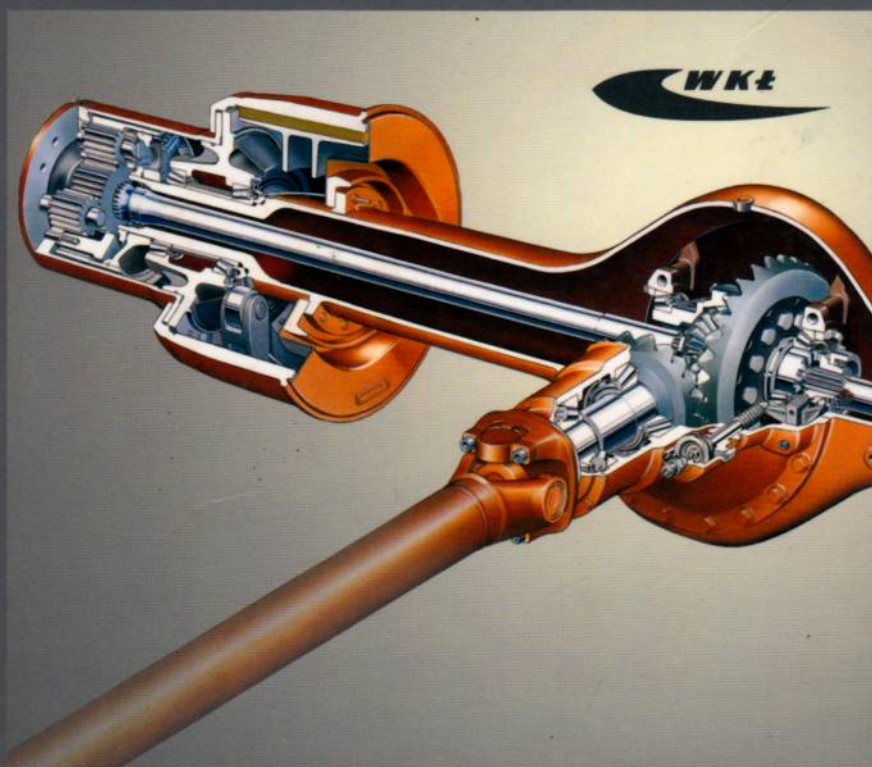


Technik pojazdów samochodowych

# PODSTAWY KONSTRUKCJI MASZYN

2

## Techniki wytwarzania i maszynoznawstwo



# **PODSTAWY KONSTRUKCJI MASZYN**

# PODSTAWY KONSTRUKCJI MASZYN

## 2

### Techniki wytwarzania i maszynoznawstwo



**Wydawnictwa Komunikacji i Łączności**

Autorzy:

*Piotr Boś (rozdz. 3.8 do 3.14), Dorota Chodorowska (rozdz. 4),  
Romuald Fejkiel (rozdz. 3.1 do 3.7), Zofia Wrzask (rozdz. 1 i 2)*

Projekt okładki: *Janusz Olech*

Redaktor merytoryczny: *mgr inż. Jacek Łęgiewicz*

Opracowanie językowe: *mgr Barbara Głuch*

Redaktor techniczny: *Ewa Kęsicka*

Korekta: *zespół*

Podręcznik dopuszczony do użytku szkolnego przez ministra właściwego do spraw oświaty i wychowania i wpisany do wykazu podręczników przeznaczonych do kształcenia w zawodach do nauczania zawodu **technik pojazdów samochodowych** na podstawie opinii rzeczoznawców:

*mgr. inż. Igora Lange, dr. Jarosława Pacuły i mgr. inż. Roberta Wanica.*

Typ szkoły: **technikum i szkoła policealna.**

Rok dopuszczenia: **2011.**

669.01+669.2/.8+621 (075)

Druga część bogato ilustrowanego podręcznika poświęconego podstawom konstrukcji maszyn w zakresie niezbędnym dla technika pojazdów samochodowych. Opisano najważniejsze właściwości i przykłady zastosowania różnych rodzajów materiałów konstrukcyjnych. Podano podstawowe wiadomości z zakresu technik wytwarzania z uwzględnieniem odlewania, obróbki plastycznej, prac ślusarskich, maszynowej obróbki skrawaniem, gładkościowej obróbki powierzchni i montażu oraz najistotniejsze informacje dotyczące części maszyn i zasad obliczania ich wytrzymałości. Przedstawiono również podstawy maszynoznawstwa, w tym m.in. klasyfikację maszyn, różne rodzaje energii, jej źródła i zasoby, odnawialne źródła energii, maszyny hydrauliczne, napędy hydrostatyczne i hydrokinetyczne, maszyny cieplne, elektrownie jądrowe, sprężarki, napędy pneumatyczne i pneumatyczno-hydrauliczne, urządzenia chłodnicze oraz maszyny i środki transportowe. Na końcu każdego rozdziału zamieszczono pytania i ćwiczenia kontrolne, umożliwiające uczniowi samoocenę w zakresie opanowania materiału. Odbiorcy: uczniowie kształcący się w zawodzie technik pojazdów samochodowych oraz uczniowie szkół o pokrewnym profilu kształcenia.

ISBN 978-83-206-1827-3

© Copyright by Wydawnictwa Komunikacji i Łączności spółka z o.o., Warszawa 2012

Utwór ani w całości, ani w fragmentach nie może być skanowany, kserowany, powielany bądź rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych, w tym również nie może być umieszczany ani rozpowszechniany w postaci cyfrowej zarówno w Internecie, jak i w sieciach lokalnych bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich.

Wydawnictwa Komunikacji i Łączności sp. z o.o.

ul. Kazimierzowska 52, 02-546 Warszawa

tel. 22-849-27-51; fax 22-849-23-22

Dział handlowy tel./fax 22-849-23-45, tel. 22-849-27-51 w. 555

*Prowadzimy sprzedaż wysyłkową książek*

Księgarnia firmowa w siedzibie wydawnictwa

tel. 22-849-20-32, czynna pon.–pt. w godz. 10.00–18.00

e-mail: [wkl@wkl.com.pl](mailto:wkl@wkl.com.pl)

*Pełna oferta WKŁ w INTERNECIE:* <http://www.wkl.com.pl>

Wydanie 1. Warszawa 2012

Skład i łamanie: FOTOSKŁAD Pracownia Poligraficzna

ul. Czardasza 16/18, 02-169 Warszawa

Druk i oprawa: Drukarnia TREND

e-mail: [drukarniatrend@wp.pl](mailto:drukarniatrend@wp.pl)

# Spis treści

<b>1.</b>	<b>Materiały konstrukcyjne</b> .....	9
1.1.	Właściwości metali i ich stopów .....	9
1.2.	Metale żelazne i ich stopy .....	14
1.2.1.	Klasyfikacja i otrzymywanie stopów żelaza z węglem .....	14
1.2.2.	Wykres żelazo-węgiel .....	15
1.2.3.	Stale .....	19
1.2.4.	Staliwa .....	27
1.2.5.	Żeliwa .....	29
1.3.	Metale nieżelazne i ich stopy .....	33
1.3.1.	Klasyfikacja i ogólna charakterystyka stopów metali nieżelaznych .....	33
1.3.2.	Aluminium i jego stopy .....	34
1.3.3.	Miedź i jej stopy .....	36
1.3.4.	Cynk i jego stopy .....	39
1.3.5.	Magnez i jego stopy .....	40
1.3.6.	Nikiel i jego stopy .....	41
1.3.7.	Wolfram i jego stopy .....	41
1.3.8.	Tytan i jego stopy .....	42
1.4.	Obróbka cieplna .....	42
1.5.	Obróbka cieplno-chemiczna .....	47
1.6.	Materiały metalowe w pojazdach samochodowych .....	49
1.7.	Materiały niemetalowe .....	52
1.7.1.	Klasyfikacja i charakterystyka .....	52
1.7.2.	Materiały niemetalowe w pojazdach samochodowych .....	58
1.8.	Pytania kontrolne .....	60
<b>2.</b>	<b>Techniki wytwarzania</b> .....	62
2.1.	Klasyfikacja technik wytwarzania .....	62
2.2.	Odewanie .....	63
2.2.1.	Wiadomości wstępne .....	63
2.2.2.	Klasyfikacja metod odlewania .....	63
2.2.3.	Proces odlewania .....	64
2.2.4.	Specjalne metody odlewania .....	66
2.3.	Obróbka plastyczna .....	66
2.3.1.	Klasyfikacja i rodzaje obróbki plastycznej .....	66
2.3.2.	Kucie .....	68
2.3.3.	Walcowanie .....	69
2.3.4.	Tłoczenie .....	70
2.3.5.	Ciągnięcie .....	70

2.4.	Prace ślusarskie	71
2.5.	Maszynowa obróbka skrawaniem	80
2.5.1.	Rodzaje i charakterystyka	80
2.5.2.	Obrabiarki skrawające	81
2.5.3.	Narzędzia	85
2.6.	Wykańczająca obróbka powierzchni	89
2.7.	Maszyny i narzędzia do wytwarzania części pojazdów samochodowych	91
2.8.	Montaż	92
2.8.1.	Wiadomości wstępne	92
2.8.2.	Dokumentacja technologiczna montażu	95
2.9.	Przepisy bhp podczas wytwarzania części maszyn	97
2.10.	Pytania i ćwiczenia kontrolne	98
<b>3.</b>	<b>Części maszyn</b>	<b>99</b>
3.1.	Klasyfikacja i charakterystyka części maszyn	99
3.2.	Normalizacja części maszyn	100
3.3.	Zasady konstruowania i obliczania wytrzymałości części maszyn	102
3.4.	Połączenia nierozłączne	110
3.4.1.	Klasyfikacja połączeń nierozłącznych	110
3.4.2.	Połączenia nitowe	110
3.4.3.	Połączenia spawane	116
3.4.4.	Połączenia zgrzewane i lutowane	123
3.4.5.	Połączenia klejone	130
3.4.6.	Połączenia wciskowe	132
3.4.7.	Oznaczanie połączeń nierozłącznych na rysunkach technicznych	137
3.4.8.	Połączenia nierozłączne w pojazdach samochodowych	141
3.5.	Połączenia rozłączne	145
3.5.1.	Klasyfikacja połączeń rozłącznych	145
3.5.2.	Połączenia wpustowe	146
3.5.3.	Połączenia wielowypustowe	150
3.5.4.	Połączenia wielokorbne	153
3.5.5.	Połączenia kółkowe i sworzniowe – technologia wykonania i obliczanie	154
3.5.6.	Połączenia klinowe	162
3.5.7.	Połączenia gwintowe	164
3.5.8.	Oznaczanie połączeń rozłącznych na rysunkach technicznych	182
3.5.9.	Połączenia rozłączne w pojazdach samochodowych	185
3.6.	Połączenia i elementy podatne	190
3.6.1.	Klasyfikacja i charakterystyka połączeń podatnych	190
3.6.2.	Materiały stosowane na elementy podatne	192
3.6.3.	Obliczanie sprężyn	192
3.6.4.	Oznaczanie sprężyn na rysunkach technicznych	198
3.7.	Osie i wały	199
3.7.1.	Ogólna charakterystyka osi i wałów	199
3.7.2.	Materiały stosowane na osie i wały	200
3.7.3.	Obliczanie osi i wałów	201
3.7.4.	Oznaczanie osi i wałów na rysunkach technicznych	207
3.8.	Łożyskowanie	208
3.8.1.	Klasyfikacja łożysk	208
3.8.2.	Materiały stosowane na łożyska	212
3.8.3.	Dobór i obliczanie łożysk	213
3.8.4.	Oznaczanie łożysk na rysunkach technicznych	217
3.9.	Przekładnie zębate	219
3.9.1.	Wiadomości wstępne	219

3.9.2.	Klasyfikacja i charakterystyka przekładni zębatach	219
3.9.3.	Materiały stosowane na koła zębata	221
3.9.4.	Metody wytwarzania kół zębatach	222
3.9.5.	Przekładnie walcowe o zębatach prostych	223
3.9.6.	Przekładnie walcowe o zębatach skośnych i daszkowych	231
3.9.7.	Przekładnie stożkowe	233
3.9.8.	Przekładnie zębata śrubowe	236
3.9.9.	Przekładnie ślimakowe	237
3.9.10.	Przekładnie obiegowe i specjalne	241
3.9.11.	Oznaczanie przekładni zębatach na rysunkach technicznych	244
3.9.12.	Przekładnie zębatach w pojazdach samochodowych	246
3.10.	Przekładnie cierne	247
3.10.1.	Klasyfikacja i charakterystyka przekładni ciernych	247
3.10.2.	Zastosowanie przekładni ciernych	248
3.10.3.	Oznaczanie przekładni ciernych na rysunkach technicznych	248
3.11.	Przekładnie cięgnowe	249
3.11.1.	Klasyfikacja i charakterystyka przekładni cięgnowych	249
3.11.2.	Zastosowanie przekładni cięgnowych	251
3.11.3.	Oznaczanie przekładni cięgnowych na rysunkach technicznych	254
3.12.	Sprzęgła	257
3.12.1.	Charakterystyka i rodzaje sprzęgieł	257
3.12.2.	Dobór i obliczanie sprzęgieł	261
3.13.	Hamulce	265
3.13.1.	Charakterystyka i rodzaje hamulców	265
3.13.2.	Dobór i obliczanie hamulców	267
3.14.	Zastosowanie programów wspomagających projektowanie do obliczania i konstruowania części maszyn	268
3.15.	Pytania i ćwiczenia kontrolne	271
<b>4.</b>	<b>Podstawy maszynoznawstwa</b>	<b>274</b>
4.1.	Klasyfikacja i ogólna charakterystyka maszyn	274
4.2.	Energia, jej rodzaje i źródła	275
4.2.1.	Rodzaje, znaczenie i zasoby energii	275
4.2.2.	Odnawialne źródła energii	276
4.2.3.	Ogniwa paliwowe	280
4.2.4.	Biopaliwa	283
4.3.	Maszyny hydrauliczne	283
4.3.1.	Podstawy hydromechaniki	283
4.3.2.	Klasyfikacja maszyn hydraulicznych	285
4.3.3.	Silniki wodne i ich zastosowanie	288
4.3.4.	Klasyfikacja pomp	290
4.3.5.	Pompy wirowe i wyporowe	291
4.3.6.	Charakterystyka napędów hydrostatycznych i hydrokinetycznych	294
4.3.7.	Pompy i napędy hydrauliczne w pojazdach samochodowych	301
4.4.	Maszyny ciepłone	304
4.4.1.	Podstawowe właściwości gazów	304
4.4.2.	Pierwsza zasada termodynamiki	306
4.4.3.	Przemiany gazów doskonałych	307
4.4.4.	Druga zasada termodynamiki	310
4.4.5.	Przemiany energetyczne w maszynach	311
4.4.6.	Zasady wymiany ciepła	312
4.4.7.	Turbiny parowe	314
4.4.8.	Klasyfikacja silników spalinowych	316

---

4.4.9.	Odrzutowe silniki przepływowe .....	322
4.4.10.	Silniki rakietowe .....	323
4.5.	Elektrownie jądrowe .....	326
4.6.	Sprężarki .....	329
4.6.1.	Ogólna charakterystyka sprężarek .....	329
4.6.2.	Klasyfikacja sprężarek .....	330
4.6.3.	Sprężarki wyporowe i przepływowe .....	331
4.7.	Napędy pneumatyczne i pneumatyczno-hydrauliczne .....	334
4.8.	Urządzenia chłodnicze .....	341
4.9.	Maszyny i środki transportowe .....	343
4.10.	Automatyzacja transportu wewnętrznego .....	344
4.11.	Przepisy bhp podczas obsługi maszyn .....	347
4.12.	Pytania i ćwiczenia kontrolne .....	350
<b>Literatura</b>	.....	<b>352</b>



---

# 1. Materiały konstrukcyjne

## 1.1. Właściwości metali i ich stopów

Występujące w przyrodzie pierwiastki można podzielić na metale i niemetale.

**Metale** mają następujące cechy różniące je od niemetali:

- dobrą przewodność elektryczną,
- przewodnictwo cieplne,
- własności magnetyczne,
- plastyczność,
- charakterystyczny połysk (metaliczny),
- nieprzezroczystość.

Własności te wynikają z budowy wewnętrznej metali – z wiązań pomiędzy atomami tworzącymi ich strukturę. Metale najczęściej występują w przyrodzie jako składniki różnych minerałów lub rud. Rudy są to naturalne skupienia minerałów, zawierających metale lub ich związki (np. siarczki, tlenki, węglany). Ze względu na niekorzystne własności wytrzymałościowe metale chemicznie czyste stosuje się w technice rzadko. Do budowy maszyn stosuje się najczęściej stopy metali i niemetali.

**Stopy metali** są to substancje o własnościach metalicznych, otrzymywane przez stopienie i mieszanie dwóch lub więcej metali albo metali z niemetalami. Stopy metali mają lepsze własności mechaniczne i technologiczne niż czyste metale. Korzystną własnością czystych metali jest ich większa odporność na niszczące działanie czynników chemicznych i elektrochemicznych, czyli na korozję.

Własności metali i ich stopów dzieli się na:

- chemiczne,
- fizyczne,
- mechaniczne,
- technologiczne.

Badaniem tych własności zajmuje się nauka zwana metaloznawstwem.

Do **własności chemicznych** metali i ich stopów zalicza się odporność na działanie środowiska zewnętrznego (kwasów, zasad, temperatury, gazów, wilgotności itp.), tj. na korozję. Metale o dużej odporności na korozję to platyna, złoto i srebro oraz stopy żelaza z chromem i niklem.

**Własności fizyczne** metali i ich stopów to gęstość, temperatura topnienia, temperatura wrzenia, ciepło właściwe, przewodnictwo cieplne, przewodność elektryczna, magnetyzm i rozszerzalność cieplna. Własności fizyczne zestawiono w tablicy 1-1.

## Przykładowe własności fizyczne metali i ich stopów

Własność	Definicja	Jednostka	Przykłady
Gęstość	Stosunek masy ciała jednorodnego do jego objętości	kg/m <sup>3</sup> , g/cm <sup>3</sup>	Metale o małej gęstości (lekkie): aluminium, sód, magnez i ich stopy. Metale o dużej gęstości (ciężkie): żelazo, nikiel, miedź, platyna, ołów i ich stopy
Temperatura topnienia	Temperatura, w której następuje przemiana ze stanu stałego w stan ciekły	°C, K	Metale łatwo topliwe, których temperatura topnienia wynosi do 650°C: cynk, cyna, bizmut, kadm, magnez, ołów. Metale trudno topliwe, których temperatura topnienia wynosi od 650°C do 2000°C: chrom, kobalt, miedź, nikiel, platyna, żelazo. Metale bardzo trudno topliwe, których temperatura topnienia wynosi powyżej 2000°C: wolfram, molibden, tantal. Metale mają stałą temperaturę topnienia, natomiast stopy nie
Temperatura wrzenia	Temperatura, w której następuje przemiana ze stanu ciekłego w stan gazowy	°C, K	Łatwo wrzące metale: kadm i cynk, których temperatura wrzenia wynosi odpowiednio 767°C i 907°C
Ciepło właściwe	Ciepło potrzebne do zwiększenia temperatury ciała o masie 1 kg o 1 stopień	J/(kg·K)	Cyna 222 J/(kg·K). Cynk 389 J/(kg·K). Mosiądz 387 J/(kg·K). Żelazo 452 J/(kg·K). Platyna 136 J/(kg·K). Ciepło właściwe zależy od rodzaju substancji, temperatury i sposobu ogrzewania
Rozszerzalność cieplna	Wzrost objętości lub długości ciała pod wpływem wzrostu temperatury	1/K	Największą rozszerzalność cieplną wykazuje kadm, a najmniejszą wolfram $\alpha$ – współczynnik rozszerzalności liniowej, $\beta$ – współczynnik rozszerzalności objętościowej
Przewodność elektryczna	Zdolność przewodzenia prądu elektrycznego (odwrotność oporu elektrycznego)	S (simens)	Największą przewodność elektryczną wśród metali mają srebro, miedź, złoto, aluminium. Przewodność maleje wraz ze wzrostem temperatury przewodnika

**Własności mechaniczne** stanowią zespół cech określających odporność metali i stopów na działanie sił zewnętrznych. Wpływają one na trwałość konstrukcji i warunkują wybór odpowiedniej metody obróbki materiału. Do własności mechanicznych zalicza się:

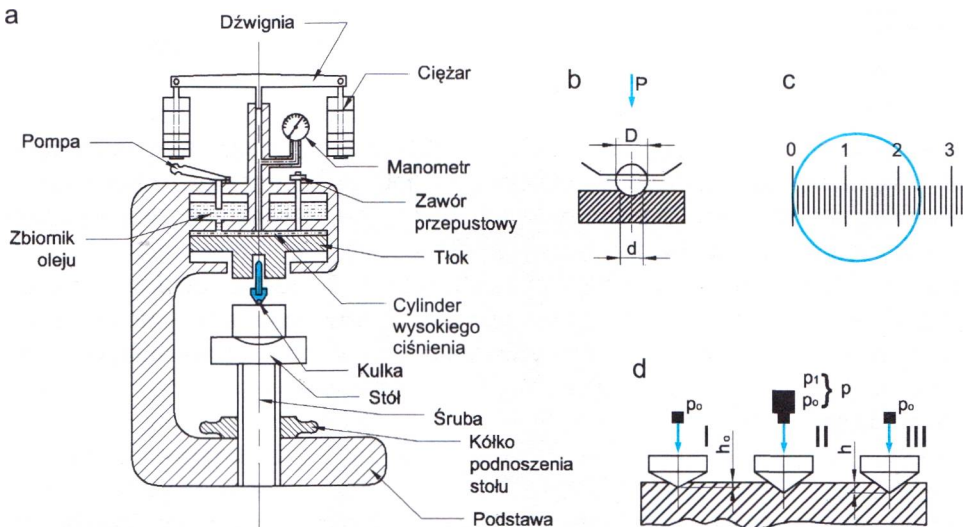
- wytrzymałość,
- twardość,
- uduerność.

**Wytrzymałość** jest to stosunek największej wartości obciążenia w czasie próby wytrzymałościowej do pola powierzchni przekroju poprzecznego badanej próbki. W zależności od rodzaju obciążeń można rozróżnić wytrzymałość na roz-

ciąganie, ściskanie, skręcanie, zginanie, ścinanie i wyboczenie. Opisy tych parametrów i metod ich pomiaru są zawarte w pierwszej części podręcznika „Podstawy konstrukcji maszyn”, w rozdziale 5. „Podstawy wytrzymałości materiałów”.

**Twardość** jest to odporność materiału na odkształcenia trwałe, powstające wskutek wciskania weń węgelnika. Najczęściej próby twardości wykonuje się metodami Brinnella, Rockwella i Vickersa na prasach zwanych twardościomierzami, zgodnie z odpowiednimi normami. Pomiar twardości metodą Brinnella polega na wciskaniu w powierzchnię badanego materiału stalowej kulki. W zależności od rodzaju i grubości materiału stosuje się kulki o różnych średnicach: 1; 2,5; 5 i 10 mm i siłę nacisku od 10 do 30 000 N. Wskutek działania siły kulka tworzy na badanej powierzchni kulisty odcisk, którego średnicę mierzy się za pomocą specjalnej lupy z podziałką. Następnie z odpowiednich tabel odczytuje się twardość Brinnella, oznaczaną jako HB. Metodą tą bada się metale i stopy metali nieżelaznych, żeliwa i stali nieutwardzonej. Sposób przeprowadzenia badania oraz tabele do odczytu twardości zawarto w normie PN-EN ISO 6506-4:2008. Budowę twardościomierza i schemat pomiaru twardości przedstawiono na rysunku 1.1.

Pomiar twardości metodą Rockwella polega na wciskaniu w powierzchnię metalu diamentowego stożka o kącie rozwarcia  $120^\circ$  lub stalowej kulki o średnicy 1,588 mm. W celu zmniejszenia błędów pomiaru stosuje się obciążenie dwustopniowe. Miarą twardości w tej metodzie jest głębokość wnikania stożka lub kulki w badany materiał. Twardość odczytuje się bezpośrednio na podziałce czujnika twardościomierza. Jeżeli pomiar był wykonywany za pomocą kulki, oznacza się go symbolem HRB, jeśli zaś za pomocą stożka – symbolem HRC. Zasadę pomiaru twardości metodą Rockwella przedstawiono na rysunku 1.1d.



