

3.3

Połączenia spajane

W TYM ROZDZIALE DOWIESZ SIĘ:

- dlaczego połączenia spajane stanowią najszerszą grupę połączeń nierozłącznych
- dlaczego połączenia klejowe są coraz powszechniej stosowane w konstrukcji maszyn
- do jakiej temperatury trzeba podgrzać łączone elementy, aby uzyskać określony rodzaj połączenia

3.3.1. Wprowadzenie

Połączenia spajane należą do połączeń nierozłącznych bezpośrednich. Główną część połączeń spajanych stanowią połączenia spawalnicze. Ogólnie połączenia spawalnicze dzieli się na trzy grupy:

1. spawane,
2. zgrzewane,
3. lutowane.

Tabela 3.2. Charakterystyka połączeń spajanych

Cecha	Rodzaj połączenia spajanego			
	spawalnicze			klejowe
	spawane	zgrzewane	lutowane	
Temperatura elementów w miejscu łączenia	powyżej temperatury topnienia – nadtopienie	temperatura topnienia – z nadtopieniem – bez nadtopienia	temperatury otoczenia lub lutu	temperatura otoczenia
Rodzaj materiału dodatkowego	materiał o składzie zbliżonym do składu materiału łączonych elementów	brak	metal, którego temperatura topnienia jest niższa od temperatury materiału łączonego	klej
Stan materiału dodatkowego podczas procesu spajania	ciekły powyżej temperatury topnienia	–	ciekły powyżej temperatury topnienia	zależnie od rodzaju kleju
Docisk części łączonych	bez docisku	z dociskiem	bez docisku	zależnie od rodzaju kleju i technologii klejenia

Źródło: A. Rutkowski, *Części maszyn*, WSiP, Warszawa 2007

Do połączeń spajanych należą również połączenia klejowe. Jest to często marginalizowany rodzaj połączeń w ujęciu podstaw konstrukcji maszyn. Znaczny rozwój inżynierii materiałowej, w tym również grupy materiałów klejowych, znacząco zwiększył zastosowanie połączeń klejowych w konstrukcji maszyn. Zmusza to konstruktorów do poszerzenia wiedzy z tego zakresu.

Kryterium podziału połączeń spajanych jest następujące:

- stan materiału rodzimego w miejscu łączenia,
- źródło energii wykorzystywanej do łączenia,
- sposób łączenia materiałów:
 - w wyniku dyfuzji – wzajemne przenikanie cząstek łączonych materiałów,
 - w wyniku kohezji – spójność międzycząsteczkową łączonych materiałów.

Podstawowy podział połączeń spajanych i ich cechy charakterystyczne przedstawiono w tabeli 3.2.

3.3.2. Połączenia spawane

Połączenie spawane to trwałe, metalurgiczne złączenie elementów. Uzyskuje się je w wyniku nadtopienia brzegów łączonych elementów, przeważnie z udziałem materiału dodatkowego (spoiwa) wskutek działania skoncentrowanego źródła ciepła. Miejsce łączenia elementów nazywa się **spoiną**. Spoina jest mieszaniną materiałów łączonych i spoiwa. Budowa strukturalna i właściwości spoiny są inne niż łączonych materiałów. Jest to rodzaj karbu pod względem zarówno strukturalnym, jak i geometrycznym oraz naprężeniowym. Dlatego należy to uwzględnić w obliczeniach wytrzymałościowych.

W zależności od źródła ciepła zastosowanego podczas spawania rozróżnia się następujące techniki spawania:

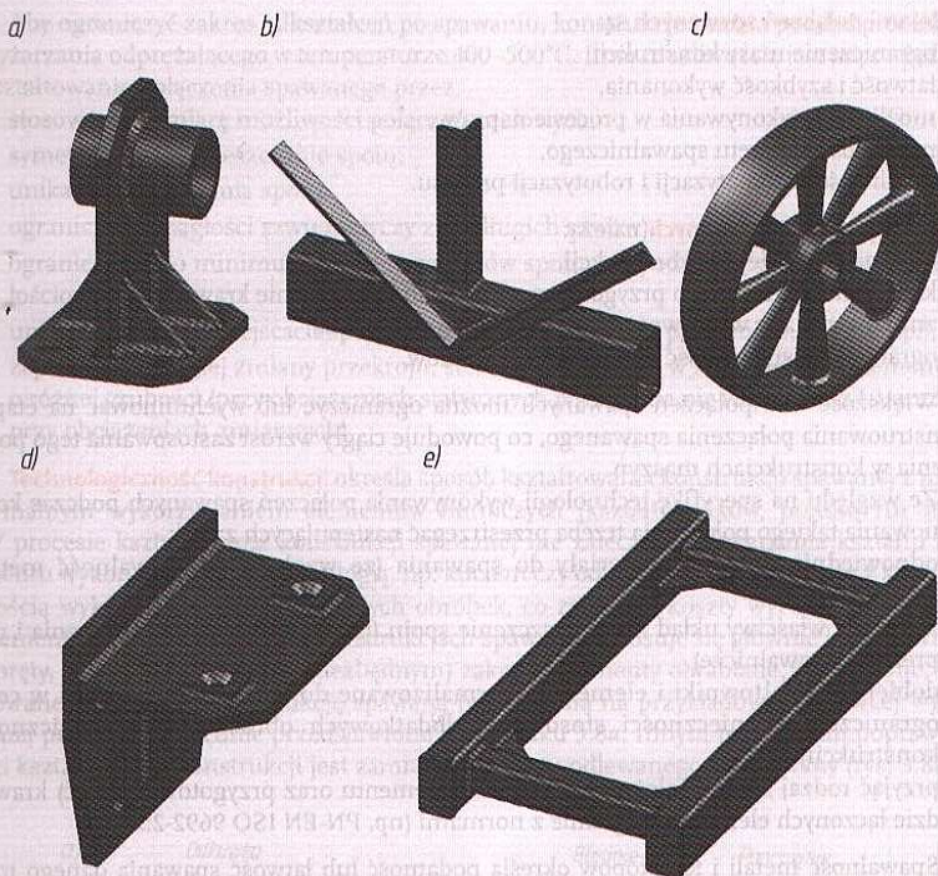
- gazowe,
- łukowe,
- atomowe,
- plazmowe,
- elektronowe,
- laserowe,
- tworzyw termoplastycznych.

W zależności od konstrukcji złącza spawanego, rodzaju łączonych materiałów, kształtu i ich wielkości oraz innych aspektów technologicznych wybieramy jedną z wymienionych technik spawania, pamiętając, że każda z nich znacznie wpływa na nośność i trwałość połączeń spawanych.

Technologiczność konstrukcji spawanych

Przed przystąpieniem do konstruowania połączenia spawanego należy rozważyć jego zasadność w konstrukcji. Główną przesłanką może być znaczne ograniczenie masy konstrukcji, zwłaszcza wielkogabarytowej. Oszczędność materiału w porównaniu z technologiami odlewania lub kucia jest znaczna.

