

W tym rozdziale dowiemy się:

- na jakie grupy dzieli się części maszyn,
- na czym polega normalizacja części maszyn,
- jakie są podstawowe zasady konstruowania części maszyn,
- jakie są podstawowe zasady obliczania wytrzymałości części maszyn,
- jakie rodzaje połączeń nierozłącznych i rozłącznych występują w budowie maszyn oraz gdzie się je stosuje,
- jakie są rodzaje elementów podatnych, jak się je oblicza i gdzie stosuje,
- jak konstruuje się osie i wały oraz gdzie się je wykorzystuje,
- jakie są rodzaje łożysk, gdzie się je spotyka oraz jak się je oblicza lub dobiera,
- jak są zbudowane różne rodzaje przekładni, jak się je dobiera i gdzie stosuje,
- jakie są rodzaje sprzęgieł oraz jak się je oblicza i gdzie znajdują zastosowanie,
- jakie są rodzaje hamulców, jak się je dobiera i oblicza oraz gdzie się je wykorzystuje,
- na czym polega komputerowe wspomaganie projektowania części maszyn.

Klasyfikacja i charakterystyka części maszyn

8.1

Każda maszyna lub urządzenie składa się z pewnej liczby elementów, czyli **części**. Części tworzą zespoły spełniające określone funkcje w maszynie. **Zespół** to zestaw części tworzących wyodrębnioną całość, który spełnia w maszynie określoną funkcję. W złożonych zespołach można wyodrębnić zespoły niższych rzędów, nazywane **podzespołami**. Zespoły spełniające w maszynie funkcje podstawowe są zespołami najniższych rzędów.

Na przykład skuter składa się z setek części. Części te montuje się najpierw w zespoły o małym stopniu złożoności (najniższych rzędów), które z kolei składa się w coraz bardziej skomplikowane zespoły (wyższych rzędów). Natomiast z zespołów najwyższego rzędu montuje się gotowy wyrób (rys. 8.1).

W konstrukcji samochodów zespoły wyższych rzędów często nazywa się układami (m.in. układy kierowniczy, hamulcowy, napędowy).

Części maszyn można podzielić na trzy grupy, którymi są:

- połączenia,
- łożyskowania,
- części napędów.

W celu zapewnienia poprawnego działania urządzeń wszystkie części je tworzące muszą być w odpowiedni sposób ze sobą połączone.

Połączeniem nazywa się fragment (miejsce) urządzenia, w którym zostały sprzęgnięte dwie (lub więcej) części. Zadaniem połączeń części maszyn są:

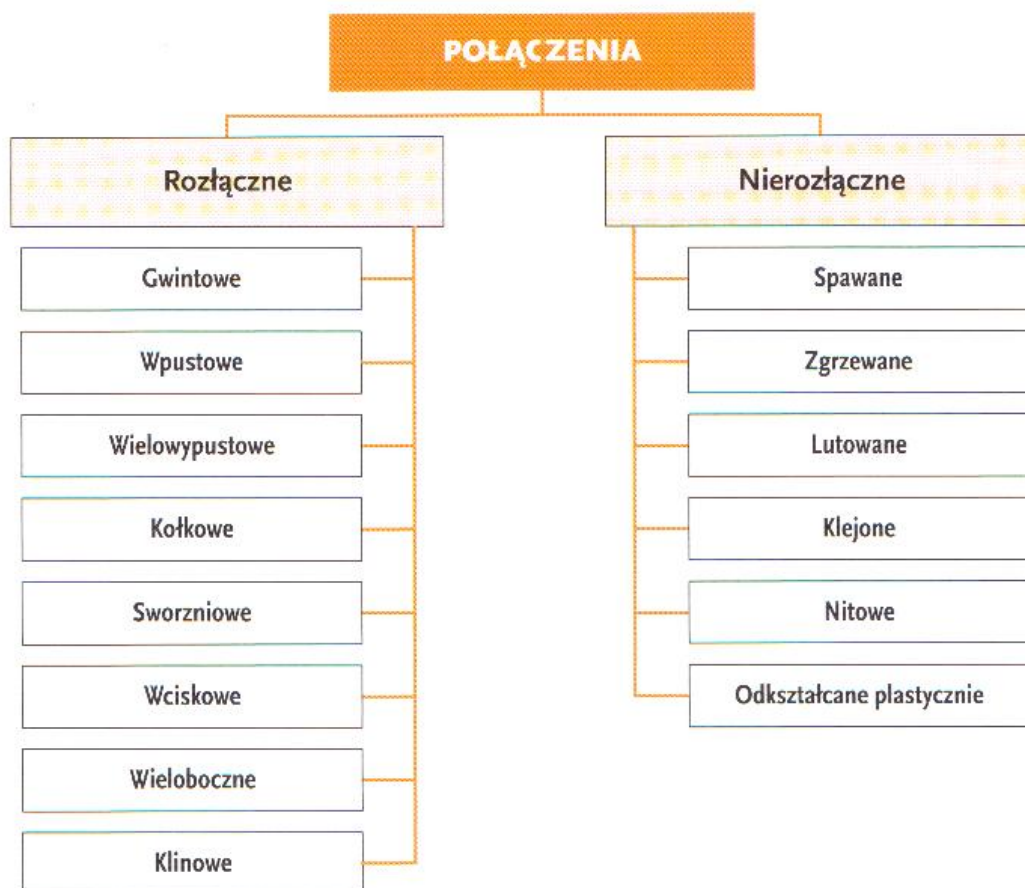
- przeniesienie obciążenia (siły lub momentu obrotowego) pomiędzy częściami,
- zabezpieczenie przed wzajemnym przemieszczaniem się części sprzężonych lub zagwarantowanie wykonywania tylko określonego ruchu względnego części sprzężonych.

Połączenia mogą być wykonywane różnymi technikami. Wykorzystuje się różne zjawiska fizyczne wpływające na sprzęgnięcie elementów – wynika stąd duża różnorodność połączeń części maszyn. W klasyfikacji połączeń przyjmuje się następujące kryteria:

1. rozłączalności części łączonych,
2. stosowania dodatkowych elementów łączących,
3. sposobu przenoszenia obciążenia przez połączenie,
4. możliwości wykonywania ruchu względnego części łączonych.

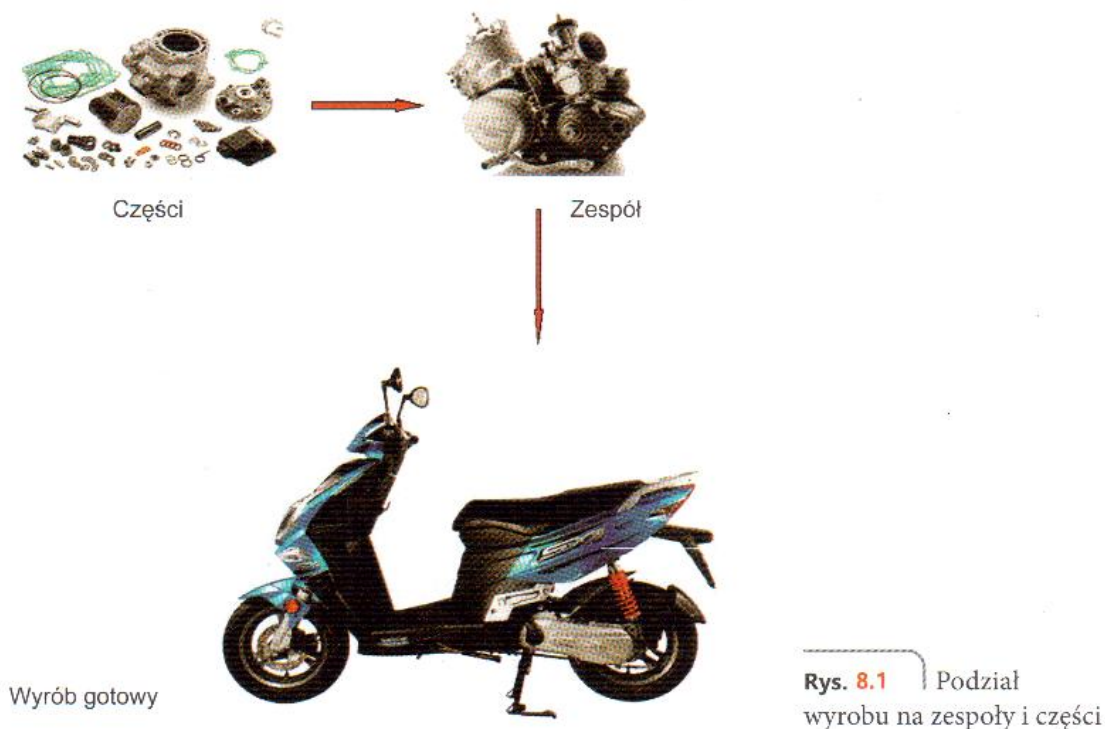
Ze względu na możliwość rozłączania części połączonych rozróżnia się połączenia (rys. 1.2):

- rozłączne – dające możliwość rozłączenia części łączonych bez ryzyka ich uszkodzenia,
- nierozłączne – rozłączenie części łączonych wiąże się z koniecznością uszkodzenia połączenia (łączników lub części łączonych).



Rys. 1.2. Podział połączeń wg kryterium rozłączalności części łączonych

Przedstawiony powyżej podział połączeń jest najważniejszy dla użytkowników urządzeń i dlatego stosuje się go najczęściej.



Rys. 8.1 Podział
wytworu na zespoły i części

Połączenia to części maszyn składające się z dwóch lub większej liczby elementów zespolonych ze sobą bezpośrednio bądź pośrednio – za pomocą dodatkowych części nazywanych łącznikami (połączenia *bezpośrednie* i *pośrednie*), w których niemożliwe lub możliwe jest wzajemne przemieszczanie się połączonych części (połączenia *stałe* i *ruchowe*), a także części łączone lub łączące, które w razie rozłączenia ulegają lub nie ulegają uszkodzeniu (połączenia *nierozłączne* i *rozłączne*).

Łożyskowania to części maszyn połączone ze sobą w sposób umożliwiający ruch, który nie wiąże się z przenoszeniem mocy (wykonywaniem pracy). Do tej grupy części zalicza się *osie*, *wały* i *łożyska*.

Części napędów to elementy maszyn połączone ze sobą w sposób umożliwiający ruch, który wiąże się z przenoszeniem mocy (wykonywaniem pracy). Do tej grupy zalicza się *przekładnie* (zębate, cięgnowe i cierne) oraz *mechanizmy* (śrubowe, dźwigniowe, krzywkowe, jarzmowe, zapadkowe), a także *sprzęgła* i *hamulce*.

Części maszyn powinny spełniać różnorodne wymagania, dotyczące m.in. ich wytrzymałości, trwałości, łatwości wykonania (technologiczności), ceny oraz wyglądu, które wynikają z warunków technicznych dla poszczególnych konstrukcji, jak również z ogólnych zasad projektowania i konstruowania maszyn.

8.2 Normalizacja części maszyn

W projektowaniu i budowie maszyn normalizacja ma bardzo istotne znaczenie. Jest ona ważna np. w produkcji jednostkowej i małoseryjnej, w której – ze względu na ograniczenie kosztów – należy wykorzystywać jak największą liczbę znormalizowanych części.

Normalizacja w budowie maszyn dotyczy następujących najważniejszych zagadnień:

- podstawowych wielkości teoretycznych (np. tolerancji i pasowań);
- kształtu zarysu gwintów, zarysu kół zębatach, szeregów uprzywilejowanych wymiarów;
- rodzajów materiałów i ich właściwości;
- gotowych wyrobów (np. łączników gwintowych, nitów, kołków);
- warunków odbioru technicznego maszyn różnego rodzaju.

W przepisach dotyczących części maszyn, nazywanych **normami**, określono nazwę, kształt, wymiary, materiał, własności wytrzymałościowe oraz zastosowanie i przeznaczenie odpowiednich części.

Normalizacja polega na ujednoczeniu, uproszczeniu nazewnictwa i pojęć, ustaleniu kształtów, wymiarów, materiału i dokładności wykonania, co gwarantuje właściwą jakość oraz ułatwia konstrukcję, obsługę i naprawę maszyn.

Od 1 stycznia 2003 r. w Polsce obowiązuje nowa ustawa o normalizacji. Wraz z jej wejściem w życie przestały funkcjonować występujące wcześniej normy zakładowe (ZN) i branżowe (BN). Obowiązujące obecnie krajowe normy PN mogą być zintegrowane z normami europejskimi (oznaczenie PN-EN) lub międzynarodowymi (PN-ISO) albo oboma tymi normami (PN-EN ISO). Stosowanie norm jest całkowicie dobrowolne. Z normalizacją wiążą się ściśle dwa inne pojęcia – typizacja i unifikacja.

Typizacja oznacza ujednoczenie cech konstrukcyjnych i wymiarowych części maszyn w celu uproszczenia produkcji przez zmniejszenie liczby możliwych odmian danego wyrobu. Umożliwia ona obniżenie kosztów produkcji oraz ułatwia eksploatację maszyn. Przykładami typizacji są: typoszeregi wymiarowe łożysk tocznych, średnice i skoki gwintów oraz moduły kół zębatach.

Unifikacja to z kolei ujednoczanie elementów i zespołów występujących w maszynach podobnego rodzaju. Stosowanie jednakowych sprawdzonych rozwiązań umożliwia ich pełną zamiennność oraz znaczne obniżenie kosztów produkcyjnych i eksploatacyjnych.

W przemyśle motoryzacyjnym unifikacja polega na stosowaniu w różnych pojazdach tych samych elementów lub ich zespołów, dzięki czemu znacznie zmniejsza się ich różnorodność. Unifikacja w konstrukcji nowszych pojazdów umożliwia wykorzystanie wcześniej zaprojektowanych i wypróbowanych elementów oraz zespołów bez wprowadzania w nich zmian.

Zasady konstruowania i obliczania wytrzymałości części maszyn

8.3

Zadaniem konstruktora jest opracowanie konstrukcji optymalnej, czyli najlepszej w danych warunkach. Zapisu konstrukcji dokonuje się w dokumentacji konstrukcyjnej, która zawiera:

- założenia konstrukcyjne;
- warianty konstrukcji, szkice;
- wyniki analizy obciążeń, rozkłady sił;
- schematy strukturalne i kinematyczne;
- schematy montażu i połączeń;
- rysunki złożeniowe z podanymi warunkami technicznymi;
- rysunki złożeniowe zespołów głównych, zespołów niższych rzędów i wykazy części;

- rysunki wykonawcze części;
- warunki techniczne odbioru i dokumentację techniczno-ruchową (DTR);
- rysunek ofertowy wyrobu.

W trakcie prac projektowych należy stosować zasady umożliwiające zapewnienie optymalizacji konstrukcji.

Optymalizacja konstrukcji jest bardzo ważna, gdyż bezpośrednio wpływa na wybór rozwiązania konstrukcyjnego spośród wielu dopuszczalnych wariantów. Stosowanie zasad optymalizacji umożliwia wybór konstrukcji najbardziej odpowiedniej w określonych warunkach.

Najczęściej zaleca się stosowanie następujących zasad:

- dostępność i taniość materiałów;
- możliwość stosowania technik wytwarzania – technologiczność;
- niskie koszty i łatwość eksploatacji;
- zgodność z obowiązującymi normami i przepisami;
- uwzględnianie specyfiki użytkowania (np. temperatury lub zanieczyszczenia środowiska).

Podane zasady dotyczą również projektowania części maszyn. Do podejmowania wszelkich prac projektowych jest niezbędna znajomość typowych rozwiązań konstrukcyjnych. Podstawowy zakres wiedzy powinien obejmować: kształt i zastosowanie projektowanych części, stosowane do ich wykonania materiały konstrukcyjne oraz ich cechy wytrzymałościowe i użytkowe, wyznaczanie obciążeń i obliczenia wytrzymałościowe. Obliczenia wytrzymałościowe części maszyn przeprowadza się w celu ustalenia optymalnych wymiarów projektowanych części.

Wymagane minimalne wymiary części ustala się na podstawie podstawowego warunku wytrzymałościowego, który brzmi: **naprężenia rzeczywiste (obliczeniowe) muszą być mniejsze od naprężeń dopuszczalnych lub najwyżej im równe.**

Wartości naprężeń rzeczywistych ustala się na podstawie następujących zależności:

$$\sigma, \tau \text{ lub } p = \frac{F}{S} \leq k \quad (8.1)$$

oraz

$$\sigma \text{ lub } \tau = \frac{M}{W} \leq k \quad (8.2)$$

gdzie:

- σ – naprężenia normalne (prostopadłe) do rozpatrywanego przekroju podczas rozciągania, ściskania i zginania [Pa],
- τ – naprężenia styczne (równoległe) do rozpatrywanego przekroju podczas ścinania i skręcania [Pa],
- p – naciski powierzchniowe [Pa],
- F – obciążenie rozciągające, ściskające lub nacisk [N],
- S – pole powierzchni obciążonego przekroju poprzecznego [m²],
- M – obciążenie momentem zginającym lub skręcającym [N · m],
- W – wskaźnik wytrzymałości przekroju obciążonego momentem zginającym W_x lub skręcającym W_o [m³],
- k – naprężenia lub naciski dopuszczalne dla określonego stanu naprężeń [Pa].

W celu rozróżnienia stanu naprężenia przy symbolach naprężeń umieszcza się wskaźniki dotyczące rodzaju obciążenia (r – rozciąganie, c – ściskanie, t – ścinanie, g – zginanie, s – skręcanie) oraz dodatkowe (j dla obciążeń jednostronnie zmiennych i o dla obciążeń obustronnie zmiennych).

Z uwagi na występowanie w materiałach konstrukcyjnych dużych naprężeń, ich wartości wyraża się w megapaskalach [MPa]. Ponieważ

$$1 \text{ MPa} = \frac{1 \text{ MN}}{1 \text{ m}^2} = \frac{1 \cdot 10^6 \text{ N}}{1 \cdot 10^6 \text{ mm}^2} = 1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

więc wygodne jest określanie wymiarów przekrojów poprzecznych w mm^2 , a wskaźników wytrzymałości przekroju w mm^3 .

Poza prostymi stanami naprężeń wywoływanych rozciąganiem, ścisaniem, ścinaniem lub zginaniem w konstrukcjach mogą występować również złożone stany naprężeń, np. ściskanie z równoczesnym zginaniem lub zginanie ze skręcaniem. W takich przypadkach oblicza się tzw. naprężenie zastępcze.

- Gdy naprężenia mają jednakowy kierunek, naprężenia zastępcze

$$\sigma_z = \sigma_c + \sigma_g \leq k_c \quad (8.3)$$

- Gdy naprężenia mają różne kierunki, zgodnie z hipotezą wytrzymałościową Hubera naprężenia zastępcze

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_g^2 + (\alpha\tau)^2} \leq k_g \quad (8.4)$$

gdzie α jest współczynnikiem określającym stosunek naprężeń dopuszczalnych normalnych do stycznych właściwych danemu stanowi obciążenia, np. dla ściskania ze skręcaniem

$$\alpha = \frac{k_c}{k_s} \quad (8.5)$$

natomiast dla zginania ze skręcaniem

$$\alpha = \frac{k_{g0}}{k_{sj}} \quad (8.6)$$

Naprężenia dopuszczalne to takie, które mogą wystąpić w materiale, nie naruszając wytrzymałości i sztywności konstrukcji. Naprężenia dopuszczalne wyznacza się na podstawie własności wytrzymałościowych materiałów konstrukcyjnych oraz charakteru obciążenia.

Jeśli obciążenia są stałe, wartość naprężenia dopuszczalnego dla materiałów plastycznych określa się na podstawie granicy plastyczności R_e , a dla materiałów kruchych – za pomocą granicy wytrzymałości R_m . W celu zagwarantowania trwałości konstrukcji stosuje się odpowiednie współczynniki bezpieczeństwa (oznaczane x) – o różnej wartości, zależnej od rodzaju konstrukcji i warunków eksploatacji. Wzory do obliczania wartości naprężeń dopuszczalnych są następujące:

- dla materiałów plastycznych (np. stali)

$$k_r = k_c = \frac{R_e}{x_e} \quad (8.7)$$

- dla materiałów kruchych (np. żeliwa)

$$k_r = \frac{R_m}{x_m} \quad (8.8)$$

$$k_c = \frac{R_c}{x_c} \quad (8.9)$$

Natomiast dla obciążeń zmiennych podstawą obliczenia wartości naprężenia dopuszczalnego jest wytrzymałość zmęczeniowa odpowiednia do rodzaju występującego obciążenia Z , z właściwym indeksem wskazującym na charakter obciążenia. Wartość naprężenia dopuszczalnego oblicza się wg wzoru

$$k = \frac{Z}{x_z} \quad (8.10)$$

Przykładowe wartości współczynników bezpieczeństwa dla różnych materiałów konstrukcyjnych podano w tabelicy 8-1.

Dopuszczalne naciski powierzchniowe ustala się na podstawie naprężeń dopuszczalnych dla ściskania.

W układach spoczynkowych najczęściej przyjmuje się

- dla obciążeń stałych

$$k_o = 0,8k_c$$

- dla obciążeń jednostronnie zmiennych

$$k_{oj} \approx 0,8k_{cj}$$

- dla obciążeń obustronnie zmiennych

$$k_{oo} \approx 0,4k_{cj}$$

Dla układów ruchowych wartości dopuszczalnych nacisków powierzchniowych ustala się na podstawie odrębnych tablic. W połączeniach ustaloną wartość dopuszczalnego nacisku k_o odnosi się zawsze do części wykonanej z materiału o mniejszej wytrzymałości.

Przykładowe własności wytrzymałościowe wybranych gatunków stali, żeliw i stopów metali nieżelaznych zawarto w tablicach 8-2 do 8-4, natomiast orientacyjne wartości naprężeń dopuszczalnych dla różnych rodzajów obciążenia – w tabelicy 8-5.