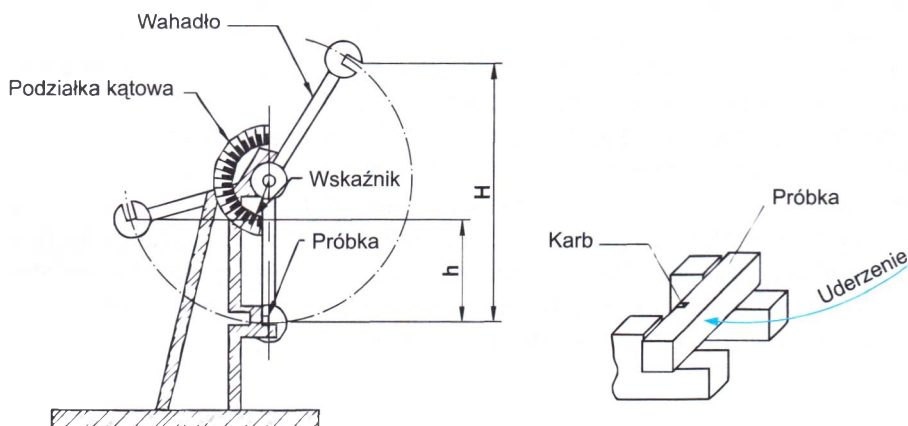
**Rys. 1.1.** Twardościomierz i schematy pomiaru twardości

a – schemat przyrządu, b – zasada pomiaru wg Brinnella, c – schemat pomiaru średnicy odcisku, d – zasada pomiaru wg Rockwella

Metodę tę stosuje się do twardych metali i ich stopów, a sposób prowadzenia badań przedstawiono w normie PN-EN ISO 6508-1:2007.

Pomiar twardości metodą Vickersa polega na wciskaniu w materiał diamentowego ostrosłupa o podstawie kwadratowej i kącie wierzchołkowym (piramidy)  $136^\circ$ . W wyniku badania otrzymuje się odcisk w kształcie kwadratu, którego przekątną mierzy się za pomocą mikroskopu pomiarowego. Następnie na podstawie długości przekątnej z tabeli odczytuje się twardość, oznaczaną symbolem HV. Metodę Vickersa stosuje się do badania twardości bardzo cienkich materiałów, a także bardzo cienkich warstw powierzchniowych według normy PN-EN ISO 6507-1:2007.

**Udarność** jest to odporność materiałów na uderzenia, dająca informację o tym, jak zachowa się materiał pod wpływem narastającego gwałtownie obciążenia. Do badania udarności stosuje się najczęściej młot udarnościowy Charpy'ego. Zasadę jego działania przedstawiono na rysunku 1.2.



Rys. 1.2. Młot udarnościowy Charpy'ego

Specjalnie przygotowaną próbkę o określonych wymiarach i kształcie (z karbem) układa się na podporach młota wahadłowego. Młot, spadając z wysokości  $H$ , łamie próbkę i wznosi się na wysokość  $h$ . Miarą udarności jest stosunek pracy zużytej na złamanie próbki do pola jej przekroju poprzecznego.

**Właściwości technologiczne** określają podatność metalu lub stopu metali na różne zabiegi technologiczne, wykonywane w celu otrzymania gotowego wyrobu. Ponieważ wyroby metalowe wytwarza się za pomocą skrawania, odlewania, kucia, tłoczenia itp., do właściwości tych zalicza się:

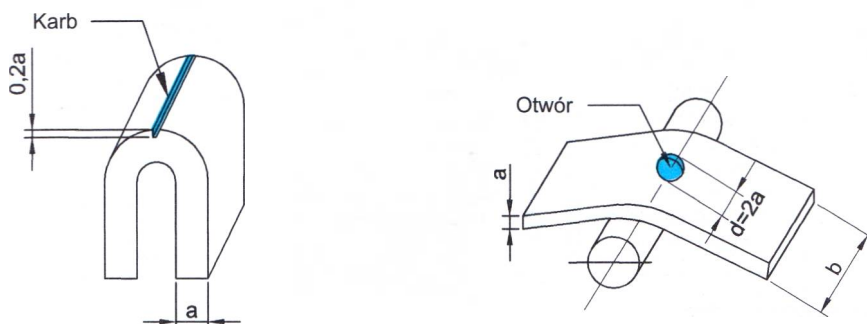
- skrawalność,
- lejność,
- plastyczność.

**Skrawalność** jest to podatność materiału na obróbkę skrawaniem. Zależy ona od twardości i budowy wewnętrznej materiału. Materiały twarde i kruche skrawają się trudniej niż miękkie i plastyczne, jednak materiały zbyt miękkie także nie mają dobrej skrawalności, ponieważ zalepią ostrza narzędzi skrawających.

Skrawalność materiałów określa się drogą prób, podczas których bada się rodzaj wiórów i powierzchnię skrawania.

**Lejność** jest to zdolność ciekłego metalu lub stopu metali do wypełnienia formy odlewniczej. Zależy ona od składu chemicznego, budowy wewnętrznej i temperatury ciekłego metalu. Miarą lejności jest odległość, na jaką dopłynie ciekły metal w znormalizowanej formie o kształcie spirali. Im większa jest lejność badanego materiału, tym dłuższy odcinek spirali zostanie wypełniony podczas odlewania.

**Plastyczność** jest to zdolność ciał stałych do osiągania znacznych odkształceń trwałych pod działaniem sił zewnętrznych, ale bez naruszania sił spójności. Przez badanie plastyczności sprawdza się zdolność materiału do obróbki plastycznej, czyli np. walcowania, kucia lub tłoczenia. Jedną z prób badania własności plastycznych materiału jest próba zginania. Zginaniu poddaje się płaskownik z naciętym karbem lub wywierconym otworem o średnicy równej podwójnej grubości próbki (rys. 1.3). W próbie zginania miarą plastyczności jest wartość kąta, o jaki można zgiąć próbkę bez spowodowania jej pęknięcia.



Rys. 1.3. Obostrzona próba zginania

Przydatność blach do tłoczenia określa się w próbie tłoczności metodą Erichsen. Polega ona na powolnym wtlaczaniu kulisto zakończonych stempla stalowego lub kulki w próbkę blachy umocowaną w matrycy. Stempel lub kulkę wtlacza się za pomocą koła dociskowego. Próba trwa do pojawienia się pęknięć obserwowanych w lusterku maszyny (rys. 1.4). Miarą tłoczności blachy jest głębokość wyciśniętego wgłębienia.



Rys. 1.4. Maszyna do badania tłoczności blachy metodą Erichsen

## 1.2. Metale żelazne i ich stopy

### 1.2.1. Klasyfikacja i otrzymywanie stopów żelaza z węglem

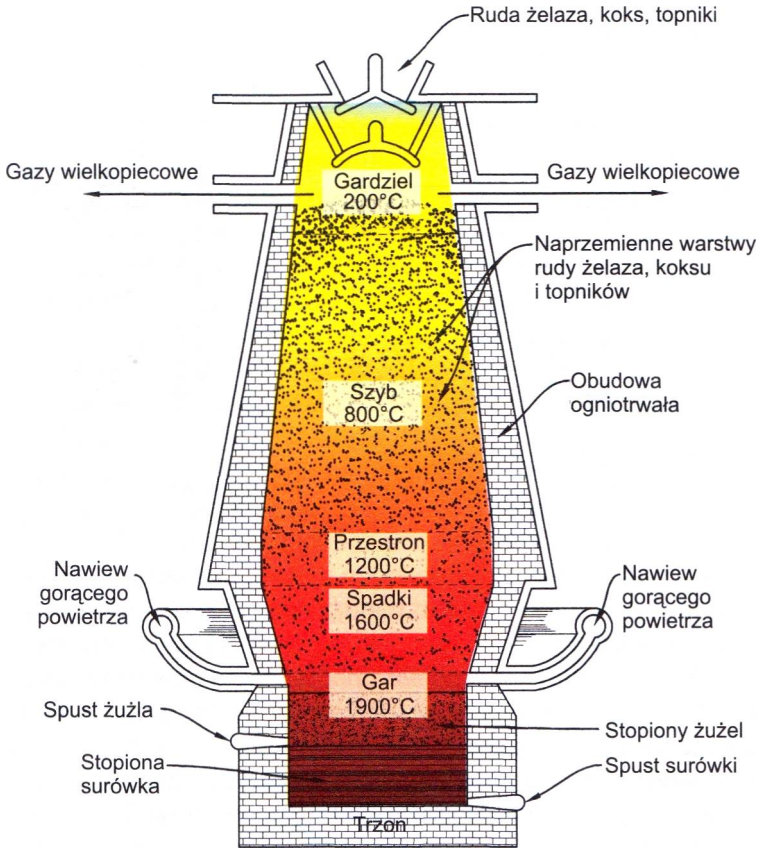
Z technicznego punktu widzenia najważniejszy metal to żelazo (symbol chemiczny Fe), będące głównym składnikiem stali, która jest stopem żelaza z węglem. Stopy żelaza z węglem można podzielić według schematu przedstawionego na rysunku 1.5.



Rys. 1.5. Podział stopów żelaza

Produktami wyjściowymi do otrzymywania stopów żelaza są surówki żelaza, wytwarzane z rud żelaza w tzw. wielkich piecach hutniczych. Wysokość tych pieców może dochodzić do 30 m, a średnica do 8 m (rys. 1.6).

Pojemność użyteczna wielkiego pieca, czyli jego objętość wypełniona materiałem do wytopu wynosi do 1500 m<sup>3</sup>. Wewnętrzne ściany wielkiego pieca są zbudowane z materiałów ogniotrwałych, z zewnątrz zaś pokryte grubą stalową blachą. Górna, cylindryczna część pieca to gardziel. Poniżej niej znajduje się szyb o kształcie stożka ściętego, którego najszersza część to przestron. Od przestronu w dół piec zwęża się, tworząc spadki, które przechodzą w część najniższą – gar, gdzie panuje temperatura około 1900°C. W dolnej części gara znajduje się otwór do spuszczenia surówki. Proces wielkopiecowy to zespół zjawisk fizycznych i reakcji chemicznych zachodzących w wielkim piecu w celu uzyskania surówki. Wsadem do wielkiego pieca są rudy żelaza, różniące się zawartością żelaza: hematyt, limonit, syderyt i magnetyt, oraz koks i topniki, ładowane na przemian, warstwami, od góry przez gardziel. Do gara jest pod ciśnieniem doprowadzane gorące powietrze. Produkty wielkiego pieca to surówka biała, stosowana do dalszej przeróbki na stal, i surówka szara, z której otrzymuje się żeliwo. Podczas wytopu surówki powstają także gazy wielkopiecowe, uży-



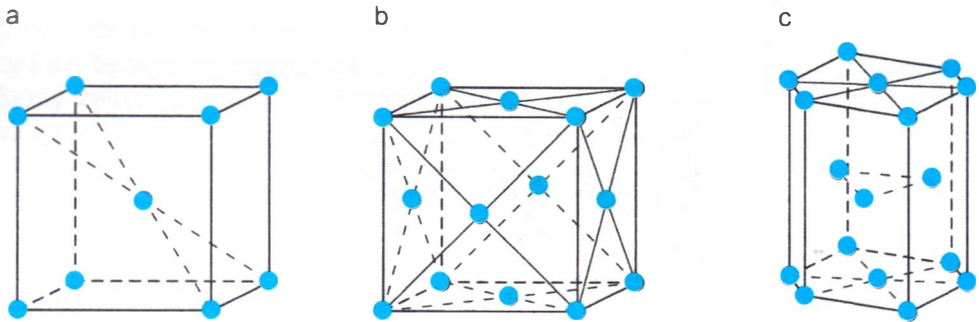
Rys. 1.6. Schemat wielkiego pieca

wane do ogrzewania nagrzewnic powietrza dostarczanego do pieca, oraz żużel, wykorzystywany do wyrobu cegły i żużlobetonu. Wydajność wielkich pieców wynosi 250...2000 ton surówki na dobę. Piece te pracują w produkcji ciągłej około 2–3 lata, a następnie są remontowane.

### 1.2.2. Wykres żelazo-węgiel

Wszystkie metale w stanie stałym mają budowę krystaliczną, czyli charakteryzują się uporządkowanym, regularnym rozmieszczeniem atomów tworzących przestrzenną, krystaliczną siatkę. Siatka składa się z płaszczyzn krystalograficznych, oddalonych od siebie na pewną odległość. W węzłach siatki są rozmieszczone atomy. Rodzaj budowy krystalicznej ma wpływ na własności chemiczne, fizyczne i mechaniczne metalu. Większość metali i stopów metali krystalizuje się (krystalizacja to przejście ze stanu ciekłego w stan stały) w trzech podstawowych typach siatek przestrzennych (rys. 1.7):

- regularnej przestrzennie centrycznej,
- regularnej płasko centrycznej,
- heksagonalnej.



**Rys. 1.7.** Rozmieszczenie atomów w siatkach krystalicznych

*a* – siatka regularna przestrzennie centryczna, *b* – siatka regularna płasko centryczna, *c* – siatka heksagonalna

Metale takie jak chrom, wanad, wolfram i molibden mają siatkę krystaliczną regularną przestrzennie centryczną. Aluminium, miedź, ołów, nikiel i srebro mają siatkę regularną płasko centryczną. Cynk, tytan i mangan mają siatkę heksagonalną. Niektóre metale mogą w zależności od warunków (np. temperatury) zmieniać swoją siatkę przestrzenną. Powstają wówczas odmiany alotropowe danego metalu, różniące się budową oraz właściwościami fizycznymi, chemicznymi i mechanicznymi. Zjawisko alotropii jest wykorzystywane w obróbce cieplnej metali. W odmianach alotropowych występuje żelazo, kobalt, cyna, mangan i tytan. Żelazo występuje w dwóch odmianach alotropowych, oznaczonych greckimi literami  $\alpha$  oraz  $\gamma$ , zależnie od zakresu temperatury, w którym dana odmiana może istnieć. Odmiana  $\alpha$  ma siatkę krystaliczną regularną przestrzennie centryczną, a odmiana  $\gamma$  – siatkę regularną płasko centryczną (rys. 1.7). Odmiana  $\alpha$  istnieje do temperatury  $910^{\circ}\text{C}$ , a potem przechodzi w odmianę  $\gamma$ , występującą do temperatury  $1390^{\circ}\text{C}$ , powyżej której następuje ponowna przemiana w żelazo  $\alpha$ .



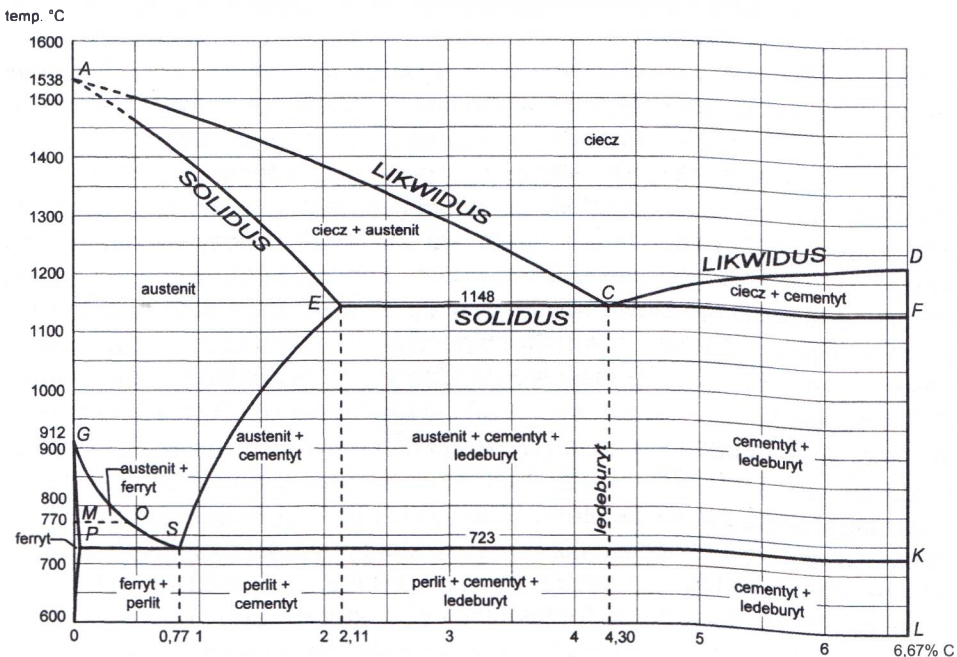
Metale czyste krzepną (przechodzą ze stanu ciekłego w stan stały) w stałej, ściśle określonej temperaturze. Stopy metali, które w stanie ciekłym stanowią roztwór jednorodny (o jednakowych własnościach), podczas przechodzenia ze stanu ciekłego w stan stały mogą tworzyć mieszaniny, związki chemiczne lub roztwory stałe. Mieszaniny to stopy, których składniki rozpuszczają się w sobie w stanie ciekłym, a nie rozpuszczają się w sobie w stanie stałym, utrzymując swoje odrębne siatki krystaliczne. Podczas tworzenia związków chemicznych tworzy się nowa siatka krystaliczna, różna od siatek składników stopu. Kryształy roztworu stałego różnią się od mieszaniny tym, że zostaje w nich zachowana siatka krystaliczna, w której obok atomów rozpuszczalnika znajdują się atomy składników stopu (atomy rozpuszczonego składnika zamieniają sobą atomy roz-



puszczalnika albo umieszczają się między nimi). W budowie pojazdów samochodowych najszersze zastosowanie ma stop żelaza z węglem. Uproszczony układ podwójny stopów żelazo-węgiel przedstawiono na rysunku 1.8.

Na podstawie tego wykresu można określić przebieg krzepnięcia stopów żelaza z węglem, zmiany zachodzące w stopach w stanie stałym podczas powolnego studzenia oraz strukturę tych stopów po ostudzeniu. Znając zmiany w strukturze stopów, można z kolei określić ich własności. Wykres obejmuje stopy żelaza z węglem o zawartości węgla od 0 do 6,67% C (oś pozioma) i zakres temperatur od 600 do 1600°C (oś pionowa). Każdy punkt wykresu odpowiada określonemu stopowi o określonym składzie chemicznym w określonej temperaturze. Składniki strukturalne stopów żelazo-węgiel, występujące na wykresie na rysunku 1.8, to:

- ferryt, prawie czyste żelazo o niedużej twardości (od 50 do 70 HB), a bardzo dużej plastyczności; jest to roztwór stały węgla w żelazie  $\alpha$ , rozpuszczalność węgla jest w nim bardzo mała i wynosi do 0,02%;
- cementyt, węgiel żelaza ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) o zawartości węgla 6,67%, bardzo twardy (ok. 800 HB) i kruchy, podczas nagrzewania do wysokich temperatur rozkłada się na ferryt i węgiel;
- austenit, roztwór stały węgla w żelazie  $\gamma$  o zawartości węgla do 2%, o dużej plastyczności; podczas powolnego chłodzenia poniżej temperatury 723°C rozkłada się na ferryt, cementyt i perlit;



Rys. 1.8. Uproszczony układ podwójny stopów żelazo-węgiel

- perlit, mieszanina ferrytu i cementytu, może występować w dwóch rodzajach, jako płytkowy i ziarnisty; podczas ogrzewania można zmienić budowę perlitu płytkowego na ziarnisty, który ma lepsze własności mechaniczne niż płytkowy; stal o zawartości węgla 0,8% ma czystą strukturę perlityczną;
- ledeburyt, eutektyczna mieszanina austenitu i cementytu o zawartości węgla 4,3% (eutektyka to struktura stopu będącego mieszaniną dwóch składników o określonym składzie procentowym, nierozpuszczających się wzajemnie; stop taki, tak jak czyste metale, krzepnie w stałej temperaturze, która jest najniższa spośród wszystkich stopów obu metali; po zakrzepnięciu stop ten jest mieszaniną bardzo drobnych kryształów obu metali); ledeburyt jest kruchy i ma znaczną twardość (wynoszącą od 440 do 510 HB).

Własności stali zależą od zawartości poszczególnych składników strukturalnych. Stale o małej zawartości węgla (poniżej 0,3%) są plastyczne na zimno i na gorąco. Stale o zawartości węgla powyżej 0,8% są twarde i mało plastyczne, ponieważ występuje w nich cementyt. Własności stali zależą także od szybkości chłodzenia. Przy zwiększonej szybkości chłodzenia strukturę perlitu tworzą coraz drobniejsze i gęściej ułożone pasemka cementytu. Twardość takiej struktury wzrasta. Podczas bardzo szybkiego chłodzenia stali, np. w zimnej wodzie, powstaje martenzyt w postaci bardzo twardych igieł. Na wykresie żelazo-węgiel (rys. 1.8) przedstawiono charakterystyczną linię łączącą punkty ACD, tzw. linię likwidusu, łączącą punkty początku krzepnięcia; jej nazwa pochodzi od łacińskiego słowa *liquidus* – płynny. Powyżej tej linii wszystkie stopy znajdują się w stanie ciekłym. Czyste żelazo topi się w temperaturze 1538°C (punkt A). Stopy żelaza z węglem topnieją w pewnych zakresach temperatur. Wzdłuż linii likwidusu na odcinku AC zaczyna się wydzielanie kryształów austenitu. Powyżej linii AC znajduje się ciecz, a poniżej niej ciecz i kryształy austenitu. Wzdłuż linii likwidusu na odcinku CD zaczynają się wydzielać kryształy cementytu, powyżej linii CD znajduje się ciecz, a poniżej niej ciecz i kryształy cementytu. Stop zawierający 4,3% węgla krzepnie całkowicie w punkcie C w temperaturze 1130°C, wydzielając równocześnie kryształki austenitu i cementytu, w wyniku czego powstaje eutektyka nazywana ledeburytem. Na linii AECF kończy się proces krystalizacji. Jest to linia solidusu łącząca punkty końców krzepnięcia, jej nazwa pochodzi od łacińskiego słowa *solidus* – stały. Poniżej linii solidusu wszystkie stopy znajdują się w stanie stałym. Stopy poniżej linii solidusu w obszarze ograniczonym liniami ES, AE i SG mają jednorodną strukturę austenityczną. Wzdłuż linii ES z austenitu zaczyna się wydzielać cementyt. Na linii PSK austenit podczas chłodzenia rozpada się na ferryt, perlit i cementyt. W punkcie S, który odpowiada zawartości 0,77% węgla, austenit rozpada się na ferryt i cementyt, tworząc mieszaninę zwaną perlitem. Stop ten nazywa się eutektoidalnym. Stale o zawartości węgla mniejszej niż 0,77% to stale podeutektoidalne, w których strukturze obok ziaren ferrytu występują ziarna perlitu. Stale o zawartości węgla większej niż 0,77% to stale nadeutektoidalne, w których strukturze występują ziarna cementytu i perlitu. Stal o zawartości węgla równej 0,77% to stal eutektoidalna, a jej struktura składa się z ziaren perlitu. Surówki o zawartości węgla

od 2 do 4,3% to surówki podeutektyczne, o zawartości węgla równej 4,3% – eutektyczne, a o zawartości węgla od 4,3 do 6,67% – nadeutektyczne. Jak wynika z analizy wykresu żelazo-węgiel, dla określonego składu chemicznego można otrzymać różne struktury, a zarazem różne własności materiałów, w zależności od przeprowadzonych procesów nagrzewania i chłodzenia, czyli obróbki cieplnej.

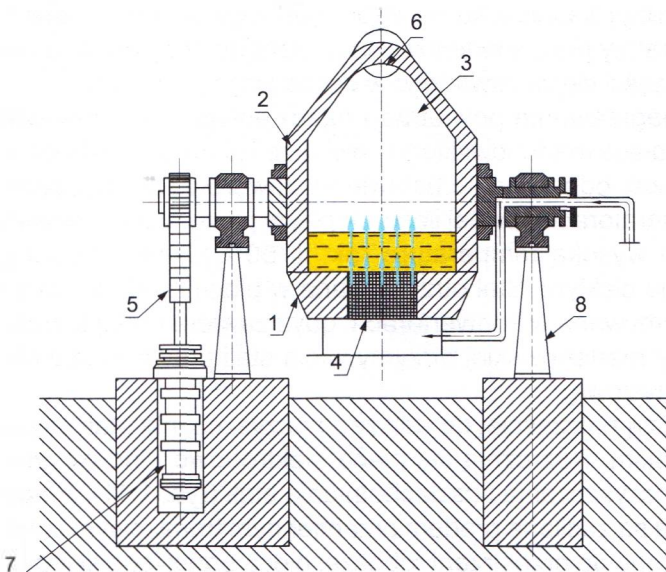
### 1.2.3. Stale

#### Otrzymywanie stali

Stal jest to stop żelaza z węglem i innymi pierwiastkami, zawierający maksymalnie do 2% węgla, przerobiony plastycznie i obrobiony cieplnie. Otrzymuje się ją w wyniku przeróbki surówki białej, jednego z produktów wielkiego pieca (patrz rys. 1.6). W surówce białej węgiel występuje w postaci węgliku żelaza (cementytu). Nazwa „surówka biała” pochodzi od bardzo jasnego przelomu. Surówka zawiera od 3,2% do 4,3% węgla, więc proces otrzymywania stali polega na odwęglaniu surówki. Podczas przeróbki na stal węgiel, inne domieszki i zanieczyszczenia ulegają częściowemu wypaleniu. Stal można otrzymać metodą:

- konwertorową,
- martenowską,
- elektryczną.