Przykładowo konstrukcja spawana może być lżejsza nawet do 50% w odniesieniu do tej samej konstrukcji wykonanej jako odlew żeliwny. Wynika to głównie z możliwości zastosowania cieńszych ścianek w konstrukcji, możliwości zastosowania materiałów o większej wytrzymałości oraz ograniczeniu naddatków na obróbkę końcową (rys. 3.7).



Rys. 3.7. Przykłady połączeń spawanych: a) korpusy łożysk, b) konstrukcje kratownicowe, c) koła pasowe (zębate) dużych rozmiarów, d) wsporniki, e) konstrukcje ramowe

Innym przykładem ograniczenia masy konstrukcji z zastosowaniem spawania są konstrukcje nitowane. Odciążenie konstrukcji może wynosić do 20%. Można ponadto całkowicie wyeliminować blachę węzłową w konstrukcjach kratownicowych, a przez łączenie kształtowników krawędziami otrzymać nowe przekroje, które znacząco zwiększają sztywność prętów kratownicy. Ma to duże znaczenie w przypadku prętów ściskanych.

Pozostałe zalety połączeń spawanych, tj. prostota wykonania, łatwa dostępność podstawowych urządzeń spawalniczych, możliwość łączenia elementów w różnym kształcie i wymiarach oraz różnorodność technik spawalniczych, sprawiają, że są one najpowszechniej stosowane z grupy połączeń nierozłącznych. Z tego względu konstrukcje wykonywane technologiami kucia lub odlewania są zastępowane przez konstrukcje spawane, np. korpusy obrabiarek lub zbiorniki ciśnieniowe.

Jedną z najbardziej znanych konstrukcji spawanych jest most stalowy w Maurzycach na rzece Słudwi, który jako pierwszy na świecie został wykonany za pomocą techniki spawania.

Zaletami połączeń spawanych są:

- ograniczenie masy konstrukcji,
- łatwość i szybkość wykonania,
- możliwość wykonywania w procesie napraw,
- mobilność osprzętu spawalniczego,
- możliwość automatyzacji i robotyzacji procesu.

Do wad połączeń spawanych należą:

- odkształcenia cieplne konstrukcji,
- konieczność wstępnego przygotowywania detali (ukosowanie krawędzi),
- znaczne zmiany właściwości mechanicznych połączenia,
- ograniczona spawalność niektórych materiałów.

Większość wad połączeń spawanych można ograniczyć lub wyeliminować na etapie konstruowania połączenia spawanego, co powoduje ciągły wzrost zastosowania tego połączenia w konstrukcjach maszyn.

Ze względu na specyfikę technologii wykonywania połączeń spawanych podczas konstruowania takiego połączenia trzeba przestrzegać następujących zasad:

- odpowiednio dobierać materiały do spawania (ze względu na spawalność metali i stopów),
- zapewnić właściwy układ i rozmieszczenie spoin (ma to wpływ na odkształcenia i naprężenia spawalnicze),
- dobierać kształtowniki i elementy znormalizowane do budowy konstrukcji w celu ograniczenia konieczności stosowania dodatkowych obróbek (technologiczność konstrukcji),
- przyjąć rodzaj spoiny zależnie od grubości elementu oraz przygotować (ściąć) krawędzie łączonych elementów zgodnie z normami (np. PN-EN ISO 9692-2:2002).

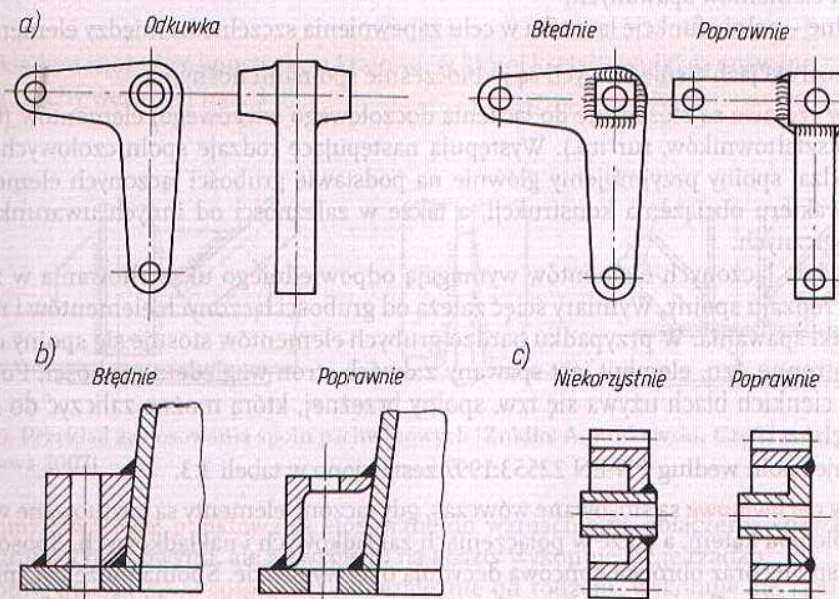
Spawalność metali i ich stopów określa podatność lub łatwość spawania danego materiału, zapewniającą uzyskanie spoin o wysokich właściwościach mechanicznych. Najłatwiej spawa się stale niskowęglowe o zawartości węgla mniejszej niż 0,25%. Powstała nawet grupa stali przeznaczona głównie do spawania: S185, S235JR i S235. W miarę wzrostu zawartości węgla w stali spadają właściwości mechaniczne spoiny w wyniku pojawiania się pęknięć na granicy materiał – spoina. Do materiałów trudno spawalnych należą stale wysokostopowe, stopy miedzi i aluminium, a także żeliwo szare.

Odkształcenia i naprężenia oraz **wady spawalnicze** określają zakres zmian geometrycznych konstrukcji po spawaniu i są spowodowane odkształceniami cieplnymi. W procesie spawania lokalnie skupione źródło ciepła powoduje nierównomierne oddziaływanie temperatury (grzanie i stygnięcie). Tego następstwem jest miejscowy skurcz spoiny, który wprowadza dodatkowe naprężenia (naprężenia spawalnicze) w spawanym elemencie po jego ostygnięciu. Naprężenia powodują odkształcenia elementu lub całej konstrukcji. Ponadto mogą się one sumować z naprężeniami pochodzącymi od obciążeń zewnętrznych. Odkształcenia spawalnicze mogą również odkształcić element po dłuższym czasie, np. w wyniku obróbki wykańczającej (wskutek uwolnienia naprężeń spawalniczych). Dlatego znajomość rozkładu naprężeń spawalniczych jest istotna dla wytrzymałości konstrukcji. Oprócz odkształceń i naprężeń spawalniczych w połączeniach spawanych mogą też wystąpić wady spawalnicze. Są one spowodowane niewłaściwie wykonanym procesem spawania i zależą głównie od umiejętności spawacza. Ograniczenie wad spawalniczych można uzyskać w wyniku automatyzacji lub robotyzacji tego procesu.