Tabl. 8-1 Przeciętne wartości współczynników bezpieczeństwa

| Material | x_r | $x_{m(c)}$ | x_z |
|---------------------------------|----------|------------|----------|
| Stale, staliwa, żeliwa ciągliwe | 2 do 2,3 | - | 3,5 do 4 |
| Żeliwa szare | - | 3,5 | 3 |
| Stopy miedzi | 3 do 4 | - | 4,5 do 6 |
| Stopy aluminium | 3,5 do 4 | - | 5 do 7 |

Tabl. 8-4 Własności wytrzymałościowe wybranych stopów metali nieżelaznych

| Material | Gatunek | | Postać | Własności wytrzymałościowe w MPa | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------|--------|-----------------|----------------------------------|-------|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | znak | cecha | | R_m | R_e | Z_{cj}^{rj} | Z_{rc} | Z_{gj} | Z_{go} | Z_{sj} | Z_{so} |
| Brązy (wg PN-91/H-87026) | CuSn10 | B10 | odlewy | 240 | 145 | 105 | 60 | 130 | 75 | 75 | 40 |
| | CuSn10P | B101 | | 220 | 130 | 95 | 55 | 120 | 70 | 70 | 35 |
| | CuSn10Zn2 | B102 | | 240 | 145 | 105 | 60 | 130 | 75 | 75 | 40 |
| | CuAl10Fe3Mn2 | BA1032 | pręty i rury | 500 | 300 | 220 | 155 | 320 | 190 | 190 | 110 |
| CuAl10Fe4Ni4 | BA1044 | 590 | | 355 | 260 | 185 | 380 | 225 | 225 | 130 | |
| Mosiądze (wg PN-92/H-87025) | CuZn38Mn2Pb2 | MM58 | odlewy | 250 | 150 | 120 | 80 | 150 | 90 | 90 | 50 |
| | CuZn40Pb2 | MO58 | pręty i rury | 450 | 270 | 220 | 140 | 280 | 160 | 160 | 90 |

Tabl. 8-5 Orientacyjne wartości naprężeń dopuszczalnych przy różnych rodzajach obciążenia stosowane w obliczeniach przybliżonych

| Rodzaj obciążenia | Naprężenia dopuszczalne przy obciążeniach | | |
|------------------------|---|-------------------------|-----------------------|
| | statycznych (dla materiałów plastycznych) | jednostronnie zmiennych | obustronnie zmiennych |
| Rozciąganie | $k_r = 0,48R_e$ | $k_{rj} = 0,39Z_{go}$ | $k_{rc} = 0,20Z_{go}$ |
| Ściskanie | $k_c = k_r$ | $k_{cj} = k_{rj}$ | |
| Zginanie | $k_g = 0,53R_e$ | $k_{gj} = 0,27Z_{go}$ | $k_{go} = 0,28Z_{go}$ |
| Ścinanie | $k_t = 0,30R_e$ | $k_{tj} = 0,55Z_{go}$ | $k_{to} = 0,55Z_{go}$ |
| Skręcanie | $k_s = k_t$ | $k_{sj} = k_{tj}$ | $k_{so} = k_{to}$ |
| Naciski powierzchniowe | $k_o = 0,80k_c$ | $k_{oj} = 0,80k_{cj}$ | $k_{oo} = 0,40k_{cj}$ |

Przykład 8.1

Porównaj naprężenia dopuszczalne w elementach konstrukcji wykonanych ze stali gatunku S235JR poddanych statycznym i jednostronnie zmiennym obciążeniom rozciągającym.

Rozwiązanie

Rozróżniamy obciążenia rozciągające:

- statyczne, dla których naprężenia dopuszczalne można opisać wzorem

$$k_r = \frac{R_e}{x_e}$$

- jednostronnie zmienne – dla nich naprężenia dopuszczalne

$$k_{rj} = \frac{Z_{rj}}{x_z}$$

Z tablicy 8-2 dla stali S235JR odczytujemy wartości

$$R_e = 235 \text{ MPa} \text{ oraz } Z_{rj} = 230 \text{ MPa.}$$

W tablicy 8-1 odnajdujemy współczynniki bezpieczeństwa

$$x_{e \max} = 2,3, x_{e \min} = 2, x_{z \max} = 4, x_{z \min} = 3,5.$$

Zatem szukane naprężenia dopuszczalne

$$k_{r \min} = \frac{R_e}{x_{e \max}} = \frac{235}{2,3} = 102 \text{ MPa}; \quad k_{r \max} = \frac{R_e}{x_{e \min}} = \frac{235}{2} = 117 \text{ MPa}$$

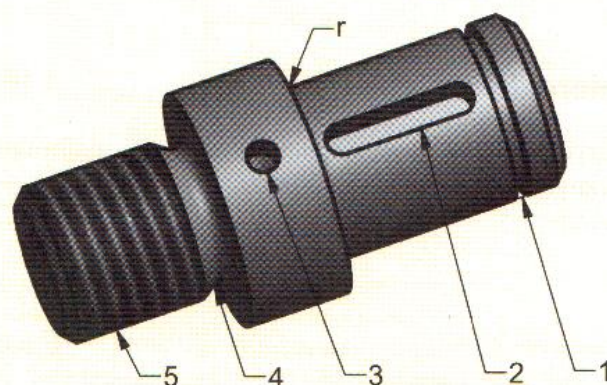
$$k_{rj \min} = \frac{Z_{rj}}{x_{z \max}} = \frac{230}{4} = 57 \text{ MPa}; \quad k_{rj \max} = \frac{Z_{rj}}{x_{z \min}} = \frac{230}{3,5} = 66 \text{ MPa}$$

Z porównania obliczonych wartości widać, że ten sam element konstrukcyjny może przemieść znacznie większe naprężenia, jeśli siła rozciągająca ma wartość stałą.

W przypadku obciążeń zmiennych często w obliczeniach należy uwzględnić czynniki mające wpływ na wytrzymałość zmęczeniową, głównie wymiary części, rodzaje i wymiary karbów oraz stan powierzchni. Karby (rys. 8.2), czyli nagłe zmiany przekroju części, wywołują lokalne zwiększenie wartości naprężeń, czyli ich spiętrzenie lub koncentrację.

W takich przypadkach współczynnik bezpieczeństwa x_z przyjmuje większą wartość. Przy jej ustalaniu za pomocą odpowiednich współczynników uwzględnia się m.in. wielkość przedmiotu, wrażliwość materiału na działanie karbu oraz kształt. Ich wartości liczbowe można odnaleźć w tablicach zawartych w specjalistycznych podręcznikach przeznaczonych do projektowania części maszyn.

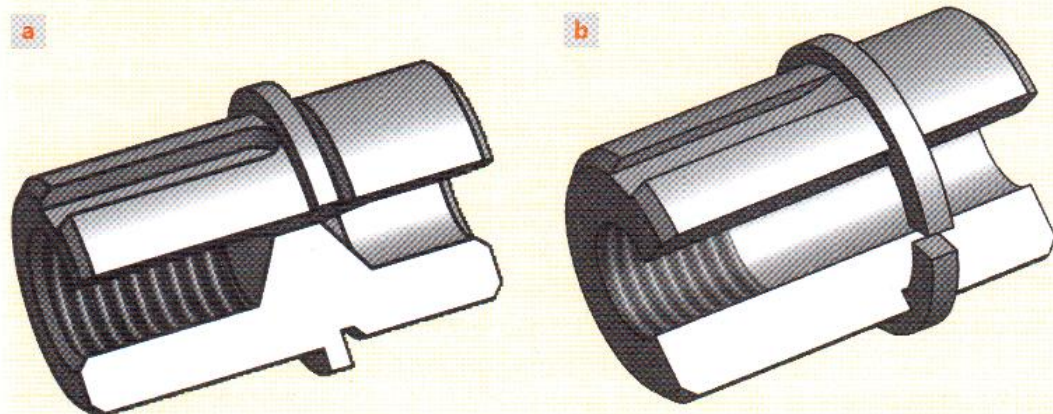
Podczas konstruowania części maszyn należy zapewnić właściwy dobór tolerancji wymiarowo-kształtowych, pasowań oraz optymalny stan powierzchni (patrz rozdz. 4 i 6). Trzeba unikać ostrych przejść, a jeśli to możliwe zaokrąglić przejścia promieniem $r = \frac{D-d}{2}$, gdzie D i d to średnice kolejnych stopni wału. Zaleca się dbać o gładkość powierzchni w karbach, stosować materiały niewrażliwe na działanie karbu oraz unikać



Rys. 8.2 Rodzaje karbów występujących w częściach maszyn
1 i 2 – karby ostre,
3 i 4 – karby zaokrąglone,
5 – karby wielokrotne

konstrukcji o niepotrzebnie dużych wymiarach. Większość tych wymagań wpływa bezpośrednio na technologiczność konstrukcji.

Technologiczność konstrukcji jest zagadnieniem bardzo szerokim ze względu na mnogość stosowanych technik wytwarzania. Konstrukcję nazywamy technologiczną wówczas, gdy spełniając założenia dotyczące funkcjonalności, równocześnie można ją wytworzyć z dostępnych materiałów w łatwy i tani sposób (rys. 8.3). Prosta i tania jest też jej obsługa oraz naprawa.



Rys. 8.3 | Przykład nietechnologicznego (a) oraz technologicznego (b) rozwiązania konstrukcyjnego wałka

Rozwiązanie nietechnologiczne (a):

- konieczność obróbki otworów w dwóch zamocowaniach,
- brak wyjścia gwintu wewnętrznego,
- konieczność obróbki rowka frezem trzpieniowym,
- duże naddatki obróbkowe niezbędne do wykonania kołnierza.

Rozwiązanie technologiczne (b):

- obróbka otworu w jednym zamocowaniu,
- możliwość wykonania gwintu gwintownikiem maszynowym,
- możliwość wykonania rowka frezem tarczowym,
- mniejsza i równa wyjściowa średnica zewnętrzna.

8.4 Połączenia nierozłączne

8.4.1 Podział połączeń nierozłącznych

Połączenia nierozłączne to takie, których demontaż wymaga zniszczenia co najmniej jednego elementu złącza. Do nierozłącznych zalicza się połączenia:

- uzyskiwane przez odkształcenie trwałe,
- spawane,
- zgrzewane,
- lutowane,
- klejone,
- wciskane.

Połączenia nierozłączne należą do grupy **połączeń stałych (spoczynkowych)**, gdyż uniemożliwiają względny ruch połączonych części. W większości są to połączenia bezpośrednie. Wyjątkiem są połączenia nitowe, należące do połączeń pośrednich, w których występują łączniki w postaci nitów.

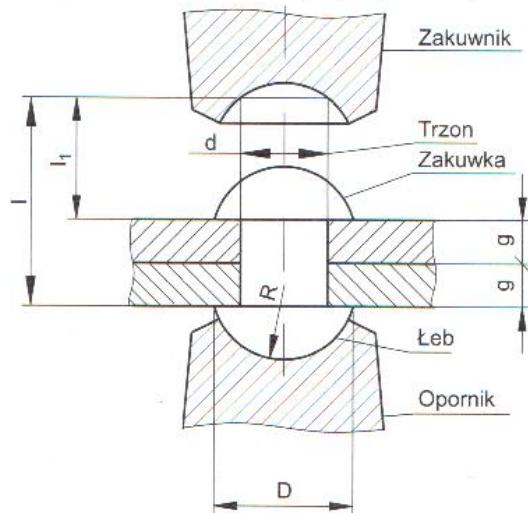
Połączenia nitowe

8.4.2

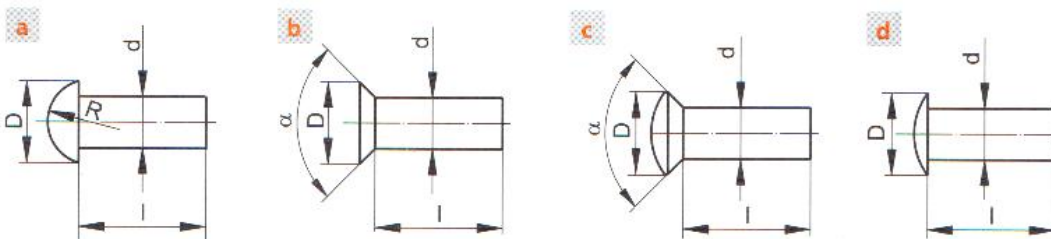
Proces nitowania polega na umieszczeniu nitu w otworze przechodzącym przez dwie lub więcej łączonych warstw materiału, podparciu fabrycznego łba nitu na oporniku i spęczeniu za pomocą zakuwnika wystającego trzona nitu, który przybiera kształt drugiego łba nazywanego zakuwką (rys. 8.4).

Kształtowanie zakuwki, nazywane zamykaniem nitu, może odbywać się *na zimno* (dla nitów o średnicy nieprzekraczającej 20 mm) lub *na gorąco* dla nitów o większej średnicy. W konstrukcjach stalowych średnicę nitu dobiera się wg zależności $d \approx 2g$, w której g jest grubością łączonego elementu. Średnice otworów pod nity zamykane na zimno przyjmuje się równe średnicy trzonu ($d_o = d$), z zachowaniem luźnego pasowania. Średnice otworów pod nity zamykane na gorąco wykonuje się z luzem wynoszącym 1 mm ($d_o = d + 1$). Długość trzonu nitu przed zamknięciem powinna wynosić $l = l_g + 1,5d$, gdzie l_g jest długością trzonu odpowiadającą sumarycznej grubości łączonych materiałów.

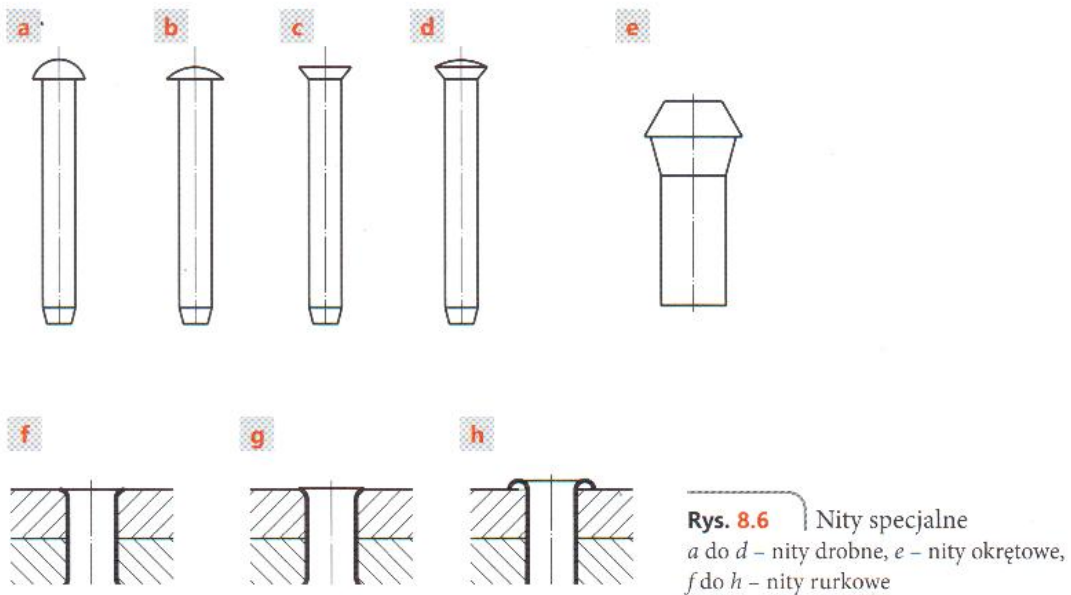
Nity mają różnorodną budowę. Rozróżnia się nity normalne o zróżnicowanym kształcie łba (rys. 8.5) oraz nity specjalne (rys. 8.6).



Rys. 8.4 Schemat nitowania
 g – grubość łączonych elementów, d – średnica trzonu nitu, l – całkowita długość nitu przed zamknięciem, l_1 – długość trzonu na zakuwkę, R – promień łba i zakuwki ($R = 0,83d$), D – średnica łba i zakuwki ($D = 1,6d$)



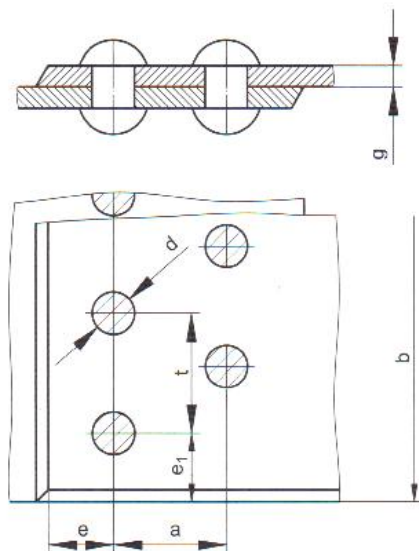
Rys. 8.5 Rodzaje nitów normalnych i ich charakterystyczne wymiary
 a – nit z łbem kulistym, b – nit z łbem płaskim, c – nit z łbem soczewkowym, d – nit z łbem grzybkowym, $\alpha = 75^\circ$ lub $\alpha = 90^\circ$



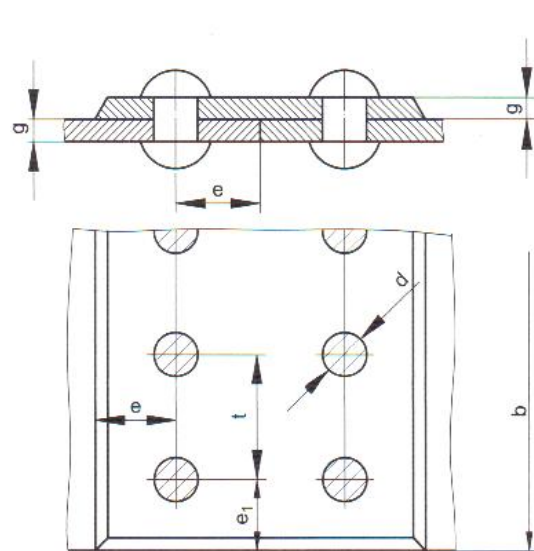
Nity z reguły wykonuje się z miękkich stali konstrukcyjnych (S235N, E295N E325N), nity specjalne zaś dodatkowo ze stali chromoniklowej, z metali nieżelaznych i ich stopów (np. miedzi, mosiądzu i duraluminium) oraz z tworzyw sztucznych termoplastycznych – do nitowania tworzyw sztucznych, skóry itp.

Połączenia nitowe mogą być zakładkowe (rys. 8.7), nakładkowe jednostronne (rys. 8.8) lub nakładkowe dwustronne (rys. 8.9). W pierwszych dwóch rodzajach podanych połączeń nity są ścinane w jednym przekroju.

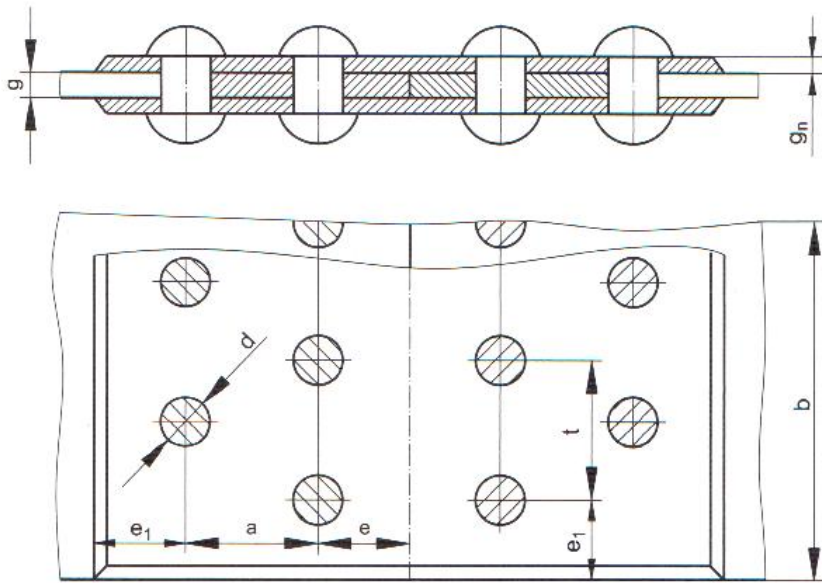
Gdy ilość łączonych elementów jest większa, liczba ścinanych przekrojów nitów wynosi 2 lub więcej (patrz rys. 8.9).



Rys. 8.7 Połączenie nitowe zakładkowe



Rys. 8.8 Połączenie nitowe nakładkowe jednostronne



Rys. 8.9
Połączenie nitowe
nakładkowe
dwustronne

Zniszczenie połączenia nitowego najczęściej może nastąpić wskutek:

- ścięcia nitów (niespełnienia warunku wytrzymałości na ścinanie),
- owalizacji otworów lub nitów (niespełnienia warunku wytrzymałości na naciski powierzchniowe),
- rozerwania łączonych elementów w przekrojach osłabionych otworami pod nity (niespełnienia warunku wytrzymałości na rozciąganie).

Do obliczania wytrzymałości nitów na **ściananie** stosuje się wzór

$$\tau = \frac{F}{mn \frac{\pi d_o^2}{4}} \leq k_t \quad (8.11)$$

gdzie:

F – siła zewnętrzna obciążająca połączenie,

m – liczba przekrojów ścinanych w jednym nicie,

n – liczba nitów (w połączeniach zakładkowych wszystkie nity, w połączeniach nakładkowych liczba nitów po jednej stronie połączenia),

d_o – średnica otworów pod nity,

k_t – dopuszczalne naprężenia ścinające dla materiału nitów.