**Wytapianie stali metodą konwertorową** polega na przedmuchiwaniu sprężonego powietrza (lub tlenu) przez roztopioną surówkę (rys. 1.9). Następuje wówczas utlenienie węgla i domieszek (krzemu, manganu, siarki, fosforu), które w postaci żużła lub gazu opuszczają piec konwertorowy (konwertor). W skład



**Rys. 1.9.** Schemat pieca konwertorowego  
 1 – zbiornik stalowy,  
 2 – warstwa materiału ceramicznego,  
 3 – komora robocza,  
 4 – komora powietrzna,  
 5 – mechanizm obracania konwertora,  
 6 – otwór do wlewania ciekłej surówki,  
 7 – siłownik hydrauliczny,  
 8 – podstawa

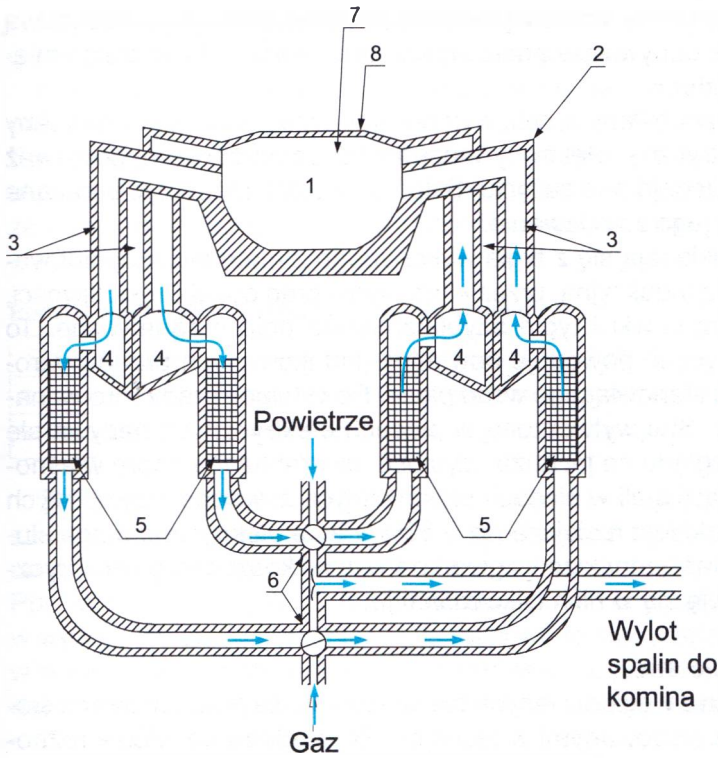
konwertora wchodzi podłużny zbiornik stalowy, wyłożony ogniotrwałym materiałem ceramicznym o charakterze kwaśnym lub zasadowym. Zbiornik może się obracać dookoła osi. Składa się z dwóch komór: większej (roboczej), w której odbywa się proces wytopu, i mniejszej (powietrznej), do której doprowadza się powietrze lub tlen pod ciśnieniem. Obydwie komory są przedzielone ścianą z otworami, przez które jest włączane powietrze lub tlen. Powietrze (tlen) przechodzące przez ciekłą surówkę wypala zawarty w niej węgiel i domieszki, w wyniku czego otrzymuje się stal.

Rozróżnia się trzy rodzaje procesów konwertorowych: Bessemera, Thomasa i LD (tlenowy). **Proces bessemerowski** (opracowany w 1856 r.) polega na otrzymywaniu stali w piecach konwertorowych wyłożonych materiałem ogniotrwałym kwaśnym (krzemionkowym). Metoda ta uniemożliwia przeróbkę surówek zawierających fosfor, który, pozostając w stali, powoduje jej kruchość. **Proces tomassowski** (wprowadzony w 1878 r.) polega na otrzymywaniu stali w piecach konwertorowych wyłożonych materiałem ogniotrwałym zasadowym (dolomitowym), co umożliwia przeróbkę surówki zawierającej fosfor. Wadą obu wymienionych metod jest wprowadzenie do stali azotu z powietrza. Aby wyeliminować to zjawisko, stosuje się powietrze wzbogacone w tlen przy bocznym nadmuchu komory. **Proces LD** (opracowany w 1949 r.) polega na otrzymywaniu stali z surówki przez wdmuchiwanie czystego tlenu do górnej części pionowo ustawionego konwertora wyłożonego materiałem ogniotrwałym zasadowym. Metoda LD pozwala na otrzymywanie stali z surówki o dowolnym składzie chemicznym i nie powoduje naazotowania stali.

**Metodą martenowską** (Siemensa-Martina) stal otrzymuje się przez wytopienie surówki ze złomem żelaznym i topnikami w piecu wannowym opalanym gazem. Piec martenowski (rys. 1.10) składa się z przestrzeni roboczej (tzw. topniska) z oknami wsadowymi i otworem spustowym, głowic (doprowadzających paliwo i powietrze oraz odprowadzających spaliny), kanałów, komór żuźlowych, regeneratorów i zaworów rozrządczych. Regeneratory pieca martenowskiego służą do odzyskiwania dla procesu martenowskiego części ciepła zawartego w uchodzących spalinach.

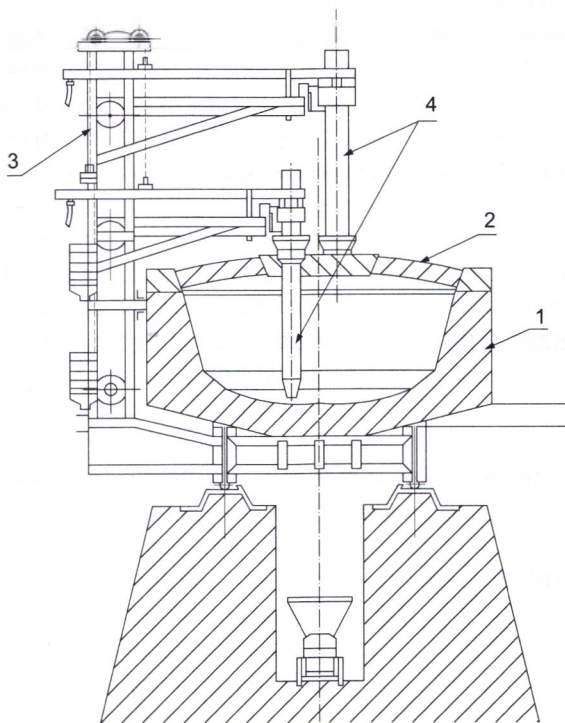
Odzyskiwanie ciepła (nagrzewanie powietrza i gazu) polega na okresowej zmianie kierunku wlotu do pieca martenowskiego powietrza i gazu oraz uchodzenia spalin, uzyskiwanej przez odpowiednie ustawienie zaworów rozrządczych. Dzięki odzyskaniu w regeneratorach pewnej ilości ciepła, w piecu martenowskim można uzyskiwać bardzo wysoką temperaturę (ok. 1750°C), umożliwiającą utrzymywanie stali w stanie ciekłym. Stal otrzymywana w piecu martenowskim ma lepszą jakość niż otrzymywana w konwertorach, gdyż zawiera mniej fosforu i siarki. Pomimo to metody martenowskiej otrzymywania stali prawie wcale nie stosuje się na skalę przemysłową.

**Metody elektryczne** służą najczęściej do dalszego oczyszczania stali otrzymanej w piecu martenowskim. Rozróżnia się piece elektrodowe i indukcyjne, służące do rafinacji, czyli oczyszczania i uszlachetniania stali (rys. 1.11). **Piece elektrodowe** typu Heroult są zasilane prądem przemiennym trójfazowym i mają trzy elektrody wprowadzone do przestrzeni roboczej pieca przez jego sklepie-



**Rys. 1.10.** Schemat pieca martenowskiego

1 – przestrzeń robocza pieca (topnisko),  
 2 – głowica,  
 3 – kanały doprowadzające powietrze i gaz oraz odprowadzające spaliny,  
 4 – kanały żuźlowe,  
 5 – regeneratory,  
 6 – zawory,  
 7 – trzon pieca,  
 8 – sklepienie pieca



**Rys. 1.11.** Schemat pieca elektrycznego

1 – trzon pieca,  
 2 – ruchome sklepienie pieca,  
 3 – mechanizmy do ustawienia elektrod,  
 4 – elektrody

nie. Piec może być wyłożony warstwą kwaśną (krzemionkową) lub zasadową (dolomitową). Topienie odbywa się przez wytwarzanie łuku elektrycznego między elektrodami a wsadem.

Cały piec może być pochylany w celu wylania stali przez otwór spustowy. Aby wyregulować łuk elektryczny, elektrody można podnosić i obniżać, ponieważ w czasie pracy pieca ulegają one zużyciu. Sklepienie pieca może być obracane na bok, aby umożliwić jego załadowanie.

**Piece indukcyjne** składają się z tygla wykonanego z materiałów ogniotrwałych, otoczonego cewką indukcyjną, przez którą płynie prąd dużej częstotliwości, wzbudzający wewnątrz cewki i tygla szybkozmienne pole magnetyczne. To zmienne pole magnetyczne powoduje powstanie indukowanych prądów wirowych wewnątrz metalu stanowiącego wsad pieca. Powstające prądy wirowe nagrzewają i topią wsad. Stal wytworzoną w piecach elektrycznych nazywa się stalą szlachetną ze względu na jej dużą czystość, gwarantującą dobre własności użytkowe. Po rafinacji stali w piecach elektrycznych zawartość szkodliwych dodatków, fosforu i siarki jest mniejsza niż 0,03%. Piece elektryczne mogą służyć także do wytopu stali, jednak ze względu na wysoki koszt energii elektrycznej najczęściej wykonuje się w nich tylko rafinację.

### Podział i zastosowanie stali

Stale, czyli stopy żelaza z węglem i innymi pierwiastkami, są podstawowymi stopami metali od dawna stosowanymi w technice. Ze względu na wielką różnorodność stopów istnieją różne **kryteria podziału stali**.

Z punktu widzenia składu chemicznego stale dzieli się na:

- niestopowe (węglowe),
- odporne na korozję,
- inne stopowe.

Ze względu na podstawowe zastosowanie rozróżnia się stale:

- konstrukcyjne,
- maszynowe,
- narzędziowe,
- o specjalnych własnościach.

W zależności od sposobu wytwarzania można wyodrębnić stale:

- martenowskie,
- konwertorowe,
- elektryczne i in.

Przyjmując za kryterium podziału jakość, można rozróżnić stale:

- jakościowe,
- specjalne.

Według rodzaju produktów wyodrębnia się:

- blachy,
- pręty,
- rury,
- kształtowniki.

Najważniejsze kryterium podziału to skład chemiczny, ponieważ decyduje on o własnościach, a własności o zastosowaniu stali.

Klasyfikacja stali jest prowadzona według odpowiednich norm. Dotychczas prowadzono klasyfikację według Polskich Norm (PN), ale wejście Polski do Unii Europejskiej spowodowało konieczność ich dostosowania do systemu europejskiego (PN-EN oraz PN-ISO). Zgodny z normą PN-EN10020:2003 podział stali ze względu na skład chemiczny przedstawiono w tablicy 1-2.

Tablica 1-2

#### Podział ogólny stali ze względu na skład chemiczny

Stale niestopowe	Stale odporne na korozję $Cr \geq 10,5\%$ , $C \leq 1,2\%$	Inne stale stopowe
A. jakościowe	charakterystyczne ze względu na zawartość niklu	A. jakościowe
B. specjalne	charakterystyczne ze względu na własności	B. specjalne

**Stale niestopowe** to stopy żelaza z węglem i innymi pierwiastkami w postaci zanieczyszczeń o zawartości mniejszej od wartości granicznej. Wartości graniczne (w procentach masowych) dla pierwiastków: Al, B, Bi, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Nb, Pb, Se, Si, Te, Ti, V, W, Zr, lantanowców i innych (z wyjątkiem C, P, S, N) podano w wyżej wymienionej normie. Stale stopowe to stopy żelaza z węglem, które zawierają celowo wprowadzone – w ilości równej lub powyżej określonej granicy – dodatki stopowe. Pierwiastki, które najczęściej stanowią dodatki stopowe, to:

- chrom (Cr), zwiększający wytrzymałość i twardość oraz odporność na ścieranie i korozję;
- krzem (Si), zwiększający sprężystość i wytrzymałość;
- mangan (Mn), zwiększający wytrzymałość i sprzyjający głębokiemu hartowaniu (stale manganowe są odporne na uderzenia i ścieranie);
- molibden (Mo), zwiększający hartowność i wytrzymałość w podwyższonych temperaturach;
- wolfram (W), zwiększający hartowność, twardość i odporność na ścieranie oraz sprzyjający powstawaniu drobnoziarnistej struktury;
- wanad (V), zwiększający hartowność i drobnoziarnistość struktury.

**Stale niestopowe jakościowe** dzieli się ze względu na zastosowanie na stale:

- o wymaganych minimalnych własnościach wytrzymałościowych:
  - konstrukcyjne i przeznaczone na zbiorniki,
  - do zbrojenia betonu,
  - szynowe;
- o ograniczonych maksymalnych własnościach mechanicznych, używane na wyroby płaskie do kształtowania na zimno;
- o określonej zawartości węgla:
  - automatowe,
  - do ciągnięcia drutu,
  - do ulepszania cieplnego,
  - sprężynowe,
  - narzędziowe;

- o wymaganych właściwościach magnetycznych lub elektrycznych;
- do określonego zastosowania:
  - do produkcji opakowań,
  - do produkcji elektrod.

**Stale niestopowe specjalne** mają w porównaniu ze stalami niestopowymi jakościowymi większy stopień czystości. Ze względu na zastosowanie dzieli się je na stale:

- o wymaganych minimalnych własnościach wytrzymałościowych:
  - konstrukcyjne i przeznaczone na zbiorniki ciśnieniowe,
  - do sprężania betonu;
- o określonej zawartości węgla:
  - do ciągnięcia drutu,
  - do nawęglania,
  - do ulepszania cieplnego,
  - narzędziowe,
  - sprężynowe,
  - o wymaganych własnościach magnetycznych lub elektrycznych;
- do określonego zastosowania.

**Stale odporne na korozję** (muszą zawierać co najmniej 10,5% chromu i maksymalnie 1,2% węgla) według normy PN-EN 10020:2003 dzieli się ze względu na **zawartość niklu** na zawierające mniej niż 2,5% niklu oraz zawierające 2,5% niklu i więcej (tabl. 1–2). Drugim kryterium są **własności stali**, tworzące podział stali odpornych na korozję na:

- żaroodporne,
- żarowytrzymałe,
- nierdzewne.

**Stale stopowe jakościowe** według zastosowania dzieli się na:

- konstrukcyjne drobnoziarniste, spawalne;
- przeznaczone do produkcji szyn i kształtowników na obudowy górnicze;
- stale stopowe do produkcji wyrobów płaskich walcowanych na gorąco lub zimno;
- elektrotechniczne (ich główne dodatki stopowe to krzem i aluminium);
- z miedzią jako głównym dodatkiem stopowym.

**Stale stopowe specjalne** mają własności podwyższone przez precyzyjnie dobrany skład chemiczny i specjalnie określone warunki wytwarzania. Ze względu na zastosowanie dzieli się je na:

- przeznaczone do budowy maszyn (niklowe, chromowe, manganowe, molibdenowe, krzemowe);
- narzędziowe:
  - do pracy na zimno,
  - do pracy na gorąco,
  - szybko tnące;
- przeznaczone na łożyska toczne;
- konstrukcyjne;
- odporne na korozję atmosferyczną;



– o szczególnych właściwościach fizycznych (magnetyczne, niemagnetyczne i oporowe o określonym współczynniku rozszerzalności cieplnej).

### Oznaczenie stali

Norma PN-EN 10027 określa dwa systemy oznaczania stali:

- symbolowy, wg PN-EN 10027-1,
- cyfrowy, wg PN-EN 10027-2.

**Klasyfikację oznaczeń stali w systemie symbolowym** można podzielić na dwie grupy – według znaków wskazujących:

- na zastosowanie oraz mechaniczne lub fizyczne własności stali,
- na skład chemiczny stali.

**Oznaczenie stali z uwagi na zastosowanie oraz własności** składa się z ciągu liter i cyfr. Pierwszym symbolem jest litera wskazująca na przeznaczenie, a drugim liczba określająca mechaniczne własności stali (tabl. 1-3).

Tablica 1-3

### Znaki przedstawiające przeznaczenie oraz mechaniczne własności stali

Symbole główne	Oznaczenie cyfrowe (wartość w MPa)
S – stale konstrukcyjne E – stale maszynowe P – stale pracujące pod ciśnieniem L – stal na rury przewodowe	Liczba równa min. granicy plastyczności dla najmniejszej grubości wyrobu
R – stal na szyny lub w postaci szyn	Minimalna wytrzymałość na rozciąganie
B – stale do zbrojenia betonu	Charakterystyczna granica plastyczności
Y – stale do betonu sprężonego	Minimalna wytrzymałość na rozciąganie
H – wyroby płaskie walcowane na zimno ze stali o podwyższonej wytrzymałości do kształtowania na zimno	Minimalna granica plastyczności
T – stal na wyroby walcowane, taśmy i blachy opakowaniowe	Minimalna wytrzymałość na rozciąganie
M – stale elektrotechniczne	
D – wyroby ze stali miękkich do kształtowania na zimno (poza tymi ze znakiem H)	

Przykładowe oznaczenia stali: L355, S235, E410, B500.

**Oznaczenia stali według składu chemicznego** są następujące.

**A.** Stale niestopowe (z wyłączeniem stali automatowej) o zawartości manganu (Mn) mniejszej niż 1%; np. C40 – liczba oznacza średnią zawartość węgla w procentach pomnożoną przez 100 (w tym przypadku zawartość węgla jest równa 0,4%), C35, C50.

**B.** Stale niestopowe o zawartości manganu równej 1% lub większej i stale stopowe (z wyłączeniem szybko tnących) o zawartości każdego pierwiastka stopowego mniejszej niż 5%; symbol – **LPPz-z**, gdzie:

- **L** jest to liczba określająca średnią zawartość procentową węgla pomnożoną przez 100;

- **P** określa symbole pierwiastków chemicznych będących składnikami stopowymi stali, uporządkowane według malejącej ilości, przy czym jeśli dwóch pierwiastków jest procentowo tyle samo, to wpisuje się je w kolejności alfabetycznej;
- **z-z** są to liczby odpowiadające średniej zawartości procentowej poszczególnych pierwiastków stopowych, pomnożone przez określone współczynniki oddzielone od siebie kreską poziomą, przy czym wynik działania jest zaokrąglany do najbliższej liczby całkowitej; współczynniki do ustalania symboli liczbowych pierwiastków stopowych, przez które należy pomnożyć zawartość procentową danego pierwiastka w stali, to:
  - 4 dla **Cr, Co, Mn, Ni, Si, W**;
  - 10 dla **Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr**;
  - 100 dla **Ce, N, P, S**;
  - 1000 dla **B**.

Na przykład według nowej normy oznaczenie stali dawniej oznaczanej jako 09G2Cu, o maks. zawartości C 0,12%; Mn 1,2...1,8%; Cu poniżej 1% to 9MnCu6-10. Inne przykłady oznaczeń stali z tej grupy to 13MnNi6-3, 13CrMo4-5, 27MnCrB5-2.

**C.** Stale stopowe (z wyłączeniem szybko tnących) zawierające co najmniej jeden pierwiastek stopowy w ilości równej 5% lub większej; symbol **XLPPz-z**, gdzie:

- **X** jest to symbol grupy stali;
- **L** jest to liczba określająca średnią zawartość procentową węgla pomnożoną przez 100;
- **P** określa symbole pierwiastków chemicznych będących składnikami stopowymi stali, uporządkowane według malejącej zawartości w stali, przy czym jeżeli dwóch pierwiastków jest taka sama ilość, to wpisuje się je według kolejności alfabetycznej;
- **z-z** są to liczby odpowiadające średniej zawartości procentowej poszczególnych pierwiastków stopowych, pomnożonej przez wyżej wymienione współczynniki, przy czym wyniki są zaokrąglane do najbliższej liczby całkowitej.

Na przykład według nowej normy oznaczenie stali dawniej oznaczanej jako X7Ni9, o zawartości węgla średnio 0,07% (maks. 0,1%) i niklu średnio 9%, to X7Ni36. Inne przykłady oznaczeń stali stopowych z tej grupy to X6CrMoNb17-1, X38CrMoNb16, X5CrNiCuNb16-4.

**D.** Stale szybko tnące; znak stali składa się z liter HS i liczb oznaczających procentowe zawartości składników stopowych w następującej kolejności: wolfram, molibden, wanad, kobalt (W-Mo-V-Co), przy czym liczby oddziela się poziomymi kreskami.

Przykładowe oznaczenia: HS6-5-2-5, HS2-9-1-8.

Gdy wymienione symbole główne nie wystarczają do pełnej identyfikacji stali, dodaje się symbole dodatkowe. Wskazują one na gatunki stali i cechy wyrobów stalowych.

**System cyfrowy oznaczania stali** jest bardziej przydatny do przetwarzania danych. Został on tak skonstruowany, aby można go było wykorzystać do ozna-

czania nie tylko stali, ale i innych materiałów. Każdą stal można jednoznacznie określić za pomocą pięciu cyfr (w przyszłości siedmiu): X. XXXX. Pierwsza cyfra oznacza numer grupy materiału (1 to stal, a pozostałe, od 2 do 9, są przygotowane do oznaczania innych materiałów). Dwie następne cyfry oznaczają numer grupy stali (stal niestopowa jakościowa, specjalna, stopowa konstrukcyjna, odporna na korozję). Każda grupa ma swój kod. Czwarta i piąta cyfra oznaczają kolejny numer w danej grupie stali. Na przykład występujące w systemie cyfrowym oznaczenie stali 1.3555 odpowiada występującemu w dawniej obowiązującej PN oznaczeniu stali szybkonałej – SW18.

Przedstawione systemy oznaczeń stali zostały opracowane według nowych norm, dostosowanych do wymagań europejskich (PN-EN). W wielu podręcznikach, tablicach i poradnikach, wydawanych przed opracowaniem nowych norm, opisano stary podział i oznakowanie stali według Polskich Norm (PN). Aktualność norm zawsze należy sprawdzić przed ich zastosowaniem.

#### 1.2.4. Staliwa

Staliwo jest to stop żelaza z węglem, zawierający mniej niż 2,0% węgla, przeznaczony na odlewy i niepoddawany obróbce plastycznej.

Staliwo otrzymuje się, podobnie jak stal, w piecach konwertorowych oraz elektrycznych. Ma ono najlepsze własności mechaniczne spośród odlewniczych stopów żelaza. Po odpowiedniej obróbce cieplnej własności staliwa są zbliżone do własności stali o takim samym składzie chemicznym, jednak od nich gorsze. Dobre własności mechaniczne staliwa spowodowały, że stosuje się je w produkcji silnie obciążonych odlewów o skomplikowanych kształtach, które trudno byłoby wykonać przez kucie lub inny rodzaj obróbki plastycznej. Wadą staliwa jest duży (ok. 2%) skurcz odlewniczy, prawie dwukrotnie większy niż w przypadku żelixa, co utrudnia konstruowanie odlewów.

Staliwa można podzielić na:

- węglowe (niestopowe),
- stopowe.

**Staliwo niestopowe** według normy PN-ISO 3755:1994 występuje w postaci ośmiu gatunków staliw węglowych konstrukcyjnych ogólnego przeznaczenia.

Staliwa są oznaczane dwiema liczbami trzycyfrowymi lub dwiema liczbami trzycyfrowymi i literą W (gdy jest określona maksymalna zawartość poszczególnych pierwiastków). Pierwsza liczba określa minimalną wartość granicy plastyczności w megapaskalach, a druga minimalną wytrzymałość na rozciąganie, także wyrażoną w megapaskalach.

Przykłady oznaczeń: 230-450, 230-450W, 200-400.

