji stalowych. Polskie Wydawnictwo Techniczne, Rzeszów 2009.
- [4] Kozłowski A., Ślęczka L., Wierzbicki S.: Projektowanie połączeń spawanych wg PN-EN 1993-1-1 i PN-EN 1993-1-8. Inżynieria i Budownictwo nr 3/2008.
- [5] Kielbasa Z., Kozłowski A., Kubiszyn W., Pisarek S., Reichhart A., Stankiewicz B., Ślęczka L., Wojnar A.: Konstrukcje stalowe. Przykłady obliczeń według PN-EN 1993-1. Część pierwsza. Wybrane elementy i połączenia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów 2009.
- [6] PN-90/B- 03200 Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [7] PN-EN 1993-1-1: 2006. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [8] PN-EN 1993-1-3: 2008. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-3: Reguły ogólne – Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno.
- [9] PN-EN 1993-1-8: 2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: Projektowanie węzłów.
- [10] PN-EN-1993-1-9: 2007. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-9: Zmęczenie.
- [11] PN-EN-1993-1-10: 2007. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-10: Dobór stali ze względu na odporność na kruche pękanie i ciągliwość międzywarstwową.
- [12] PN-EN 1090-2:2009. Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych. Część 2: Wymagania techniczne dotyczące konstrukcji stalowych.
- [13] PN-EN ISO 5817 Spawanie. Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu, i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką). Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych.
- [14] Rykaluk K.: Konstrukcje stalowe. Podstawy i elementy. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2006.