Warunek wytrzymałości połączenia nitowego na **naciski powierzchniowe** jest następujący

$$p = \frac{F}{ngd_o} \leq k_o \quad (8.12)$$

gdzie:

F – siła zewnętrzna obciążająca połączenie,

n – liczba nitów (w połączeniach zakładkowych wszystkie nity, w połączeniach nakładkowych liczba nitów po jednej stronie połączenia)

g – grubość łączonych elementów (blach),

d_o – średnica otworów pod nity,

k_o – dopuszczalne naciski powierzchniowe.

$$b \geq \frac{30\,000}{6 \cdot 161} + 1 \cdot 12 = 31,06 + 12,00 = 43,06 \text{ mm.}$$

Obliczamy grubość nakładek

$$g_n = 0,65g = 0,65 \cdot 6 = 3,9 \text{ mm}$$

Przyjmujemy

$$g_n = 4 \text{ mm}$$

W przekroju II-II siła rozciągająca nakładki jest największa, a liczba otworów

$$n_1 = 2$$

W tym przekroju sprawdzamy nakładki, wykorzystując warunek wytrzymałości na rozciąganie

$$b_n \geq \frac{F_1}{g_n k_r} + n_1 d_o$$

$$b_n \geq \frac{30\,000}{2 \cdot 4 \cdot 161} + 2 \cdot 12 = 23,29 + 24 = 47,29 \text{ mm.}$$

Na podstawie dokonanych obliczeń okazało się, że przy zaproponowanym rozkładzie nitów szerokość pasów blachy i nakładek $b = b_n = 60 \text{ mm}$ jest wystarczająca.

Połączenia spawane

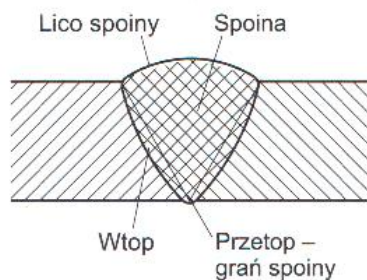
8.4.3

Połączenie spawane wykorzystuje się do łączenia części wykonanych z tego samego materiału lub ich naprawy. Spawaniu podlegają metale żelazne i ich stopy, niektóre stopy metali kolorowych (np. aluminium i miedzi) oraz niektóre termoplastyczne tworzywa sztuczne (np. PCV i PE).

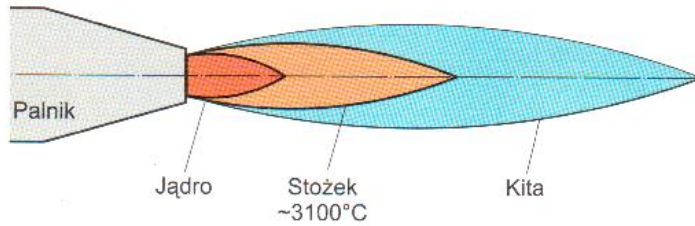
Połączenie spawane powstaje przez nadtopienie brzegów łączonych elementów i zalanie powstałej szczeliny ciekłym spoiwem o składzie identycznym lub zbliżonym do materiału spawanego. W wyniku spawania powstaje szew zwany **spoiną** (rys. 8.10).

Rozróżnia się dwa podstawowe rodzaje spawania: gazowe i elektryczne.

Spawanie gazowe polega na wykorzystaniu ciepła uzyskiwanego ze spalania gazów technicznych. Najczęściej jest to mieszanina acetylenu (C_2H_2) i tlenu (O_2). Prawdłowo wyregulowany palnik umożliwia uzyskanie płomienia o temperaturze dochodzącej do $3100^\circ C$ (rys. 8.11), który poza działaniem temperatury nie wpływa nawęglająco ani utleniająco na spawany materiał. Gazowo można spawać stale niskowęglowe i żeliwa, a dzięki zastosowaniu odpowiednich topników także stopy aluminium i miedzi. Spawanie gazowe jest metodą dość uniwersalną, jednak ze względu na stosunkowo niską wydajność oraz duże koszty, jest wypierane przez inne metody spawania.



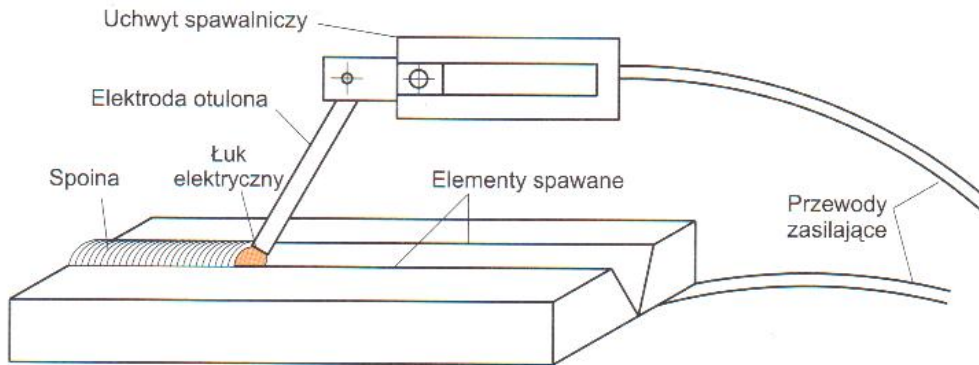
Rys. 8.10 Elementy spoiny



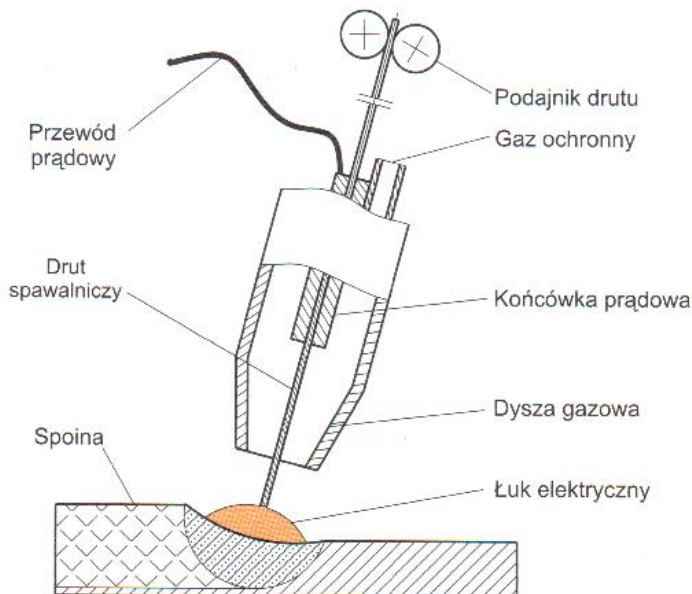
Rys. 8.11 Elementy płomienia palnika acetylenowo-tlenowego

Natomiast do cięcia metali używa się specjalnych palników, w których mieszanka gazów po roztopieniu metalu jest wzbogacana w tlen. Tlen powoduje szybkie utlenianie roztopionego metalu i dalsze jego roztopianie. Metoda ta nazywa się cięciem tlenowym.

Spawanie elektryczne, najczęściej łukowe, polega na wytworzeniu łuku elektrycznego między elektrodą i materiałem spawanym. Wysoka temperatura łuku elektrycznego, wynosząca ok. 6000°C , umożliwia skuteczne stopienie spawanego materiału i spoiwa. Najbardziej rozpowszechnione metody spawania elektrycznego opisano poniżej.

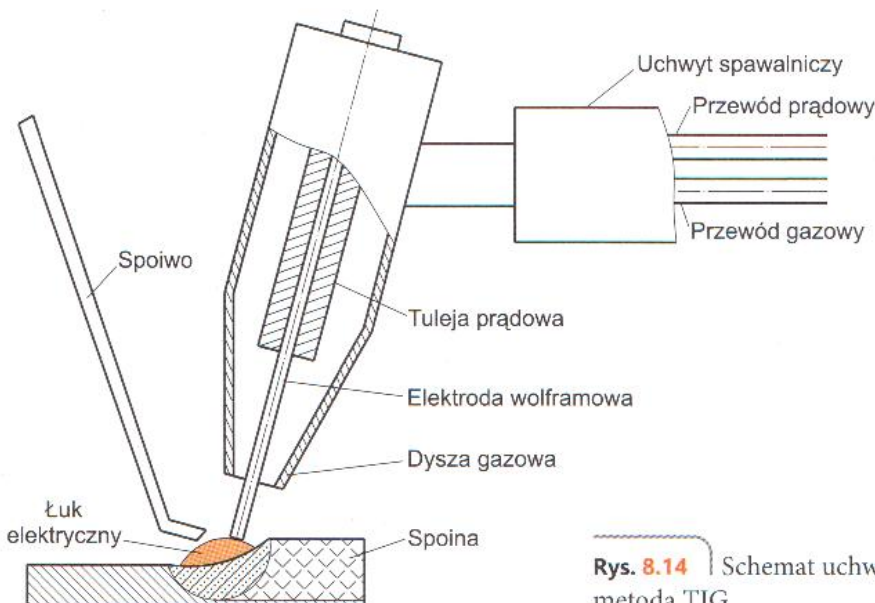


Rys. 8.12 Schemat spawania metodą MMA



Rys. 8.13 Schemat końcówki uchwytu do spawania metodami MAG i MIG

- **MMA** (ang. *Manual Arc Welding*) – **spawanie łukowe elektrodą otuloną**. Jest to metoda spawania ręcznego, w której topliwa metalowa elektroda jest źródłem spoiwa, a spalana w łuku elektrycznym sprasowana otulina (zasadowa, rutyłowa lub celulozowa) wytwarza niezbędną atmosferę gazów ochronnych (rys. 8.12). Stopiona otulina okrywa spoinę warstwą żużla chroniącego przed działaniem atmosfery i zbyt szybkim stygnięciem. Metoda MMA to metoda bardzo uniwersalna, popularna w małych warsztatach naprawczych.
- **MAG** (ang. *Metal Active Gas*) – **spawanie łukowe elektrodą topliwą w osłonie gazu aktywnego**. W tej metodzie drut spawalniczy (elektroda) jest podawany mechanicznie przez uchwyt spawalniczy. Przez dyszę w końcówce uchwytu jest dozowany aktywny gaz osłonowy (głównie **dwutlenek węgla**), który chroni spoinę przed działaniem atmosfery. Reakcje chemiczne zachodzące w gazie pod wpływem wysokiej temperatury wspomagają proces topienia i łączenia spawanego metalu.
- **MIG** (ang. *Metal Inert Gas*) – **spawanie łukowe elektrodą topliwą w osłonie gazu obojętnego**. Jest to metoda podobna do MAG, z tą różnicą, że gaz ochronny (**argon** lub **hel**) nie jest aktywny i jego rola ogranicza się tylko do osłony spoiny. Spawanie metodami MAG i MIG może być stosowane do wykonywania wysokiej jakości połączeń wszystkich metali i ich stopów, które dają się łączyć za pomocą spawania łukowego. Należą do nich stale węglowe i niskostopowe, stale odporne na korozję oraz stopy aluminium, miedzi i niklu. Metody MAG i MIG (rys. 8.13) szeroko wykorzystuje się także w samochodowych warsztatach naprawczych, ze względu na możliwość spawania cienkich blach.
- **TIG** (ang. *Tungsten Inert Gas*) – **spawanie łukowe nietopliwą elektrodą wolframową w osłonie gazu obojętnego** jest najbardziej uniwersalną metodą spawania łukowego. Łuk elektryczny jarzy się między nietopliwą elektrodą wolframową a materiałem spawanym (rys. 8.14). Proces odbywa się w osłonie gazu obojętnego (**argonu** lub **helu**). Spoiwo jest podawane ręcznie. Jego rodzaj dobiera się odpowiednio do spa-



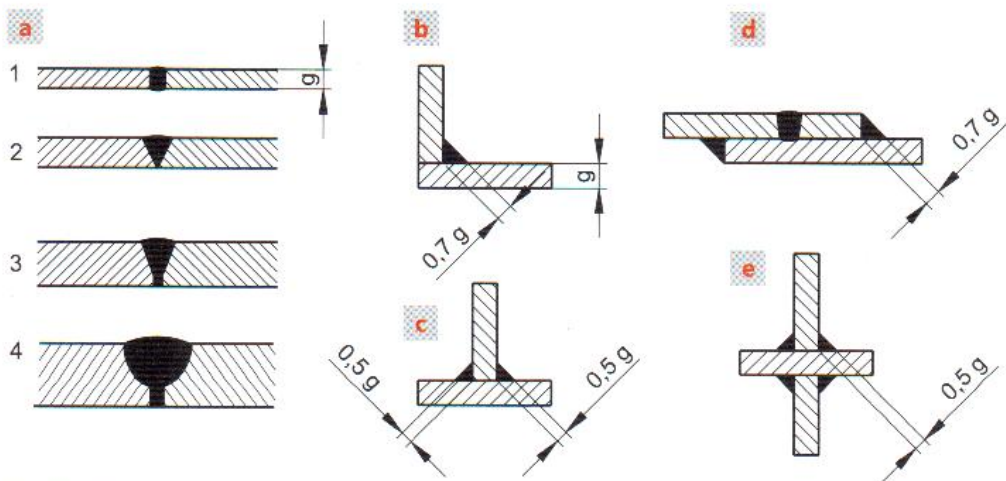
Rys. 8.14 Schemat uchwytu do spawania metodą TIG

wanych elementów. Metodę TIG stosuje się głównie do spawania stali nierdzewnych i innych stali stopowych, stopów aluminium, miedzi, tytanu i niklu. Wykorzystuje się ją w przemyśle lotniczym, samochodowym, chemicznym i spożywczym.

Nie wszystkie metale i ich stopy dają się spawać jednakowo łatwo. Łatwo spawalne są stale i staliwa o zawartości węgla do 0,25%. Wraz ze wzrostem zawartości węgla stale stają się trudniej i trudno spawalne. Stale zawierające ponad 0,4% węgla są już niespawalne. Podobnie jak węgiel na spawalność stali wpływają niektóre składniki stopowe, np. mangan, chrom, nikiel, aluminium, krzem. Z tego powodu stale niskostopowe są trudniej spawalne. Natomiast stale wysokostopowe, stopy aluminium, stopy miedzi oraz żeliwa są trudno spawalne elektrycznie i wymagają specjalnych metod spawania.

Jako spoiny nośne stosuje się głównie spoiny czołowe i pachwinowe. W technologii spawania rozróżnia się kilka rodzajów złączy spawanych. Najczęściej stosuje się złącza: doczołowe, kątowe, teowe, zakładkowe i krzyżowe (rys. 8.15a-e).

W celu uzyskania prawidłowego przetopu elementy o grubości do 4 mm rozstawia się na odległość 0,5–3 mm, uzyskując spoiny typu I. Grubsze elementy należy ukosować. W zależności od sposobu ukosowania, wraz ze wzrostem grubości łączonych elementów, stosuje się spoiny typu V, Y i U (rys. 8.15a).



Rys. 8.15 Rodzaje złączy spawanych i spoin

a – doczołowe ze spoiną czołową typu: I (1), V (2), Y (3), U (4), b – kątowe ze spoiną pachwinową, c – teowe z dwoma spoinami pachwinowymi, d – zakładkowe z dwoma spoinami pachwinowymi i jedną otworową, e – krzyżowe z czterema spoinami pachwinowymi

W złączy spawanym najsłabszym miejscem jest spoina. Spoiny oblicza się na podstawie ogólnych warunków wytrzymałościowych, w zależności od rodzaju obciążenia. Spoiny czołowe mogą być rozciągane, ściskane, zginane i ścinane. Natomiast spoiny pachwinowe, niezależnie od rodzaju obciążenia, zawsze są ścinane. Wartości naprężeń dopuszczalnych dla spoin oblicza się wg ogólnej zależności

$$k' = z_0 z k$$

(8.17)

którą np. w odniesieniu do rozciągania, zginania jednostronnego i skręcania można przedstawić odpowiednio jako

8.4.4 Połączenia zgrzewane i lutowane

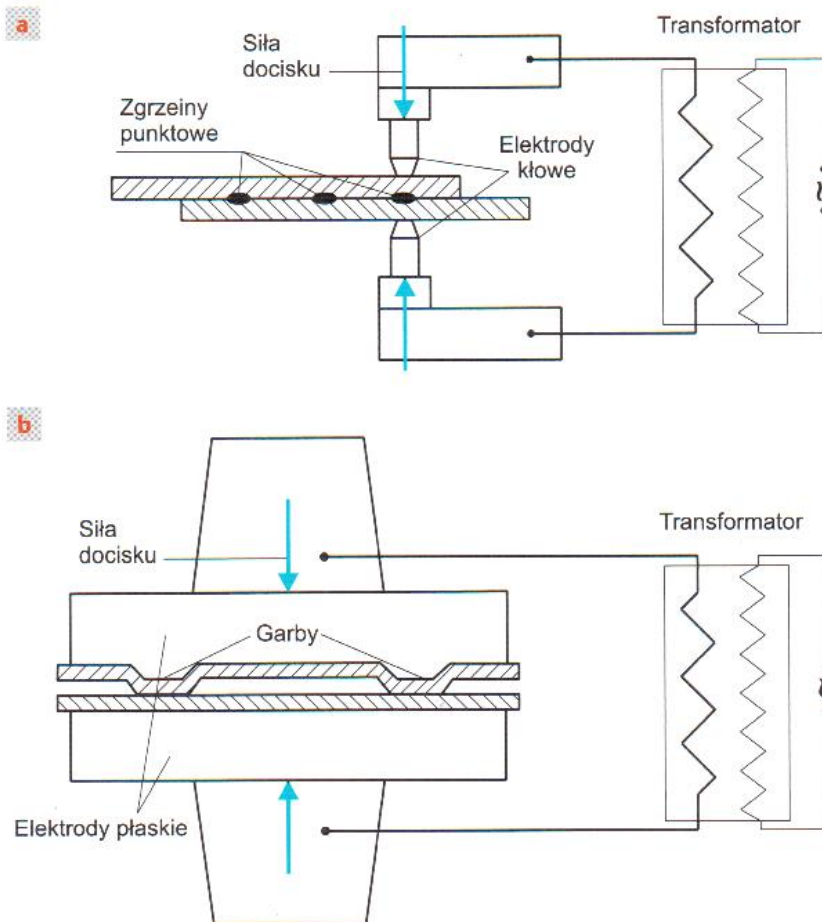
Połączenia zgrzewane

Połączenie zgrzewane powstaje bez dodatku spoiwa, w wyniku miejscowego ogrzania łączonych elementów do stanu plastyczności (temperatura białego żaru) i docięnięcia ich do siebie za pomocą siły mechanicznej (kucie, prasowanie lub docisk). Powstałe w wyniku zgrzewania złącze nazywa się zgrzeiną. Zgrzewanie umożliwia łączenie różnych metali lub metali z niemetalami.

W zależności od sposobu nagrzewania rozróżnia się następujące **rodzaje zgrzewania**:

- **ogniskowe** (elementy łączone nagrzewa się w ognisku kuziennym),
- **gazowe** (elementy są nagrzewane palnikiem gazowym),
- **tarciowe** (ciepło powstaje w wyniku tarcia o siebie łączonych powierzchni),
- **oporowe** (do wytworzenia ciepła wykorzystuje się energię elektryczną).

Najbardziej rozpowszechnione jest **zgrzewanie oporowe**, podczas którego przez zetknięte ze sobą części przepuszcza się prąd o dużym natężeniu. Wskutek oporu elektrycznego miejsca styku nagrzewają się do temperatury białego żaru i wtedy łączy się je ze sobą przez docisk.



Rys. 8.16 Zgrzewanie punktowe (a) i garbowe (b)

Ze względu na rodzaj powstałej zgrzeiny rozróżnia się zgrzewanie punktowe, garbowe, liniowe i doczołowe.

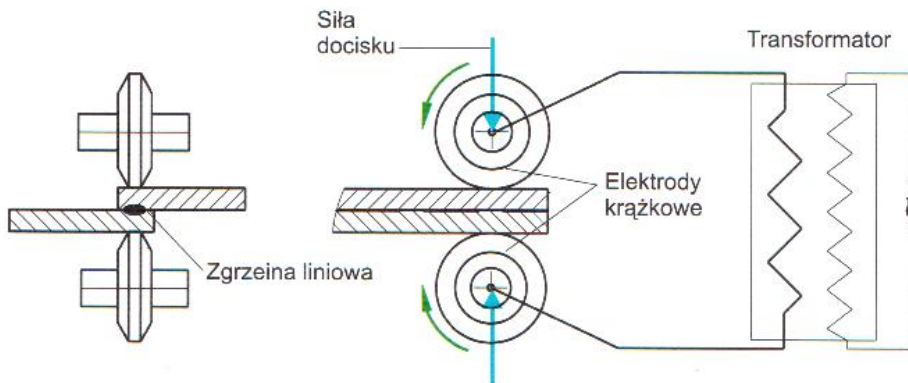
Zgrzewanie punktowe (rys. 8.16a) stosuje się do łączenia blach, wyprasek i profili tłoczonych o grubości 0,2–15 mm, gdy nie wymaga się szczelności złącza. Tę odmianę zgrzewania stosuje się powszechnie do łączenia blach nadwozi samochodowych.

Zgrzewanie garbowe (rys. 8.16b) jest ulepszoną wersją zgrzewania punktowego i służy do łączenia elementów konstrukcji o dużej powierzchni styku. Wykonanie takiego połączenia wymaga wyźłobienia garbów w jednym z łączonych elementów i zastosowania płytowych elektrod o kształcie odpowiednim do wykonanych garbów.

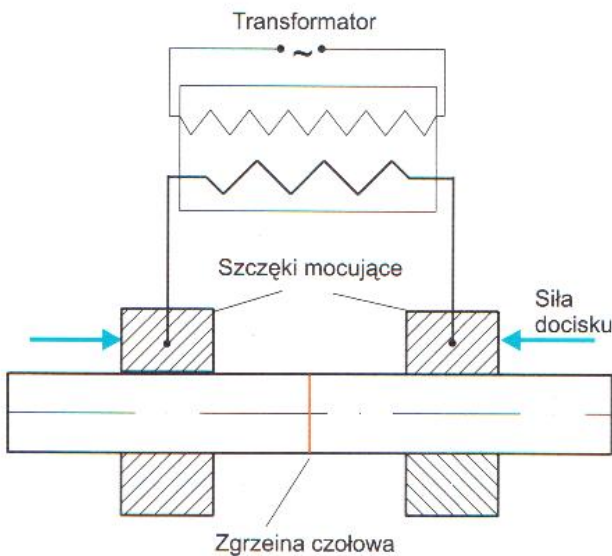
Zgrzewanie liniowe (rys. 8.17) odbywa się za pomocą elektrod krążkowych. Stosuje się je, gdy jest wymagana szczelność połączenia, a grubość łączonych elementów nie przekracza 4 mm.