Norma ta dzieli staliwa na dwie grupy – w zależności od wytrzymałości i od zawartości poszczególnych pierwiastków:

- I (zwykłej jakości),
- II (wyższej jakości).

Przykłady oznakowania staliwa węglowego to LI400, LII450, LII500, gdzie symbol L oznacza stal laną, liczba rzymska I lub II oznacza jakość, a liczba trzycyfrowa określa minimalną wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$ .

Staliwa węglowe znajdują zastosowanie np. w produkcji maszyn energetycznych, górniczych i rolniczych, taboru kolejowego oraz obudów łożysk ślizgowych.

**Staliwa stopowe**, tak jak stale, zawierają dodatki stopowe wprowadzone specjalnie w celu uzyskania założonych własności. Oznakowanie i podział staliwa stopowego określa norma PN-H/83156: 1997. Znak staliwa składa się z litery L, a następnie – podobnie jak przy oznakowaniu stali – liczby określającej średnią zawartość procentową węgla pomnożoną przez 100 oraz kolejno umieszczonych symboli oznaczających dodane pierwiastki stopowe według malejących zawartości procentowych składnika. Symbole oznaczające poszczególne pierwiastki to np. G – mangan, S – krzem, H – chrom, M – molibden, T – tytan, F (V) – wanad, J – aluminium. Jeśli danego pierwiastka jest mniej niż 2%, podaje się tylko symbol, bez liczby określającej zawartość procentową.

Przykłady oznakowania staliwa stopowego: L20G – staliwo manganowe o zawartości 0,2% węgla, L30GS – staliwo manganowo-krzemowe o zawartości 0,3% węgla.

Ze względu na zastosowanie staliwa stopowe dzieli się na:

- konstrukcyjne,
- do pracy w podwyższonych temperaturach,
- odporne na korozję,
- żaroodporne i żarowytrzymałe,
- odporne na ścieranie,
- narzędziowe.

Główne zastosowanie staliw stopowych to budowa części maszyn budowlanych, kół zębatach, szczęk do kruszarek, kół jezdnych do suwnic, korpusów sprzęgieł i elementów czerpaków.

Ogólnie staliwa mają własności mechaniczne zależne głównie od zawartości węgla. Można więc je podzielić na:

- **niskowęglowe**, o zawartości węgla od 0,1 do 0,25%, niskich własnościach odlewniczych i skłonności do pękania, stosowane na części maszyn przenoszące niewielkie obciążenia, np. części samochodowe, czy też korpusy silników elektrycznych;
- **średniowęglowe**, o zawartości węgla od 0,2 do 0,4%, stosowane np. na części maszyn bardziej obciążone niż wykonywane ze staliw niskowęglowych, jak koła zębata, podstawy maszyn, korpusy pras i młotów oraz cienkościenne odlewy kształtowe;
- **wysokowęglowe**, o zawartości węgla od 0,4 do 0,6%, stosowane na części maszyn bardzo silnie obciążone i narażone na ścieranie, np. koła zębata napędów walcowniczych.

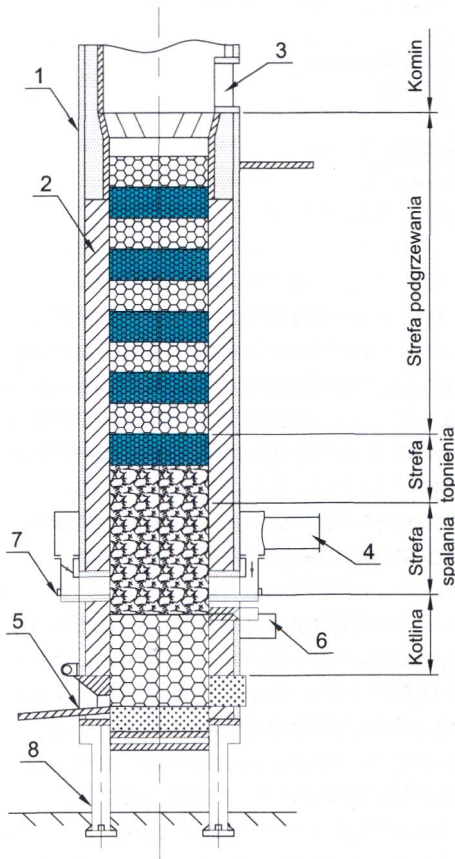
Obecnie ogranicza się wykorzystanie staliwa w budowie samochodów na rzecz żeliwa sferoidalnego, którego własności mechaniczne są zbliżone do własności staliwa, a skurcz odlewniczy jest dwukrotnie mniejszy. Staliwo jest

stosowane na elementy podwozi samochodów ciężarowych (wsporniki, dźwignie, obudowy przekładni głównej, pochwy mostów, elementy sprzęgające ciągników siodłowych).

### 1.2.5. Żeliwa

Żeliwo jest to stop żelaza z węglem, zawierający ponad 2% węgla oraz inne domieszki, takie jak krzem, mangan, fosfor i siarka. W żeliwach stopowych występują ponadto specjalnie wprowadzane dodatki stopowe zmieniające własności żeliwa, podobnie jak w przypadku omawianej wcześniej stali stopowej, np. chrom, nikiel, molibden, tytan.

Żeliwo otrzymuje się, przetapiając surówkę szarą w piecu zwanym żeliwiakiem, którego schemat budowy przedstawiono na rysunku 1.12.



**Rys. 1.12.** Schemat pieca żeliwiaka

1 – obudowa, 2 – materiał ogniotrwały,  
3 – okno wsadowe, 4 – przewód powietrza,  
5 – otwór spustowy żeliwa, 6 – otwór spustowy  
żużla, 7 – wziernik, 8 – podstawy

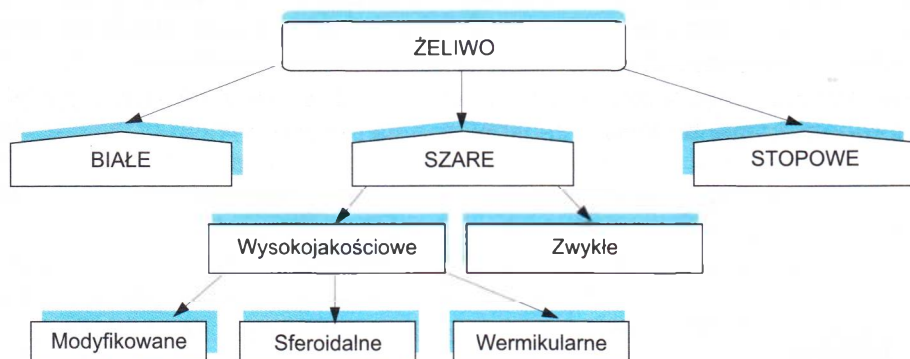
Piec jest zbudowany z blachy stalowej i wyłożony wewnątrz materiałem ogniotrwałym. Przez okno wsadowe, umieszczone w górnej części pieca, wprowadza się do niego metale przeznaczone do topienia (surówkę, złom żeliwny, złom stalowy) na przemian z koksem i topnikami. Za pomocą dyszy podaje się powietrze potrzebne do spalania koksu. Żeliwo spływa do dolnej części trzonu pieca, skąd

jest okresowo spuszczone przez otwór spustowy. W dolnej części pieca znajduje się także otwór do spuszczenia żużla.

Żeliwo charakteryzuje się dobrymi własnościami odlewniczymi i dlatego jest wykorzystywane do wytwarzania odlewanych części maszyn i pojazdów. Węgiel w żelwie może się wydzielić w postaci:

- cementytu (węglika żelaza o charakterystycznym połysku), tworząc żeliwo białe;
- grafitu, tworząc żeliwo szare.

Podział żeliw przedstawiono na rysunku 1.13.



Rys. 1.13. Podział żeliw

**Żeliwo białe** to materiał bardzo twardy i kruchy, nienadający się do obróbki skrawaniem, dlatego ma ograniczone zastosowanie i nie stosuje się go na części konstrukcyjne. Ze względu na dobrą odporność na ścieranie żeliwo białe jest stosowane na kule do młynów, ślimaki mieszalników, walce drogowe i przenośniki materiałów sypkich. Większe zastosowanie znajduje **żeliwo zabilane**, w którego strukturze na powierzchni występuje twarda powłoka z cementytu, a wewnątrz węgiel w postaci grafitu. Stosuje się je do wyrobu dźwigni zaworowych i popychaczy. Odlewy z żeliwa białego stanowią przede wszystkim produkt wyjściowy do produkcji żeliwa ciągliwego.

**Żeliwo szare** jest materiałem o dobrych własnościach odlewniczych, dobrej obrabialności, małej udarności i dużym współczynniku tłumienia drgań. Jego wytrzymałość na rozciąganie wynosi od 100 MPa do 350 MPa, a wytrzymałość na ściskanie jest około 3,5 razy większa od wytrzymałości na rozciąganie. Własności mechaniczne żeliwa szarego zależą od struktury osnowy metalicznej, która może być ferrytyczna, perlityczna lub ferrytyczno-perlityczna. Wytrzymałość żeliwa zależy także od postaci i wielkości wydzieliń grafitu, który może mieć postać płatkową, kulistą (sferoidalną), wermikularną (struktura pośrednia między grafitem płatkowym a sferoidalnym) i żarzenia. Żeliwo szare dzieli się na:

- zwykłe,
- wysokojakościowe sferoidalne,
- wysokojakościowe modyfikowane.

**Żeliwo szare zwykłe** ze względu na swoje własności (dobra skrawalność, dobra odporność na zużycie, duży współczynnik tłumienia drgań) znalazło szerokie zastosowanie jako materiał na kadłuby, tuleje i głowice cylindrów, kadłuby pomp wodnych, koła zamachowe, obudowy sprzęgieł, tarcze dociskowe sprzęgieł, bębny hamulcowe i rury dolotowe.

**Żeliwo sferoidalne** ma dobre własności wytrzymałościowe i plastyczne oraz dużą odporność na ścieranie, dzięki czemu znalazło szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach, takich jak przemysł maszynowy, górnictwo, kolejnictwo i motoryzacja. Z żeliwa sferoidalnego wykonuje się koła zębate, wrzeciona obrabiarek, wały rozrządu, wały korbowe, pierścienie tłokowe i zawory.

**Żeliwo modyfikowane** otrzymuje się przez dodanie do ciekłego żeliwa modyfikatorów, np. stopu krzemu z wapniem, żelazokremu lub magnezu. Modyfikowanie podwyższa zdecydowanie własności mechaniczne żeliwa – jego wytrzymałość na rozciąganie dochodzi wówczas do 450 MPa, a po obróbce cieplnej do 600 MPa. Z żeliwa modyfikowanego wykonuje się tarcze dociskowe sprzęgieł, koła zębate, tuleje cylindrów i wały korbowe. W wyniku długotrwałego wyżarzania żeliwa białego (przez kilkadziesiąt godzin) otrzymuje się **żeliwo ciągliwe** o bardzo dobrych własnościach mechanicznych i dobrej plastyczności. Z żeliwa ciągliwego wykonuje się obudowy tylnego mostu i przekładni kierowniczej, piasty kół, wsporniki, tuleje i łączniki rur.

W przemyśle duże zastosowanie mają również **żeliwa stopowe**, które dzięki zastosowaniu odpowiednich dodatków stopowych charakteryzują się podwyższoną odpornością na korozję, wysoką temperaturę, działanie substancji chemicznych i ścieranie. Najczęściej stosuje się żeliwa:

- **krzemowe** (odlewy wykonane z tego żeliwa są odporne na działanie kwasów, korozję i temperaturę);
- **chromowe** (odlewy wykonane z tego żeliwa są żaroodporne, odporne na korozję i ścieranie);
- **alumińowe** (odlewy wykonane z tego żeliwa są ognioodporne, żaroodporne, odporne na działanie środowiska gazowego tlenu, węgla i siarki);
- **niklowe** (odlewy wykonane z tego żeliwa są odporne na korozję i ścieranie).

**Oznaczanie żeliiw** określa norma PN-EN 1560:2001 (*System oznaczania żeliwa. Symbole i numery materiału*), według której istnieją dwa systemy oznaczania, tak jak w przypadku stali – symbolowy i cyfrowy.

**W systemie symbolowym** przewidziano sześć pozycji, określających odpowiednio:

- I EN (materiały znormalizowane);
- II GJ (G – materiał odlewany, J – żeliwo);
- III symbol postaci grafitu (L – grafit płatkowy, S – kulkowy, M – żarzenia, V – wermikularny, N – struktura niezawierająca grafitu, Y – struktura specjalna);
- IV symbol mikrostruktury osnowy (A – austenit, B – przełom czarny, F – ferryt, L – ledeburyt, M – martenzyt, P – perlit, Q – stan po hartowaniu, T – stan po hartowaniu i odpuszczaniu, W – przełom biały);

## V symbol klasyfikacji według:

- właściwości mechanicznych podawanych za pomocą liczb, a także liter określających metody wykonania wlewka próbnego (C – wzięty z odlewu, S – odlewany oddzielnie, U – przylany), przy czym liczby mogą przedstawiać:
  - minimalną wytrzymałość na rozciąganie [MPa], np. EN-GJL-150 (żeliwo szare,  $R_{m \min} = 150$  MPa),
  - minimalną wytrzymałość na rozciąganie [MPa] oraz minimalną wartość wydłużenia [%], oddzielone kreskami, np. EN-GJMW-350-4 (żeliwo ciągliwe białe,  $R_{m \min} = 350$  MPa, wydłużenie 4%),
  - wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie i udarność (należy podać za pomocą symboli temperaturę, w której badano udarność, tj. RT – temperatura pokojowa, RL – temperatura niska),
  - twardość podaną za pomocą symboli określających metodę pomiaru (HB – Brinnella, HR – Rockwella, HV – Vickersa) i odpowiedniej wartości liczbowej, np.: EN-GJL-HB155, EN-GJN-HV350;
- składu chemicznego podawanego za pomocą symbolu X, a następnie kolejnych symboli i liczb, odpowiadający dwóm rodzajom klasyfikacji:
  - z określeniem zawartości węgla – po znaku X podaje się zawartość węgla pomnożoną przez 100, następnie symbole i liczby odpowiadające zawartościom poszczególnych pierwiastków (podobnie jak w oznakowaniu stali), np. EN-GJN-X300CrNiSi9-5-2,
  - bez określenia zawartości węgla – po znaku X podaje się symbole chemiczne pierwiastków stopowych w kolejności malejących ich zawartości w stopie oraz ich zawartości procentowe zaokrąglone do liczb całkowitych, np. EN-GJL-XNiMn13-7;

## VI symbol wymagań dodatkowych, np. D – odlew surowy, H – odlew po obróbce cieplnej, Z – wymagania dodatkowe.

**Uwaga.** Oznaczenie żeliw według systemu symbolowego nie musi zawierać wszystkich sześciu symboli.

**W systemie cyfrowym** oznaczenie obejmuje dziewięć następujących znaków:

- znak od 1 do 3 – EN oznacza materiały znormalizowane;
- znak 4 – J oznacza żeliwo;
- znak 5 to litera charakteryzująca strukturę grafitu (jak w oznaczeniu na podstawie symboli);
- znak 6 charakteryzuje podstawowe właściwości żeliwa, np. wytrzymałość na rozciąganie, twardość, skład chemiczny;
- znak od 7 do 8 – od „00” do „99” charakteryzuje materiał;
- znak 9 charakteryzuje wymagania specjalne materiału; np. EN-JL1020 (żeliwo szare), EN-JM1010 (żeliwo ciągliwe białe).



## 1.3. Metale nieżelazne i ich stopy

### 1.3.1. Klasyfikacja i ogólna charakterystyka stopów metali nieżelaznych

Do metali nieżelaznych zalicza się wszystkie metale z wyjątkiem żelaza. Metale nieżelazne, a szczególnie ich stopy, znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle ze względu na swoje własności fizyczne, chemiczne, mechaniczne i technologiczne. Stopy metali mają niższą temperaturę topnienia w porównaniu z czystymi metalami oraz wyższą wytrzymałość i twardość, dobrą plastyczność i dużą odporność na korozję. Metale nieżelazne można podzielić ze względu na:

– gęstość:

- lekkie (aluminium, magnez, tytan),
- ciężkie (miedź, nikiel, wolfram, platyna);

– temperaturę topnienia:

- łatwo topliwe (cynk, cyna, kadm, magnez, ołów),
- trudno topliwe (chrom, kobalt, miedź, nikiel, platyna, złoto),
- bardzo trudno topliwe (wolfram, molibden, tantal),

co przedstawiono w tabelicy 1-1.

W tym punkcie zostaną omówione metale nieżelazne i ich stopy stosowane w produkcji pojazdów samochodowych. Podstawowe własności tych metali zawarto w tabelicy 1-4.

Tablica 1-4

#### Własności metali nieżelaznych

Własności	Miedź Cu	Nikiel Ni	Cynk Zn	Cyna Sn	Ołów Pb	Alumi- nium Al	Magnez Mg
Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	8,96	8,90	7,13	7,30	11,34	2,70	1,74
Temperatura topnienia [°C]	1083	1453	419	232	327	660	649
Ciepło właściwe w temperaturze 20°C [J/(kg · K)]	386	441	384	226	130	900	1000
Współcz. rozszerz. liniowej w zakresie 20...100°C [1/°C]	16,5 · 10 <sup>-6</sup>	13,7 · 10 <sup>-6</sup>	39,7 · 10 <sup>-6</sup>	23,0 · 10 <sup>-6</sup>	29,3 · 10 <sup>-6</sup>	23,8 · 10 <sup>-6</sup>	26,0 · 10 <sup>-6</sup>
Rezystywność w temperaturze 20°C [μΩ · m]	0,0167	0,068	0,059	0,115	0,206	0,027	0,042
Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ [MPa]							
– w stanie lanym lub miękkim	210...240	350...550	30...60	25...40	11...15	70...110	130...250
– w stanie prasowanym lub walcowanym	400...500	700...800	120...150	–	–	150...250	–
Wydłużenie $A_{10}$ [%]:							
– w stanie lanym lub miękkim	38...50	40...15	0,5...0,3	40	73...21	40...30	7...10
– w stanie prasowanym lub walcowanym	8...6	30...6	60...40	–	–	8...4	–
Twardość HB w stanie miękkim	40...50	80...90	32...40	ok. 5	3,0...4,5	15...25	ok. 25
Skurcz odlewniczy [%]	ok. 2,1	ok. 2,2	ok. 1,6	ok. 2,8	–	ok. 1,7	–

### 1.3.2. Aluminium i jego stopy

Aluminium (Al) jest metalem o barwie srebrnobiałej, odpornym na korozję, dobrze przewodzącym ciepło i elektryczność, dającym się dobrze kuć, przeciągać i walcować, mającym dobrą lejność, ale duży skurcz i małą wytrzymałość mechaniczną (jego wytrzymałość na rozciąganie wynosi około 60 MPa). Podstawowym surowcem do produkcji aluminium jest ruda zwana boksytem, zawierająca od 55% do 65% tlenku glinowego  $Al_2O_3$ . Aluminium otrzymuje się w wyniku dwóch procesów: w pierwszym uzyskuje się czysty tlenek  $Al_2O_3$ , w drugim – metodą elektrolityczną – aluminium. Według obowiązujących norm PN-EN 573-3:2007 wytwarza się 17 gatunków aluminium, różniących się stopniem czystości – od 99,0 do 99,99% zawartości czystego aluminium.

**Oznaczenie aluminium** składa się z liter oraz liczb, np. ENAW-Al99,6Ti, gdzie:

- EN to norma europejska (kodowanie na podstawie symboli chemicznych),
- A to aluminium,
- W to wyroby oraz wlewki do obróbki plastycznej (półwyroby),
- liczba 99,6 to zawartość procentowa czystego aluminium,
- Ti to symbol chemiczny pierwiastka stanowiącego główną domieszkę.

**Czyste aluminium** stosuje się do produkcji przewodów elektrycznych, aparatury chemicznej, wyrobów elektronicznych i elektrotechnicznych, folii, farb i proszków do platerowania naczyń. Ze względu na małą wytrzymałość zastosowanie czystego aluminium w budowie samochodów jest niewielkie i ogranicza się do tłoczonych pokryw i ekranów, elementów elektrotechnicznych oraz powłok platerowanych w celu zwiększenia odporności na korozję.

Zdecydowanie większe zastosowanie mają **stopy aluminium**, które ze względu na małą gęstość są zaliczane do stopów lekkich. Najczęściej stosowane dodatki stopowe to:

- krzem,
- miedź,
- magnez,
- mangan,
- nikiel,
- cynk.

Pierwiastki te wpływają na polepszenie wytrzymałości i obrabialności. Stopy aluminium dzieli się na:

- odlewnicze,
- do obróbki plastycznej.

**Stopy odlewnicze aluminium** zawierają w swoim składzie od 5% do 25% dodatków. Główne pierwiastki dodawane do tych stopów to krzem, miedź, magnez, mangan, nikiel, tytan.

Największe zastosowanie mają stopy odlewnicze aluminium z krzemem, który może występować w ilości od 0,8 do 23%. Stopy aluminium zawierające do 13% krzemu to siluminy. Charakteryzują się odpornością na korozję oraz dobrymi własnościami wytrzymałościowymi i odlewniczymi, dlatego są stosowane

na odlewy części maszyn o skomplikowanych kształtach i różnych grubościach ścianek.

Stopy aluminium zawierające od 4 do 8% miedzi charakteryzują się dobrymi własnościami odlewniczymi i plastycznymi oraz odpornością na korozję, ale wykazują skłonność do pęknięć na gorąco. Stosowane są na średnio i wysoko obciążone odlewy części maszyn oraz do wyrobu galanterii stołowej.

Norma PN-EN 1706:2001 dotyczy odlewniczych stopów aluminium.

**Oznaczenie stopu składa się z liter i liczb**, np. ENAC- $\text{AlSi12}$ , gdzie:

- EN to norma europejska (kodowanie na podstawie symboli chemicznych),
- A to aluminium,
- C to stopy odlewnicze,
- Al to stop aluminium,
- Si oznacza, że głównym pierwiastkiem stopowym jest krzem, a jego średnia zawartość zaokrąglona do najbliższej liczby całkowitej wynosi 12%.

W tym zapisie w przypadku kilku dodatków stopowych ich symbole umieszcza się w kolejności zmniejszającej się zawartości pierwiastków.

Przykłady zastosowania stopów odlewniczych aluminium do produkcji samochodów są następujące:

- ENAC- $\text{AlSi12}$  – do produkcji obudowy skrzynek biegów i skrzyń korbowych;
- ENAC- $\text{AlSi10Mg}$  – do produkcji głowic i bloków cylindrowych;
- ENAC- $\text{AlSi6Cu4}$  – do produkcji przewodów wlotowych, pokryw korpusów, głowic cylindrowych, misek olejowych;
- ENAC- $\text{AlCu4Ti}$  – do produkcji części przenoszących duże obciążenia.

**Stopy aluminium do obróbki plastycznej** mają mniejszą zawartość procentową dodatków stopowych niż stopy odlewnicze, ponieważ duże ilości dodatków stopowych pogarszają własności plastyczne. Główne pierwiastki dodawane do tych stopów to:

- magnez,
- miedź,
- krzem,
- mangan,
- chrom,
- nikiel,
- cynk.

Stopy z magnezem charakteryzują się odpornością na korozję i dobrymi własnościami plastycznymi, dlatego stosuje się je na elementy tłoczone i kute w urządzeniach do przemysłu spożywczego i chemicznego. Stopy z magnezem i krzemem to awiale. Wykorzystuje się je w motoryzacji i lotnictwie na średnio obciążone elementy o skomplikowanych kształtach. Durale to stopy wieloskładnikowe mające w swym składzie miedź i magnez, stosowane na konstrukcyjne elementy budowlane, lotnicze i samochodowe.

Norma PN-EN 573-3: 2007 dotyczy stopów aluminium do obróbki plastycznej.

**Oznaczenie stopu składa się**, tak jak w omawianym wcześniej przykładzie, **z liter i liczb**, np. ENAW- $\text{AlCu4Mg2}$ , gdzie:

- EN to norma europejska (kodowanie na podstawie symboli chemicznych);
- A to aluminium;
- W to stop do przeróbki plastycznej;
- Al to stop aluminium;
- Cu to główny pierwiastek stopowy, którego zawartość procentowa – zaokrąglona do najbliższej liczby całkowitej – wynosi 4%;
- Mg to kolejny pierwiastek, którego zawartość procentowa – zaokrąglona do najbliższej liczby całkowitej – wynosi 2%.