Aby ograniczyć zakres odkształceń po spawaniu, konstrukcje można poddać procesowi wyżarzania odpężającego w temperaturze 400–500°C. Inną możliwością jest odpowiednie kształtowanie połączenia spawanego przez:

- stosowanie w miarę możliwości połączeń czołowych,
- symetryczne rozmieszczanie spoin,
- unikanie krzyżowania spoin,
- ograniczenie ciągłości szwu (dotyczy zbyt długich szwów),
- ograniczenie do minimum liczby i wymiarów spoiny na podstawie obliczeń wytrzymałościowych,
- unikanie spoin w miejscach spiętrzenia naprężeń (zmiana przekrojów, otwory itp.),
- zapewnienie ciągłej zmiany przekroju, stosując pochylenia w razie łączenia elementów o różnej grubości (przy obciążeniach statycznych pochylenie nie większe niż 1:1 oraz 1:4 przy obciążeniach zmiennych).

Technologiczność konstrukcji określa sposób kształtowania konstrukcji spawanej z maksymalnym wykorzystaniem elementów hutniczych (kształtowników, prętów, rur itp.). W procesie kształtowania konstrukcji spawanej nie zaleca się odtwarzania kształtu elementu wykonanego inną technologią, np. kuciem czy odlewaniem. Wiąże się to z koniecznością wykonania wielu dodatkowych obróbek, co zwiększa koszty wytworzenia i masę elementu. W związku z tym w konstrukcjach spawanych stosuje się głównie kształtowniki i pręty, a tylko w niewielkim (niezbędnym) zakresie elementy obrabiane, np. toczone, frezowane, odkuwane. Konstrukcję spawaną (wzorowaną na przykładowej odkuwce) wykonaną poprawnie i błędnie przedstawiono na rysunku 3.8a. Innym przykładem poprawności kształtowania konstrukcji jest zamiana elementu odlewanego na spawany (rys. 3.8b).



Rys. 3.8. Przykłady poprawności kształtowania konstrukcji spawanych [Źródło: A. Rutkowski, Części maszyn, WSiP, Warszawa 2007]

Technologiczność konstrukcji może zostać ograniczona z powodu warunków wytrzymałościowych (rys. 3.8c – piasta koła zębatego). W kole korzystniej jest wykonać spawanie na większej średnicy ze względu na większe pole przekroju spoiny (większy obwód). W tym celu niestety należy zastosować kształtowaną tuleję o większej masie niż w przypadku rury i tarczy.

W razie spoin pachwinowych zaleca się:

- grubość spoiny powinna mieścić się w przedziałach:
 $0,2 g_2 \leq a_n \leq 0,7 g_1$ oraz $2,5 \text{ mm} \leq a_n \leq 16 \text{ mm}$ (a_n – nominalna wielkość spoiny, g_1 – grubość cieńszego elementu, g_2 – grubość grubszego elementu),
- ograniczyć lub wyeliminować stosowanie spoin pachwinowych w konstrukcjach obciążonych dynamicznie,
- unikać krzyżowania spoin.

Rodzaje spoin i ich oznaczenie

W zależności od wzajemnego położenia łączonych elementów występują:

- spoiny czołowe,
- spoiny pachwinowe.

Mogą również występować (np. w połączeniach zakładkowych) spoiny otworowe, punktowe lub w przypadku bardzo cienkich elementów spoiny brzeżne (grzbietowe). Podział ten jest uwzględniany w obliczeniach wytrzymałościowych.

W zależności od przeznaczenia połączeń spawanych rozróżniamy spoiny:

- nośne – pełnią funkcję łącznika między elementami i przenoszą znaczne obciążenia;
- łączne – pełnią funkcję łącznika w celu zapewnienia względnego położenia między elementami. Są stosowane przy nieznacznych obciążeniach, a także do wstępnego łączenia elementów spawanych;
- szczelne – pełnią funkcję łącznika w celu zapewnienia szczelności między elementami.

W konstrukcjach ciśnieniowych są jednocześnie spoinami nośnymi.

Spoiny czołowe są stosowane do łączenia doczołowego (stykowego) elementów (blach, prętów, kształtowników, rur itp.). Występują następujące rodzaje spoin czołowych: **I**, **V**, **Y**, **U**. Rodzaj spoiny przyjmujemy głównie na podstawie grubości łączonych elementów oraz charakteru obciążenia konstrukcji, a także w zależności od innych uwarunkowań technologicznych.

Krawędzie łączonych elementów wymagają odpowiedniego ukształtowania w zależności od rodzaju spoiny. Wymiary ściąg zależą od grubości łączonych elementów i rodzaju techniki spawania. W przypadku bardzo grubych elementów stosuje się spoiny czołowe dwustronne, tzn. element jest spawany z dwóch stron względem grubości. Podczas łączenia cienkich blach używa się tzw. spoiny brzeżnej, którą można zaliczyć do spoin czołowych.

Rodzaje spoin według PN-EN 22553:1997 zestawiono w tabeli 3.3.

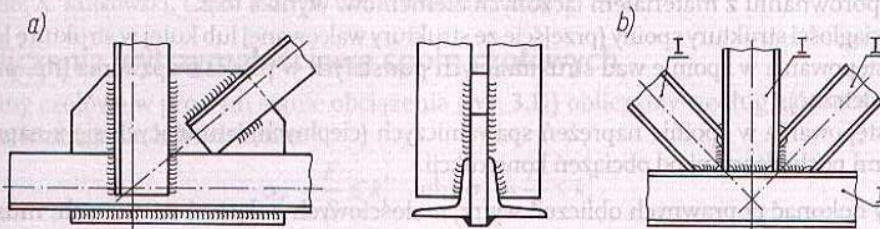
Spoiny pachwinowe są stosowane wówczas, gdy łączone elementy są usytuowane względem siebie pod kątem, a także w połączeniach zakładkowych i nakładkowych. Sposób wykonania spoiny oraz obróbka końcowa decydują o jej wyglądzie. Spoina może być: płaska, wklęsła i wypukła. Spoiny płaskie są używane jako spoiny nośne, a wklęsłe – jako łączne. Spoiny wypukłe są wykorzystywane rzadziej ze względu na czasochłonność ich wykonania oraz większe zużycie elektrod. Spoiny pachwinowe, tak jak czołowe, mogą być spoinami dwustronnymi.