Zgrzewanie doczołowe wykorzystuje się przede wszystkim do łączenia powierzchni czołowych prętów i rur (rys. 8.18). Rozróżnia się przy tym dwie metody nagrzewania:

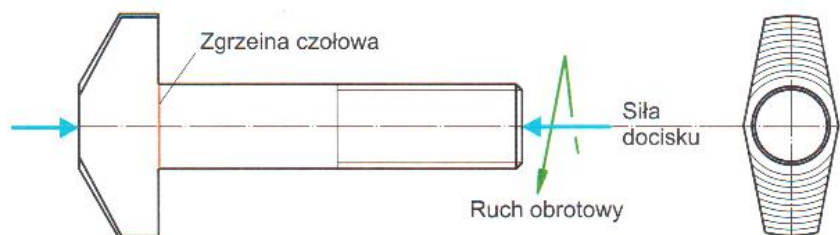
- zwarciovą, w której podczas przepływu prądu części łączone cały czas się stykają;
- iskrową, w trakcie której łączone części kilkakrotnie rozsuwa się i zwiera w celu wywołania iskrzenia przyspieszającego proces nagrzewania.



Rys. 8.17 Zgrzewanie liniowe



Rys. 8.18 Zgrzewanie elektryczne doczołowe



Rys. 8.19 Wykonana ze stali narzędziowej szczeka klucza nastawnego zgrzana metodą tarciovą ze śrubą wykonaną ze stali konstrukcyjnej

Zgrzewanie tarciove jest zgrzewaniem mechanicznym, podczas którego występuje ruch obrotowy jednej z części zgrzewanych. Wskutek tarcia wydziela się ciepło, które szybko nagrzewa łączone powierzchnie do stanu plastycznego, a dzięki osiowemu dociskowi powstaje zgrzeina czołowa. Metoda ta jest szeroko stosowana w produkcji różnych narzędzi, w których nie wszystkie elementy muszą być wykonane z drogiej stali narzędziowej (rys. 8.19).

Zgrzewanie ogniskowe i gazowe to stare oraz proste sposoby łączenia części. Ze względu na słabą jakość uzyskiwanych połączeń wykorzystuje się je obecnie w bardzo ograniczonym zakresie.

Obliczanie połączeń zgrzewanych. Połączenia zgrzewane mogą być rozciągane, zginane, ścinane i skręcane. W obliczeniach wytrzymałościowych połączeń zgrzewanych stosuje się takie same wzory jak w obliczeniach połączeń spawanych.

Naprężenia dopuszczalne dla zgrzein czołowych można obliczyć za pomocą wzoru

$$k' = z_o k \quad (8.27)$$

gdzie:

z_o – współczynnik wytrzymałości zgrzeiny o wartości:

$z_o = 0,70 \dots 0,85$ dla zgrzein czołowych wykonanych metodą zwarciovą lub tarciovą,

$z_o = 0,80 \dots 0,90$ dla zgrzein czołowych wykonanych metodą iskrową;

k – odpowiednie dla określonego stanu naprężeń naprężenie dopuszczalne dla zgrzewanego materiału.

Połączenia zgrzewane punktowo projektuje się tak, aby zgrzeiny były tylko ścinane. Średnicę zgrzein punktowych d ustala się według następujących wzorów:

- dla blach o minimalnej grubości $g_{\min} \leq 3$ mm

$$d = 1,2g_{\min} + 4 \text{ mm} \quad (8.28)$$

- dla blach o minimalnej grubości $g_{\min} > 3$ mm

$$d = 1,5g_{\min} + 5 \text{ mm} \quad (8.29)$$

Obliczoną średnicę zgrzein punktowych zaokrągla się w górę do pełnych wartości wyrażonych w milimetrach.

Naprężenia dopuszczalne dla zgrzein punktowych obciążonych statycznie określa się na podstawie zależności

$$k'_t = z_o k_r \quad (8.30)$$

gdzie $z_o = 0,35 \dots 0,50$.

W przypadku zgrzewania dwóch różnych materiałów do obliczeń przyjmuje się wartości naprężeń dopuszczalnych materiału o gorszych własnościach wytrzymałościowych.

Przykład 8.6

Taśmę hamulca ręcznego o grubości 1,5 mm wykonaną ze stali E335 połączono na zakładkę zgrzeinami punktowymi. Podczas zaciągania hamulca na taśmę działa siła rozciągająca $F = 5$ kN. Oblicz wymaganą liczbę zgrzein.

Rozwiązanie

Z tablicy 8-2 dla stali E335 odczytujemy wartość granicy plastyczności $R_e = 335$ MPa.

W tablicy 8-5 odnajdujemy naprężenia dopuszczalne

$$k_r = 0,48R_e$$

i obliczamy ich wartość

$$k_r = 0,48R_e = 0,48 \cdot 335 = 160,8 \text{ MPa} \approx 161 \text{ MPa}$$

Złącze jest obciążone siłą ścinającą. Oblicza się je na podstawie warunku wyrażonego wzorem

$$\tau = \frac{F}{n \frac{\pi d^2}{4}} \leq k'_r$$

gdzie:

F – siła ścinająca,

n – liczba zgrzein,

d – średnica zgrzein.

Obliczamy średnicę zgrzein

$$d = 1,2 \cdot 1,5 + 4 = 5,8 \text{ mm}$$

Przyjmujemy

$$d = 6 \text{ mm}$$

Obliczamy wartość dopuszczalnych naprężeń ścinających

$$k'_r = 0,4k_r = 0,4 \cdot 161 = 64,4 \text{ MPa} \approx 64 \text{ MPa}$$

Obliczamy liczbę zgrzein

$$n \geq \frac{4F}{\pi d^2 k'_r} = \frac{4 \cdot 5000}{3,14 \cdot 6^2 \cdot 64} = 2,8$$

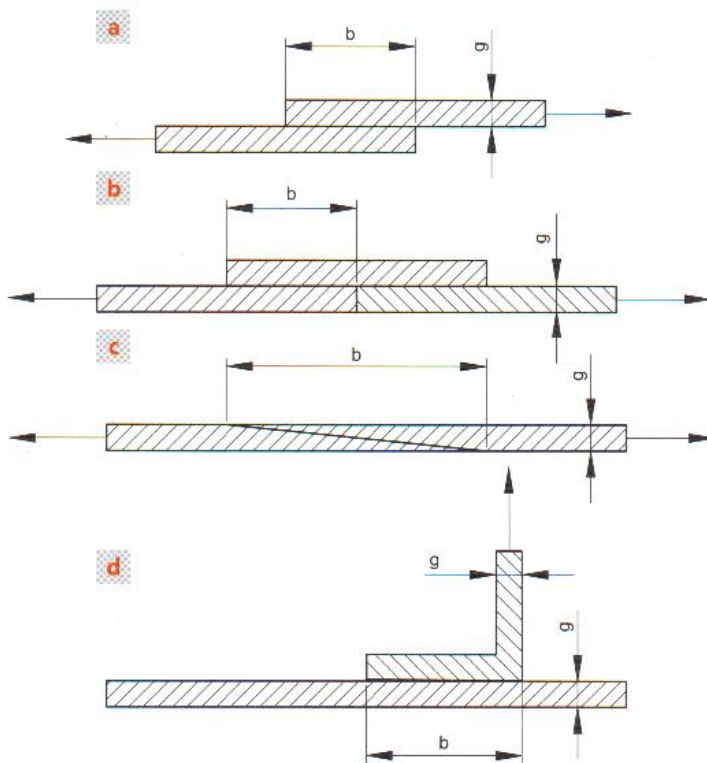
Przyjmujemy liczbę zgrzein

$$n = 3$$

W celu zamocowania taśmy hamulca należy więc wykonać trzy zgrzeiny.

Połączenia lutowane

Lutowanie polega na spajaniu metalowych części roztopionym spoiwem nazywanym lutem, którego temperatura topnienia jest niższa od temperatury łączonych elementów. Rozróżnia się **lutowanie miękkie**, wykonywane za pomocą lutów o temperaturze topnienia nieprzekraczającej 500°C, oraz **lutowanie twarde**, w którym wykorzystuje się luty o temperaturze topnienia przekraczającej 500°C. W celu zapewnienia dobrego przyle-

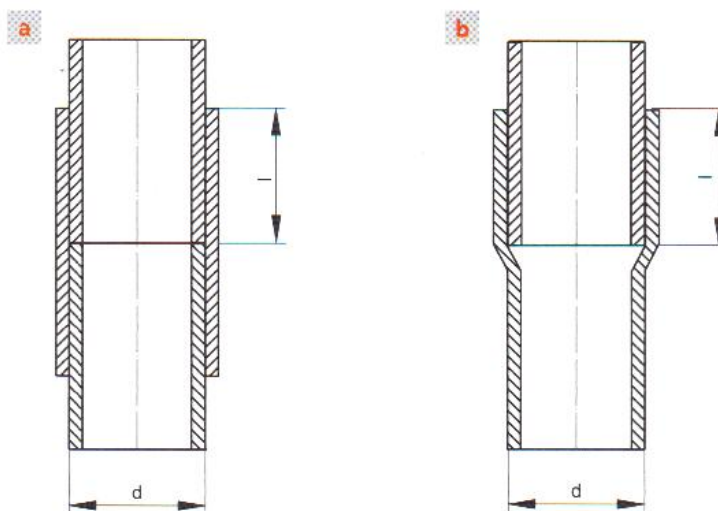


Rys. 8.20 Połączenia lutowane
a - zakładkowe,
b - nakładkowe,
c - zakładkowe z zakładką gubioną,
d - przykładowe

gania lutu do łączonych powierzchni roztopiony lut powinien dobrze je zwilżać, dlatego przed lutowaniem powinny one być dokładne oczyszczone i odfuszczone, a podczas lutowania stosuje się odpowiednie topniki (np. kałafonia, boraks).

Złącze lutowane powinno być tak zaprojektowane, aby spoina była tylko ścinana. Z tego powodu najczęściej wykorzystuje się połączenia zakładkowe, nakładkowe lub przykładowe (rys. 8.20).

Połączenia lutowane wykorzystuje się również do spajania rur. Stosuje się wówczas złącza mufowe oraz kielichowe (rys. 8.21).



Rys. 8.21 Lutowane połączenia rur
a - mufowe,
b - kielichowe

Lutami miękkimi są stopy na osnowie cyny, cynku, kadmu oraz indu i bizmutu. Ich wytrzymałość na ścinanie $R_t = 20 \dots 80$ MPa. Natomiast luty twarde są stopami na osnowie miedzi, aluminium oraz srebra. Wytrzymałość na ścinanie tych stopów wynosi 100–250 MPa.

Naprężenia dopuszczalne w połączeniu lutowanym przyjmuje się dla materiału lutu, stosując następujące wartości współczynników bezpieczeństwa:

- $x \approx 3$ dla obciążeń statycznych,
- $x \approx 5$ dla obciążeń jednostronnie zmiennych,
- $x \approx 8$ dla obciążeń obustronnie zmiennych.

Grubość lutowia w połączeniu powinna wynosić 0,01–0,15 mm, przy czym mniejsze grubości dotyczą lutów twardych, a większe – lutów miękkich.

W celu zapewnienia wytrzymałości złącza, równej wytrzymałości na rozciąganie łączonych elementów, przyjmuje się następującą szerokość lutowanego złącza:

- $b \approx 6g$ dla lutów miękkich,
- $b \approx 3g$ dla lutów twardych.

Drugi wymiar (prostopadły do b), czyli długość złącza l , oblicza się z warunku wytrzymałości złącza na ścinanie:

- dla połączeń elementów płaskich

$$\tau = \frac{F}{bl} \leq k'_t \quad (8.31)$$

- dla połączeń rurowych

$$\tau = \frac{F}{\pi dl} \leq k'_t \quad (8.32)$$

Połączenia klejone

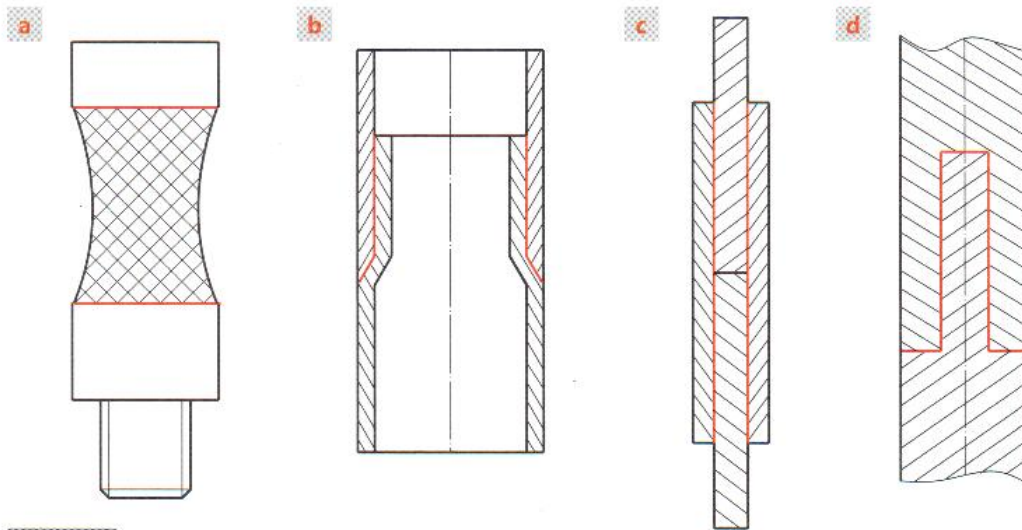
8.4.5

Klejenie jest procesem łączenia metali lub metali z niemetalami za pomocą klejów syntetycznych. Warunkiem poprawnego wykonania połączenia klejonego jest dobra zwilżalność powierzchni klejonych przez klej. Na wytrzymałość złącza klejonego wpływają:

- siły spójności klejonego materiału,
- siły spójności utwardzonego kleju,
- siły przyczepności występujące między klejem a materiałem klejonym.

Powierzchnie klejone muszą być czyste, wolne od smarów, produktów korozji, farb, lakierów i innych zanieczyszczeń. Do oczyszczenia powierzchni klejonych stosuje się metody mechaniczne, chemiczne i elektrochemiczne. Przed czyszczeniem powierzchnie odłuszcza się za pomocą benzyny ekstrakcyjnej, rozpuszczalnika tri, tetry, acetonu lub roztworów alkalicznych.

Połączenia klejone są zwykle złączami zakładkowymi, rzadziej doczołowymi. Złącza doczołowe stosuje się do łączenia elementów metalowych z niemetalowymi o różnych polach powierzchni przekroju poprzecznego (rys. 8.22a). Najkorzystniejsze połączenia otrzymuje się jednak w złączach zakładkowych, nakładkowych i wpuszczanych (rys. 8.22b–d).



Rys. 8.22 | Złącza klejone

a – doczołowe, *b* – zakładkowe, *c* – nakładkowe, *d* – wpuszczane

Niezwykle istotny jest prawidłowy dobór kleju, odpowiedniego dla łączonych elementów i późniejszych warunków pracy. Sposób przygotowania kleju zawsze jest podany przez producenta kleju na opakowaniu lub dołączonej instrukcji.

W handlu dostępna jest duża grupa klejów produkcji krajowej i zagranicznej. Różnią się one przeznaczeniem oraz technologią wykonywania połączeń.

Do klejenia metali stosuje się omówione niżej rodzaje klejów.

Kleje epoksydowe, produkowane na bazie żywic epoksydowych, są chemoutwardzalne i przed zastosowaniem wymagają wymieszania z utwardzaczem. Do klejenia metali, jak również do ich laminowania, stosuje się utwardzacze *PAC*, *TFF* lub *Z1*. Klejenie odbywa się w temperaturze pokojowej bez konieczności dociskania łączonych elementów. Najbardziej rozpowszechnione kleje z tej grupy to *Epidian* i *Poxipol*.

Kleje fenolowe w połączeniu ze składnikami termoplastycznymi tworzą spoiwa o dużej wytrzymałości i odporności na działanie wody oraz podwyższonej temperatury. Wykorzystuje się je do łączenia aluminium oraz stali niskowęglowych i stopowych. W handlu dostępne są pod nazwami *Borsol* (utwardzany w temp. 70–80°C) oraz *Żywica AW* (utwardzana w temp. 180°C).

Kleje poliuretanowe produkowane w Polsce występują w postaci gęstej cieczy pod nazwami *Poles 170/12*, *Poles 220/11*, *Poles 300/8* i *Izokol 102*. Po zmieszaniu z *Izocynem PF-100* utwardzają się w temperaturze pokojowej lub na gorąco w ciągu ok. 30 min. Na klejone elementy należy wyrzeć nacisk ok. 0,2 MPa.

Kleje cyjanoakrylowe występują powszechnie pod nazwą *Cyjanopan*. Są przeznaczone do klejenia metali, szkła, ceramiki, gumy i niektórych tworzyw sztucznych. Charakteryzują się bardzo krótkim czasem utwardzania (kilkadziesiąt sekund) przy docisku ręcznym.

Kleje anaerobowe utwardzają się po odcięciu dostępu tlenu z powietrza w temperaturze pokojowej przez kilkanaście minut. Krajowy *Kolfix* znajduje zastosowanie do zabezpieczania śrub i nakrętek przed odkręcaniem, osadzania łożysk, panewek i tulei oraz do uszczelniania spoin.

Kleje prądoprzewodzące charakteryzują się bardzo małym oporem elektrycznym. Z powodzeniem zastępują połączenia lutowane, jeśli obciążenie nie przekracza 1 A/cm^2 . Polski *Elektroklej* można stosować do montażu diod tranzystorów i innych elementów elektronicznych małej mocy.

Połączenia wciskowe

8.4.6

Połączeniem wciskowym nazywa się połączenie, w którym wzajemne unieruchomienie łączonych części następuje na skutek tarcia wywołanego wciskiem.

Połączenie wciskowe powstaje w wyniku skojarzenia części wewnętrznej o wymiarze zewnętrznym większym niż wymiar wewnętrzny części obejmującej (np. skojarzenie czop-piasta). Wciskiem W nazywa się bezwzględną wartość ujemnego luzu L , czyli dodatnią wartość różnicy między wymiarem zewnętrznym czopa i wymiarem wewnętrznym części obejmującej. Granicznymi wartościami wcisku są:

- wcisk minimalny

$$W_{\min} = |-L_{\max}| \quad (8.33)$$

- wcisk maksymalny

$$W_{\max} = |-L_{\min}| \quad (8.34)$$

Uzyskany wcisk – o wartości

$$W = d_{z1} - d_{w2} \quad (8.35)$$

powoduje docisk na powierzchniach styku, będący wynikiem działania odkształceń sprężystych w łączonych częściach (rys. 8.23a). Docisk ten wywołuje z kolei znaczną siłę tarcia zdolną do przeciwstawienia się siłom wzdłużnym lub momentom skręcającym, które obciążają połączenie.

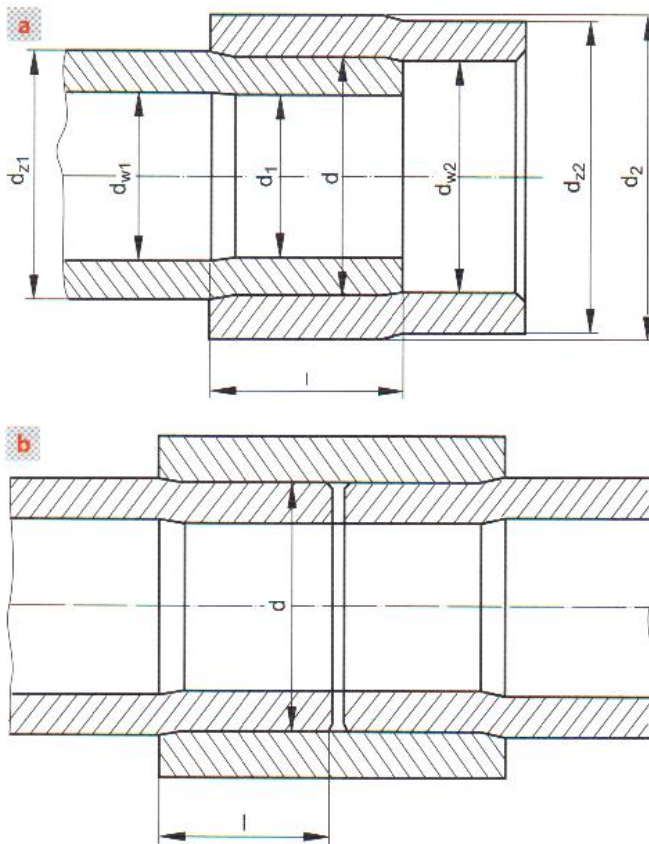
Połączenia wciskowe mogą być **bezpośrednie** (patrz rys. 8.23a) lub **pośrednie** (rys. 8.23b). W połączeniach pośrednich występuje łącznik w postaci mufy, pierścienia lub innego elementu łączącego.

Ze względu na sposób montażu rozróżniamy połączenia:

- **wtlaczane**, uzyskiwane w wyniku wciśnięcia czopa w oprawę na prasie,
- **roztlaczane**, powstałe przez rozwalcowanie rurowego czopa w otworze oprawy,
- **skurczowe**, tworzone dzięki podgrzaniu oprawy do temperatury umożliwiającej swobodne jej nasunięcie na czop,
- **rozprężne**, wytwarzane przez oziębienie czopa zestalonym CO_2 (temp. -70°C) lub ciekłym azotem (temp. -190°C),
- **kombinowane (skurczowo-rozprężne)**, stosowane przy dużych wartościach wcisku. Siła wtlaczania powinna być o 30% większa od wzdłużnej siły tarcia w połączeniu.

Podczas montażu połączeń skurczowych i rozprężnych należy zachować dużą ostrożność, aby nie ulec poparzeniu ani odmrożeniu.

Połączenia wciskowe na ogół są nierozłączne. Ponowne skojarzenie zdemontowanego połączenia wciskowego jest możliwe tylko w przypadku małych wcisków oraz dużej twardości i gładkości łączonych powierzchni.