Przykłady zastosowania stopów aluminium do obróbki plastycznej w produkcji samochodów są następujące:

- ENAW- $AlMn1$  – do produkcji chłodnic, blach samochodowych i wyciskanych profili do budowy nadwozi;
- ENAW- $AlMgSi$  – do produkcji profili do budowy nadwozi i obręczy kół;
- ENAW- $AlCu4Mg1$  – do produkcji wahaczy podłużnych, poprzecznych i piast hamulcowych.

Istnieje także **system cyfrowy oznaczania aluminium i jego stopów**, określony w normie PN-EN 573-1:2006. Składa się on z czterocyfrowego kodu następującego po wcześniej omówionym oznaczeniu ENAW:

- cyfra pierwsza oznacza aluminium niestopowe, a w przypadku stopów – główny pierwiastek stopowy o największej zawartości procentowej, przy czym:
  - 1 – aluminium niestopowe,
  - 2 – miedź,
  - 3 – mangan,
  - 4 – krzem,
  - 5 – magnez,
  - 6 – magnez i krzem,
  - 7 – cynk,
  - 8 – inne pierwiastki,
  - 9 – na razie nieużywana;
- cyfra druga określa modyfikację aluminium (0 – brak modyfikacji, 1 do 9 – modyfikacja według ograniczeń średniej arytmetycznej zawartości składników w czystym aluminium);
- cyfry trzecia i czwarta oznaczają zawartość procentową czystego aluminium (np. ENAW-1070 to aluminium niestopowe, ponieważ pierwsza cyfra to 1, brak modyfikacji, ponieważ druga cyfra to 0, a zawartość czystego aluminium to 99,70%, ponieważ trzecia i czwarta cyfra to 7 i 0).

### 1.3.3. Miedź i jej stopy

Miedź (Cu) jest metalem barwy czerwonożółtej, miękkim, plastycznym i odpornym na korozję oraz bardzo dobrym przewodnikiem elektryczności i ciepła. Występuje w przyrodzie najczęściej w postaci rud siarczkowych ( $Cu_2S$ ,  $CuFeS_2$ ) oraz tlenowych ( $CuO$ ), a także jako miedź rodzima. Do celów przemysłowych miedź wytwarza się przez prażenie i wytapianie lub metodą elektrolityczną. Wy-

konuje się z niej przewody elektryczne oraz elementy urządzeń w przemyśle chemicznym i spożywczym. W celu polepszenia własności wytrzymałościowych czystej miedzi zaczęto wprowadzać do niej składniki stopowe w ilościach nieprzekraczających 3%. W ten sposób powstała miedź stopowa, której nazwa pochodzi od głównego dodatku stopowego:

- chromowa (do produkcji elektrod do zgrzewarek),
- kadmowa (do produkcji przewodów elektrycznych),
- arsenowa (do produkcji aparatury chemicznej).

**Oznaczenie miedzi stopowej** składa się z symbolu chemicznego miedzi (Cu) oraz symbolu chemicznego głównego składnika stopowego i liczby określającej jego zawartość procentową, np. CuCd1 to miedź kadmowa o zawartości procentowej kadmu równej 1%.

W przemyśle największe zastosowanie znalazły stopy miedzi, czyli mosiądze i brązy.

**Mosiądze** są to stopy miedzi z cynkiem (o zawartości do ok. 40% cynku) oraz z innymi metalami. Charakteryzują się dobrą skrawalnością, odpornością na korozję oraz dobrymi własnościami plastycznymi i odlewniczymi. Mosiądze mają zastosowanie w budowie części maszyn, układów zasilania i chłodzenia, instrumentów muzycznych, dzwonów, pomników, śrub okrętowych i elementów ozdobnych (m.in. klamek, okuć, świeczników, pucharów, biżuterii). W konstrukcjach samochodowych są stosowane w postaci półwyrobów przerabianych plastycznie (prętów, blach, taśm, rur), a także jako mosiądze wysokoniklowe, z których wykonuje się elementy sprężyste regulatorów, przekładników i urządzeń elektrotechnicznych. Własności mechaniczne mosiądzów zależą od zawartości cynku. Największą wytrzymałość (ok. 420 MPa) ma mosiądz o zawartości 45% cynku, a największą plastyczność – mosiądz o zawartości 30% cynku. Mosiądze można podzielić na:

- odlewnicze,
- do obróbki plastycznej.

**Mosiądze odlewnicze** są to stopy wieloskładnikowe, które zawierają pierwiastki modyfikujące ich własności: mangan i ołów (do 4% zawartości), aluminium (do 3% zawartości), żelazo (do 1,5% zawartości) i krzem (do 4,5% zawartości). Stosuje się je na odlewy części maszyn, łożysk i armatury.

**Mosiądze do obróbki plastycznej** mają mniejszą zawartość dodatków stopowych (aby polepszyć ich własności plastyczne). Stosuje się je w postaci odkuwek, prętów, blach i rur w przemyśle elektromaszynowym, samochodowym i okrętowym.

**Brązy** to stopy miedzi z cyną i innymi metalami. Charakteryzują się dobrymi właściwościami ślizgowymi, dużą odpornością na korozję i dobrą lejnością. Nazwy brązów pochodzą od głównego składnika stopowego; rozróżnia się np. brązy aluminiowe, ołowiowe, cynowe, krzemowe i manganowe. Ich własności i zastosowanie zależą od rodzaju i ilości dodatków stopowych. Brązy można podzielić, podobnie jak mosiądze, na:

- odlewnicze,
- do obróbki plastycznej.

**Brązy odlewnicze** są to stopy wieloskładnikowe, które zawierają w swoim składzie następujące pierwiastki: cynę i aluminium (do 11% zawartości), ołów (do 33% zawartości), cynk (do 7% zawartości), żelazo i nikiel (do 5,5% zawartości), krzem (do 4,5% zawartości), mangan (do 2% zawartości oraz fosfor (do 1,5% zawartości). Są stosowane jako części maszyn narażone na korozję, zużycie i obciążenia mechaniczne w przemyśle maszynowym, lotniczym, okrętowym, górniczym i chemicznym (np. na łożyska, panewki, elementy napędowe i aparatury chemicznej).

**Brązy do obróbki plastycznej** zawierają mniejsze ilości dodatków stopowych niż odlewnicze, podobnie jak mosiądze. Najczęściej stosowane do obróbki plastycznej są brązy:

- cynowe, o dużej wytrzymałości, dobrej skrawalności i plastyczności, odporne na ścieranie i korozję, stosowane na łożyska, sprężyny, membrany i tulejki korbowodów;
- aluminiowe, o dobrych własnościach mechanicznych, odporne na ścieranie i korozję oraz obciążenia przemienne, stosowane na łożyska o dużych naciskach i małych prędkościach, np. tulejki i ślimacznice;
- berylowe, o dużej wytrzymałości, odporne na zużycie, o dobrej przewodności elektrycznej i cieplnej; ponieważ nie iskrzą przy uderzeniach, są stosowane do wyrobu narzędzi pracujących w ośrodkach zagrożonych wybuchami (np. kopalnie podziemne oraz zakłady wydobywania ropy naftowej i gazu ziemnego);
- krzemowe, o dobrych własnościach wytrzymałościowych i dobrej spawalności, odporne na korozję, stosowane na tuleje kół i sprężyny.

Według PN-EN **oznaczenie stopów miedzi** rozpoczyna się od symbolu Cu, a następnie podaje się symbol głównego dodatku stopowego i liczbę całkowitą odpowiadającą zawartości procentowej tego pierwiastka. Dalej oznaczenie zawiera symbole chemiczne pierwiastków i liczby odpowiadające ich zawartościom procentowym – w kolejności malejącej zawartości. Jeśli zawartość pierwiastka jest mniejsza niż 1%, cyfrę się opuszcza, np.:

- CuMn12Ni3, brąz manganowy o zawartości 12% manganu i 3% niklu;
- CuBe2NiCo, brąz berylowy o zawartości 2% berylu i zawartości niklu i kobaltu poniżej 1%.

Dodatkowo w oznakowaniu stopów miedzi według PN-EN 1982:2002 mogą pojawić się symbole na końcu znaku (np. CuZn15As-C), przy czym:

- C to stop odlewniczy,
- B dostarczony w postaci gąsek,
- GS odlewany do form odlewniczych,
- GM odlew kokilowy,
- GZ odlew odśrodkowy,
- GC odlew ciągły,
- GP odlew ciśnieniowy.

Norma PN-EN 1173:2008 dopuszcza podanie po znaku stopu wartości minimalnej wytrzymałości na rozciąganie, wyrażonej w megapaskalach.

Zastosowanie przykładowych stopów miedzi używanych w produkcji samochodów (według oznakowań) jest następujące:

- CuPb17Sn5 do produkcji materiałów na odlewy warstwowe i łożysk silników spalinowych,
- CuSn7ZnPb do produkcji panewek i tulei łożysk ślizgowych oraz tulei sworzni tłokowych,
- CuAl11Ni do produkcji kół zębatych śrubowych i łożysk ślizgowych silnie obciążonych dynamicznie,
- CuZn37Pb do produkcji części odlewanych ciśnieniowo z zakresu elektrotechniki i mechaniki precyzyjnej.

### 1.3.4. Cynk i jego stopy

Cynk (Zn) jest metalem o barwie szarobiałej, o małej wytrzymałości i twardości, odpornym na korozję, o niskiej temperaturze topnienia, a dużej rozszerzalności cieplnej, jest plastyczny i ma dobre własności odlewnicze. Otrzymuje się go z rud siarczkowych (ZnS), tzw. blend, oraz z rud węglanowych (ZnCO<sub>3</sub>). Rudy te zawierają niewiele cynku, dlatego najpierw wzbogaca się je przez prażenie, a następnie przerabia na cynk metodą ogniową lub elektrolityczną. Cynk jest stosowany na powłoki ochronne stalowych blach i drutów, na rynny dachowe i na odlewy ciśnieniowe, jako składnik stopów i lutów oraz do wytwarzania baterii elektrycznych.

W pojazdach samochodowych czysty cynk jest stosowany tylko na pokrycia antykorozyjne elementów stalowych.

Stopy cynku zawierają jako składniki:

- aluminium (główny składnik stopów cynku występujących pod nazwą znal),
- mangan,
- miedź,
- magnez.

Mogą to być stopy odlewnicze i do obróbki plastycznej. Znale mają dobrą leżność, skrawalność i plastyczność oraz można je łatwo spawać. Znalazły zastosowanie w przemyśle maszynowym, wykonuje się z nich armaturę, obudowy, korpusy, części maszyn drukarskich i przyrządów pomiarowych.

**Oznaczenie stopów cynku** jest podobne jak pozostałych stopów metali nieżelaznych, czyli zawiera symbol cynku Zn, a następnie symbol głównego dodatku stopowego i liczbę odpowiadającą jego zawartości procentowej w stopie. Kolejno podaje się symbole dodatków stopowych i liczby odpowiadające ich zawartościom procentowym w kolejności malejącej, np. ZnCu1CrTi, ZnAl11Cu1. Własności odlewnicze stopów cynku i ich skład chemiczny podaje norma PN-EN 12844:2001.

Zastosowanie przykładowych odlewniczych stopów cynku (według oznakowań) jest następujące:

- ZnAl4Cu3 do produkcji odlewów ciśnieniowych o dużej dokładności wymiarowej, na korpusy i komory pływakowe gaźników;
- ZnAl10Cu5 na łożyska pracujące z małymi i średnimi prędkościami.

Zastosowanie przykładowych stopów cynku do przeróbki plastycznej:

- ZnAl4 do produkcji elektrotechnicznego osprzętu motoryzacyjnego,
- ZnAl4Cu1 do produkcji elementów wytłaczanych osprzętu elektrycznego.

### 1.3.5. Magnez i jego stopy

Magnez (Mg) jest metalem srebrzystobiałym, bardzo lekkim, o małej wytrzymałości, jest kowalny i ciągliwy oraz ma dużą aktywność chemiczną. Otrzymuje się go z minerału zwanego karnalitem ( $KClMgCl_2 \cdot 6H_2O$ ), magnezytu ( $MgCO_3$ ) i dolomitu  $CaCO_3 \cdot MgCO_3$  w dwóch etapach – najpierw uzyskuje się czysty chlorek magnezu, a następnie, na drodze elektrolizy, magnez. Zastosowanie czystego magnezu jest niewielkie, używa się go w pirotechnice oraz w przemyśle chemicznym i metalurgicznym.

W przemyśle często stosuje się stopy magnezu. Głównymi dodatkami tych stopów są aluminium i cynk, które zapewniają poprawę własności wytrzymałościowych i plastycznych, co wobec małej gęstości umożliwia wykorzystanie ich na odlewy stosowane w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym. Stopy te występują pod nazwą elektronów. Podobnie jak stopy pozostałych metali nieżelaznych, stopy magnezu dzieli się na:

- odlewnicze,
- do obróbki plastycznej.

**Stopy odlewnicze** są stosowane na odlewy dla przemysłu lotniczego, motoryzacyjnego i maszynowego, na korpusy pomp, armaturę, obudowy i części silników oraz silnie obciążone odlewy części lotniczych. **Stopy** magnezu do **obróbki plastycznej** także są wykorzystywane w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym, na poszycia samolotów i śmigłowców oraz na średnio i bardzo obciążone elementy konstrukcji lotniczych i samochodowych.

Zasada **oznakowania stopów magnezu** jest taka sama, jak dla wcześniej omówionych stopów metali nieżelaznych. Najpierw podaje się symbol magnezu (Mg), a następnie symbole pozostałych pierwiastków i liczby odpowiadające ich zawartościom procentowym w kolejności malejącej, np. MgZn3Cr.

Według normy PN-EN 1753:2001, określającej odlewnicze stopy magnezu, oprócz wymienionych symboli na początku znaku pojawiają się litery MC, oznaczające stopy odlewnicze, np. MCMgAl6Mn.

Zastosowanie przykładowych stopów odlewniczych magnezu i ich oznakowanie jest następujące:

- MgZn5Zr do produkcji skomplikowanych odlewów, na koła samochodów wyścigowych;
- MgAl16Zn3Mn do produkcji elementów silników pracujących w temperaturze do 120°C;
- MgAl7Mn do produkcji korpusów skrzyń biegów i silników.

Zastosowanie przykładowych stopów magnezu do obróbki plastycznej jest następujące:

- MgMn2 do produkcji zbiorników paliwa i osłon,



- MgAl13Zn do produkcji części podlegających średnim obciążeniom i o umiarkowanej odporności na korozję,
- MgAl18Zn do produkcji części podlegających dużym obciążeniom.

### 1.3.6. Nikiel i jego stopy

Nikiel (Ni) jest metalem o barwie srebrzystobiałej, miękkim, kowalnym, ciągliwym, skrawalnym, odpornym na korozję i żarowytrzymałym, daje się łatwo spawać i lutować. Nikiel otrzymuje się z rud siarczkowych przerabianych na tzw. kamień niklowy, z którego uzyskuje się tlenek niklowy, a z niego – poprzez redukcję węglem – czysty nikiel. Nikiel można otrzymać także innymi metodami. Stosuje się go w elektronice na katody i anody oraz inne elementy konstrukcyjne lamp elektronowych, w przemyśle chemicznym, do uzyskania powłok antykorozyjnych na częściach stalowych oraz – najczęściej – jako składnik stopowy. Stopy niklu odznaczają się dobrymi własnościami mechanicznymi nawet w bardzo wysokich temperaturach, mają mały współczynnik rozszerzalności cieplnej oraz są odporne na korozję i działanie substancji chemicznych. Ze względu na swe własności stopy niklu znalazły zastosowanie:

- w przemyśle chemicznym i petrochemicznym (np. na urządzenia do wydobycia i oczyszczania ropy i urządzenia do odsalania wody morskiej);
- w przemyśle lotniczym (np. na łopatki turbin);
- w przemyśle motoryzacyjnym (na elektrody świec zapłonowych i elementy kompensacji temperaturowej przyrządów pomiarowych);
- w przemyśle stoczniowym (do budowy rurociągów i platform przybrzeżnych);
- w przemyśle termoelektrycznym (na termoelementy, przewody kompensacyjne i podgrzewacze wody);
- w medycynie (jako tzw. stopy z pamięcią kształtu, niklowo-tytanowe, na implanty, gwoździe kostne i płytki do zespolień).

Sposób **oznakowania stopów niklu** jest taki sam jak wcześniej omawianych stopów metali nieżelaznych.

Stopy niklu można podzielić na poddawane obróbce plastycznej i odlewnicze.

Oznakowanie i zastosowanie przykładowych stopów niklu do obróbki plastycznej jest następujące:

- NiFe48MnSi do produkcji elektrod do spawania żeliwa,
- NiAl2MnSi1 do produkcji termoelementów i przewodów kompensacyjnych.

Oznakowanie i zastosowanie przykładowych stopów niklu do odlewania:

- NiCu30FeMn (stop Monela) do produkcji łopatek turbin, części pomp;
- NiCr15Fe5 (stop inconel) do produkcji części pieców metalurgicznych.

### 1.3.7. Wolfram i jego stopy

Wolfram (W) jest metalem srebrzystobiałym, bardzo twardym, trudno topliwym, ma dużą wytrzymałość w wysokich temperaturach, jest odporny na działanie kwasów i zasad. Z rud wolframu, z których najważniejsze to wolframit i szelit,

otrzymuje się trójtlenek wolframu ( $\text{WO}_3$ ), a z niego, przez redukcję wodorem – wolfram. Z wolframu wykonuje się włókna lamp oświetleniowych i elektronowych, antykatody lamp rentgenowskich, elementy grzewcze pieców i dysze silników odrzutowych. Wolfram jest najczęściej wykorzystywany jako składnik stopów.

Stopy wolframu są żaroodporne, twarde, trudno topliwe, wytrzymałe i odporne na korozję. Wysokotopliwe stopy wolframu, mające w swoim składzie niob (Nb), tantal (Ta) i molibden (Mo), są stosowane do produkcji łopatek turbin i części dysz. Żaroodporne stopy wolframu, mające w swoim składzie nikiel (Ni), kobalt (Co), żelazo (Fe) i chrom (Cr), są stosowane do produkcji narzędzi skrawających. Stopy wolframu mogą również być stosowane w produkcji styków elektrycznych, na obudowy półprzewodników i dysze raket. Wolframu używa się także do wytwarzania proszków węgla wolframu, który przetwarza się za pomocą technologii metalurgii proszków i wykorzystuje do produkcji narzędzi szybkoobrotowych, służących do obróbki skrawaniem.

### 1.3.8. Tytan i jego stopy

Tytan (Ti) jest to metal srebrzystobiały, lekki, plastyczny, o dużej wytrzymałości mechanicznej, odporny na korozję, żaroodporny i trudno topliwy. Otrzymuje się go różnymi metodami z rud tytanowych, takich jak rutil i tytanit. Jedną z metod polega na redukcji czterochloru tytanu za pomocą magnezu. Tytan jest stosowany przede wszystkim jako składnik stopów.

Stopy tytanowe są wytrzymałe, odporne na korozję, żaroodporne, skrawalne, plastyczne i spawalne, można je lutować i kleić. Są wykorzystywane w budowie samolotów, silników odrzutowych, raket, kadłubów okrętów, w technice medycznej do produkcji narzędzi chirurgicznych, w przemyśle chemicznym do produkcji aparatury i zbiorników kwasu azotowego oraz w motoryzacji do budowy silników i części układu jezdnych samochodów wyścigowych. Tytan jest też składnikiem węglaków spiekanych.

Przykładowe oznaczenie stopów tytanu to  $\text{TiAl6V4}$ ,  $\text{TiAl6V6Sn2}$ ,  $\text{TiAl4Mo4Sn2}$ .

## 1.4. Obróbka cieplna

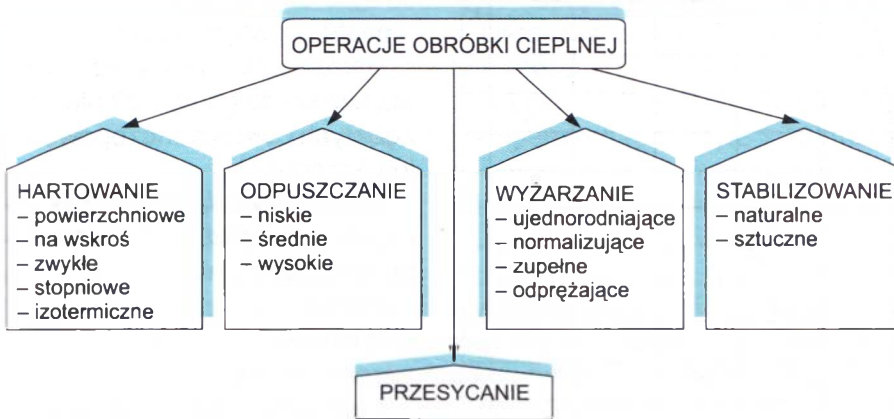
Obróbka cieplna polega na zabiegach cieplnych, powodujących zmianę struktury materiału, a przez to zmianę jego własności mechanicznych (np. wytrzymałości, sprężystości, twardości), fizycznych, chemicznych lub technologicznych (np. skrawalności). Obróbce takiej poddaje się stale, żeliwa i stopy metali nieżelaznych w stanie stałym. Przebieg obróbki cieplnej zależy od odpowiednio dobranej temperatury nagrzania, szybkości nagrzewania i szybkości chłodzenia. Prawidłowo przeprowadzona obróbka cieplna o właściwie dobranych tych parametrach jest jedną z technologicznych metod zwiększenia trwałości eksploatacyjnej części pojazdów. W materiałach poddawanych obróbce cieplnej mogą

powstać dodatkowe naprężenia, będące przyczyną zniszczenia obrobionego przedmiotu pod wpływem nawet nieznacznego obciążenia, dlatego tak ważny jest dobór odpowiednich parametrów obróbki. Większość zabiegów obróbki cieplnej prowadzi się w temperaturach, w których występują przemiany strukturalne w stopach.

Podczas obróbki cieplnej występują:

- **operacje cieplne**, czyli części procesu technologicznego (np. hartowanie, wyżarzanie, odpuszczanie);
- **zabiegi**, czyli części operacji (np. nagrzewanie, chłodzenie, wygrzewanie).

Operacje obróbki cieplnej przedstawiono na rysunku 1.14. Zostaną one dalej omówione na przykładzie stali, ponieważ zmiany struktury tego materiału przedstawiono wcześniej w podrozdziale 1.2.



Rys. 1.14. Operacje obróbki cieplnej

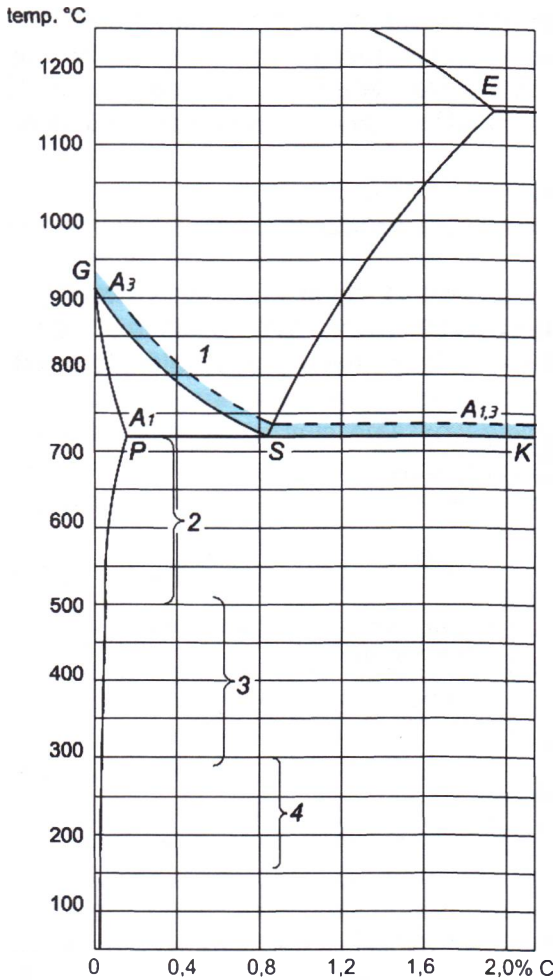
Jedną z podstawowych operacji obróbki cieplnej jest **hartowanie**. Polega ono na nagraniu metalu do określonej temperatury, zależnej od rodzaju materiału. Dla stali jest to temperatura około  $30^{\circ}\text{C}$  wyższa od temperatury przemiany  $A_3$ . Zakres temperatur hartowania przedstawiono na rysunku 1.15 – jest to pas wzdłuż linii  $A_3$ – $A_{1,3}$ .