Tabela 3.3. Rodzaje spoin (wg PN-EN 22553:1997)

Czołowa jednorodna					
Spoina	Znak spoiny	Przekrój spoiny	Spoina	Znak spoiny	Przekrój spoiny
I	II		brzeżna	JL	
V	V		pachwinowa	płaska	
1/2V	1/2V			wklęsła	
Y	Y			wypukła	
1/2Y	1/2Y		otwarta	podłużna	
U	Y			okrągła	
1/2U	1/2U		punktowa	O	

Źródło: A. Rutkowski, Części maszyn, WSiP, Warszawa 2007

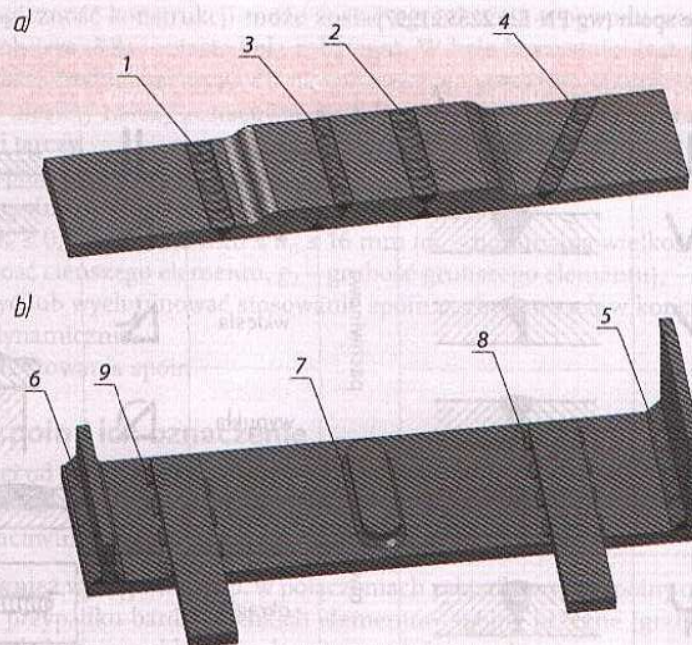
Przykładem może być konstrukcja kratowa, w której kształtowniki są spawane z dwóch stron blachy węzłowej (rys. 3.9).



Rys. 3.9. Przykład zastosowania spoin pachwinowych [Źródło: A. Rutkowski, Części maszyn, WSiP, Warszawa 2007]

Spoiny otworowe, punktowe są stosowane do wzmacniania połączenia spawanego ze spoinami pachwinowymi, ale ze względu na koszty wykonuje się je rzadko.

Spoiny, inaczej **szwy spawalnicze**, niezależnie od rodzaju, wykonuje się jako odcinki lub łuki o pewnych długościach względem elementu. Mogą być orientowane wzdłużnie, poprzecznie lub skośnie względem kierunku działania siły lub osi spawanego elementu. Usytuowanie szwów względem siebie i przedmiotu może być: obwodowe, przerywane i przestawne. Najczęściej występujące szwy spawalnicze pokazano na rysunku 3.10.



Rys. 3.10. Rodzaje szwów i połączeń spawanych: a) połączenia czołowe, b) połączenia pachwinowe; rodzaje spoin: 1, 5 – jednostronna, 2, 6 – dwustronna 3 – dwustronna przestawna, rodzaje szwów: 1 – poprzeczny, 4 – skośny, 7 – wzdłużny (obwodowy), 8 – przerywany, 9 – przerywany przestawny

Zasady obliczania połączeń spawanych

Obliczenia wytrzymałościowe połączeń spawanych polegają na określeniu wytrzymałości elementów stanowiących to połączenie, czyli spoiny i elementów spawanych. Spoina stanowi najsłabszy element połączenia ze względu na mniejszą wytrzymałość materiału spoiny w porównaniu z materiałem łączonych elementów. Wynika to z:

- nieciągłości struktury spoiny (przejście ze struktury walcowanej lub kutej w strukturę laną),
- występowania w spoinie wad strukturalnych powstałych w procesie spawania (np. pustki powietrzne),
- występowania w spoinie naprężeń spawalniczych (ciepłnych) sumujących się z naprężeniami pochodzącymi od obciążeń konstrukcji.

Aby dokonać poprawnych obliczeń wytrzymałościowych połączeń spawanych, musimy odpowiednio określić naprężenia dopuszczalne materiału spoiny.

Naprężenia dopuszczalne są określane w zależności od rodzaju spoiny (czołowa lub pachwinowa) oraz rodzaju obciążenia działającego na spoinę (np. rozciąganie, zginanie). Dlatego w obliczeniach statycznych i zmęczeniowych przyjmujemy współczynnik z osłabienia spoiny, który w odniesieniu do naprężeń dopuszczalnych materiału pozwala na wyznaczenie naprężeń dopuszczalnych spoiny. Ogólna zależność określająca naprężenia dopuszczalne materiału spoiny jest następująca:

$$k'_i = z \cdot k_i, \quad (3.4)$$

gdzie: i – indeks określający rodzaj obciążenia, np. k_r – rozciąganie, k_g – zginanie, k_c , k_s , k_t ,
 z – współczynnik osłabienia wytrzymałości spoiny.

Obliczenia wytrzymałościowe oparte na dopuszczalnych naprężeniach k' materiału spoiny i wyznaczone na podstawie współczynnika z są obliczeniami przybliżonymi. Dlatego w przypadku konstrukcji odpowiedzialnych lub obciążonych zmiennie, również dynamicznie, podczas obliczeń trzeba uwzględnić też:

- technikę spawania,
- rodzaj spoiny czołowej (I, U, V itd.),
- jakość spoiny,
- rodzaj obróbki spoiny po spawaniu,
- wytrzymałość materiału (im wyższa wartość R_m , tym mniejsze wartości współczynnika z),
- sposób wykonania połączenia (spawanie ręczne, automatyczne itp.),
- kontrolę procesu spawania,
- rodzaj i charakter obciążeń (np. dynamiczne, wysoko lub nisko cyklowe),
- dodatkowe czynniki zewnętrzne oddziałujące na spoinę (np. środowisko korozyjne),
- inne.

Podstawowe wartości współczynników k i z zestawiono w tabeli 3.4. Do obliczeń dokładnych należy korzystać z literatury fachowej w tym zakresie.

Tabela 3.4. Wartości współczynników k i z z wytrzymałości spoiny

Rodzaj spoiny	Rodzaj obciążenia	Wartość współczynnika z	Naprężenia dopuszczalne k w spoinie w odniesieniu do materiału spawanego
Czołowa	rozciąganie	0,8	$k'_r = 0,8k_r$
	ściskanie	1,0	$k'_c = k_c$
	zginanie	0,9	$k'_g = 0,9k_g$
	ścinięcie	0,65	$k'_t = 0,65k_t$
Pachwinowa	wszystkie rodzaje obciążeń	0,65	$k'_t = 0,65k_t$

Źródło: A. Rutkowski, *Części maszyn*, WSiP, Warszawa 2007

Obliczenia wytrzymałościowe spoin czołowych

Spoiny czołowe w prostym stanie obciążenia (rys. 3.11) obliczamy według zależności:

- na rozciąganie lub ściskanie:

$$\sigma_r = \frac{F}{S} \leq k'_r \quad \text{lub} \quad \sigma_c = \frac{F}{S} \leq k'_c, \quad (3.5)$$

- na ścinanie:

$$\tau_t = \frac{F}{S} \leq k'_t, \quad (3.6)$$

- na zginanie:

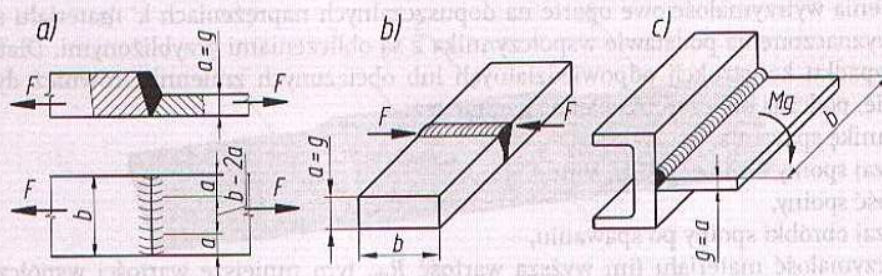
$$\sigma_g = \frac{M_g}{W_x} \leq k'_g, \quad (3.7)$$

gdzie: F – siła obciążająca połączenie [N · m],

M_g – moment gnący obciążający połączenie [N · m],

S – pole przekroju spoiny [mm²],

W_x – wskaźnik wytrzymałości przekroju spoiny względem osi x [mm³].