Rys. 8.23 Połączenia wciskowe
a – bezpośrednie (wymiary czopa i oprawy przed oraz po zmontowaniu),
b – pośrednie (wymiary łącznika)

Obliczanie połączeń wciskowych. Do obliczania połączeń wtlaczanych wykorzystujemy następujące wzory:

- w przypadku obciążenia złącza siłą wzdłużną

$$F \leq T = \mu p \pi d l \quad (8.36)$$

- przy obciążeniu złącza momentem skręcającym

$$M \leq Td/2 = 0,5\mu p \pi d^2 l \quad (8.37)$$

gdzie:

μ – współczynnik tarcia,
 p – minimalny nacisk powierzchniowy,
 d – poprzeczny wymiar złącza,
 l – długość złącza.

Montażowy wcisk skuteczny W oblicza się na podstawie zależności

$$W = pd \left(\frac{c_1}{E_1} + \frac{c_2}{E_2} \right) \quad (8.38)$$

gdzie:

p – minimalny nacisk powierzchniowy,
 d – poprzeczny wymiar złącza,
 c_1, c_2 – współczynniki określone wzorami

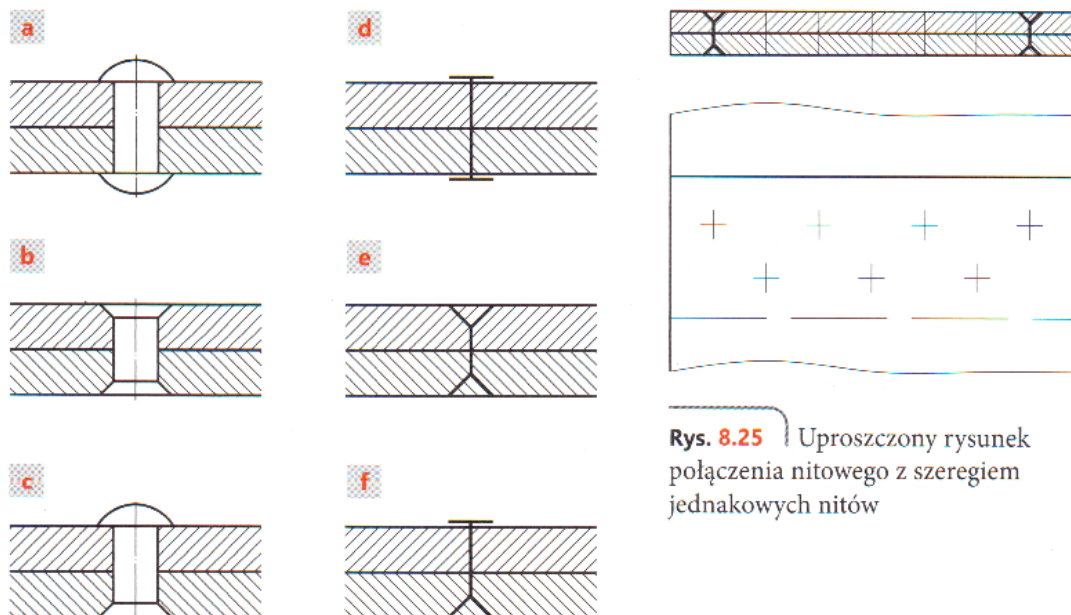
8.4.7 Oznaczanie połączeń nierozłącznych na rysunkach technicznych

Wszystkie części na rysunkach powinny być w zasadzie przedstawione w sposób rzeczywisty z uwzględnieniem szczegółów i proporcji wymiarowych. Takiego przedstawienia szczegółów wymaga się tylko na rysunkach wykonawczych. Na rysunkach złożeniowych jest to bowiem niemożliwe ze względu na stosowane zmniejszenie przedstawianego obiektu oraz czytelność i pracochłonność wykonywania rysunku. W normach dotyczących rysunku technicznego przewidziano możliwość przedstawiania niektórych części maszyn i ich połączeń w jednym lub dwóch stopniach uproszczenia. Uproszczenia rysunkowe są tak dobrane, że im wyższy stopień uproszczenia, tym mniej szczegółów na rysunku. Wybór stopnia uproszczenia zależy od rodzaju rysunku oraz jego podziałki i tak:

- I stopień uproszczenia stosuje się na rysunkach wykonawczych części maszyn,
- II stopień uproszczenia wykorzystuje się głównie na rysunkach złożeniowych, wykonanych w dużym zmniejszeniu.

W normach przewidziano jeszcze III stopień uproszczenia, nazywany również uproszczeniem schematycznym lub umownym, lecz jego wykorzystanie ograniczono głównie do sporządzania schematów mechanizmów.

Nity na rysunkach wykonawczych rysuje się bez uproszczeń, natomiast rysunki połączeń nitowych można przedstawić w uproszczeniu (rys. 8.24). W rzucie na płaszczyznę prostopadłą do osi nitów położenie nitów zaznacza się krzyżykami. Natomiast na rzutach lub przekrojach równoległych do osi nitów rysuje się je w uproszczeniu, przy czym jeden lub dwa nity rysuje się w uproszczeniu, a pozostałe zaznacza jedynie pionową cienką kreską (rys. 8.25).



Rys. 8.24 Połączenia nitowe
a do c – bez uproszczeń, d do f – w uproszczeniu

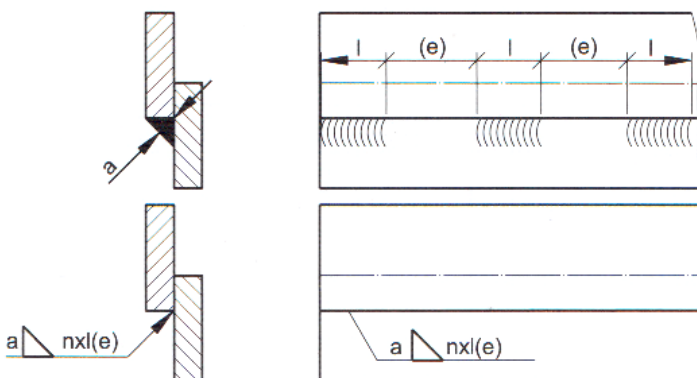
Rys. 8.25 Uproszczony rysunek połączenia nitowego z szeregiem jednakowych nitów

Połączenia spawane na rysunkach technicznych przedstawia się w uproszczeniu, gdy wymaga się przedstawienia szczegółów połączenia, albo w sposób umowny, który podano w normie (rys. 8.26).

Spoiny przerywane, składające się z kilku odcinków, wymiaruje się przez podanie liczby odcinków n , długości odcinka l i odstępu e między odcinkami sąsiednich spoin (rys. 8.27).

| | Rodzaj spoiny | | | |
|--------------------------|---------------|-----------|-----------------------|----------|
| | Czołowa V | Czołowa Y | Pachwinowa dwustronna | Otworowa |
| Widok lica spoiny | | | | |
| Przekrój | | | | |
| Widok przeciwlica spoiny | | | | |
| Oznaczenia umowne spoin | | | | |

Rys. 8.26 Przykładowe oznaczenia niektórych spoin na rysunkach



Rys. 8.27 Pachwinowa spoina przerywana w uproszczeniu i oznaczeniu umownym

Połączenia zgrzewane, podobnie jak spawane, można przedstawiać na rysunkach w sposób uproszczony lub umowny. Uproszczone oznaczenie połączeń zgrzewanych stosuje się wówczas, gdy wymaga się przedstawienia szczegółów połączenia. Umowne przedstawienie zgrzein jest częściej stosowane i sprawia, że rysunek staje się bardziej czytelny i przejrzysty.

Zarysy zgrzein w uproszczeniu rysuje się linią grubą. Zgrzeiny punktowe i liniowe w przekroju zaznacza się owalem, rysowanym linią grubą, a ich obszar się kropkuje. Widoki zgrzein punktowych i liniowych rysuje się linią kreskową grubą. Zgrzeiny punktowe zaznacza się okręgami wypełnionymi wewnątrz łukami, a liniowe – zachodzącymi na siebie owalami (rys. 8.28).

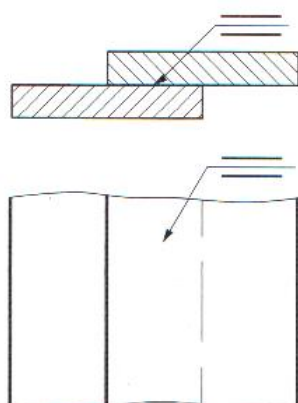
Umowne oznaczanie zgrzein na rysunkach znormalizowano. Zgrzeiny czołowe zaznacza się linią grubą, a na linii odniesienia zakończonej strzałką umieszcza się syme-

| | Widoki i przekroje w uproszczeniu | Oznaczenia umowne |
|------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| Zgrzeina czołowa w przekroju | | |
| Zgrzeina czołowa w widoku | | |
| Zgrzeiny punktowe | | |
| Zgrzeina liniowa | | |

Rys. 8.28 Przykładowe oznaczanie zgrzein na rysunkach

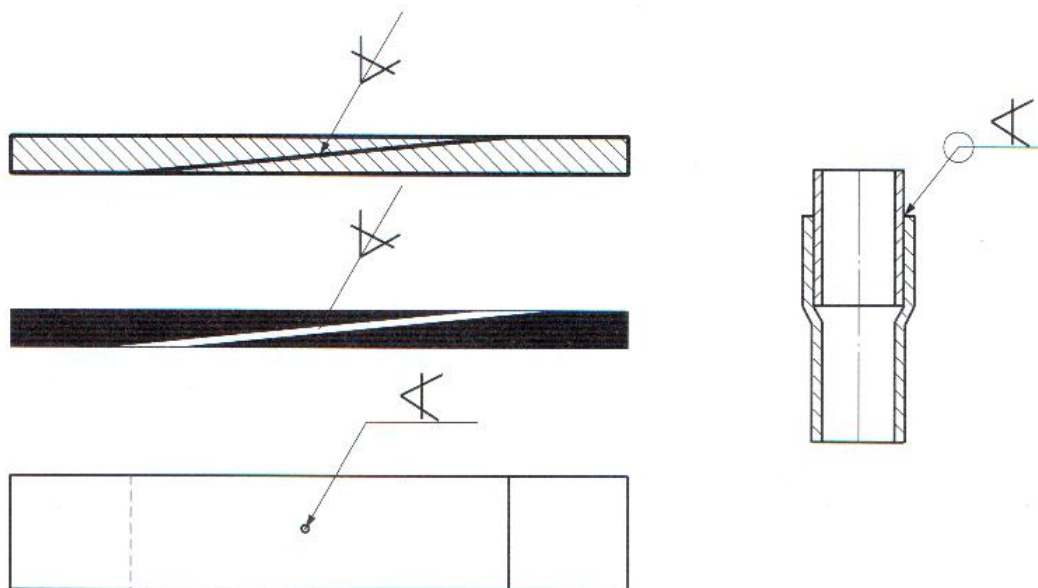
trycznie symbol zgrzeiny. Zgrzeiny punktowe i liniowe oznacza się linią punktową, a na linii odniesienia podaje się wymiar charakterystyczny zgrzeiny, czyli średnicę d lub szerokość c , symetrycznie na linii odniesienia umowny znak zgrzeiny, a za nim liczbę zgrzein n i ich rozstaw e lub długość zgrzeiny liniowej l (patrz rys. 8.28).

Połączenia lutowane z reguły tworzą złącza zakładkowe. Uprozczone rysunki tych połączeń wykonuje się wg ogólnych zasad, natomiast przy umownym oznaczaniu obowiązują takie same zasady jak dla połączeń zgrzewanych. Przykład umownego przedstawienia połączenia lutowanego pokazano na rysunku 8.29.



Rys. 8.29 Umowne przedstawienie spoiny lutowanej

Połączenia klejone rysuje się tylko w jednym stopniu uproszczenia. Na przekroju miejsce połączenia oznacza się bardzo grubą linią lub niewypełnionym odstępem, gdy połączone elementy są zaczerńnione. Spoinę klejoną wskazuje się linią odniesienia, nad którą wpisuje się informacje o rodzaju kleju, a na linii lub nad nią umieszcza się symbol spoiny. Gdy połączenie ma być wykonane na całym obwodzie, na załamaniu linii odniesienia umieszcza się okrąg o średnicy 3–5 mm (rys. 8.30)



Rys. 8.30 Oznaczanie połączeń klejonych na rysunkach

8.5 Połączenia rozłączne

8.5.1 Podział połączeń rozłącznych

Połączenia rozłączne to takie, których demontaż jest możliwy bez uszkodzenia żadnego elementu złącza. Są to z reguły połączenia kształtowe, gdyż polegają na załamaniach powierzchni styku łączonych elementów, czyli odpowiedniemu ich ukształtowaniu (**połączenia bezpośrednie**), lub przenikaniu gładkiej powierzchni styku przez łączniki o odpowiednim kształcie (**połączenia pośrednie**). Konstrukcja połączeń pośrednich wymaga stosowania łączników w postaci wpustów, kołków, sworzni, klinów, śrub lub wkrętów.

Do rozłącznych zalicza się połączenia:

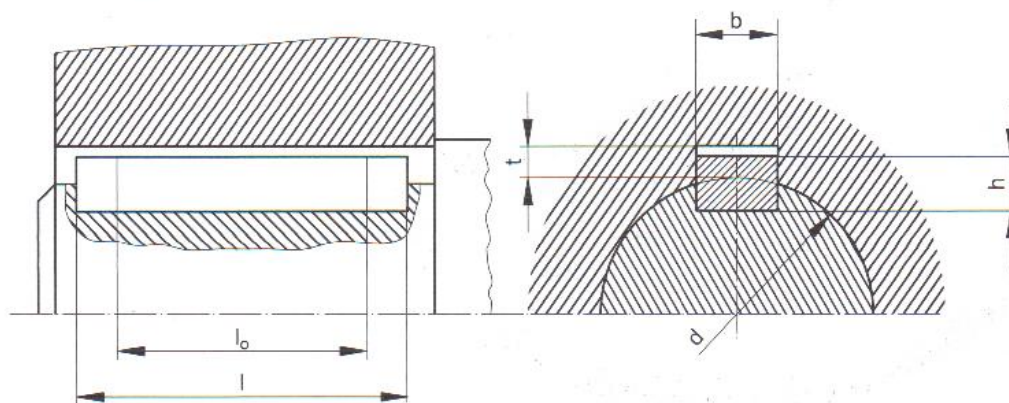
- wpustowe,
- wielowypustowe i wielokarbowe,
- kołkowe i sworzniowe,
- klinowe,
- gwintowe.

Połączenia rozłączne mogą być:

- **spoczynkowe**, gdy służą do przenoszenia momentu obrotowego lub sił wzdłużnych oraz do ustalania położenia jednej części względem drugiej, a względny ruch połączonych części jest niemożliwy;
- **ruchowe**, w których połączone części mogą się względem siebie przemieszczać, a połączenie ma charakter kierujący i służy do prowadzenia jednej części względem drugiej.

8.5.2 Połączenia wpustowe

Połączenia wpustowe stanowią grupę rozłącznych pośrednich połączeń kształtowych. Stosuje się je do łączenia wałów z piastami kół zębatach, sprzęgieł itp. w celu przeniesienia momentu obrotowego z jednego elementu na drugi lub odwrotnie. Takie połączenie ma charakter spoczynkowy. Gdy oprócz przeniesienia momentu obrotowego jest wymagana



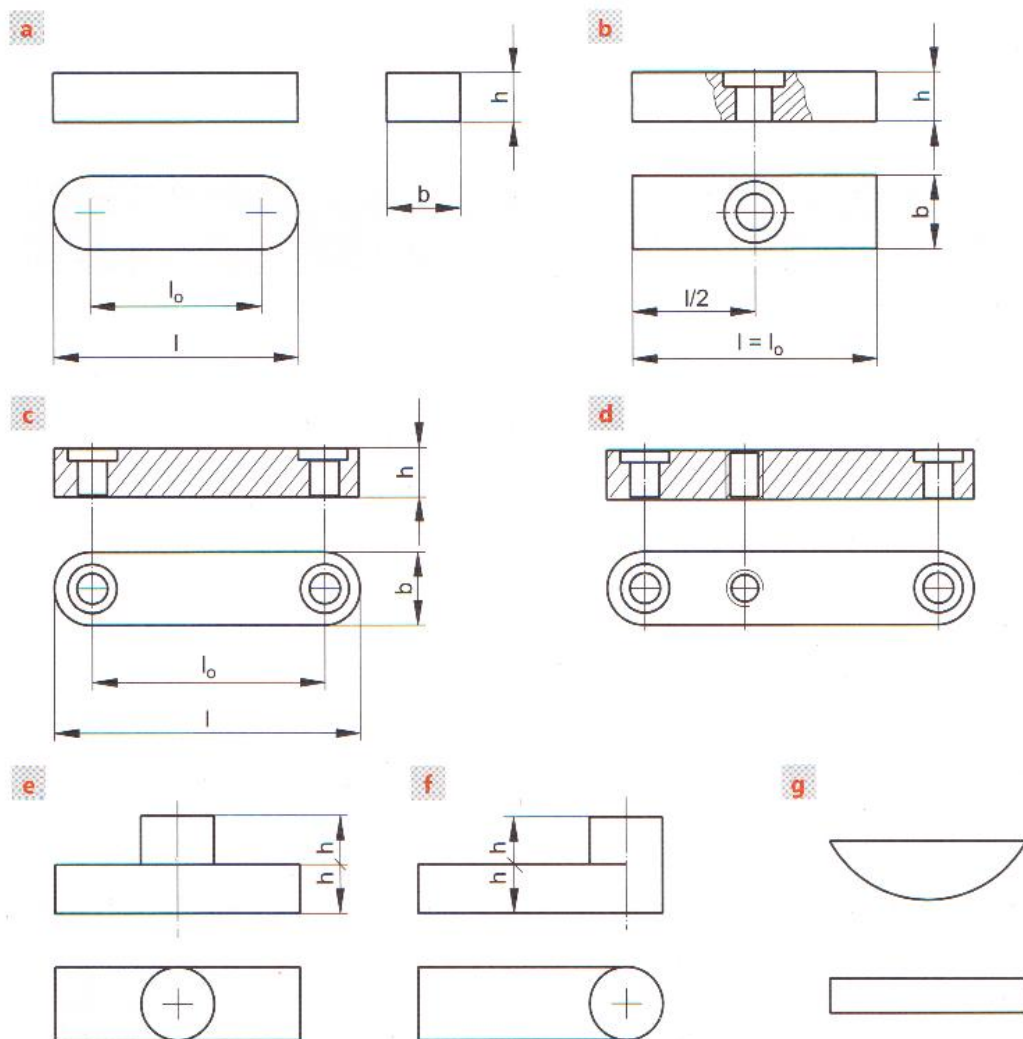
Rys. 8.40 Połączenie wpustowe z wpustem pryzmatycznym zaokrąglonym
 d – średnica połączenia, b – szerokość wpustu, h – wysokość wpustu, l_0 – czynna długość wpustu,
 $l = (l_0 + b)$ – całkowita długość wpustu, t – głębokość rowka w piaście

możliwość przemieszczania się piasty wzdłuż osi wału, wówczas połączenie wpustowe ma charakter ruchowy.

Rolę łączników w połączeniach wpustowych pełnią **wpusty** (rys. 8.40). Wpusty osadza się powierzchniami bocznymi ciasno w rowkach czopa wału i piasty (pasowanie N9/h9 lub P9/h9). Osiowanie wału i piasty należy zapewnić, stosując lekki wcisk na średnicy połączenia (pasowanie H7/j6).

W połączeniach ruchowych wpust osadza się ciasno w rowku czopa wału (pasowanie N9/h9), natomiast luźno w rowku piasty (pasowanie F9/h9 lub G9/h9). Na średnicy połączenia stosuje się pasowanie suwliwe (H7/f7).

Dla ułatwienia montażu głębokość rowka w piastie powinna być taka, aby między grzbietem wpustu a dnem rowka w piastie zapewnić wymagany luz 0,2–0,4 mm.



Rys. 8.41 Rodzaje wpustów

a – przyzmatyczny zaokrąglony, *b* – przyzmatyczny ścięty jednootworowy, *c* – przyzmatyczny zaokrąglony dwuotworowy, *d* – przyzmatyczny zaokrąglony dwuotworowy wyciskowy, *e* – czopkowy symetryczny, *f* – czopkowy niesymetryczny, *g* – członkowy przyzmatyczny

Przykład 8.9

Na wałku o średnicy $d = 40$ mm osadzono spoczynkowo koło zębate, przenoszące moment obrotowy $M = 400$ N · m. Wałek wykonano ze stali C45, koło z żeliwa EN-GJL-200, a wpust ze stali E360. Należy dobrać wymiary wpustu dla lekkich warunków pracy.

Rozwiązanie

Obliczamy siłę obwodową działającą na wpust

$$F = \frac{2M}{d} = \frac{2 \cdot 400 \cdot 10^3}{40} = 20\,000 \text{ N} = 20 \text{ kN}$$

Z tablicy 8-7 dla $d = 40$ mm dobieramy wpust pryzmatyczny zaokrąglony o wymiarach poprzecznych $b \times h = 12 \times 8$ mm.

Na podstawie danych zawartych w tablicach 8-1 do 8-5 ustalamy wartości dopuszczalnych naprężeń ściskających:

- dla stali C45: $k_c = 0,48R_c = 0,48 \cdot 355 = 170,4 \text{ MPa} \approx 170 \text{ MPa}$,
- dla żeliwa EN-GJL-200: $k_c = \frac{R_c}{x_c} = \frac{800}{3,5} = 228,6 \text{ MPa} \approx 229 \text{ MPa}$,
- dla stali E360 $k_c = 0,48R_c = 0,48 \cdot 360 = 172,8 \text{ MPa} \approx 173 \text{ MPa}$.