Następnie stal jest wygrzewana w tej temperaturze w celu uzyskania jednokowej temperatury w całym materiale oraz poddawana chłodzeniu. Celem hartowania jest zwiększenie twardości, wytrzymałości i granicy plastyczności stali. Zwiększenie twardości uzyskuje się przez utworzenie struktury martenzytycznej, czyli przesyconego roztworu węgla w żelazie  $\alpha$ . Schemat operacji hartowania, składającej się z zabiegów nagrzewania, wygrzewania i chłodzenia, przedstawiono na rysunku 1.16.

W zależności od sposobu nagrzewania hartowanie można podzielić na:

- powierzchniowe,
- na wskroś.

**Hartowanie powierzchniowe** polega na bardzo szybkim ogrzaniu powierzchniowej warstwy materiału, a następnie szybkim chłodzeniu. Metoda ta pozwala



Rys. 1.15. Zakres temperatur hartowania i odpuszczania stali

- 1 – grzanie przed hartowaniem,
- 2 – odpuszczanie wysokie,
- 3 – odpuszczanie średnie,
- 4 – odpuszczanie niskie

części ze stali niestopowych oraz części ze stali stopowych. Po hartowaniu zwykłym stosuje się odpuszczanie, aby pozbyć się naprężeń hartowniczych.

Hartowanie stopniowe polega na nagraniu i wygrzaniu stali tak, jak w hartowaniu zwykłym, a następnie na stopniowym chłodze-

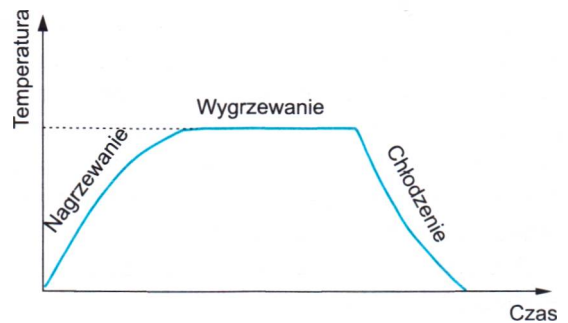
na uzyskanie twardej, odpornej na ścieranie powierzchni zewnętrznej oraz plastycznego rdzenia. W zależności od sposobu nagrzewania rozróżnia się hartowanie powierzchniowe:

- indukcyjne (ogrzewanie przedmiotu prądami o wysokiej częstotliwości),
  - płomieniowe (ogrzewanie przedmiotu za pomocą palnika gazowego),
  - kąpielowe (ogrzewanie przedmiotu w gorącej kąpeli solnej).
- Hartowanie powierzchniowe stosuje się do obróbki cieplnej kół zębatych, sworzni i czopów wałów korbowych.

Do **hartowania na wskroś** zalicza się, w zależności od sposobu chłodzenia, hartowanie:

- zwykłe,
- stopniowe,
- izotermiczne.

Hartowanie zwykłe polega na nagraniu materiału w odpowiedniej temperaturze i szybkim chłodzeniu. Czas wygrzewania wynosi od 25 do 50% czasu nagrzewania. Ten typ hartowania stosuje się do nieskomplikowanych



Rys. 1.16. Schemat procesu obróbki cieplnej – hartowania stali, składający się z procesów nagrzewania i chłodzenia

niu, najpierw w kąpeli solnej, a następnie w powietrzu, do temperatury otoczenia. Ten rodzaj hartowania nie powoduje powstawania tak dużych naprężeń, jak hartowanie zwykłe. Stosuje się go do hartowania części ze stali stopowych o skomplikowanych kształtach.

Hartowanie izotermiczne (z przemianą w stałej temperaturze) polega na nagraniu materiału tak, jak przy hartowaniu zwykłym, wygrzaniu w tej temperaturze, następnie chłodzeniu w kąpeli saletrzonej lub ołowiowej o temperaturze wyższej niż w hartowaniu stopniowym, a potem chłodzeniu w powietrzu. Zaletą tego sposobu hartowania jest powstawanie bardzo małych naprężeń wewnętrznych, dlatego po tej obróbce nie stosuje się odpuszczania. Hartowanie izotermiczne stosuje się do małych części ze stali niestopowych.

**Odpuszczanie** ma na celu usunięcie naprężeń wewnętrznych, powstałych w przedmiotach podczas hartowania, i poprawę własności plastycznych. Polega ono na nagraniu wcześniej zahartowanej stali do temperatury  $723^{\circ}\text{C}$  (niższej od temperatury  $A_1$ ), wygrzaniu w tej temperaturze i powolnym studzeniu w powietrzu lub w oleju. W zależności od temperatury (patrz rys. 1.15) rozróżnia się odpuszczanie:

- niskie,
- średnie,
- wysokie.

**Odpuszczanie niskie** prowadzi się w temperaturze  $150...250^{\circ}\text{C}$ . Odpuszczanie takie usuwa naprężenia hartownicze, ale zachowuje dużą twardość stali; stosuje się je przy produkcji narzędzi i przyrządów pomiarowych oraz części maszyn ze stali niestopowych.

**Odpuszczanie średnie**, które prowadzi się w temperaturze  $250...500^{\circ}\text{C}$ , zwiększa sprężystość i wytrzymałość, a zmniejsza kruchość; stosuje się je do obróbki cieplnej sprężyn, resorów, matryc, młotów pneumatycznych i części samochodowych.

**Odpuszczanie wysokie** prowadzi się w temperaturze od  $500^{\circ}\text{C}$  do temperatury  $A_1$  (patrz rys. 1.15). Zwiększa ono wytrzymałość oraz odporność na uderzenia i sprężystość. Stosuje się je do obróbki cieplnej części narażonych na uderzenia maszyn pracujących pod obciążeniem, jak np. osie, wały i korbowody.

**Wyżarzanie** jest to operacja obróbki cieplnej, która polega na nagraniu metalu do żądanej temperatury, wygrzaniu w tej temperaturze i powolnym chłodzeniu do temperatury otoczenia.

Można rozróżnić wyżarzanie:

- ujednorodniające,
- normalizujące,
- rekrytalizujące,
- zupełne,
- odprężające.

Zakres temperatur wyżarzania przedstawiono na rysunku 1.17.

### Wyżarzanie ujednorodniające

stali stosuje się w celu uzyskania jednakowego składu chemicznego w całym materiale. Proces ten prowadzi się w temperaturze około 1000...1250°C przez 10...15 godzin.

### Wyżarzanie normalizujące

umożliwia uzyskanie jednolitej struktury, polepszenie własności wytrzymałościowych i usunięcie naprężeń własnych. Proces ten polega na nagrzewaniu stali do temperatury 30...50°C powyżej linii GSE (rys. 1.17), wygrzaniu w tej temperaturze i chłodzeniu na powietrzu.

### Wyżarzanie rekrytalizujące

stosuje się w celu usunięcia zgniotu i przywrócenia stali (podanej wcześniej obróbce plastycznej na zimno) początkowej plastyczności. Prowadzi się je, nagrzewając materiał do temperatury 550...650°C, a następnie wygrzewając go w tej temperaturze i chłodząc na powietrzu.

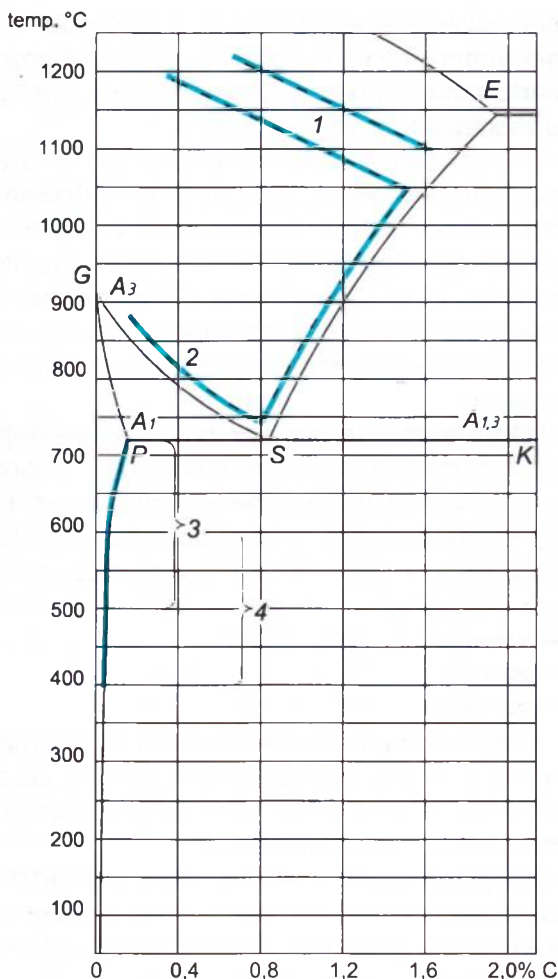
**Wyżarzanie zupełne** ma na celu uzyskanie jednolitej, drobnoziarnistej struktury stali, jej dużej ciągliwości i małej twardości, a także usunięcie naprężeń własnych. Proces ten prowadzi się, nagrzewając

materiał do temperatury 30...50°C powyżej linii GSK (rys. 1.17), wygrzaniu w tej temperaturze i powolnym chłodzeniu w wygaszonym piecu. Różnica między wyżarzaniem zupełnym a normalizującym polega na sposobie chłodzenia.

**Wyżarzanie odprężające** służy zlikwidowaniu naprężeń własnych w materiale. Proces ten prowadzi się, nagrzewając stal do temperatury nieprzekraczającej 550...650°C, wygrzewając ją w tej temperaturze i chłodząc.

**Stabilizowanie** (dawniej: sezonowanie) jest to operacja mająca na celu zmniejszenie naprężeń własnych i zapewnienie niezmienności wymiarów. Można rozróżnić stabilizowanie:

- naturalne,
- sztuczne.



Rys. 1.17. Zakres temperatur wyżarzania stali

- 1 – ujednorodniającego, 2 – normalizującego,  
3 – rekrytalizującego, 4 – odprężającego

**Stabilizowanie naturalne** to długotrwałe (od kilku do kilkunastu miesięcy) przetrzymywanie wyrobów w zmiennych warunkach atmosferycznych.

**Stabilizowanie sztuczne** polega na nagrzewaniu stali do temperatury 160°C, wygrzewaniu jej w tej temperaturze od kilku do kilkudziesięciu godzin, a następnie chłodzeniu.

**Przesycanie** to operacja, którą stosuje się, żeby poprawić własności plastyczne stopów oraz zwiększyć ich odporność na korozję. Proces ten prowadzi się, nagrzewając stal do temperatury stanu austenicznego, wygrzewając w tej temperaturze, a następnie szybko ochładzając. Przesycaniu poddaje się stale kwasoodporne.

## 1.5. Obróbka cieplno-chemiczna

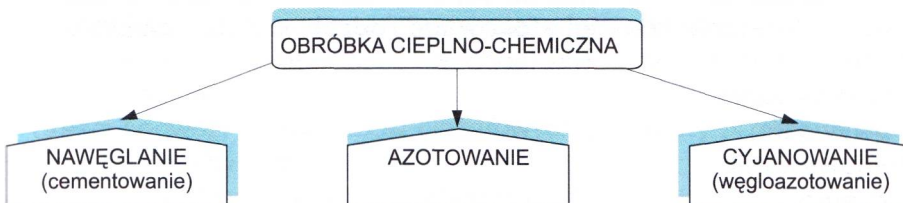
Obróbka cieplno-chemiczna polega na zabiegach cieplnych, które powodują zmianę składu chemicznego zewnętrznych warstw materiału i jego struktury na skutek aktywnego działania chemicznego ośrodka, w którym przedmiot się wygrzewa. Zmiana struktury materiału i związana z tym zmiana własności fizycznych i chemicznych następuje na skutek dyfuzji, czyli samorzutnego przemieszczania się atomów pierwiastka z ośrodka, w którym przeprowadza się obróbkę cieplno-chemiczną, w głąb materiału poddawanego obróbce. Szybkość dyfuzji zależy od czasu przeprowadzonej operacji i wzrasta wraz z podwyższeniem temperatury. W zależności od pierwiastka wprowadzanego do obrabianego materiału można rozróżnić:

- nawęglanie,
- azotowanie,
- cyjanowanie.

Operacje obróbki cieplno-chemicznej przedstawiono na rysunku 1.18.

**Nawęglanie**, inaczej cementowanie, polega na nasyceniu węglem zewnętrznej warstwy przedmiotu na głębokość 0,5...2,5 mm. Umożliwia to, po późniejszym zahartowaniu przedmiotu, uzyskanie twardej i odpornej na ścieranie warstwy zewnętrznej z zachowaniem miękkiego rdzenia. Ze względu na środowisko, w którym jest prowadzone, rozróżnia się nawęglanie:

- **w środowiskach stałych** (w proszkach), polegające na użyciu węgla drzewnego z dodatkiem węglanów, którymi zasypuje się obrabiany przedmiot, a następnie w specjalnej skrzynce wygrzewa się go w piecu;



Rys. 1.18. Operacje obróbki cieplno-chemicznej

- **w środowiskach gazowych**, polegające na doprowadzeniu do komory pieca, w której znajduje się przedmiot, gazu nawęglającego, np. gazu ziemnego z domieszką propanu;
- **w środowiskach ciekłych**, przeprowadzane w piecach wannowych, w których znajdują się sole nawęglające.

Proces nawęglania stosuje się do przedmiotów stalowych o zawartości węgla do 0,25%. Nawęglanie wykorzystuje się w produkcji wałów korbowych, wałów rozrządu, osi, tulei i kół zębatach.

**Azotowanie** polega na nasyceniu azotem zewnętrznej warstwy przedmiotu w podwyższonej temperaturze, wynoszącej od 500 do 850°C. Warstwa zewnętrzna przedmiotu zostaje wówczas utwardzona (bez hartowania) oraz staje się odporna na korozję i ścieranie. Azotowanie w zależności od ośrodka można podzielić na:

- **gazowe**: do komory pieca, w której znajduje się przedmiot, doprowadza się amoniak, pod wpływem temperatury rozkładający się na azot i wodór;
- **ciekłe** (kąpielowe): wygrzewa się przedmiot w kąpielach stopionych soli zawierających związki cyjanowe, które pod wpływem temperatury rozkładają się z wydzieleniem azotu i węgla; to azotowanie jest stosowane do przedmiotów ze stali lub żeliwa, mających w swoim składzie związki aluminium, chromu lub molibdenu.

Azotowanie wykorzystuje się do produkcji części narażonych na ścieranie przy niedużych naciskach, np. wałów korbowych, ślimaków i tulei cylindrowych.

**Cyjanowanie**, inaczej węgloazotowanie, polega na nasyceniu powierzchni przedmiotów jednocześnie węglem i azotem w temperaturze 500...950°C. Warstwa zewnętrzna ma po hartowaniu większą odporność na ścieranie i twardość.

W zależności od ośrodka cyjanowanie można podzielić na:

- **gazowe**, polegające na wygrzewaniu przedmiotu w mieszaninie amoniaku i gazu nawęglającego;
- **ciekłe** (kąpielowe), polegające na wygrzewaniu przedmiotu w stopionych solach zawierających cyjanek sodu (NaCN jest substancją trującą!) i sól obojętą.

Ten rodzaj obróbki wykorzystuje się do produkcji stalowych części urządzeń pomiarowych i precyzyjnych, odpornych na ścieranie, narzędzi tnących, kół zębatach, sworzni tłokowych i części sprzęgła.

Nawęglanie, azotowanie i cyjanowanie to najczęściej stosowane w przemyśle maszynowym operacje obróbki cieplno-chemicznej. W zależności od pierwiastka wprowadzanego przez dyfuzję do warstwy powierzchniowej przedmiotu wyróżnia się także **inne, rzadziej stosowane rodzaje obróbki cieplno-chemicznej**, np.:

- **nachromowywanie**,
- **naborowywanie**,
- **nakrzemowywanie**,
- **nasiarczanie**.



## 1.6. Materiały metalowe w pojazdach samochodowych

Produkcja współczesnego samochodu wymaga zastosowania wielu materiałów. Podstawowymi materiałami wykorzystywanymi w przemyśle motoryzacyjnym są nadal metale (żelazne i nieżelazne) oraz ich stopy. Materiały metalowe stanowią znaczny procent masy pojazdu, jednak postęp w dziedzinie inżynierii materiałowej zmierza do redukcji masy elementów samochodu oraz zmniejszenia ich podatności na korozję bez zmiany parametrów wytrzymałościowych, a w konsekwencji również do uzyskania mniejszego zużycia paliwa i poprawy dynamiki jazdy.

### Stale

W pojazdach samochodowych stosuje się następujące rodzaje stali: konstrukcyjną, sprężynową, zaworową, do nawęglania, do azotowania, do ulepszenia oraz nierdzewną. Elementy pojazdów samochodowych wykonywane ze stali to:

- miski olejowe,
- sworznie tłokowe,
- wały korbowe,
- korbowody,
- zawory dolotowe i wylotowe,
- wałki rozrzędu,
- koła zębate,
- wałki skrzyń biegów,
- wałki przegubowe,
- stożkowe koła napędowe i talerzowe,
- nadwozia samonośne,
- ramy,
- resory,
- osie,
- obręcze kół,
- zderzaki,
- elementy ozdobne.

### Staliwa

W ostatnich latach raczej odchodzi się od stosowania staliw w pojazdach samochodowych. Elementy, które nadal wykonuje się ze staliwa (średnio- i wysokowęglowego), to:

- części podwozi samochodów ciężarowych (obudowy przekładni, wsporniki, pochwy mostów i dźwignie);
- elementy sprzęgające ciągników siodłowych;
- bębny, jarzma i tarcze hamulcowe.

## **Żeliwa**

Żeliwa stosowane w pojazdach samochodowych to żeliwo szare oraz żeliwo z grafitem płatkowym i kulkowym (sferoidalne).

Elementami pojazdów samochodowych wykonywanymi z żeliwa są:

- bloki cylindrów,
- tuleje cylindrowe,
- pierścienie tłokowe,
- skrzynie korbowe,
- wały korbowe,
- korbowody,
- koła zębate,
- wałki rozrządu,
- widełki zmiany biegów,
- tarcze hamulcowe, bębny hamulcowe i siodła hamulcowe.

## **Aluminium**

Aluminium w postaci stopów pozwala zastąpić elementy pojazdów wykonywane dotychczas głównie z blachy stalowej. Parametry stopów aluminium zapewniają znaczne zwiększenie odporności elementów na korozję (zmniejszenie zużycia eksploatacyjnego) oraz dużą redukcję masy całego pojazdu.

Ze stopów aluminium w pojazdach samochodowych są wykonane:

- nadwozia (struktura nośna, drzwi, błotniki, pokrywa silnika, pokrywa bagażnika);
- tłoki silników;
- kadłuby silników;
- wały napędowe, półosie, wahacze;
- łożyska korbowodowe;
- kolektory dolotowe i wylotowe, miski olejowe, głowice;
- obręcze kół;
- obudowy skrzyni biegów i urządzeń wspomagania układu kierowniczego;
- ramy zawieszń;
- kielichowe mocowania kolumn amortyzatorów;
- chłodnice, elementy układu klimatyzacji, wymienniki ciepła;
- elementy konstrukcyjne foteli;
- zaciski hamulcowe;
- dźwigienki zaworów.

## **Miedź**

Miedź w pojazdach samochodowych stosuje się w postaci stopów. Podstawowe z nich to stopy z cyną (brązy), cynkiem (mosiądze), ołowiem, niklem, aluminium, krzemem i manganem.

Elementy, które wykonuje się ze stopów miedzi, to:

- tuleje korbowodowe;
- prowadnice i gniazda zaworów;
- przewody elektryczne;

- uzwojenia alternatorów, rozruszników, cewek zapłonowych i elektrycznych pomp paliwa;
- przewody paliwowe i olejowe, rurki skraplaczy i chłodnic;
- elementy sprężyste regulatorów, przekaźników i urządzeń elektrotechnicznych;
- złącza elektryczne;
- łożyska korbowodowe, tuleje i panewki łożysk;
- sprężyny.

### **Cynk**

Cynk w pojazdach samochodowych jest wykorzystywany na:

- powłoki antykorozyjne na elementach stalowych,
- styki osprzętu elektrotechnicznego.

### **Magnez**

W pojazdach samochodowych wykorzystuje się stopy magnezu głównie z cynkiem i aluminium (tzw. stopy ultralekkie, np. elektron). Wykonuje się z nich:

- odlewy obręczy kół samochodów wyścigowych,
- korpusy skrzyń biegów i silników,
- obudowy wału kierownicy,
- zbiorniki paliwa,
- miski olejowe,
- skrzynie korbowe,
- pokrywy głowic i mechanizmu rozrządu,
- wsporniki tablic przyrządów.

### **Nikiel**

W samochodach nikiel jest stosowany najczęściej jako składnik stopowy.

Elementy pojazdów samochodowych wykonywane ze stopów niklu to:

- elektrody świec zapłonowych,
- części (elementy) kompensacji temperaturowej przyrządów pomiarowych,
- powłoki antykorozyjne.

### **Wolfram**

W pojazdach samochodowych wolfram jest wykorzystywany głównie na:

- włókna żarówek oświetleniowych,
  - styki elektryczne
- oraz jako dodatek do olejów smarowych.

### **Tytan**

Tytan stosuje się przede wszystkim jako składnik stopów. Najczęściej jest używany do budowy elementów pojazdów narażonych na duże obciążenia mechaniczne, głównie w samochodach wyścigowych.

Z tytanu wykonuje się następujące elementy pojazdów samochodowych:

- pierścienie gniazd zaworów (jako składnik węglików spiekanych),

- sondy lambda,
- korpusy silników,
- elementy układu jezdnego.

**Inne materiały metalowe** stosowane w pojazdach samochodowych to:

- *itr*, *iryd* i *platyna* na elektrody i pokrycie elektrod świec zapłonowych;
- *rod*, *pallad*, *cyrkon* i *ruten* na katalizatory spalin i sondy lambda;
- *ołów*, *lit*, *kadm* i *srebro* na elementy akumulatorów.

## 1.7. Materiały niemetalowe

### 1.7.1. Klasyfikacja i charakterystyka

Do materiałów niemetalowych wykorzystywanych we wszystkich gałęziach przemysłu należą przede wszystkim:

- tworzywa sztuczne,
- szkło,
- tworzywa ceramiczne,
- materiały uszczelniające.

Najszerze zastosowanie w budowie maszyn mają tworzywa sztuczne.

**Tworzywa sztuczne** są to wielkocząsteczkowe związki organiczne otrzymane przez chemiczną przeróbkę surowców pochodzenia naturalnego (roślinnego lub zwierzęcego) oraz metodą syntezy z produktów przeróbki węgla, ropy naftowej i gazu ziemnego. W procesie produkcyjnym otrzymywania tworzyw sztucznych wprowadza się wiele substancji pomocniczych, np. barwniki, katalizatory, utwardzacze, napelniacze i antyutleniające, które modyfikują właściwości materiałów. Tworzywa sztuczne coraz częściej zastępują inne materiały konstrukcyjne, nie powodując obniżenia jakości gotowych wyrobów, a nawet ją podwyższając.

Zalety tworzyw sztucznych to:

- odporność na działanie czynników atmosferycznych i chemicznych;
- mała gęstość;
- dobre właściwości mechaniczne;
- dobre właściwości izolacyjne;
- łatwość obróbki poprzez tłoczenie, walcowanie, odlewanie (możliwość otrzymania wyrobów o skomplikowanych kształtach i zachowania niskich kosztów);
- możliwość występowania w różnych postaciach: jako materiały konstrukcyjne,
- włókna, kleje, materiały powłokowe;
- możliwość otrzymywania wyrobów o różnych barwach (nawet przezroczystych).

Do głównych wad tworzyw sztucznych zalicza się:

- małą odporność na działanie podwyższonej temperatury;
- łatwopalność;

– gorsze własności mechaniczne (twardość, wytrzymałość) niż w przypadku metali;

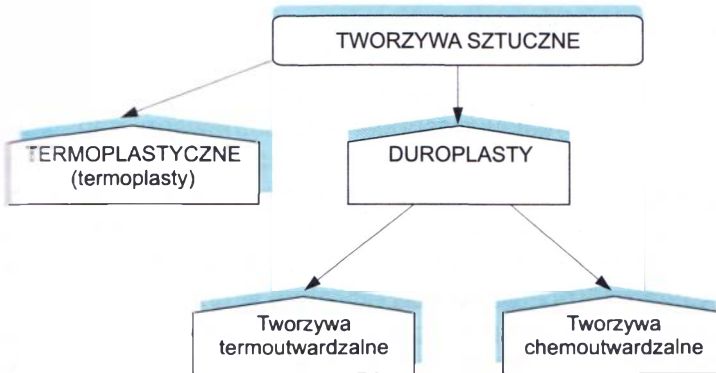
– trudności z recyklingiem.