Rys. 3.11. Wymiary spoin czołowych

Spoiny czołowe w złożonym stanie obciążenia obliczamy na podstawie naprężeń zastępczych według zależności:

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma^2 + (\alpha \cdot \tau)^2} \leq k'_t, \quad (3.8)$$

gdzie: σ – naprężenia normalne pochodzące od zginania, rozciągania lub ściskania [MPa],

τ – naprężenia styczne pochodzące od ścinania [MPa],

α – współczynnik redukcji naprężeń stycznych, który w przybliżeniu wynosi 1,6.

Obliczenia spoin i połączeń spawanych wymagają szerszej wiedzy i są ujęte w programach nauczania przedmiotu w zakresie szkoły wyższej.

Wymiary spoiny czołowej w przybliżeniu przyjmujemy równe wymiarom przekroju porzecznego mniejszego z łączonych elementów (patrz rys. 3.11). Należy jednak zwrócić uwagę, że:

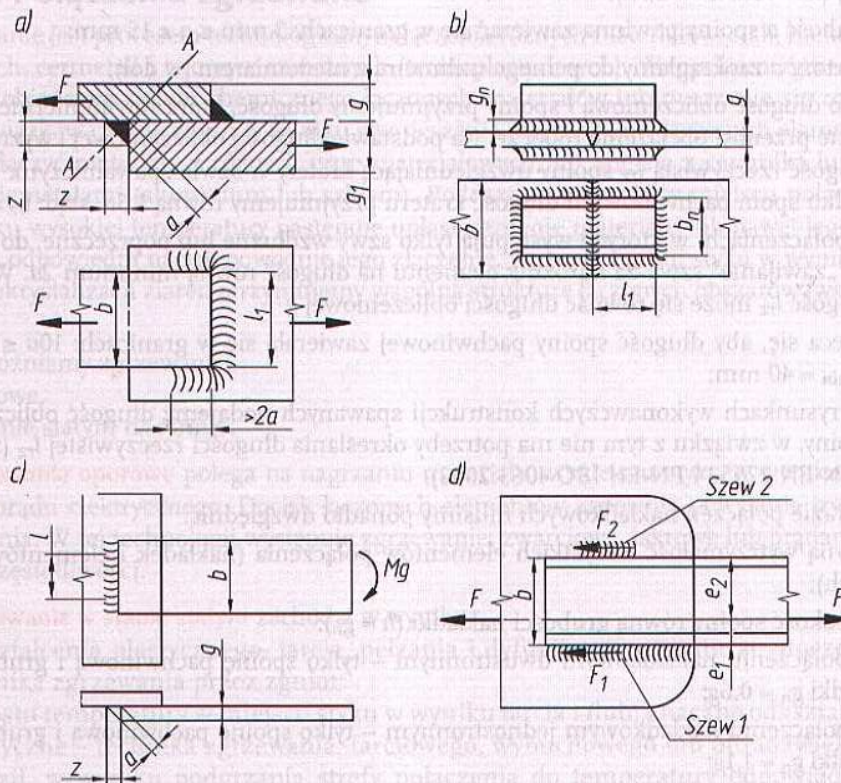
- wymiar l długości spoiny w ogólnym przypadku powinien być zmniejszony o wartość $2a$ ze względu na występujące kratery na początku i na końcu szwu spawalniczego ($l = b - 2a$);
- wymiar poprzeczny spoiny powinien odpowiadać rzeczywistej wartości wymiaru spoiny w przekroju, zwykle jest on równy grubości g cieńszego elementu spawanego. W razie bardzo grubych kształtowników lub prętów oraz spoin Y i U może nie wystąpić przetop na całej grubości. Wówczas należy to uwzględnić w obliczeniach pola przekroju i przyjąć $a < g$;
- gdy spoina czołowa ma być maksymalnej wytrzymałości, wówczas przyjmujemy $a = g$ i $b = l$, a podczas spawania spoinę należy wyprowadzić na podkładki. Ponadto musimy zapewnić pełny przetop na grubości spawanych elementów. Podkładki, na których zaczyna się i kończy układanie szwu spawalniczego po wykonaniu łącza, można odciąć od konstrukcji.

Podczas konstruowania można pominąć obliczenia wytrzymałościowe spoin czołowych i wykonać tylko obliczenia wytrzymałościowe łączonych elementów, ale wówczas:

- wykonujemy kontrolę jakości spoiny (pomiary defektoskopem),
- pole przekroju spoiny nie może być mniejsze od pola przekroju styku łączonych elementów,
- nie można obniżać wartości współczynnika wytrzymałości spoiny.

Obliczenia wytrzymałościowe spoin pachwinowych

W spoinach pachwinowych występuje złożony stan naprężeń, a określenie ich rzeczywistych wartości jest dość trudne. Dlatego w obliczeniach uproszczonych zakładamy, że spoina taka jest „tylko” narażona na ścinanie.



Rys. 3.12. Wymiary spoin pachwinowych

Warunek wytrzymałościowy dla obciążeń:

- rozciągających, ściskających i ścinających w najslabszym miejscu przekroju A-A (rys. 3.12) opisuje zależność:

$$\tau_t = \frac{F}{S} \leq k'_t, \quad (3.9)$$

zginających zaś:

$$\tau = \frac{M_g}{W_x} \leq k'_t, \quad (3.10)$$

gdzie: F – siła obciążająca połączenie [N],

M_g – moment gnący obciążający połączenie [N · m],

S – pole przekroju spoiny ($S = a \cdot l$) [mm²],

W_x – wskaźnik wytrzymałości przekroju spoiny $\left(W_x = \frac{a \cdot l^2}{6} \right)$ [mm³].