Ustalamy wartość dopuszczalnych nacisków powierzchniowych dla najsłabszego materiału, czyli dla stali C45

$$k_o = zk_c$$

Na podstawie tablicy 8-8 przyjmujemy $z = 0,8$, więc

$$k_o = 0,8 \cdot 170 = 136 \text{ MPa}$$

Po przekształceniu wzoru (8.49) obliczamy minimalną czynną długość jednego wpustu

$$l_o \geq \frac{F}{k_o \frac{h}{2} n} = \frac{20\,000}{136 \cdot \frac{8}{2} \cdot 1} = 36,8 \text{ mm}$$

oraz całkowitą długość wpustu

$$l = l_o + b = 36,8 + 12 = 48,8 \text{ mm}$$

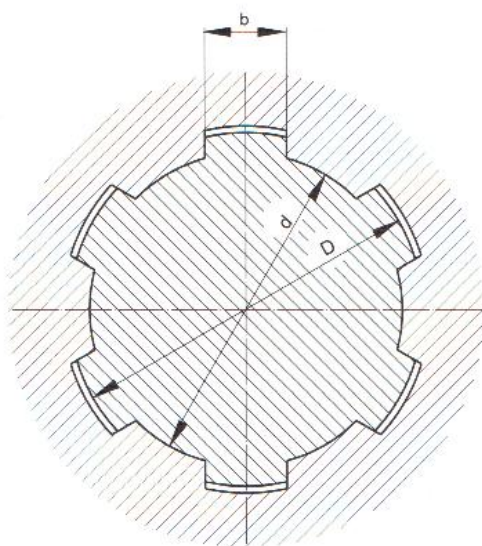
Przyjmujemy zalecaną długość wpustu

$$l = 50 \text{ mm}$$

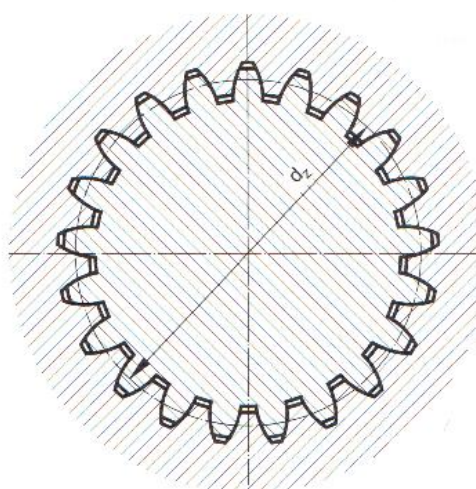
Korzystając z danych zawartych w tablicy 3.6, dobieramy wpust pryzmatyczny zaokrąglony $8 \times 12 \times 50$ wg PN-70/M-85005.

8.5.3 Połączenia wielowypustowe

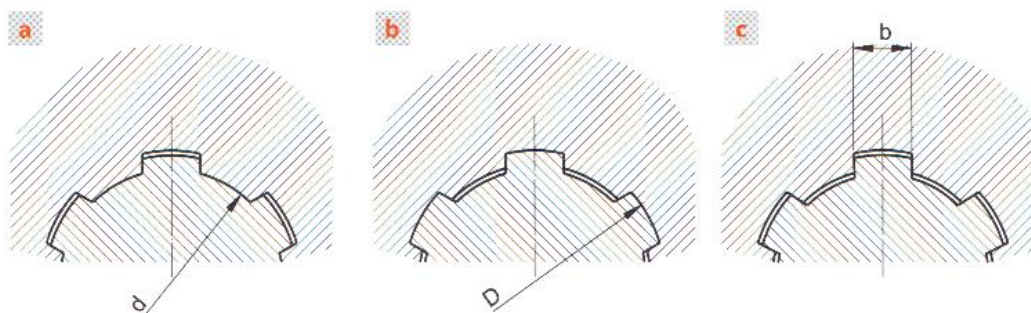
Połączenia wielowypustowe są grupą rozłącznych bezpośrednich połączeń kształtowych. Podobnie jak połączenia wpustowe, wykorzystuje się je do łączenia osi i wałów z piastami kół pasowych, sprzęgieł itp. w celu przeniesienia momentu obrotowego z jednego elementu na drugi za pomocą wypustów wykonanych na wałku i w otworze piasty (rys. 8.43). Połączenia tego rodzaju mogą być spoczynkowe lub ruchowe, gdy oprócz przeniesienia momentu obrotowego od połączenia wymaga się także możliwości przemieszczania się piasty wzdłuż osi wału.



Rys. 8.43 Połączenie wielowypustowe



Rys. 8.45 Połączenie wielowypustowe zębate



Rys. 8.44 Sposoby osiowania połączeń wielowypustowych
 a – na wewnętrznej średnicy czopa d , b – na zewnętrznej średnicy wypustów D ,
 c – na bocznych powierzchniach wypustów

Najczęściej wykorzystuje się wielowypusty o prostokątnym zarysie wypustów na wałku i rowków w piaście. Od średnicy wewnętrznej d połączenia zależy liczba wypustów, która wynosi 6, 8 lub 10. Wymiary wielowypustów znormalizowano.

Dobór pasowania połączenia wielowypustowego zależy od rodzaju połączenia (spoczynkowe lub ruchowe) i sposobu osiowania (rys. 8.44).

Ze względu na dużą wytrzymałość specyficznym rodzajem są wielowypustowe połączenia zębate o ewolwentowym zarysie wypustów, które znormalizowano. Osiewanie tego połączenia odbywa się na ewolwentowych bocznych powierzchniach wypustów, a pasowanie na średnicy podziałowej d_z (rys. 8.45).

Obliczanie połączeń wielowypustowych polega na określeniu nacisków na powierzchniach bocznych wypustów, które nie mogą przekroczyć wartości dopuszczalnych. Średnicę d połączenia wyznacza się na podstawie obliczeń wytrzymałościowych wału, pomijając istnienie wypustów. Dla przyjętej średnicy dobieramy wymiary przekroju poprzecznego wg normy. Następnie ustalamy długość połączenia z warunku wytrzymałości połączenia na naciski powierzchniowe.

Na podstawie przekształconego wzoru (8.53) obliczamy wymaganą długość piasty

$$l_o \geq \frac{F}{0,75h_o k_o n} = \frac{53\,333}{0,75 \cdot 3 \cdot 50 \cdot 8} = 59,3 \text{ mm}$$

Przyjmujemy długość piasty tarczy sprzęgła $l = 60 \text{ mm}$.

Połączenia wielokarbowe

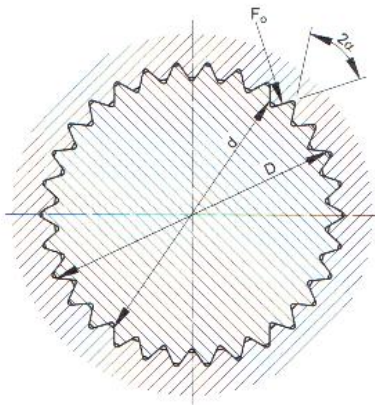
8.5.4

Połączenia wielokarbowe stanowią specyficzne rozwiązanie połączeń wielowypustowych. Mają one kilkadziesiąt drobnych wypustów o zarysie trójkątnym na obwodzie połączenia i dzięki temu nie osłabiają znacznie wytrzymałości czopa. Są to połączenia spoczynkowe o małej dokładności osiowania na bocznych powierzchniach wypustów (rys. 8.46).

Duża liczba wypustów na obwodzie ($z = 20 \dots 70$) umożliwia dowolne ustawianie piasty względem czopa i powoduje, że naciski powierzchniowe w złączeniu są niewielkie. Minimalny kąt φ_{\min} regulacji ustawienia wynika z liczby wypustów z i jest opisany wzorem

$$\varphi_{\min} = \frac{360^\circ}{z}$$

(8.54)



Rys. 8.46 Połączenie wielokarbowe

Obliczanie połączeń wielokarbowych jest prawie identyczne jak połączeń wielowypustowych o prostokątnym zarysie wypustów. Różnica polega na tym, że siła nacisku F_n na powierzchnie boczne trójkątnych wypustów jest składową siły obwodowej i oblicza się ją za pomocą wzoru

$$F_n = \frac{2M_o}{D_{sr}} \cos \alpha = \frac{4M_o}{D+d} \cos \alpha$$

(8.55)

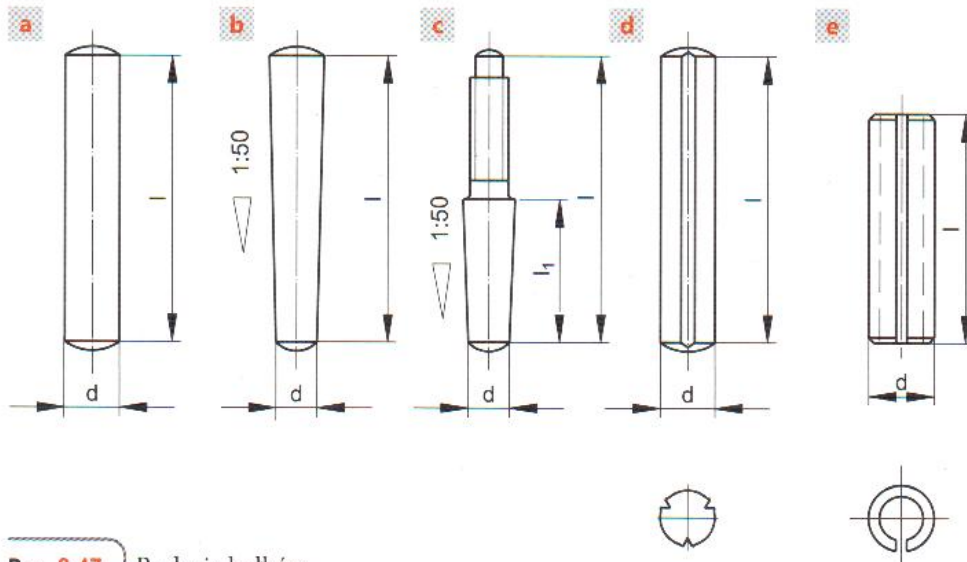
W związku z tym naciski powierzchniowe p , wynikające z działania tej siły, określa się za pomocą wyrażenia

$$p = \frac{F_n}{0,75h_o l_o n} \leq k_o$$

(8.56)

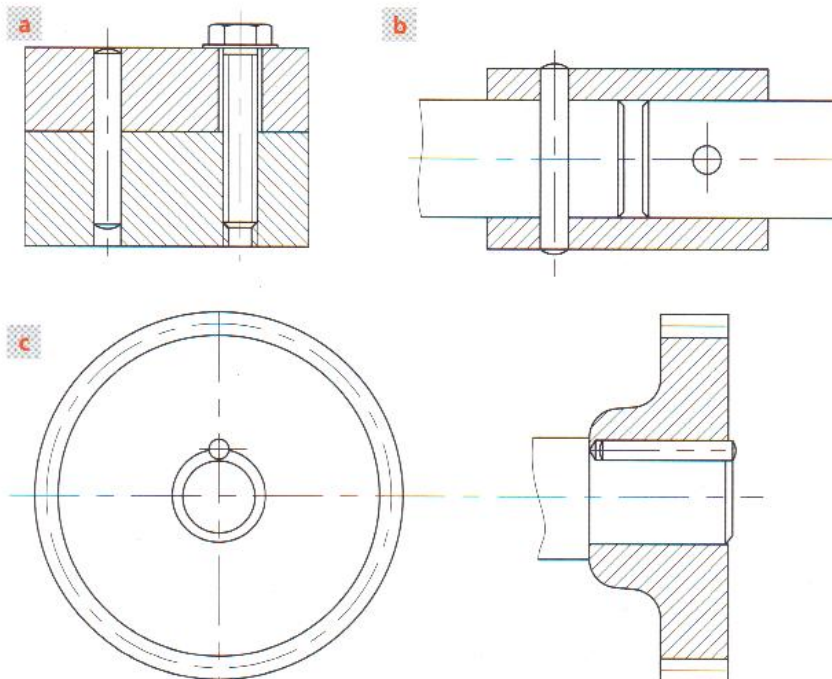
8.5.5 Połączenia kołkowe i sworzniowe

Połączenia kołkowe są najtańszymi rozłącznymi pośrednimi połączeniami kształtowymi. Różnego typu kołki (rys. 8.47) wykorzystuje się do łączenia części maszyn, ustalania ich wzajemnego położenia lub jako elementy zabezpieczające połączenie przed nadmiernym przeciążeniem.



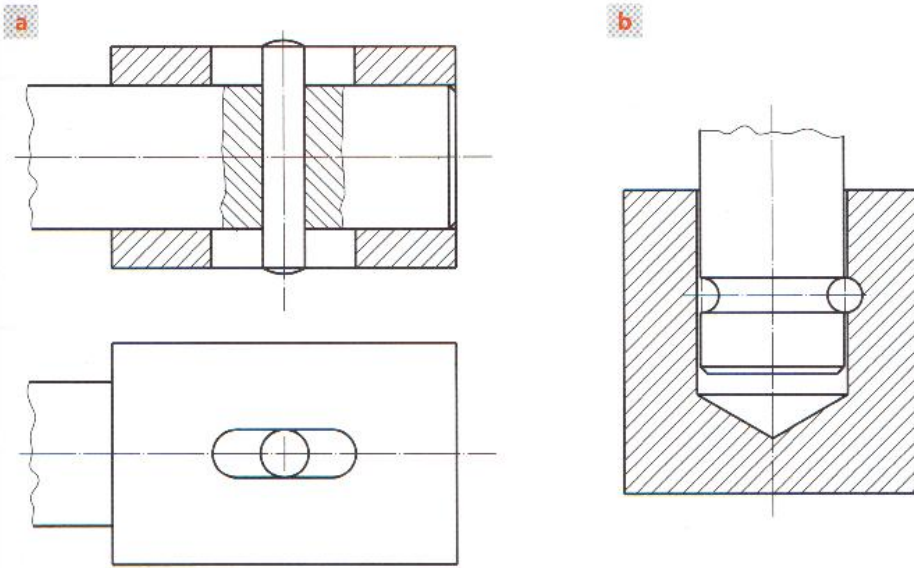
Rys. 8.47 Rodzaje kołków

a – walcowy, *b* – stożkowy, *c* – stożkowy z gwintem, *d* – karbowy, *e* – sprężysty rozcięty



Rys. 8.48 Połączenia kołkowe

a – ustalające, *b* – poprzeczne, *c* – wzdłużne



Rys. 8.49 Połączenia kołkowe ruchome
a – przesuwne, b – obrotowe

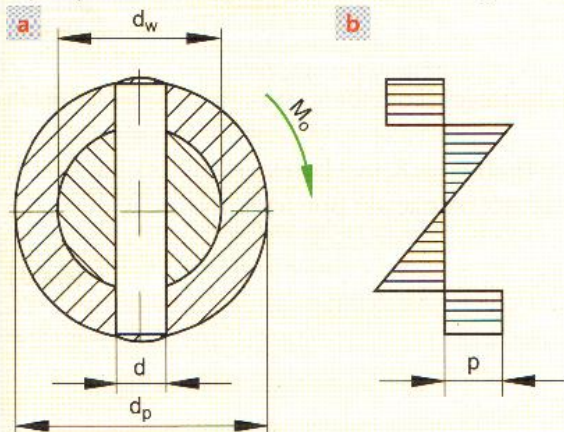
Zależnie od wymagań konstrukcyjnych kołki wciągają się wg pasowań mieszanych (np. H7/n6) lub ciasnych (np. H7/p6). Otwory przeznaczone na kołki są rozwiercane, a kołki – szlifowane. Kołki sprężyste spełniają z reguły rolę ustalającą wzajemne położenie części łączonych w inny sposób (np. wkrętami).

Kołki wykonuje się ze stali konstrukcyjnych węglowych oraz stali stopowych do ulepszenia cieplnego.

Połączenia kołkowe z reguły są połączeniami spoczynkowymi o charakterze ustalającym lub przenoszącymi obciążenia z kołkami poprzecznymi lub wzdłużnymi (rys. 8.48).

Niekiedy, gdy jest wymagany względny ruch połączonych części, stosuje się połączenia kołkowe ruchome (rys. 8.49).

Obliczanie połączeń kołkowych. Ponieważ połączenia kołkowe nie mogą przenosić dużych obciążeń, więc o wymiarach kołka najczęściej decydują wymagania technologiczne, a nie wytrzymałościowe. W razie konieczności kołki oblicza się z warunku wytrzymałości na ścinanie i na naciski powierzchniowe.



Rys. 8.50 Połączenie kołkowe poprzeczne wałka z tuleją obciążone momentem obrotowym
a – charakterystyczne wymiary połączenia,
b – rozkład nacisków powierzchniowych w połączeniu

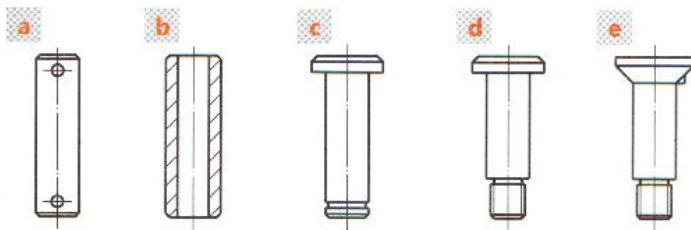
d – średnica kołka,
 l_o – czynna długość kołka.
 k_o – dopuszczalne naciski powierzchniowe dla słabszego materiału połączenia obliczane wg wzoru (8.50) i tablicy 8-8.

Połączenia sworzniowe. Sworznie (rys. 8.51) to grubsze kołki pasowane zwykle luźno i wymagające zabezpieczenia przed przesunięciem wzdłuż osi połączenia. Kształty i wymiary sworzni znormalizowano. Normalizacją objęto m.in. sworznie:

- bez łba,
- z łbem,
- z czopem gwintowanym z łbem walcowym,
- z łbem stożkowym i noskiem.

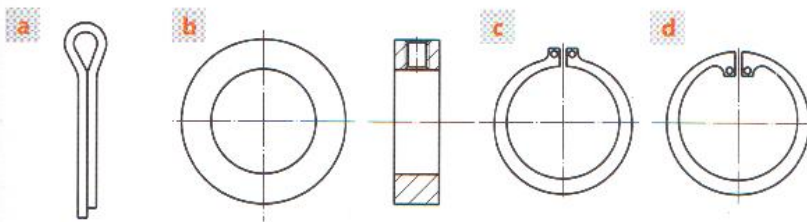
Sworznie wykonuje się ze stali konstrukcyjnych węglowych, stali stopowych do ulepszenia cieplnego, a gdy wymagana jest duża nośność powierzchni sworznia – ze stali stopowych do nawęglania.

Zabezpieczenie sworzni przed przesunięciem wzdłuż osi połączenia uzyskuje się za pomocą łbów, kołków, zawleczek, pierścieni osadczych lub sprężynujących (rys. 8.52).



Rys. 8.51 Rodzaje sworzni

a – pełny bez łba, b – drążony gładki, c – z łbem walcowym i rowkiem, d – z łbem walcowym i czopem gwintowanym, e – z łbem stożkowym z noskiem i czopem gwintowanym



Rys. 8.52 Rodzaje zabezpieczeń sworzni

a – zawleczka, b – pierścień osadczy z otworem gwintowanym, c – sprężynujący osadczy pierścień zewnętrzny, d – sprężynujący osadczy pierścień wewnętrzny

Obliczanie połączeń sworzniowych. Połączenia sworzniowe mogą być wykorzystywane jako spoczynkowe lub ruchowe. Spoczynkowe połączenia sworzniowe stałe, w których sworznień jest pasowany ciasno w obu łączonych elementach, stosuje się rzadziej. Sworznień w takim połączeniu jest ścinany najczęściej w dwóch przekrojach. Warunek wytrzymałości na ścinanie można przedstawić za pomocą wyrażenia

$$\tau = \frac{2F}{\pi d^2} \leq k,$$

z którego wyznacza się średnicę sworznia

$$d \geq \sqrt{\frac{2F}{\pi k_t}} \quad (8.64)$$

Następnie sprawdza się sworzeń na naciski powierzchniowe.

Z reguły połączenia sworzniowe są jednak połączeniami ruchowymi, w których sworzeń jest pasowany luźno w jednym z łączonych elementów, a ciasno w drugim. Takie połączenie stanowi najczęściej przegub ucho-widełki (rys. 8.53). Sworzeń w takim układzie oblicza się z warunku wytrzymałości na zginanie i sprawdza na naciski powierzchniowe w otworach widełek.

Moment zginający sworzeń jest opisany za pomocą wzoru

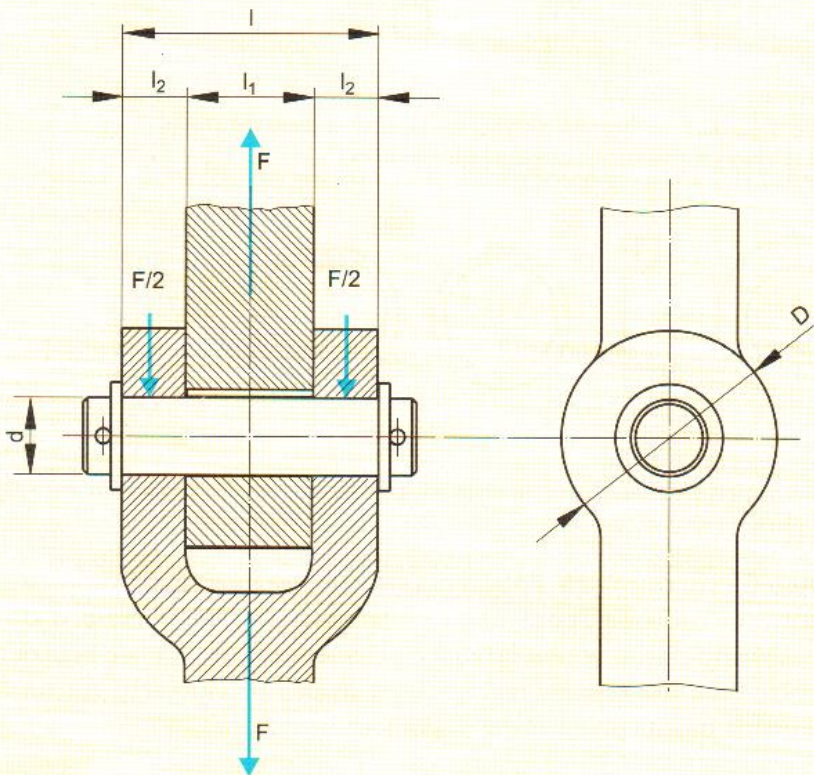
$$M_g = \frac{F(l_1 + 2l_2)}{8} = \frac{Fl}{8} \quad (8.65)$$

a naprężenia zginające w sworzniu

$$\sigma_g = \frac{M_g}{W_x} \leq k_g \quad (8.66)$$

gdzie:

$W_x = 0,1d^3$ – wskaźnik wytrzymałości na zginanie dla sworzni pełnych,



Rys. 8.53 Połączenie sworzniowe widełkowe

- dla sworznia drążonego

$$W_x = 0,1 \frac{d^4 - d_o^4}{d} = 0,1 \frac{28^4 - 14^4}{28} = 2058 \text{ mm}^3$$

Zastosowanie drążonego sworznia będzie korzystniejsze zarówno ze względu na naciski powierzchniowe, jak i mniejszą masę sworznia.