Tworzywa sztuczne stanowią dziś bardzo liczną grupę materiałów (zaczęto je produkować na początku XX wieku), dlatego można je klasyfikować ze względu na różne kryteria, np. budowę, sposób powstawania, strukturę, zastosowanie lub własności.

Dalej przedstawiono najczęściej stosowany podział tworzyw sztucznych ze względu na własności fizyczne i technologiczne. Według tego kryterium tworzywa sztuczne dzieli się na:

- tworzywa termoplastyczne,
- duroplasty.

Podział tworzyw sztucznych przedstawiono na rysunku 1.19.



Rys. 1.19. Podział tworzyw sztucznych

**Tworzywa termoplastyczne** (termoplasty) są plastyczne w podwyższonej temperaturze, a twardnieją po obniżeniu temperatury. Proces ten jest odwracalny, co umożliwia ich wielokrotną przeróbkę. Na rynku jest dostępna cała gama tworzyw termoplastycznych, a ich liczba ciągle rośnie. Mogą one występować pod pełną nazwą, skrótowym oznaczeniem lub nazwą handlową producenta, np. polichlorek winylu, PCW lub winidur. Do najważniejszych tworzyw termoplastycznych należą:

- polistyren,
- polichlorek winylu,
- polipropylen,
- polietylen,
- poliamidy,
- polimetakrylan metylu.

Polistyren jest odporny na działanie olejów, alkoholi, wody, kwasów i zasad, ma małą gęstość i małą odporność cieplną, może być stosowany w temperaturach od  $-40$  do  $+75^{\circ}\text{C}$ , jest dobrym dielektrykiem, jest palny, ma małą udarność i twardość. Znajduje zastosowanie w przemyśle maszynowym, samochodowym,

elektromaszynowym i radiowo-telewizyjnym; wykorzystuje się go do produkcji folii spożywczych i do wyrobu przedmiotów użytkowych.

Polichlorek winylu jest odporny na działanie olejów, kwasów, zasad, wody i alkoholi, jest niepalny, ma dobre własności mechaniczne i elektroizolacyjne, może być stosowany w temperaturach od  $-30$  do  $+100^{\circ}\text{C}$ . Jest wykorzystywany w przemyśle elektromaszynowym, samochodowym i budownictwie oraz do wyrobu przedmiotów użytkowych (np. węży i namiotów ogrodniczych, siedzeń i oparcí foteli).

Polipropylen jest odporny na działanie czynników chemicznych, ma dobrą udarność i własności dielektryczne oraz małą gęstość, może być stosowany w temperaturach od  $-5$  do  $+100^{\circ}\text{C}$ . Jest wykorzystywany w przemyśle maszynowym i samochodowym oraz włókienniczym – do produkcji włókien na tkaniny przemysłowe.

Polietylen jest odporny na działanie czynników chemicznych i wody, ma małą gęstość, dobre własności elektroizolacyjne, dobrą udarność, łatwo się barwi, jest palny, może być stosowany w temperaturach od  $-70$  do  $+70^{\circ}\text{C}$ . Jest wykorzystywany w przemyśle elektrotechnicznym (np. do powlekania kabli) i do wyrobu przedmiotów użytkowych (np. artykułów gospodarstwa domowego, zabawek, opakowań).

Poliamidy mają dobre własności mechaniczne, dużą wytrzymałość, udarność, twardość i odporność na ścieranie oraz dobrą odporność chemiczną na działanie produktów naftowych, agresywnych płynów i gazów. Mogą być stosowane w temperaturach od  $-40$  do  $+100^{\circ}\text{C}$ . Są wykorzystywane w przemyśle maszynowym (np. do wyrobu łożysk i kół zębatych), włókienniczym – do wyrobu włókien i tkanin (np. obić tapicerskich, tkanin do filtrowania cieczy, pasów transmisyjnych) i motoryzacyjnym.

Polimetakrylan metylu jest przezroczysty, dobrze przepuszcza światło, łatwo daje się barwić, ma dobre własności mechaniczne, jest odporny na czynniki chemiczne i atmosferyczne, może być stosowany w temperaturach od  $-70$  do  $+100^{\circ}\text{C}$ . Jest wykorzystywany do produkcji szyb przeciwoodblaskowych, kloszy lamp, szyb, przyrządów kontrolnych i elementów aparatury optycznej.

Do **duropłastów** zalicza się tworzywa:

- termoutwardzalne,
- chemoutwardzalne.

Tworzywa termoutwardzalne podczas ogrzewania początkowo mięknią, a przetrzymane w podwyższonej temperaturze twardnieją w sposób nieodwracalny, dlatego niemożliwa jest ich powtórna przeróbka. Do najważniejszych tworzyw termoutwardzalnych należą:

- fenoplasty,
- aminoplasty.

Własności fenoplastów i ich zastosowanie zależą od ilości i rodzaju dodatków stosowanych w procesach otrzymywania tych tworzyw. Fenoplasty (żywice fenolowe) są stosowane do wyrobu tłoczyw. Produkty otrzymywane metodą tłoczenia i prasowania mają dobre własności mechaniczne i cieplne, dobrą odporność

chemiczną i odporność na działanie temperatury oraz trudną palność, są wykorzystywane w przemyśle maszynowym, elektrochemicznym, do wyrobu lakierów i emalii. Żywice modyfikowane służą do wyrobów laminatów, do powlekania tkanin lub papieru, a także do otrzymywania płyt izolacyjnych, kształtek lub rur, które wykorzystuje się w przemyśle maszynowym i elektrotechnice. Żywice impregnacyjne służą do produkcji klejów, kitów i spoiw.

Aminoplasty (żywice aminowe) to tworzywa termoutwardzalne, których właściwości i zastosowanie zależą, podobnie jak w przypadku fenoplastów, od ilości oraz rodzaju dodatków wprowadzonych podczas ich otrzymywania. Żywice aminowe również są stosowane do wyrobu tłoczyw (produktów otrzymywanych metodą tłoczenia, o dobrych właściwościach izolacyjnych i mechanicznych). Wykorzystuje się je w przemyśle elektrotechnicznym, do produkcji klejów, kitów i spoiw, do wyrobu laminatów, do powlekania papieru, na wykładziny ścian i mebli, do wyrobu materiałów termoizolacyjnych, dźwiękochłonnych i tworzyw piankowych, a także do powlekania włókien szklanych w celu wykorzystania jako elementy elektroizolacyjne.

Tworzywa chemoutwardzalne są tworzywami, które twardnieją już w temperaturze pokojowej pod wpływem czynników chemicznych (utwardzaczy) dodanych do tworzywa. Najważniejsze tworzywa chemoutwardzalne to:

- żywice poliestrowe,
- żywice epoksydowe.

Żywice poliestrowe twardnieją w reakcji ze styrenem po dodaniu inicjatora, w temperaturze otoczenia. Są średnio odporne na działanie kwasów i alkoholi oraz wykazują duży skurcz objętościowy. Bardzo często stosuje się je do wyrobu laminatów – żywicą zalewa się włókna szklane w postaci mat, tkanin lub ciętych włókien. Materiały tak wykonane mają dobre właściwości mechaniczne, antykorozyjne i izolacyjne, są wykorzystywane w przemyśle elektromaszynowym, lotniczym i samochodowym. Żywice poliestrowe stosuje się często do wyrobu tłoczyw. Produkty otrzymywane metodą tłoczenia mają dobre właściwości mechaniczne i izolacyjne, odznaczają się stabilnością kształtu, są wykorzystywane w przemyśle maszynowym i motoryzacyjnym.

Żywice epoksydowe są utwardzane na zimno lub na gorąco – w zależności od dodanego utwardzacza. Charakteryzują się odpornością na działanie czynników atmosferycznych i chemicznych, mają dobre właściwości mechaniczne i dielektryczne. Żywice epoksydowe stosuje się do produkcji klejów, lakierów, kitów i do wyrobu laminatów (żywicą zalewa się włókna szklane, papier lub tkaniny bawełniane). Laminaty epoksydowo-szklane wykorzystuje się w przemyśle motoryzacyjnym, a bawełniano-epoksydowe w przemyśle maszynowym. Produkty otrzymane metodą tłoczenia z tłoczywa uzyskanego z żywic epoksydowych mają dobrą udarność oraz właściwości izolacyjne, dlatego są stosowane w przemyśle elektrotechnicznym i elektronicznym. Produkty z żywic epoksydowych otrzymane metodą odlewania mają dobre właściwości izolacyjne i odporność chemiczną; są stosowane w przemyśle elektrotechnicznym i chemicznym.

**Szkło** jest to substancja otrzymywana przez ochłodzenie stopionych tlenków: krzemu, wapnia, sodu, potasu i innych substancji. W zależności od dodawanych do krzemionki ( $\text{SiO}_2$ ) składników otrzymywane szkło nosi odpowiednio nazwę: ołowiowe, kobaltowe, sodowe, boranowe, cyrkonowe.

Szkło jest przezroczyste, gładkie i niepalne, odporne na działanie czynników atmosferycznych i rozcieńczonych kwasów (z wyjątkiem fluorowodorowego) oraz zasad. Łatwo się kształtuje w stanie plastycznym, ma małą przewodność cieplną i elektryczną, jest nieprzenikliwe dla cieczy i gazów, zwykle nie przepuszcza promieni nadfioletowych (jedynie szkło kwarcowe stosowane w autobusach przepuszcza te promienie) i jest tanie w produkcji. Wadami szkła są kruchość i wrażliwość na szybkie zmiany temperatury. Istnieje wiele kryteriów, według których można podzielić szkła, np. wcześniej wymieniony podział został dokonany ze względu na skład chemiczny. Szkło można podzielić także ze względu na wygląd – na przezroczyste (bezbarwne, barwne) oraz zamażone (mleczne, barwione). Najczęściej stosuje się podział ze względu na przeznaczenie i według tego kryterium rozróżnia się szkło:

- **budowlane** (okienne, zbrojone siatką metalową, na luksfery, piankowe – stosowane jako materiał izolujący cieplnie i akustycznie);
- **techniczne** (laboratoryjne, optyczne, elektrotechniczne, włókna szklane, które mogą być produkowane w postaci tkanin, mat lub włókna ciętego, a zalane żywicami tworzą materiały kompozytowe);
- **gospodarcze** (wyroby gospodarstwa domowego, przedmioty ozdobne);
- **na opakowania** (dla przemysłu spożywczego, farmaceutycznego, chemicznego, kosmetycznego);
- **bezpieczne** (o dobrych własnościach wytrzymałościowych, trudno tłukące się, które może być otrzymywane przez hartowanie, zbrojenie siatką metalową lub przez sklejanie kilku warstw szkła z powłokami z tworzyw sztucznych, wykonywane w motoryzacji i budownictwie).

**Tworzywa ceramiczne** są to wyroby konstrukcyjne uformowane z surowców ceramicznych, jak np. glina zwykła, glina ilowa, kaolin, kwarc, mika itp., a następnie wypalane lub spiekane w wysokich temperaturach. Materiały ceramiczne mają dużą odporność chemiczną i cierną, dużą twardość i odporność na ścieranie oraz bardzo małą przewodność elektryczną. Najczęściej stosowane tworzywa ceramiczne to:

- **porcelana**, stosowana do produkcji izolatorów w przemyśle elektrotechnicznym, rur, wirników pomp wirnikowych i walców używanych w różnych gałęziach przemysłu, a także do produkcji wyrobów stołowych i artystycznych;
- **kamionka**, wykorzystywana do produkcji rur kanalizacyjnych, zbiorników, części aparatury chemicznej i izolatorów w przemyśle elektrotechnicznym;
- **klinkier**, stosowany do wyrobu cegły klinkierowej, płytek podłogowych, kostki nawierzchniowej oraz okładzin powierzchni urządzeń narażonych na działanie niszczących czynników atmosferycznych i chemicznych.

Osobną grupę tworzyw ceramicznych tworzą **cermetale**, czyli materiały otrzymywane w wyniku mieszania proszków metali z niemetalami i prasowania ich



pod wysokim ciśnieniem, a następnie spiekania w wysokiej temperaturze. Cermetale są to materiały twarde, odporne na ścieranie i żaroodporne, odznaczają się także odpornością na gwałtowne zmiany temperatury. Materiały te są stosowane na części robocze narzędzi skrawających, części samolotów i samochodów (łopatki turbin gazowych samolotów, tłoki silników) oraz elementy aparatury elektrotechnicznej. Najczęściej stosowany składnik cermetali to trójtlenek glinu ( $Al_2O_3$ ) z domieszkami korundu, chromu, magnezu i aluminium.

**Materiały uszczelniające** służą do wykonywania elementów zapewniających szczelność połączeń między poszczególnymi częściami maszyn i urządzeń.

Niemetalowe materiały uszczelniające wytwarza się najczęściej z gumy i tworzyw sztucznych.

**Gumę** uzyskuje się przez przeróbkę kauczuku naturalnego lub syntetycznego z udziałem substancji nadających jej określone własności. Charakterystyczne cechy gumy to odporność na działanie substancji chemicznych, duża elastyczność w szerokim zakresie temperatury, odporność na ścieranie, własności amortyzacyjne, odporność na trwałe odkształcenia przy ściskaniu oraz mała przepuszczalność gazu i wody. Guma jest stosowana powszechnie w motoryzacji i w kolejnictwie oraz w maszynach i urządzeniach dla wszystkich gałęzi przemysłu.

Z **tworzyw sztucznych**, których własności przedstawiono wcześniej, największe zastosowanie jako materiały uszczelniające i izolacyjne mają polichlorek winylu, polietylen, poliamid, polipropylen i silikon. Mogą one występować w postaci mas uszczelniających – kitów (w postaci pasków lub wałków) i szczeliw rozprężnych (szczeliwo wprowadzane pomiędzy uszczelniane elementy utwardza się i zwiększa swoją objętość) oraz płyt wielowarstwowych (warstwy włókien impregnowanych żywicami).

Jako niemetalowe materiały uszczelniające można stosować także korek, tekturę, filc, skórę i włókna bawełniane lub konopne.

Omawiając materiały stosowane w przemyśle, nie można pominąć osobnej grupy nowoczesnych materiałów kompozytowych.

**Materiały kompozytowe** składają się z dwóch lub więcej komponentów o różnych właściwościach. Właściwości nowo powstałego materiału są inne – zwykle lepsze – niż składników wyjściowych. Z reguły jeden ze składników jest lepiszczem odpowiedzialnym za spójność materiału, jego twardość i odporność na ściskanie, a drugi – komponentem konstrukcyjnym, odpowiadającym za własności mechaniczne kompozytu.

Najczęściej stosowanym lepiszczem są żywice syntetyczne – poliestrowe, poliamidowe, epoksydowe, silikonowe lub poliuretanowe – których opis i własności przedstawiono wcześniej.

Elementem konstrukcyjnym w materiałach kompozytowych najczęściej są włókna – szklane, węglowe, borowe i korundowe – kwarc lub azbest, a także kevlar. Włókna zapewniają bardzo dobre własności wytrzymałościowe kompozytów. Elementy konstrukcyjne mogą być wprowadzane do kompozytu nie tylko w postaci włókien ciągłych i tkanin, ale także cząstek, płatków lub warstw.

Trudno ogólnie przedstawić określone własności materiałów kompozytowych ze względu na ich wielką różnorodność, zależną od zastosowanych materiałów wyjściowych. Zasadniczo są to materiały lekkie, o dużej wytrzymałości mechanicznej, coraz szerzej wykorzystywane w różnych gałęziach przemysłu. Mają one zastosowanie np.:

- w sporcie (na kadłuby łodzi, maszty łodzi, kajaki, tyczki, narty, kije narciarskie i golfowe, rakietki tenisowe oraz wędki);
- w lotnictwie (na śmigła samolotów, osłony silników odrzutowych, wnętrza samolotów i kadłuby samolotów);
- w motoryzacji (na elementy nadwozi samochodów wyścigowych i ciężarowych, autobusów i przyczep kempingowych, na zbiorniki paliwa, tablice rozdzielcze, nadkola i zderzaki);
- w medycynie (na różnego rodzaju implanty).

Składnikami kompozytów mogą być również materiały metalowe. Kompozyty to materiały z ogromną przyszłością.

### 1.7.2. Materiały niemetalowe w pojazdach samochodowych

Postęp w dziedzinie inżynierii materiałowej w ostatnich latach skutkuje coraz częstszym stosowaniem w pojazdach samochodowych materiałów innych niż metalowe. Geneza tego zjawiska tkwi w sporcie motorowym, który był i jest nadal swoistym poligonem doświadczalnym dla nowych technologii i materiałów pozwalających realizować dążenie do redukcji masy samochodu bez pogorszenia właściwości wytrzymałościowych w celu uzyskania lepszych wyników na zawodach sportowych. Materiały niemetalowe, wykorzystywane w ostatnich dekadach dwudziestego wieku głównie jako elementy wyposażenia wnętrza, izolacji instalacji elektrycznych i przewodów oraz jako uszczelnienia, są obecnie powszechnie stosowane w pojazdach samochodowych również w innych elementach, wykonywanych dotychczas z materiałów metalowych.

#### Tworzywa sztuczne

Z **termoplastów** wykonuje się:

- osłony, folie i izolacje nadbudówek (z polistyrenu, w tym pianki polistyrenowej);
- maty podłogowe, listwy ochronne drzwi, progów i krawędzi błotników, izolacje przewodów, węże, folie, okładziny tapicerskie kierownicy, dźwigni zmiany biegów, tablice rozdzielczej, foteli i ścian (z polichloru winylu, w tym tzw. sztucznej skóry);
- korpusy, osłony, wirniki wentylatorów, zbiorniki (paliw, olejów, smarów i innych płynów eksploatacyjnych), podkładki, okładziny wnętrza (drzwi, ścian, tablice rozdzielczej), elementy tapicerskie oparcia i siedzeń (z polipropylenu i polietylenu miękkiego oraz twardego, w tym pianki);
- koła zębate, paski zębate, tuleje, pływak gaźników i czujników poziomu paliwa, obudowy filtrów paliwa, przewody benzynowe, pancerze i osłony cięgien, wirniki wentylatorów, dolne i górne zbiorniki chłodnic, linki holownicze i podkłady lakiernicze (z poliamidów, w tym włókien poliamidowych);

– osłony świateł, soczewki, izolacje i podkłady lakiernicze (z polimetakrylanu metylu, tj. szkła akrylowego).

Z **duroplastów**, w tym chemo- i termoutwardzalnych, wykonuje się:

- elementy lub całość poszycia nadwozia, elementy jego wyposażenia (zderzaki, spoilery, klamki, kołpaki kół, obudowy lusterek), zbiorniki wysokociśnieniowe, obudowy filtrów powietrza oraz tłoczywa do wykonania innych elementów pojazdów (z żywic poliestrowych);
- spoiwo metali w elementach pojazdów i spoiwo okładzin hamulcowych (z żywic epoksydowych jako żywic klejowych);
- kolektory silnika (z zytelu – odmiany nylonu), elementy nadwozia (z żywicy melaminowej), elementy pojazdów wykonane ze zbrojonych włóknami tworzyw sztucznych (z żywicy lanej – fenolowej i silikonowej, stosowanej także jako składnik impregnacyjny materiałów izolacyjnych), podkłady lakiernicze (z żywicy fenolowej i silikonowej), środki do pielęgnacji nadwozia (m. in. z żywicy silikonowej), tablice przyrządów, wtyczki, obudowy elektrycznych podzespołów, kształtki i części izolacyjne (tłoczywa), tablice sterownicze, obudowy, koła zębate (z materiałów laminowanych).

### Szkło

Elementy pojazdów samochodowych wykonuje się głównie ze szkła bezpiecznego – hartowanego lub wielowarstwowego (laminowanego). Są to:

- szyby przednie (obligatoryjnie ze szkła wielowarstwowego),
- pozostałe szyby (ze szkła jednowarstwowego hartowanego),
- elementy żarówek,
- lusterka,
- osłony tylnych lamp pozycyjnych i kierunkowskazów (ze szkła akrylowego),
- elementy tablicy przyrządów (ze szkła akrylowego).

### Tworzywa ceramiczne

Elementami wykonanymi z tworzyw ceramicznych (ceramiki i cermetali) są w pojazdach samochodowych:

- tarcze hamulcowe,
- wałki rozrządu,
- gniazda wtykowe,
- wkładki przełączników,
- wkładki ceramiczne sondy lambda,
- zawory dolotowe i wylotowe,
- łożyska ceramiczne,
- korbowody,
- turbosprężarki,
- części podzespołów elektronicznych.

### Materiały uszczelniające i gumy

W pojazdach samochodowych materiały uszczelniające (kauczuk naturalny i syntetyczny oraz guma) są stosowane na:

- opony;
- dętki;
- przewody układu ogrzewania;
- elementy sprężyste amortyzatorów i wahaczy;
- elementy absorbujące energię drgań (łączniki płytkowe i tulejowe);
- elementy zawieszzeń silników, skrzynek biegów, nadwozi, kabin kierowcy i wałków napędowych;
- paski klinowe i rozrządu;
- pokrycia izolacyjne przewodów elektrycznych;
- uszczelki nadwozia (szyb, drzwi oraz pokryw bagażnika i komory silnika);
- uszczelki połączeń części mechanicznych i hydraulicznych;
- masy uszczelniające wewnętrznych złączy nadwozia;
- masy wygłuszające elementów blaszanych;
- wielowarstwowe płyty dźwiękochłonne (izolacja podłóg, przegród czołowych i tylnych oraz osłon silników).

### **Materiały kompozytowe**

Elementy pojazdów samochodowych wykonane z materiałów kompozytowych (węglowych, szklanych, kevlarowych) to:

- elementy konstrukcyjne nadwozi i podwozi;
- pokrywy komory silnika, bagażnika;
- gniazda osadzania lamp;
- obudowy skrzynek biegów;
- obudowy chłodnic;
- okładziny sprzęgieł;
- okładziny hamulców;
- zderzaki;
- nadkola;
- zbiorniki paliwa;
- tablice rozdzielcze;
- paski klinowe;
- obudowy części wyciszających;
- maty uszczelniające i wzmacniające wewnątrz nadwozia;
- elementy konstrukcyjne opon (włókna kevlarowe);
- uszczelki głowic.

## **1.8. Pytania kontrolne**

1. Jakie znasz własności mechaniczne metali i stopów metali?
2. Co to jest twardość i jakie znasz metody pomiaru twardości?
3. Jakie znasz stopy żelaza?
4. Co to jest stal i jak się ją otrzymuje?
5. Jakie znasz kryteria podziału stali?

6. Jak otrzymuje się staliwa i jakie mają one własności i zastosowanie?
7. Jak otrzymuje się żeliwa i jakie mają one własności i zastosowanie?
8. Co to jest układ żelazo-węgiel i czego można się na jego podstawie dowiedzieć?
9. Korzystając z podręcznika, odczytaj i wyjaśnij oznakowanie stali:  
13MnNi6-3, 27MnCrB5-2.
10. Korzystając z podręcznika, odczytaj i wyjaśnij oznakowanie żeliwa:  
EN-GJL-HB155, EN-GJMW-350-4.
11. Podaj dwa przykłady metali nieżelaznych, ich własności i zastosowanie.
12. Jakie zastosowanie mają materiały metalowe w pojazdach samochodowych?
13. Jakie znasz rodzaje tworzyw sztucznych?
14. Podaj dwa przykłady tworzyw sztucznych, ich własności i zastosowanie.
15. Co to są materiały kompozytowe?
16. Jakie zastosowanie mają materiały niemetalowe w pojazdach samochodowych?

## 2. Techniki wytwarzania

### 2.1. Klasyfikacja technik wytwarzania

Techniki wytwarzania to dział wiedzy obejmujący wytwarzanie i przetwórstwo surowców w celu uzyskania wyrobu finalnego o określonych własnościach użytkowych.