Wymiary obliczeniowego przekroju spoiny określamy następująco (rys. 3.12):

- najczęściej przyjmujemy wysokość h spoiny równą grubości g cieńszego elementu w połączeniu;
- obliczeniową grubość a spoiny określamy na podstawie wysokości h spoiny pachwinowej ($a = h \cos 45^\circ \approx 0,7h$);
- grubość a spoiny powinna zawierać się w granicach: $3 \text{ mm} \leq a \leq 15 \text{ mm}$;
- wartość a zaokrąglamy do pełnego milimetra z niedomiarem (w dół);
- jako długość obliczeniową l spoiny przyjmujemy długość, która równomiernie i całkowicie przenosi obciążenie robocze. Na podstawie długości obliczeniowej l wyznaczamy długość rzeczywistą l_{rz} spoiny uwzględniając krater w szwie spawalniczym. W przypadku spoin pachwinowych długość krateru przyjmujemy równą $1,5a$, stąd: $l_{rz} = l + 3a$;
- w połączeniach, w których występują tylko szwy wzdłużne lub poprzeczne, dopuszcza się „zawijanie” szwu za narożnik elementu na długość równą minimum $2a$. Wówczas długość l_{rz} może się równać długości obliczeniowej l ;
- zaleca się, aby długość spoiny pachwinowej zawierała się w granicach: $10a \leq l \leq 60a$ i $l_{min} = 40 \text{ mm}$;
- na rysunkach wykonawczych konstrukcji spawanych podajemy długość obliczeniową spoiny, w związku z tym nie ma potrzeby określania długości rzeczywistej l_{rz} (zgodnie z PN-EN 22553 i PN-EN ISO 4063:2002).
- W razie połączeń nakładkowych musimy ponadto uwzględnić:
- równą wytrzymałość wszystkich elementów połączenia (nakładek i elementów łączonych);
- wysokość spoiny równą grubości nakładki ($h = g_n$);
- w połączeniu nakładkowym dwustronnym – tylko spoinę pachwinową i grubość nakładki $g_n = 0,6g$;
- w połączeniu nakładkowym jednostronnym – tylko spoinę pachwinową i grubość nakładki $g_n = 1,1g$;
- w połączeniu nakładkowym dwustronnym, w którym główne elementy są dodatkowo połączone spoiną czołową, grubość nakładki $g_n = (0,3-0,5)g$;
- w połączeniu nakładkowym jednostronnym, w którym główne elementy są dodatkowo połączone spoiną czołową, grubość nakładki $g_n = (0,7-1)g$.

Podczas spawania konstrukcji kratowych z kształtowników i prętów uwzględniamy następujące wytyczne:

- długość l spoiny pachwinowej w przypadku szwu równoległego do kierunku działania siły nie powinna być mniejsza niż $1,5b$ ($l > 1,5b$), gdzie b szerokość pręta lub kształtownika;
- jeżeli pręty kratownicy są wykonane z kształtowników niesymetrycznych (np. kątowników), to rozmieszczenie spoin jest niesymetryczne względem osi działania siły (osi środka ciężkości przekroju). Aby zapewnić jednakowe wartości naprężeń w spoinach po obu stronach spawanego kształtownika, należy zróżnicować długości szwów spawalniczych. Wyznaczenie poszczególnych długości l_1 i l_2 , przy założeniu jednakowych wysokości spoin ($a_1 = a_2 = a$), dokonujemy na podstawie zależności:

$$l_1 = \frac{F}{2 \cdot a \cdot k_t} \Rightarrow l_2 = l_1 \cdot \frac{(b-e)}{e} \quad (3.11)$$

Jeżeli choć jeden z wymiarów – l_1 lub l_2 – nie spełnienia warunku minimalnej długości spoiny, zwiększamy go do wartości minimalnej i odpowiednio drugą wartość (długości) zwiększamy proporcjonalnie.

3.3.3. Połączenia zgrzewane

Zgrzewanie jest procesem technologicznym łączenia różnych materiałów: stali, metali nieżelaznych, cermetali i tworzyw sztucznych (termoplastycznych). Warunkiem zgrzewania jest podobieństwo składu chemicznego łączonych materiałów lub tworzenie się roztworów i związków chemicznych w wyniku wymieszania pierwiastków łączonych elementów. Można łączyć materiały z różnych grup materiałowych, np. metale z ceramiką lub metale z niemetalami (aluminium lub szkłem). Podczas zgrzewania w miejscu połączenia w wyniku wysokiej temperatury następuje uplastycznienie materiału lub nawet jego stan ciekły, a odpowiedni nacisk powoduje jego złączenie. Na powierzchni styku w wyniku dyfuzji i rekrystalizacji ziaren otrzymujemy wspólną strukturę łączonych obszarów (wspólne ziarna).

Rozróżniamy zgrzewanie:

- oporowe,
- w stanie stałym na zimno.

Zgrzewanie oporowe polega na nagraniu materiału w miejscu styku w wyniku przepływu prądu elektrycznego. Docisk łączonych elementów zapewnia powstanie trwałego połączenia. W tej technologii występuje zgrzewanie: zwarciove, iskrowe lub prądami wysokiej częstotliwości.

Zgrzewanie w stanie stałym zachodzi w wyniku:

- odkształcenia plastycznego, tarcia, pełzania i dyfuzji w temperaturze otoczenia – technika zgrzewania przez zgniot;
- wzrostu temperatury w miejscu styku w wyniku tarcia i (lub) znaczne odkształcenie plastyczne – technika zgrzewania: tarciovego, wybuchowego lub ultradźwiękami;
- dyfuzji, w wyniku podgrzania strefy połączenia do temperatury odpowiadającej płynięciu metalu i wprowadzeniu docisku – technika zgrzewania termitowego, gazowego.

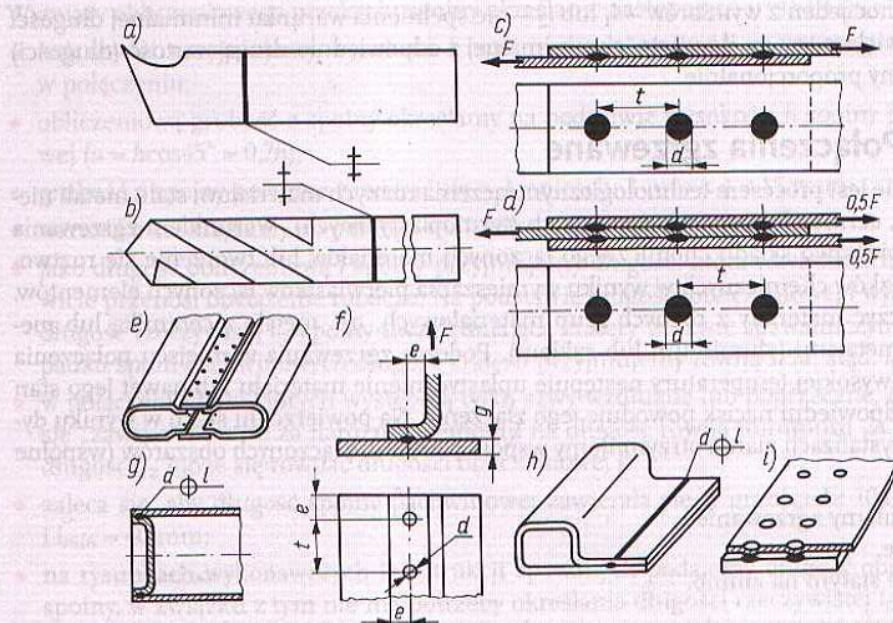
Rodzaje i zastosowanie połączeń zgrzewanych.