Sprawdzamy naciski powierzchniowe na sworzeń.

Dla stali 20Cr4 na podstawie tablic 8-1 do 8-5 oraz 8-7 przyjmujemy $z = 0,4$ i określamy naprężenia dopuszczalne

$$k_{oo} = zk_{cj} = 0,4 \frac{Z_{cj}}{x_z} = 0,4 \frac{435}{3,6} = 48,3 \text{ MPa} \approx 48 \text{ MPa}$$

Naciski powierzchniowe w korbowodzie

$$p = \frac{F}{dl_1} = \frac{20 \cdot 10^3}{28 \cdot 38} = 18,8 \text{ MPa} < k_{oo} = 48 \text{ MPa}$$

Naciski powierzchniowe w tłoku

$$p = \frac{F}{2dl_2} = \frac{20 \cdot 10^3}{2 \cdot 28 \cdot 16} = 23,3 \text{ MPa} < k_{oo} = 48 \text{ MPa}$$

Należy więc zastosować sworzeń drążony o średnicy zewnętrznej $d = 28 \text{ mm}$, średnicy wewnętrznej $d_o = 14 \text{ mm}$ i długości $l = 72 \text{ mm}$.

Połączenia klinowe

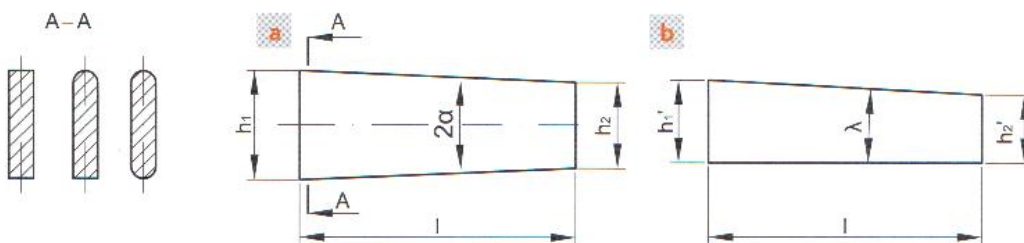
8.5.6

Połączenia klinowe to rozłączne pośrednie połączenia kształtowe. Elementami złącznymi są w nich kliny (rys. 8.54), czyli elementy o powierzchniach roboczych (płaskich lub walcowych) pochyłych względem siebie pod kątem α , nazywanym kątem rozwarcia klina. Kliny mogą być dwustronne – symetryczne (rys. 8.54a) i jednostronne – niesymetryczne (rys. 8.54b). Kliny symetryczne charakteryzuje zbieżność określona zależnością

$$\Delta = \frac{h_1 - h_2}{l} = 2 \operatorname{tg} \alpha \quad (8.69)$$

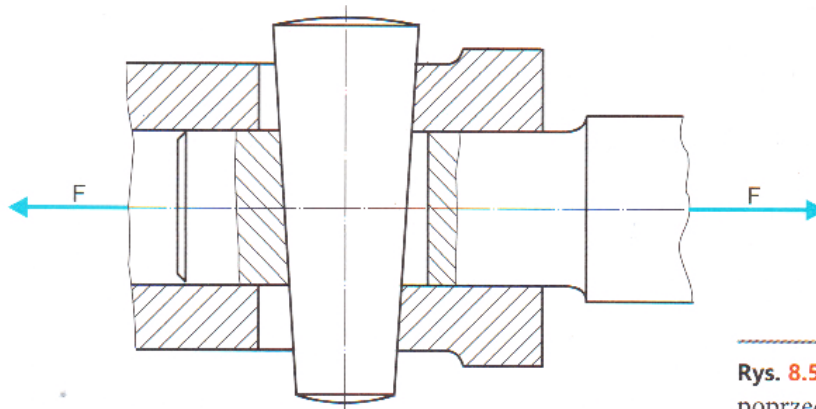
Natomiast kliny niesymetryczne charakteryzuje pochylenie definiowane jako

$$\lambda = \frac{h'_1 - h'_2}{l} = \operatorname{tg} \alpha \quad (8.70)$$

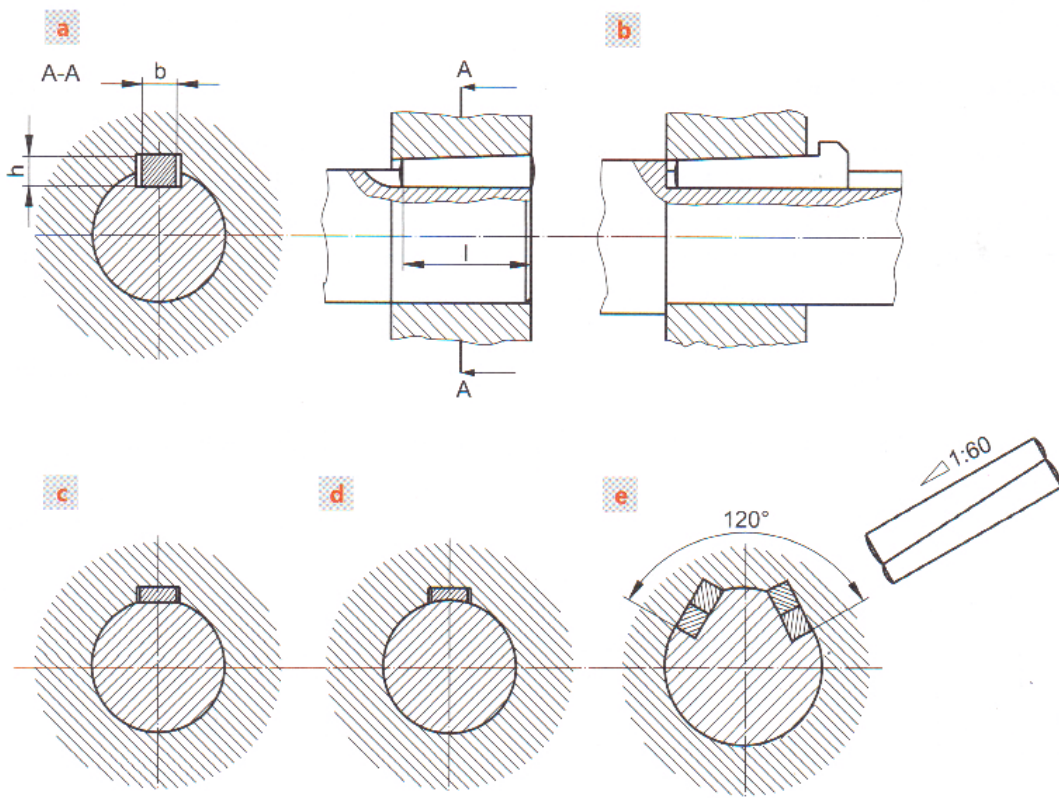


Rys. 8.54 Kliny i ich charakterystyczne wymiary
a – symetryczny, b – niesymetryczny

Połączenia klinowe mogą być *poprzeczne*, *wzdłużne* i *nastawne*. W połączeniach poprzecznych klin (najczęściej symetryczny) jest wbity prostopadle do osi połączenia (rys. 8.55). Połączenia poprzeczne mogą łączyć wały z tulejami lub tworzyć złącza typu ucho-widełki. Klin jest wbijany w odpowiednio ukształtowany otwór i utrzymuje się w nim dzięki sile tarcia występującej między roboczymi powierzchniami klina i otworem. Aby klin nie wysunął się z połączenia, musi być spełniony warunek samohamowności klina. Warunek samohamowności jest opisany nierównością

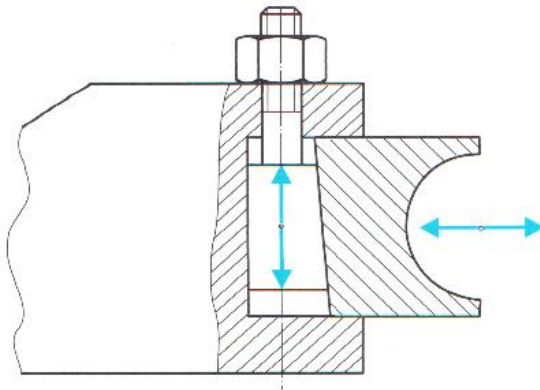


Rys. 8.55 Połączenie klinowe poprzeczne



Rys. 8.56 Połączenia klinowe wzdłużne

a – klinem wpuszczanym ściętym, *b* – klinem wpuszczanym noskowym, *c* – klinem płaskim, *d* – klinem wklęsłym, *e* – klinami stycznymi



Rys. 8.57 Połączenie klinowe nastawne

$$\Delta = \frac{h_2 - h_1}{l} = 2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} < 2\mu$$

(8.71)

gdzie μ oznacza współczynnik tarcia dla materiału klina i powierzchni z nim współpracujących.

Połączenia wzdłużne klinem równoległym do osi łączonych części (rys. 8.56) stosuje się do łączenia wałów z piastami kół pasowych, zębatych i in. oraz do zabezpieczania piast przed przesuwaniem się na wałach. Pochylenie klinów λ wynosi od 1:60 do 1:100, co zapewnia samohamowność klinów w połączeniach. Takie samo pochylenie musi mieć dno rowka w piaście. Znormalizowane wymiary klinów wpuszczanych przedstawiono w tabelicy 8-7.

Kliny wykonuje się ze stali węglowych (C), konstrukcyjnych (S) lub maszynowych (E). Wbijają się one między odpowiednią powierzchnią wału i dno rowka w piaście, co może spowodować poprzeczne przesunięcie piasty względem osi wału. Z tego powodu połączenia klinowe wykorzystuje się do łączenia części wolno obracających się i niewymagających dobrego osiowania.

Połączenia nastawne (rys. 8.57) stosowane są do regulacji wzajemnego położenia części oraz do utrzymania stałych napięć w połączeniach pomimo zużywania się współpracujących części.

Połączenia gwintowe

8.5.7

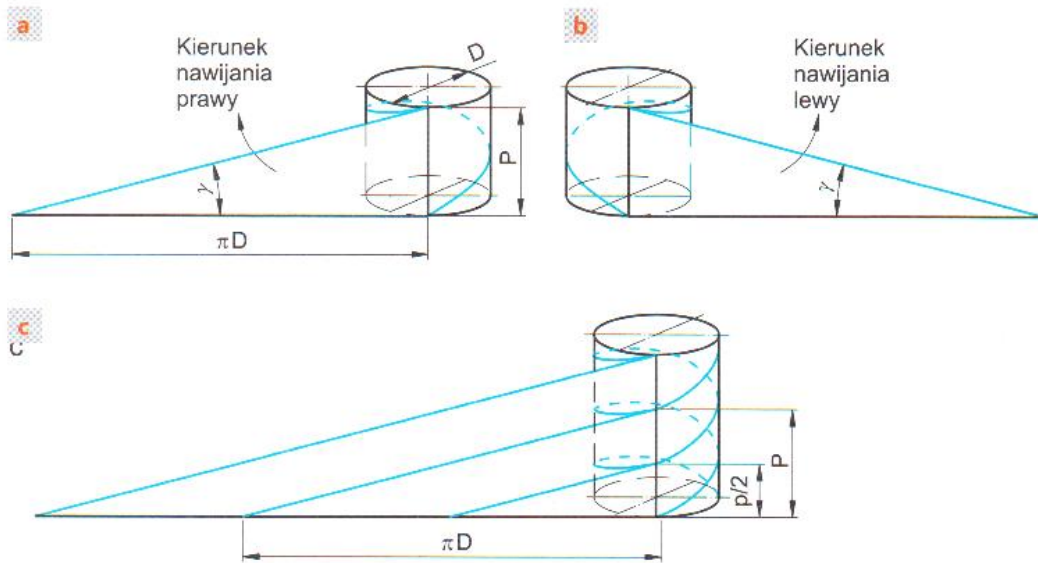
Gwint powstaje w wyniku wykonania rowka o odpowiednim kształcie wzdłuż linii śrubowej na zewnętrznej lub wewnętrznej powierzchni walcowej albo stożkowej.

Linia śrubowa jest wynikiem nawinięcia na walec lub stożek o średnicy D równi pochyłej o długości podstawy $L = \pi D$ i wysokości P (rys. 8.58a, b). Odpowiednio do kierunku nawijania linii śrubowej gwint może być prawy lub lewy. Gdy liczba linii śrubowych nawijanych na walec lub stożek jest większa niż 1, a odległość między nimi P_1 jest krotnością wysokości P , mamy do czynienia z gwintem wielokrotnym (rys. 8.58c). Na przykład z nawinięcia dwóch linii śrubowych powstaje gwint dwukrotny.

Wysokość równi to **skok linii śrubowej (gwintu)**, a kąt pochylenia równi γ tworzy **kąt wzniosu linii śrubowej** i wyznacza się go z zależności

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{P}{\pi D}$$

(8.72)



Rys. 8.58 Powstawanie linii śrubowej
 a – pojedynczej prawej, b – pojedynczej lewej, c – dwukrotnej prawej

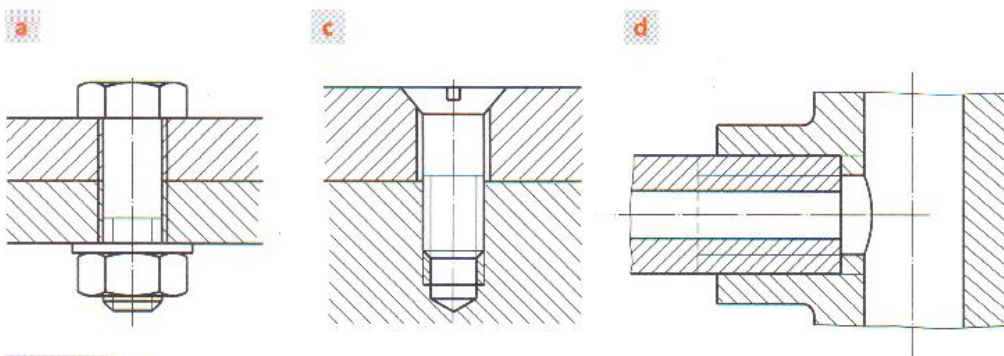
Odległość między sąsiednimi zwojami linii śrubowych, mierzona wzdłuż ich osi, nazywamy podziałką P_z . Dla linii śrubowych (gwintów) jednokrotnych podziałka $P_z = P$. Natomiast dla gwintów n -krotnych podziałka jest określona wzorem

$$P_z = \frac{P}{n}$$

(8.73)

Kształt rowka to tzw. **zarys gwintu**, który może być trójkątny, trapezowy, prostokątny lub okrągły.

Połączenia gwintowe są najczęściej stosowanymi w budowie maszyn rozłącznymi pośrednimi połączeniami kształtowymi. Powstają przez skojarzenie elementu o gwincie zewnętrznym (śruba) z elementem mającym odpowiedni gwint wewnętrzny (nakrętka). Połączenia gwintowe mogą być pośrednie, gdy są realizowane za pomocą śruby i nakrętki (rys. 8.59a) lub wkręta (rys. 8.59b), albo bezpośrednie, gdy gwinty są wykonane w łączonych elementach (rys. 8.59c).



Rys. 8.59 Połączenia gwintowe
 a – pośrednie śrubą z nakrętką, b – pośrednie wkrętem, c – bezpośrednie

Oznaczanie połączeń rozłącznych na rysunkach technicznych

8.5.8

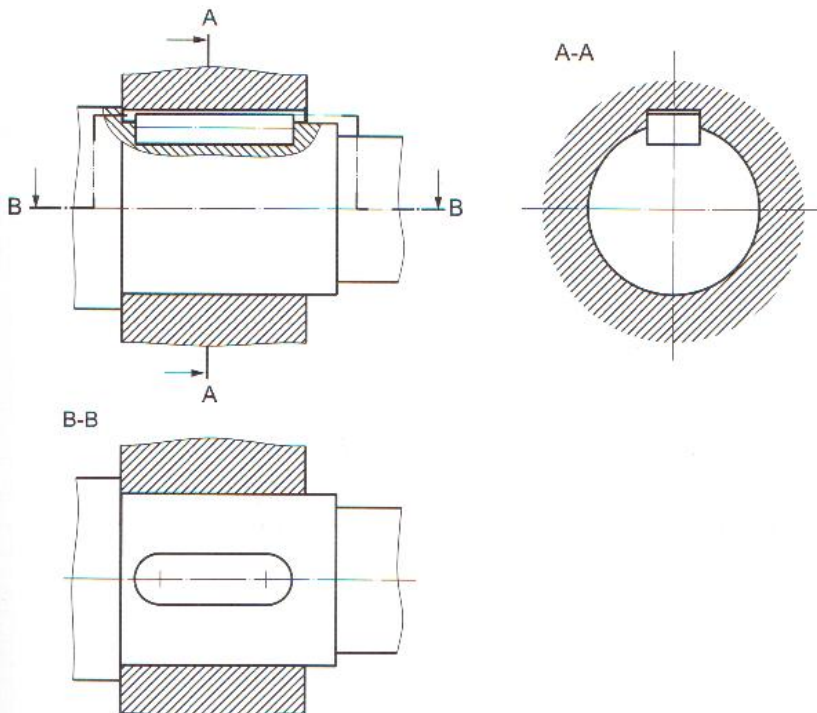
Połączenia wpustowe (rys. 8.71) przedstawia się na rysunkach w sposób rzeczywisty. Na rysunkach złożeniowych wpustu się nie wymiaruje, natomiast rodzaj, typ, wymiary tego wpustu i numer właściwej normy podaje się w wykazie części nad tabliczką rysunkową – np. *wpust pryzmatyczny A 16×10×100 PN-M-85005:1970*.

Połączenia wielowypustowe i wielokarbowe, zgodnie z odpowiednią normą, przedstawia się na rysunkach w sposób szczegółowy lub uproszczony, z zaznaczeniem na linii odniesienia symbolu zarysu oraz podaniem numeru normy i parametrów wielowypustu. Jako przykład na rysunku 8.72 przedstawiono połączenie wielowypustowe równoległe.

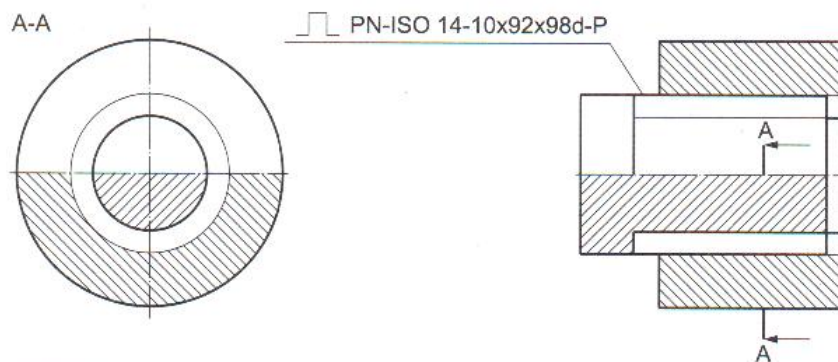
Połączenia wielowypustowe ewolwentowe i wielokarbowe w uproszczeniu rysuje się z zaznaczeniem średnicy podziałowej połączenia linią punktową cienką. Na rysunku 8.73 przedstawiono w uproszczeniu połączenie wielowypustowe ewolwentowe o 12 wypustach, średnicach wewnętrznej $d = 94$ mm i zewnętrznej $D = 98$ mm, osiowane na powierzchniach bocznych wielowypustu, spoczynkowe.

Połączenia kołkowe można rysować w sposób dokładny (patrz rys. 8.48 i 8.49), z podaniem wymiarów połączenia, w sposób uproszczony lub umowny. Kołki przedstawione w sposób uproszczony lub umowny wymiaruje się przez podanie na linii odniesienia odpowiedniego numeru normy (rys. 8.74).

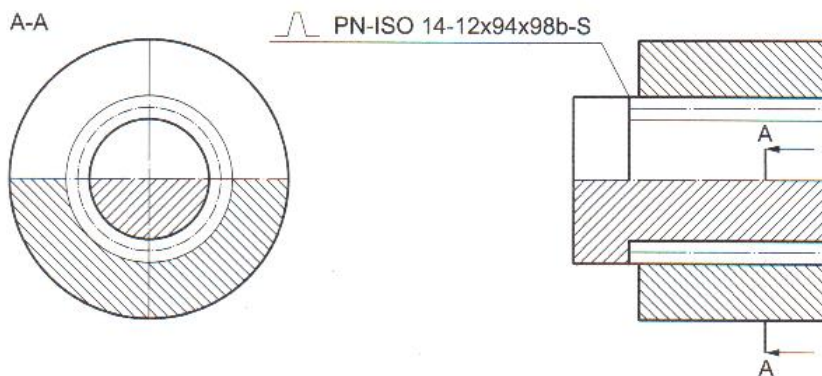
Połączenia sworzniowe rysuje się i wymiaruje podobnie (w uproszczeniu lub w sposób umowny), przy czym podaje się odpowiednie symbole oraz numery norm sworzni i elementów zabezpieczających go przed wysunięciem z połączenia (rys. 8.75).



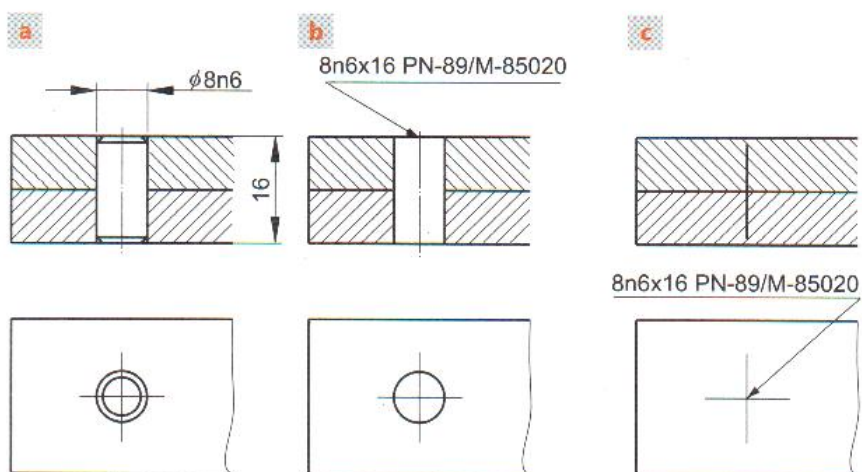
Rys. 8.71 Połączenie wpustowe z wpustem pryzmatycznym typu A



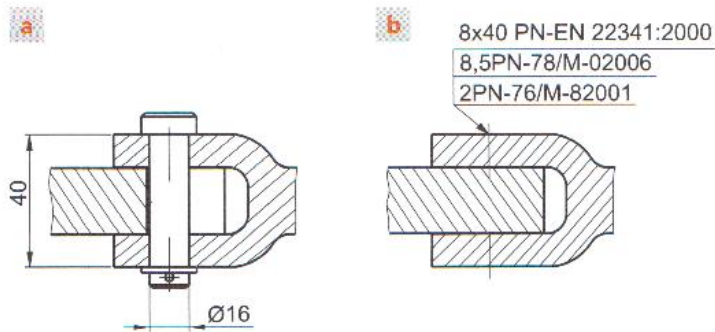
Rys. 8.72 Uprozczone przedstawienie połączenia wielowypustowego równoległego o następujących parametrach:
 10 – liczba wypustów, 92 – średnica wewnętrzna (d), 96 – średnica zewnętrzna (D),
 d – osiowanie na średnicy wewnętrznej, P – połączenie przesuwne



Rys. 8.73 Połączenie wielowypustowe ewolwentowe



Rys. 8.74 Rysunki połączenia kołkowego
 a – dokładny, b – uproszczony, c – umowny



Rys. 8.75 Rysunki połączenia sworzniowego
a – uproszczony, *b* – umowny

| Nazwa połączenia | Rysunek uproszczony | Przedstawienie umowne w przekroju w widoku | |
|--|---------------------|---|--|
| Połączenie śrubą z łbem 6-kątnym z podkładką płaską i nakrętką 6-kątną | | | |
| Połączenie śrubą 2-stronną z podkładką, nakrętką koronową i zawleczką | | | |
| Połączenie wkrętem z łbem walcowym i gniazdem wewnętrznym 6-kątnym | | | |
| Połączenie wkrętem z łbem stożkowym i z wgłębieniem krzyżowym | | | |

Rys. 8.76 Rysowanie połączeń gwintowych na rysunkach złożeniowych

Połączenia klinowe, podobnie jak wpustowe, przedstawia się na rysunkach w sposób rzeczywisty (patrz rys. 8.55 do 8.57). Na rysunkach złożeniowych klinów się nie wymiaruje, a rodzaj, typ, wymiary wpustu i numer normy wpisuje się w wykazie części nad tabliczką rysunkową – np. *klin wpuszczany ścięty 8×7×25 PN-73/M-85031*.

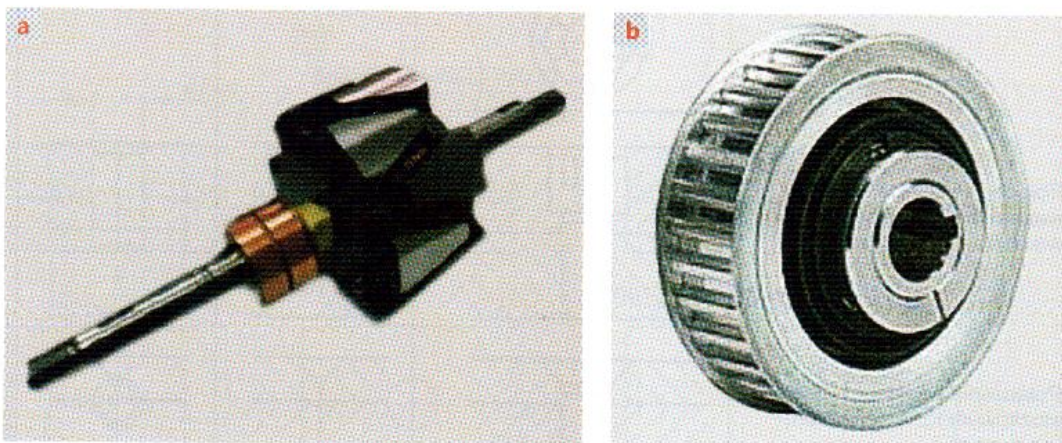
Połączenia gwintowe bezpośrednio rysuje się w sposób uszczegółowiony lub uproszczony, natomiast elementy łączące połączeń pośrednich na rysunkach złożeniowych zgodnie z normą przedstawia się w sposób uproszczony lub umowny. Przykłady niektórych połączeń gwintowych pośrednich przedstawiono na rysunku 8.76.

Przy takim przedstawieniu połączeń ważne jest, aby w wykazie części podać rodzaj elementu łączącego, jego podstawowe wymiary i numer normy – np. *śruba M12×36 PN-EN ISO 4014:2011*.

8.5.9 Połączenia rozłączne w pojazdach samochodowych

Połączenia rozłączne szeroko wykorzystuje się w konstrukcji pojazdów samochodowych. Najbardziej licznie występują połączenia gwintowe i to niemal we wszystkich odmianach. Z uwagi na dużą liczbę części obrotowych i mechanizmów przenoszenia tego ruchu, często spotyka się połączenia wpustowe, wielowypustowe i wielokarbowe. Równie często występują połączenia sworzniowe, zwłaszcza w przegubowych skojarzeniach części. Zastosowanie połączeń kołkowych ogranicza się głównie do ustalania wzajemnego położenia łączonych części (obudowy, pokrywy, tarcze). Ze względu na niedokładne osiowanie łączonych części, w pojazdach samochodowych nie stosuje się połączeń klinowych.

Połączenia wpustowe. Spośród połączeń wpustowych w pojazdach samochodowych najczęściej występują połączenia z wpustem pryzmatycznym (rys. 8.77a i b) i czółenkowym (rys. 8.78). Służą do łączenia czopów wałów i osi z piastami kół pasowych, zębatych i in. Są to przeważnie połączenia stałe, obciążone niewielkim momentem obrotowym.



Rys. 8.77 | Przykłady zastosowania połączenia z wpustem pryzmatycznym
 a – wirnik alternatora z rowkami pod wpusty, b – koło pasowe zębate ze sprzęgłem przeciążeniowym i rowkiem na wpust

Połączenia i elementy podatne

8.6

Klasyfikacja i charakterystyka połączeń podatnych

8.6.1

Połączenia podatne umożliwiają wzajemne przemieszczanie się łączonych części, łagodzą wstrząsy, pochłaniają energię uderzeń lub ją kumulują. Stosuje się je również m.in. do wywierania nacisków o stałej wartości, do regulacji i kasowania luzów. W połączeniach podatnych występują elementy podatne.

Elementy podatne charakteryzują się zdolnością do dużych odkształceń pod wpływem obciążenia. Właściwości takie można uzyskać przez:

- nadanie elementowi wykonanemu ze sztywnego i sprężystego materiału odpowiedniego kształtu – i wówczas są to **sprężyny**,
- zastosowanie materiału o małej sprężystości i dużej odkształcalności – np. **elementy gumowe i metalowo-gumowe**.

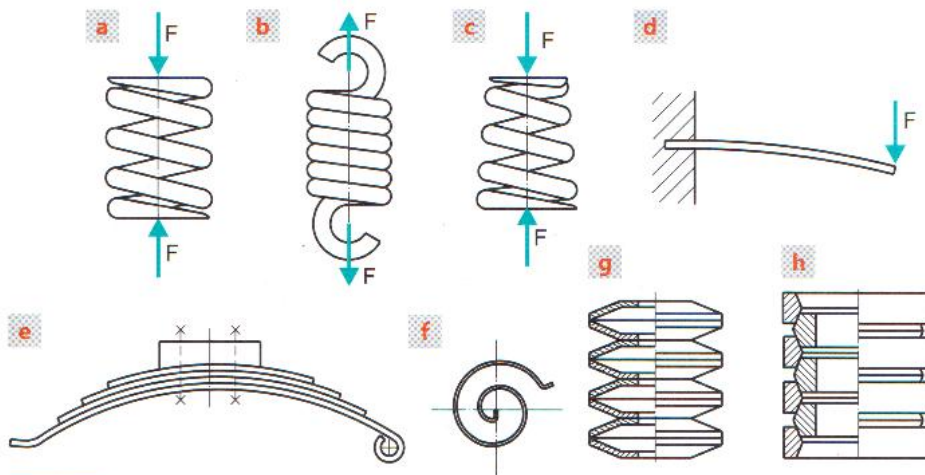
We współczesnych konstrukcjach elementów podatnych niekiedy zamiast gumy stosuje się wybrane tworzywa sztuczne – są to tzw. **amortyzatory żelowe**.

W elementach sprężystych wykorzystuje się również układy pneumatyczne – **sprężyny gazowe** lub układy hydrauliczne – **amortyzatory**.

Sprężyny stosowane w budowie maszyn spełniają następujące podstawowe zadania:

- dociskają części maszyn podczas pracy,
- zapewniają wzajemne przemieszczanie połączonych części w określonych granicach,
- łagodzą uderzenia i wstrząsy,
- tłumią drgania.

W zależności od kształtu rozróżniamy sprężyny śrubowe (walcowe i stożkowe), płaskie, spiralne, talerzowe i pierścieniowe (rys. 8.84). Zależnie od rodzaju obciążenia występują sprężyny ściskane, naciągowe, zginane i skręcane. Rodzaj obciążenia nie określa tutaj kierunków wywoływanych w sprężynie naprężeń.



Rys. 8.84 Rodzaje sprężyn

a – śrubowa walcowa ściskana, *b* – śrubowa walcowa rozciągana, *c* – śrubowa stożkowa ściskana, *d* – płaska zginana, *e* – płaska wielokrotna (tzw. resor), *f* – spiralna skręcana, *g* – talerzowa ściskana, *h* – pierścieniowa ściskana

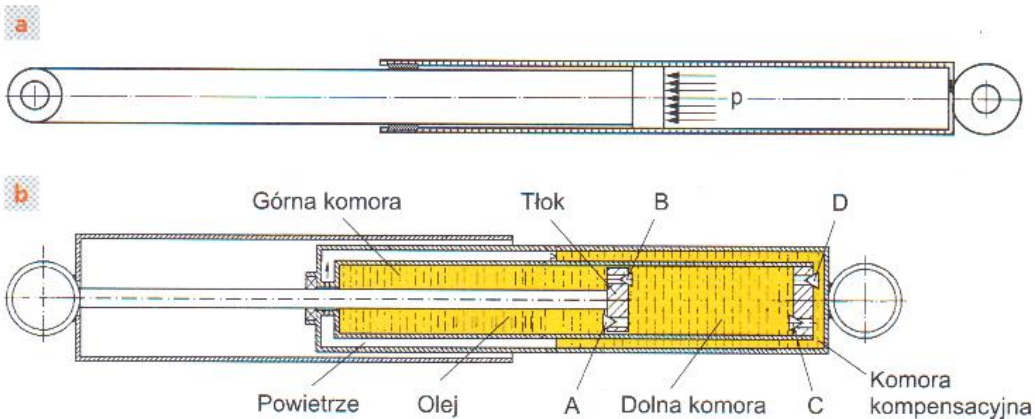


Rys. 8.85 Elementy podatne
 a – gumowe i metalowo-gumowe,
 b – wkładka żelowa amortyzatora rowerowego

Elementy gumowe i metalowo-gumowe (rys. 8.85) – dzięki dobrym własnościom plastycznym gumy, zdolności tłumienia drgań, małej gęstości i łatwości łączenia z metalami przez wulkanizowanie – są szeroko stosowane w budowie maszyn. W pojazdach samochodowych występują w roli elastycznych łączników, wieszaków, podkładek (poduszek) i tulei metalowo-gumowych (tzw. silentbłoków). Oprócz gumy w nowszych konstrukcjach na elementy sprężyste wykorzystuje się elastomery (żele).

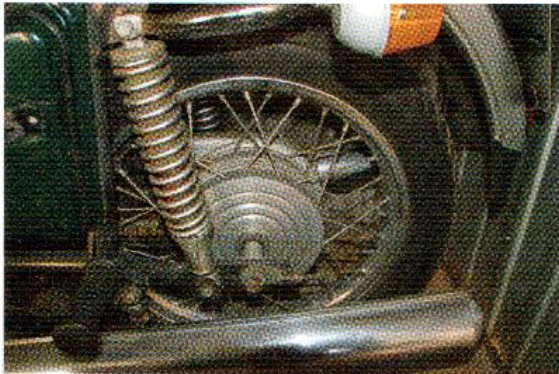
Sprężyny gazowe stanowią zespół cylindra ciśnieniowego z tłoczyskiem zakończonym tłokiem (rys. 8.86a). Siła sprężyny odpowiada iloczynowi ciśnienia gazu (azotu) w cylindrze i pola powierzchni przekroju poprzecznego tłoczyska. Sprężyny gazowe wykorzystuje się, gdy trzeba wspomagać siłę mięśni ludzkich przy podnoszeniu pokryw, drzwi i innych elementów, a ruch ma się odbywać w sposób płynny i kontrolowany.

Amortyzatory hydrauliczne jako czynnik roboczy wykorzystują ciecz (zwykle olej). Mają postać cylindra, wewnątrz którego znajduje się tłok połączony trwale z tłoczyskiem. W tłoku są otwory z zaworami, przez które olej wypełniający cylinder jest przetłaczany podczas ruchu tłoka (rys. 8.86b). Odpowiednio dobrane zawory zapewniają zróżnicowanie siły tłumienia podczas ściskania i rozciągania amortyzatora.



Rys. 8.86 Elementy sprężyste
 a – sprężyna gazowa, b – bezciśnieniowy dwururowy amortyzator hydrauliczny
 A – zawór zwrotny tłoka, B – zawór dławiący tłoka, C – zawór zwrotny cylindra, D – zawór dławiący cylindra

Przykład wykorzystania elementów sprężystych w zawieszeniu pojazdu przedstawiono na rysunku 8.87.



Rys. 8.87 Sprężyna śrubowa współpracująca z amortyzatorem hydraulicznym w tylnym zawieszeniu motocykla

Materiały stosowane na elementy podatne

8.6.2

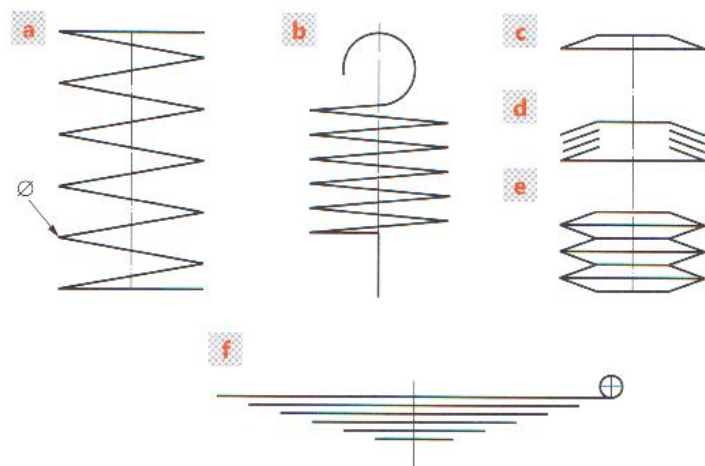
Do wyrobu sprężyn i resorów używa się głównie stali charakteryzujących się wysoką granicą sprężystości i plastyczności oraz dużą wytrzymałością zmęczeniową. Typowe węglowe stale sprężynowe cechuje zwiększona zawartość węgla, wynosząca 0,5–0,7%. Stopowe stale sprężynowe zawierają dodatki manganu (ok. 1%), krzemu (1,5–2%), chromu (0,5–1%) oraz wanadu (0,15%). Wysoką granicę sprężystości stali sprężynowych osiąga się dzięki hartowaniu i odpuszczaniu w temperaturze 380–520°C. Do wyrobu sprężyn o małej średnicy przekroju używa się drutu patentowego (fortepianowego). Drut taki zawiera ok. 1% węgla, jest wielokrotnie przeciągany na zimno i hartowany w kąpeli ołowiowej. Stale sprężynowe są znormalizowane.

Sprężyny pracujące w ośrodkach korodujących lub te, od których wymaga się dobrego przewodnictwa elektrycznego, wykonuje się ze sprężystych brązów cynowo-ołowiowych, krzemowo-manganowych lub berylowych.

Do wyrobu elementów gumowych i metalowo-gumowych używa się gumy naturalnej lub syntetycznej o twardości 30–70° Shore'a. Istotne jest, aby elementy gumowe ściskane nie odkształcały się więcej niż 50%, a rozciągane – maksymalnie do 100%. Guma wykorzystywana w budowie pojazdów samochodowych powinna być odporna na działanie olejów i smarów.

Elastomery to tworzywa sztuczne o dużej sprężystości, zdolne do powrotu do pierwotnego kształtu nawet po znacznym odkształceniu. Wykonuje się z nich najczęściej wkładki sprężyste do amortyzatorów o małym skoku.

Widoki i przekroje sprężyn przedstawiono na rysunkach 8.84 i 8.89 oraz w pierwszym rozdziale podręcznika. Stosuje się je zarówno na rysunkach wykonawczych sprężyn, jak i na rysunkach złożeniowych. Wszystkie wymiary sprężyn podaje się na rysunku, a pozostałe



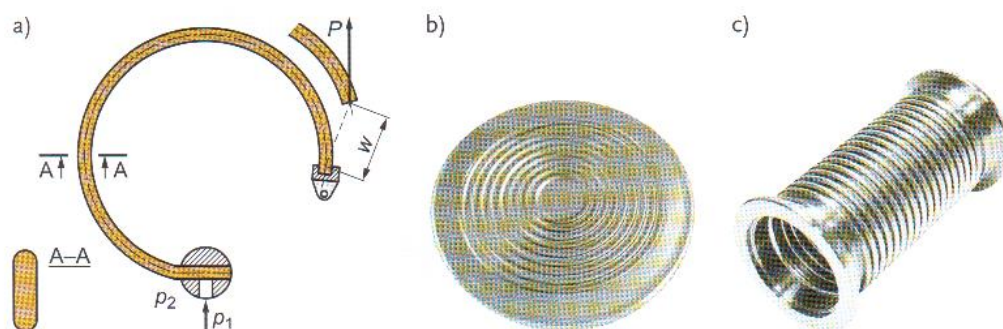
Rys. 8.91 Uproszczenia rysunkowe sprężyn
a – śrubowa walcowa ściskana,
b – śrubowa walcowa naciągowa,
c – talerzowa pojedyncza,
d, e – talerzowa wielokrotna,
f – płaska wielokrotna (resor)
 z jednostronnym zakończeniem oczkowym

wymagania i dane niezbędne do ich wykonania oraz sprawdzenia podaje się w wymaganiach technicznych lub w tabliczce umieszczonej w prawym górnym rogu rysunku.

Uproszczenia rysunkowe sprężyn (rys. 8.91) stosuje się tylko na rysunkach złożeniowych i schematach. Na rysunku w uproszczeniu, jeśli kształt przekroju drutu jest inny niż okrągły, na linii odniesienia podaje się odpowiedni symbol przekroju wg PN-EN ISO 5261 (np. □).

Jeśli końce sprężyn są nieoszlifowane, na rysunku należy podać sposób zakończenia. Sprężyny prawozwojne oznaczamy symbolem RH, a lewozwojne – LH.

Rurka Bourdona to kołowa rurka o przekroju poprzecznym owalnym lub płasko owalnym (występują również inne przekroje rurek). Jeden jej koniec jest zamocowany do podstawy, a drugi pozostaje swobodny. Pod wpływem ciśnienia podawanego do wnętrza rurki i powstaniu różnicy ciśnień $p = p_1 - p_2$ następuje jej wygięcie (dążenie do wyprostowania) i koniec swobodny w wyniku działania siły F przemieszcza się o odcinek w (rys. 4.24a).



Rys. 4.24. Ciśnieniowe elementy sprężyste: a) rurka Bourdona, b) membrana, c) mieszek sprężysty

Membrana jest płaską lub sfalowaną płytą blachy (zwykle kształtu kołowego) zamocowaną na obrzeżu. Przemieszczenie środkowego punktu membrany wynika z różnicy ciśnień działających na obie jej strony. Dwie membrany połączone na obrzeżu tworzą **puszkę membranową**. Membrany i puszki membranowe są bardzo czułymi, sprężynującymi elementami pomiarowymi stosowanymi głównie do pomiaru małych ciśnień. Mogą być wykorzystywane do uszczelnień (rys. 4.24b).

Mieszki sprężyste są to cienkościennie rurki sfalowane prostopadle do tworzącej, przeważnie zamknięte denkiem. Ugięcie mieszka jest zależne od różnicy ciśnienia wewnętrznego i zewnętrznego. Zakres stosowalności mieszków zależy od liczby sfalowań materiału i ich wymiarów. Mieszki sprężyste stosuje się między innymi do zmiany siły skupionej, przyłożonej do denka mieszka na ciśnienie (rys. 4.24c).