W zależności od potrzeb i kształtu łączonych części można uzyskać zgrzeinę: punktową, garbową, liniową lub czołową (rys. 3.13).

Zgrzewanie czołowe jest stosowane przy łączeniu odkuwek, prętów i rur. Zgrzeina zajmuje całą powierzchnię styku.

Zgrzewania punktowego używa się głównie przy łączeniu cienkich blach oraz kształtowników, np. w przemyśle samochodowym do łączenia elementów karoserii. Odmianą zgrzewania punktowego jest zgrzewanie garbowe, którego celem jest usztywnienie elementów cienkościennych w wyniku zastosowania odpowiednich przetłoczeń (garbów). W miejscu przetłoczeń dwóch elementów jest wykonywana zgrzeina, która nie powinna odkształcać garbów.

Zgrzewanie liniowe służy do łączenia elementów na znacznej długości lub po ich obwodzie i jest stosowane głównie tam, gdzie jest wymagana szczelność połączenia.



Rys. 3.13. Przykłady zastosowania połączeń zgrzewanych [Źródło: A. Rutkowski, *Części maszyn*, WSiP, Warszawa 2007]

Projektowanie połączeń zgrzewanych

Projektowanie połączeń zgrzewanych polega na wykonaniu obliczeń wytrzymałościowych zgrzein.

W przypadku zgrzein punktowych podczas obliczeń możemy skorzystać z normy PN-74/M-69021 i przyjąć dla grubości łączonych elementów odpowiednią wielkość (średnicę) zgrzeiny. Norma określa też (podobnie do połączeń nitowanych) rozmieszczenie zgrzein względem siebie oraz brzegów łączonych elementów. Liczbę zgrzein niezbędną do przeniesienia danego obciążenia wyliczamy za pomocą warunku wytrzymałościowego na ścinanie (należy tak zaprojektować połączenie punktowe, aby zgrzeiny były narażone tylko na ścinanie). Jeżeli zgrzeina ma być rozciągana (warunki bardzo niekorzystne wytrzymałościowo), należy znacznie obniżyć wartości naprężeń dopuszczalnych.

W podobny sposób projektujemy zgrzeiny garbowe.

Zgrzeiny liniowe i czołowe oblicza się podobnie do połączeń spawanych. W obliczeniach pola przekroju uwzględnia się wymiary zgrzeiny. W zgrzeinach czołowych są to najczęściej wymiary przekrojów elementów w miejscu styku. W zgrzeinach liniowych – długość i szerokość zgrzeiny, która zależy od wielkości krążka wykonującego zgrzeinę. Niezależnie od rodzaju zgrzeiny musimy określić naprężenia dopuszczalne połączenia. Zależą one od techniki zgrzewania i rodzaju obciążeń w danym połączeniu. Naprężenia dopuszczalne wyliczamy według zależności 3.4 znanej już z połączeń spawanych. Zmienia się jedynie wartość parametru wytrzymałości z , który podczas zgrzewania przyjmuje wartości:

- $z = 0,7-0,85$ – przy zastosowaniu zgrzewania oporowego,
- $z = 0,8-0,9$ – przy zastosowaniu zgrzewania iskrowego,
- $z = 0,35-0,6$ – przy zastosowaniu zgrzein punktowych obciążonych statycznie i grubości ścianek łączonych elementów do 3 mm,
- $z \approx 0,3$ – przy zastosowaniu zgrzein punktowych obciążonych zmiennie.

W razie łączenia różnych materiałów do wyliczenia naprężeń dopuszczalnych przyjmujemy wartość z słabszego z łączonych materiałów.

W zgrzeinach liniowych, podobnie do punktowych i garbowych, powinno występować tylko ścinanie połączenia i taki warunek wytrzymałościowy należy zastosować do obliczeń.

3.3.4. Połączenia klejowe

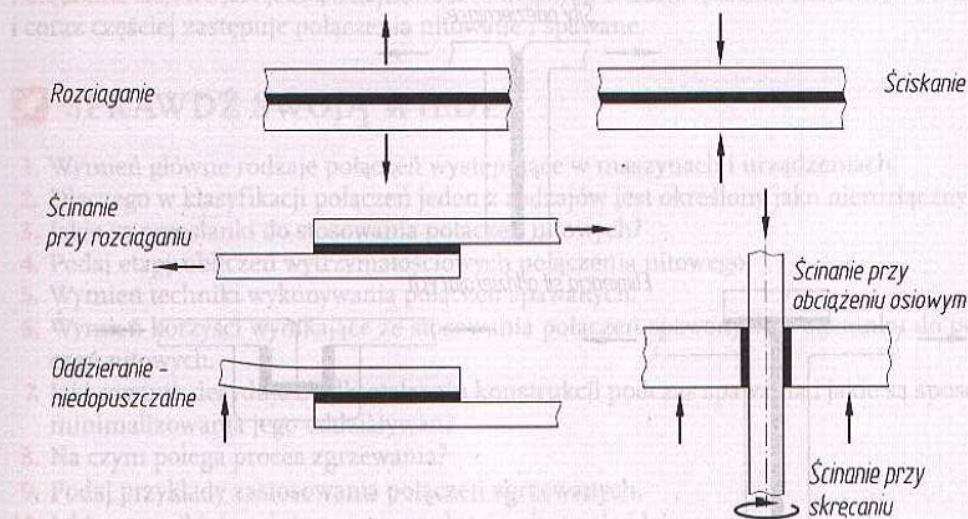
Klejenie jest nowoczesną technologią łączenia elementów konstrukcyjnych. Obecnie stosowane kleje spełniają wysokie wymagania konstrukcyjne i eksploatacyjne, co umożliwia łączenie ze sobą elementów wykonanych z różnych materiałów. Połączenia klejowe zastępują m.in. spawanie. Klejenie, oprócz połączeń konstrukcyjnych, umożliwia też odtwarzanie naprawcze lub regeneracyjne elementów maszyn.

Technika klejenia została zastosowana do łączenia elementów kompozytowych, z których niemal w całości jest wykonany kadłub najnowszego boeinga 787 dreamliner.

W zależności od rodzaju kleju i łączonych elementów w procesie klejenia występują następujące etapy:

- przygotowanie powierzchni elementów do klejenia – oczyszczanie i odtłuszczanie (zapewnienie odpowiednich właściwości stereometrycznych i czystości pod względem chemicznym, klejonych powierzchni);
- przygotowanie kleju do klejenia – większość klejów jest dwuskładnikowa lub ma ich więcej i przed nałożeniem wymaga odpowiedniego ich połączenia;
- nałożenie kleju – naniesienie odpowiedniej warstwy kleju na powierzchnię klejoną;
- konstytuowanie połączenia – okres wiązania, twardnienia kleju, który powinien następować w określonej temperaturze z odpowiednim dociskiem.

Klejenie umożliwia łączenie materiałów nie tylko z jednej grupy materiałowej (np. metal z metalem), ale również z różnych grup (np. metal z gumą, metal z tworzywem sztucznym). Niekiedy klejenie jest jedyną techniką umożliwiającą wykonanie połączenia, np. między elementami o bardzo cienkich ściankach lub o znacznej różnicy grubości. Połączenia klejowe w zależności od rodzajów obciążeń przedstawiono na rysunku 3.14.



Rys. 3.14. Możliwe rodzaje obciążeń połączeń klejowych

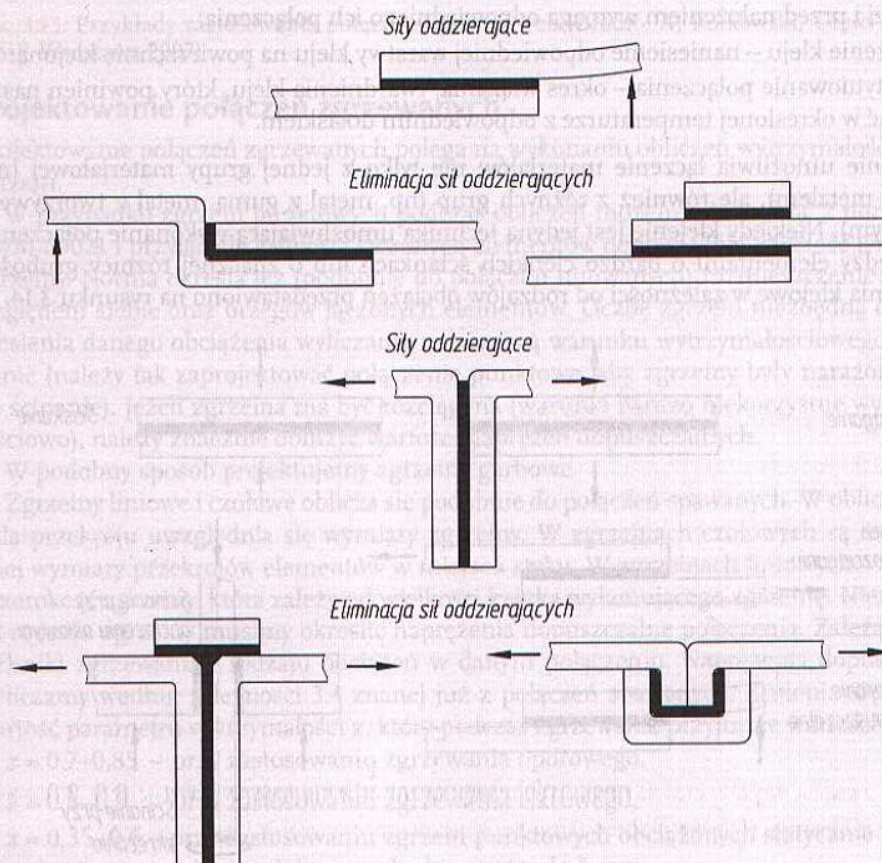
Do **zalet połączeń klejowych** należy:

- brak osłabienia łączonych elementów, ponieważ klej nie wprowadza dodatkowych naprężeń i nie osłabia konstrukcyjnie łączonych elementów (brak podcięć lub ściąg krawędzi, brak otworów, podtoczeń itp.);
- równomierne rozłożenie obciążenia na całej powierzchni łącza;
- odporność połączeń na korozję;
- zdolność tłumienia drgań;
- możliwość wykonywania bez użycia specjalistycznego sprzętu.

Do **wad połączeń klejowych** należy:

- konieczność zapewnienia odpowiedniej czystości i warunków otoczenia podczas klejenia;
- mała odporność większości klejów na zmiany temperatury;
- dość długi czas wykonywania połączenia (utwardzanie kleju);
- spadek wytrzymałości połączenia z upływem czasu spowodowany starzeniem się kleju;
- odpowiednia konstrukcja połączenia – klej powinien pracować wyłącznie na ścinanie (rys. 3.1.).

Konstrukcja połączenia klejowego powinna wywoływać w warstwie kleju naprężenia ścinające lub ściskające. Należy unikać naprężeń rozciągających lub odrywania przez odpowiednie kształtowanie elementów klejonych.



Rys. 3.15. Przykłady właściwego kształtowania połączeń klejowych

PYTANIA I POLECENIA

1. Wymień rodzaje połączeń spajanych.
2. Które z połączeń spajanych mogą być wykonywane bez konieczności podgrzewania łączonych elementów?
3. W których połączeniach spajanych jest wymagany docisk wstępny?
4. Które z połączeń spajanych należą do połączeń spawalniczych?
5. Wskaż rodzaje połączeń spawanych.
6. Wymień zalety połączeń spawanych.
7. Wymień wady połączeń spawanych.
8. Na podstawie jakiego warunku wytrzymałościowego oblicza się wymiary spoin pachwinowych?
9. Jakie są rodzaje połączeń zgrzewanych?
10. Wymień techniki zgrzewania.
11. Wymień zalety połączeń zgrzewanych.
12. Jak oblicza się połączenia zgrzewane?
13. Jak należy przeprowadzić proces klejenia?
14. Jakie materiały można łączyć za pomocą klejenia?
15. Wymień zalety połączeń klejowych.
16. Jaki rodzaj naprężeń należy eliminować z połączeń klejowych?

ZAPAMIĘTAJ

Połączenie nierozłączne to takie, których poszczególne elementy nie mogą być rozdzielone bez ich uszkodzenia.

Połączenia spajane to takie, w których wykorzystuje się siły spójności (kohezji) lub przyczepności (adhezji) materiałów łączonych (również dodatkowych) na zasadzie oddziaływań fizycznych lub chemicznych.

Połączenia spawane pachwinowe, niezależnie od rodzaju obciążenia zewnętrznego, zawsze obliczamy za pomocą warunku wytrzymałościowego na ścinanie.

Połączenie klejowe jest jedną z najnowocześniejszych technik łączenia elementów maszyn i coraz częściej zastępuje połączenia nitowane i spawane.

SPRAWDŹ SWOJĄ WIEDZĘ

1. Wymień główne rodzaje połączeń występujące w maszynach i urządzeniach.
2. Dlaczego w klasyfikacji połączeń jeden z rodzajów jest określony jako nierozłączny?
3. Jakie są przesłanki do stosowania połączeń nitowych?
4. Podaj etapy obliczeń wytrzymałościowych połączenia nitowego.
5. Wymień techniki wykonywania połączeń spawanych.
6. Wymień korzyści wynikające ze stosowania połączeń spawanych w stosunku do połączeń nitowych.
7. Jaki czynnik decyduje o odkształcaniu konstrukcji podczas spawania i jakie są sposoby minimalizowania jego oddziaływań?
8. Na czym polega proces zgrzewania?
9. Podaj przykłady zastosowania połączeń zgrzewanych.
10. Jakie czynniki decydują o wytrzymałości połączenia klejowego?
11. Jakie zastosowanie, oprócz łączenia, ma technika klejenia konstrukcji maszyn?