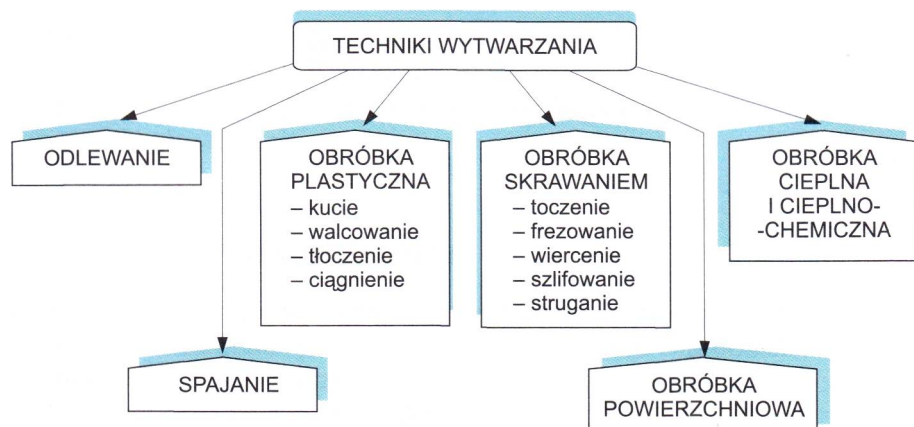
W przemyśle maszynowym do technik wytwarzania zalicza się wszystkie rodzaje obróbek stosowanych do kształtowania części maszyn i urządzeń, sposoby spajania (łączenia) części i nadawania im założonych wcześniej własności użytkowych oraz techniki pomiarowe kontroli jakości.

Najważniejsze techniki wytwarzania stosowane w przemyśle maszynowym to:

- obróbka skrawaniem,
- obróbka plastyczna,
- odlewanie,
- obróbka cieplna i cieplno-chemiczna,
- spajanie,
- obróbka powierzchniowa.

Podział technik wytwarzania przedstawiono na rysunku 2.1.

Niektóre techniki wytwarzania przedstawiono w innych podrozdziałach podręcznika: np. obróbkę cieplną w podrozdziale 1.4, obróbkę cieplno-chemiczną w podrozdziale 1.5, a spajanie w podrozdziale 3.4.



Rys. 2.1. Podział technik wytwarzania

O jakości wyrobu finalnego i jego koszcie decyduje właściwy dobór techniki wytwarzania oraz prawidłowy sposób jej wykonania. Nowoczesne techniki wytwarzania są wspomagane przez systemy komputerowe, np. CAD/CAM/CAE. Wspomaganie obejmuje zarówno fazę projektów, obliczeń technologicznych oraz wytwarzania produktów, jak i kontrolę jakości wyrobów.

## 2.2. Odlewanie

### 2.2.1. Wiadomości wstępne

**Odlewanie** jest to metoda wytwarzania części maszyn lub przedmiotów polegająca na wypełnieniu ciekłym metalem lub stopem metalu odpowiednio przygotowanych form. Materiał, krzepnąc, zachowuje kształt nadany mu w stanie ciekłym. Przedmioty otrzymywane tą metodą to **odlewy**. Kształt wewnętrzny formy jest odwzorowaniem kształtu odlewu. Odlew może być na całym przekroju jednolity lub pusty w środku – wówczas stosuje się dodatkowo formy, zwane rdzeniami.

Technikę odlewania stosuje się do materiałów o dobrej lejności (tę własność technologiczną przedstawiono w podrozdziale 1.1), jak np. staliwo, żeliwo, aluminium i jego stopy, miedź i jej stopy, magnez i jego stopy, ołów i jego stopy, cynk i jego stopy, cyna i jej stopy oraz materiały niemetalowe, np. tworzywa sztuczne.

Odlewanie jest często stosowane ze względu na możliwość wykonywania elementów o bardzo złożonym kształcie i różnej wielkości. Przedmioty odlewane niejednokrotnie mają różnego rodzaju wady, wynikające z nieprawidłowego przeprowadzenia procesu odlewania, np.:

- pęcherze gazowe, które nie mogły wydostać się z odlewu, powodujące niejednorodność jego struktury;
- jamy skurczowe, powstające w miejscach krzepnących najpóźniej;
- zaprószenia, powstające w wyniku przedostania się do odlewane go metalu zanieczyszczeń;
- niedolewy.

Wady te są zwykle wykrywane podczas kontroli jakości odlewu i czasami całkowicie dyskwalifikują wyrób.

### 2.2.2. Klasyfikacja metod odlewania

Ze względu na powszechność stosowania tej techniki w różnych gałęziach przemysłu można rozróżnić wiele metod odlewania:

- grawitacyjną (formy są zalewane ciekłym metalem z wykorzystaniem siły grawitacji);
- ciąglą (ciekły metal jest doprowadzany w sposób ciągły, w miarę jak skrzepły odlew opuszcza formę);
- ciśnieniową (ciekły metal jest włączany do formy pod wysokim ciśnieniem za pomocą sprężonego powietrza lub tłoka);

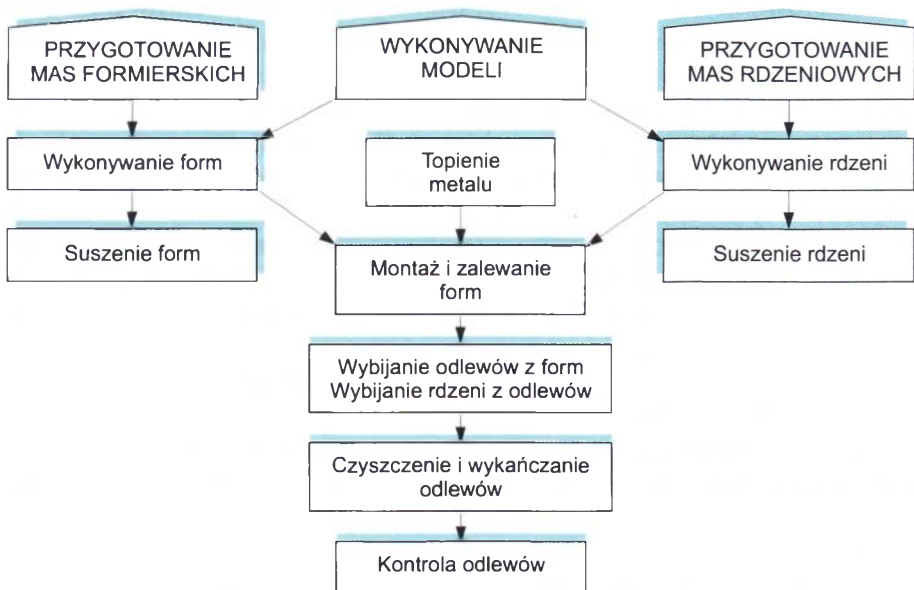
- odśrodkową (ciekły metal wypełnia wirującą formę dzięki sile odśrodkowej);
- wytapianych i wypalanych modeli (model wykonany z materiału łatwo topliwego jest wytopiony w piecu, w wyniku czego powstaje forma przygotowana do zalania metalem lub model jest bezpośrednio wypalany przez ciekły metal).

### 2.2.3. Proces odlewania

Odlewanie składa się z następujących etapów:

- sporządzenie modelu przedmiotu, którego odlew ma być wykonany;
- wykonanie formy odlewniczej i rdzeni (w razie potrzeby);
- wypełnienie formy ciekłym metalem;
- wyjęcie odlewu z formy;
- wykończenie odlewu.

Proces technologiczny odlewania przedstawiono na rysunku 2.2.



Rys. 2.2. Proces technologiczny odlewania

Modele odlewnicze mają kształty odlewanych przedmiotów. Wykonuje się je z drewna, gipsu, metalu lub tworzywa sztucznego, czyli materiałów, które łatwo kształtować. Wymiary projektowanego modelu powinny uwzględniać skurcz odlewniczy krzepnącego metalu, który jest różny dla różnych materiałów i wynosi przykładowo 1% dla żeliwa szarego, 1,5% dla stopów aluminium i 2% dla staliwa. Należy także przyjąć naddatki materiału uwzględniające końcową obróbkę odlewu. Zależą one od rodzaju materiału, z jakiego będzie wykonany odlew (naddatki dla odlewów ze staliwa są większe niż dla żeliwnych), a także od wymiarów odlewu, wielkości produkcji i metody odlewania. Aby ułatwić wyjęcie z formy, modele sporządza się jako dzielone, a także nadaje ich piono-



wym płaszczyznom modeli odpowiednie pochylenie. Rdzenie wyrabia się z masy rdzeniowej w skrzynkach rdzeniowych, czyli rdzennicach, co zapewnia prawidłowe wykonanie rdzenia oraz jego łatwe usunięcie. Formy wyrabia się w skrzynkach formierskich, które najczęściej mają kształt prostopadłościanów, a wykonane są z żeliwa, stali, tworzyw sztucznych lub drewna. Materiały, z których wykonuje się formy, to przede wszystkim piaski formierskie, ale także metale (formy noszą wtedy nazwę kokili). Dobre piaski formierskie muszą mieć następujące własności:

- odporność na działanie wysokich temperatur (ze względu na zalewanie ich ciekłymi metalami);
- plastyczność (zdolność do zachowania kształtów odcisniętych w nich modeli);
- spoiwość (odporność na wstrząsy i uderzenia formą);
- przepuszczalność (zdolność do odprowadzania gazów z ciekłego metalu przez pory masy formierskiej w celu uniknięcia powstawania wad odlewniczych w wyniku pozostawienia w odlewie pęcherzyków gazów);
- trwałość (zdolność do zachowania dobrych własności mas formierskich po wielokrotnym użyciu).

Wszystkie te warunki spełniają masy formierskie składające się z piasku, gliny, spoiw, pyłu z węgla kamiennego lub koksu oraz materiałów rozluźniających.

Przygotowanie form odlewniczych (formowanie) może być ręczne lub maszynowe.

**Formowanie ręczne** najczęściej prowadzi się w dwóch skrzynkach, jeśli model jest dzielony. Najpierw połówkę modelu układa się na desce formierskiej, a nad modelem umieszcza skrzynkę formierską, wypełniając ją odpowiednio ubijaną masą formierską. Następnie odwraca się pierwszą skrzynkę o kąt 180°, ustawia drugą połówkę modelu na pierwszej połowce i tak jak poprzednio drugą skrzynkę formierską zasypuje się masą. Potem wykonuje się układ wlewowy, ułatwiający wlewanie ciekłego metalu. Na koniec wyjmuje się obydwie części modelu z formy i suszy się ją.

**Formowanie maszynowe** wykonuje się na maszynach zwanych formierkami; stosuje się je do produkcji wielkoseryjnej i masowej. Ten rodzaj formowania oprócz przyspieszenia procesu poprawia dokładność wymiarów i jakość odlewów. Po zalaniu formy ciekłym metalem, jego zakrzepnięciu i ostygnięciu wyjmuje się odlew z formy.

Po formowaniu wyrób zostaje oczyszczony przy użyciu narzędzi ręcznych (szczotek stalowych, pilników itp.) lub metodą bębnowania, piaskowania albo trawienia. **Bębnowanie** odbywa się w specjalnych bębnach. Umieszcza się w nich odlewy i dodatkowe elementy, które podczas obrotu bębna, uderzając o siebie, oczyszczają odlew. **Piaskowanie** polega na oczyszczaniu odlewu ziarnami piasku unoszonymi strumieniem sprężonego powietrza. **Trawienie** to poddawanie powierzchni odlewu działaniu kwasu siarkowego, solnego lub azotowego (w zależności od materiału, z jakiego został wykonany odlew).

Po oczyszczeniu odlewów wykonuje się ich dodatkową obróbkę, np. mechaniczną, która była zaplanowana w procesie technologicznym.

## 2.2.4. Specjalne metody odlewania

Do specjalnych metod wytwarzania odlewów zalicza się odlewanie:

- kokilowe,
- pod ciśnieniem,
- odśrodkowe,
- odlewanie precyzyjne (metodą wytapianego i wypalanego modelu).

**Odlewanie kokilowe**, czyli odlewanie w formach metalowych (kokilach), jest stosowane w produkcji seryjnej, gdy następuje wielokrotne wykorzystanie jednej formy. Wytrzymałość kokili może wynosić nawet do kilkunastu tysięcy sztuk odlewów wykonanych z jednej formy. Odlewanie kokilowe stosuje się do odlewania stopów metali nieżelaznych, głównie aluminium, magnezu, miedzi i cynku.

**Odlewanie pod ciśnieniem** inaczej jest nazywane wtryskowym. Odlewy tą metodą otrzymuje się przez wtrysk określonej porcji ciekłego metalu do formy. Zapewnia to dużą dokładność wymiarów wykonywanych odlewów oraz ich gładką i czystą powierzchnię. Metodę tę stosuje się głównie do stopów metali nieżelaznych o niezbyt wysokiej temperaturze topnienia, jak np. aluminium, magnezu, cyny, ołowiu i miedzi.

**Odlewanie odśrodkowe** polega na wlewaniu ciekłego metalu do wirującej formy, której oś pokrywa się z osią wirowania. Siła odśrodkowa powoduje, że roztopiony metal pokrywa najbardziej odległe miejsca w formie. Dzięki temu można uzyskać odlewy wielowarstwowe, składające się z kilku rodzajów stopów. Odlewy otrzymywane tą metodą mają ścisłą budowę wewnętrzną, dobre własności mechaniczne i dokładnie odwzorowują kształt formy.

**Odlewanie precyzyjne** jest stosowane do otrzymywania odlewów o dokładnych kształtach i wymiarach, co pozwala na ograniczenie dodatkowej obróbki skrawaniem. Ta metoda odlewania jest wykorzystywana w produkcji niedużych elementów ze staliwa, żeliwa i innych stopów o wysokiej temperaturze topnienia. Odmiana odlewania precyzyjnego to formowanie **metodą wytapianego modelu**, polegające na wykonaniu pod ciśnieniem w stalowej matrycy modelu z wosku ziemnego, żywicy syntetycznych lub parafiny. Zanurza się go w ogniotrwałej masie ceramicznej i posypuje piaskiem kwarcowym. Gdy wyschnie, zostaje umieszczony w skrzynce formierskiej, którą wkłada się do pieca w celu wytopienia go. Tak przygotowana forma jest gotowa do zalania ciekłym metalem. Inna metoda stosowana w odlewaniu precyzyjnym to **metoda wypalanego modelu**. Polega ona na wykonaniu modelu ze styropianu, a następnie zalaniu formy gorącym, ciekłym metalem. Metal ten wypala styropianowy model, zajmując jego miejsce w formie.

## 2.3. Obróbka plastyczna

### 2.3.1. Klasyfikacja i rodzaje obróbki plastycznej

Obróbka plastyczna jest to technika wytwarzania, która ma na celu zmianę kształtu i wymiarów materiałów, polepszenie ich własności mechanicznych oraz

kształtowanie ich powierzchni. Proces ten odbywa się w wyniku działania sił zewnętrznych (nacisku) na materiał bez naruszenia jego sił spójności, czyli bez pęknięć. Siły zewnętrzne, działając na kryształy metalu, powodują początkowo sprężyste odkształcenie siatki krystalicznej, a w wyniku dalszego obciążenia odkształcenie trwałe, plastyczne, wywołane przez przesunięcie się jednej części kryształu względem drugiej (poślizg) lub przez obrót jednej części kryształu względem drugiej (bliźniakowanie).

W zależności od rodzaju materiału obrabianego i jego wymaganych właściwości obróbka plastyczna może być wykonywana **na gorąco** lub na zimno. Metale obrabia się na gorąco w temperaturze wyższej od temperatury, w której zachodzi rekryształizacja materiału, czyli proces rośnięcia nowych kryształów kosztem ziaren odkształconych, przy zachowaniu niezminionej sieci krystalicznej.

Temperaturę rekryształizacji można określić według zależności

$$T_r = A \cdot T_{\text{top}} \quad (2.1)$$

gdzie:

$T_r$  – temperatura rekryształizacji [K],

$T_{\text{top}}$  – temperatura topnienia [K],

$A$  – współczynnik wynoszący 0,4 dla czystych metali i 0,6 dla stopów o budowie roztworów stałych.

Przykładowe temperatury rekryształizacji wynoszą odpowiednio:

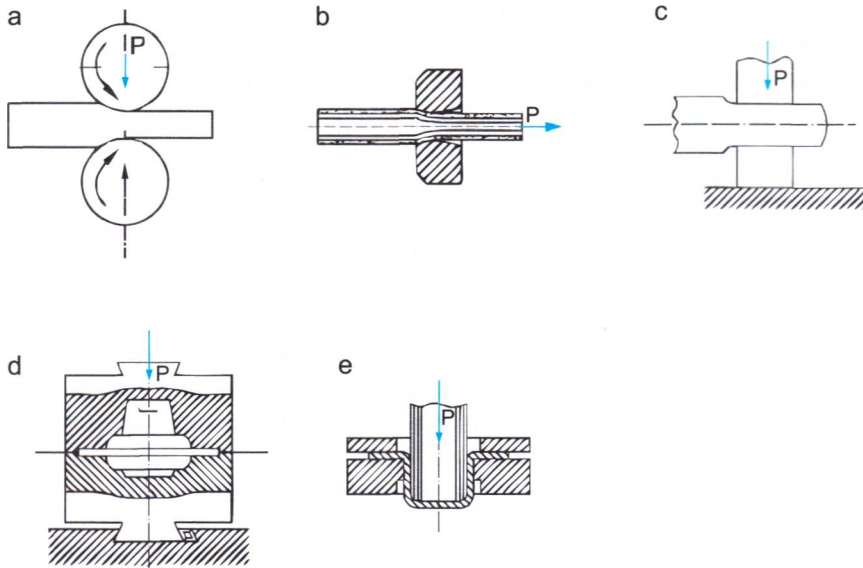
- dla stali około 550°C,
- dla miedzi około 250°C,
- dla aluminium około 200°C,
- dla cyny i cynku około 20°C.

Obróbka plastyczna **na zimno** jest prowadzona poniżej temperatury rekryształizacji. Zachodzi wówczas zjawisko umocnienia, powodujące zwiększenie wytrzymałości i twardości metalu oraz zmniejszenie jego plastyczności. Struktura zgniecionego materiału zmienia się z ziarnistej na włóknistą. Aby przywrócić materiałowi pierwotne właściwości, wykonuje się wyżarzanie rekryształizujące w temperaturze wyższej od temperatury rekryształizacji (obróbka cieplna została omówiona w podrozdziale 1.4). Podczas obróbki plastycznej na gorąco umocnienie nie zachodzi.

W zależności od sposobu wywierania nacisku na obrabiany przedmiot różni się następujące rodzaje obróbki plastycznej (rys. 2.3):

- kucie
- walcowanie,
- tłoczenie,
- ciągnięcie.

Obróbkę plastyczną stosuje się powszechnie w produkcji pojazdów samochodowych, głównie ze względu na oszczędność materiału i narzędzi (wyroby otrzymywane tą metodą są wytwarzane masowo, co powoduje obniżenie kosztów produkcji), możliwość nadawania wyrobom skomplikowanych kształtów oraz polepszenie ich właściwości mechanicznych.



Rys. 2.3. Rodzaje obróbki plastycznej

a – walcowanie, b – ciągnięcie, c – kucie swobodne, d – kucie matrycowe, e – tłoczenie

### 2.3.2. Kucie

Kucie jest to proces, w którym w wyniku uderzeń młota lub nacisku prasy uzyskuje się zmianę wymiarów i kształtu materiału. Odkształcenia materiału powstają wskutek powtarzalnych uderzeń. Materiałem wsadowym podczas kucia jest przedkuwka, a produktem tego procesu to odkuwka. Z odkuwek wykonuje się części maszyn wymagające dobrych własności mechanicznych, np. wirniki turbin, wały korbowe, korbowody, elementy układu kierowniczego i haki.

Proces obróbki obejmuje następujące czynności:

- przygotowanie materiału do kucia (np. czyszczenie, nagrzewanie);
- kucie;
- wykańczanie odkuwek (np. okrawanie, oczyszczanie).

W zależności od temperatury przeprowadzenia procesu można rozróżnić kucie:

- **na gorąco** (najczęściej spotykana technologia);
- **na zimno** (tylko dla metali, których granica plastyczności jest mała, np. aluminium).

Kucie ze względu na stosowane narzędzia i maszyny dzieli się na:

- **ręczne** (kowalskie), wykonywane na kowadłe za pomocą różnych narzędzi, np. przecinaków, przebijaków, kleszczy kowalskich, młotków kowalskich lub żłobników;
- **maszynowe**, wykonywane na młotach, prasach i kuźniarkach.

Rozróżnia się także kucie **swobodne** i **matrycowe**. W tym pierwszym przypadku materiał pod wpływem nacisku ma swobodę rozszerzania się na boki. Metodę tę stosuje się w produkcji jednostkowej i małoseryjnej, gdy wykonywa-

nie matryc jest nieopłacalne, oraz do wykonywania odkuwek, których duża masa i wymiary nie pozwalają na wykonanie matryc (rys. 2.3c). Podczas kucia matrycowego materiał umieszczony między matrycami rozchodzi się na boki, do góry i w dół, a w końcowej fazie przyjmuje kształt wykroju w matrycy. Tę metodę stosuje się do wyrobu odkuwek o masie do kilkuset kilogramów i skomplikowanych kształtach, w produkcji wielkoseryjnej i masowej (rys. 2.3d).

Podstawowe operacje występujące podczas kucia swobodnego, wykonywane ręcznie bądź maszynowo, to wydłużanie, przebijanie otworów, przecinanie, wyginanie, spęczanie (polegające na uderzaniu w materiał pionowo ustawiony na kowadle, w wyniku czego pręt staje się krótszy i grubszy) i odsadzanie (polegające na zmniejszaniu grubości materiału na jego końcu).

Kucie maszynowe najczęściej wykonuje się na młotach, które ze względu na rodzaj napędu można podzielić na młoty o napędzie mechanicznym i młoty parowo-powietrzne. Bijak (element uderzający w materiał) w młotach o napędzie mechanicznym (sprężarkowych) może mieć ciężar od 0,5 do 5 kN, natomiast w młotach parowo-powietrznych ciężar bijaka dochodzi do 60 kN.

W młotach do kucia matrycowego rozgrzany materiał umieszcza się w dolnej części matrycy i uderza się w niego jej górną częścią, przymocowaną do bijaka młota. Materiał dokładnie wypełnia matrycę i w krótkim czasie otrzymuje się odkawkę o kształcie matrycy.

Oprócz młotów do otrzymywania odkuwek używa się także pras kuźniczych. Młot działa na materiał gwałtownie, powodując odkształcenie głównie warstwy zewnętrznej, natomiast podczas prasowania naciski wywierane przez prasę na materiał są długotrwałe i powodują odkształcenia wewnętrznych warstw materiału, korzystnie wpływające na jego własności. Najczęściej stosuje się prasy korbowe, cierno-śrubowe lub hydrauliczne. Kuźniarki to prasy poziome, służące do spęczania końców prętów lub rur w matrycach; wykonuje się na nich także zawory silników spalinowych i pierścienie łożysk tocznych.

### 2.3.3. Walcowanie

Podczas walcowania obrabiany przedmiot uzyskuje określony kształt i wymiary w wyniku odkształcenia plastycznego metalu przechodzącego pomiędzy obracającymi się twardymi walcami (rysunek 2.3a). Tą metodą obrabia się stale, metale nieżelazne i ich stopy. Dzięki niej można uzyskać różnorodne wyroby – cienkie blachy, taśmy i folie (kształtowane na zimno), pręty, rury, grube blachy, różne rodzaje kształtowników (teowniki, ceowniki, zetowniki itp.), profile specjalne, obręcze kół, gwinty i koła zębate (kształtowane na gorąco). Walcowanie odbywa się na urządzeniach zwanych walcarkami, które składają się z:

- klatki roboczej (zespołu roboczego walców z łożyskami oraz urządzeniami do nastawiania i smarowania);
- elementów napędowych;
- elementów mocujących walcarki do fundamentów.

Walce mogą być gładkie lub brzdowe, w zależności od rodzaju walcowanego elementu. Materiał przechodzi w walcierce przez układ walców. Najprostszymi walcarkami składają się z dwóch poziomych walców roboczych (*duo*), ale stosuje się też walcarki o trzech (*trio*), czterech (*quarto*) i sześciu (*sexto*) poziomych walcach lub wielowalcowe – w zależności od wymogów procesu technologicznego.

### 2.3.4. Tłoczenie

Tłoczenie jest to proces obróbki plastycznej obejmujący rozdzielanie i kształtowanie przedmiotów wykonanych z blach, taśm, drutu lub folii ze stali stopowej, metali nieżelaznych i ich stopów lub materiałów niemetalowych (rys. 2.3e). Ten rodzaj obróbki plastycznej – jak pozostałe – może być prowadzony na zimno lub na gorąco. W procesie tłoczenia wyodrębnia się operacje cięcia i kształtowania.

Podczas **cięcia** następuje naruszenie spójności materiału i częściowe lub całkowite oddzielenie jednej jego części od drugiej. Najczęściej stosowane operacje cięcia to wycinanie (wykrawanie) i dziurkowanie. Do cięcia wykorzystuje się różne typy nożyc (np. krążkowe, gilotypowe) lub prasy z tłocznikami, zwanymi wykrojnikami.

**Kształtowanie** polega na nadawaniu blachom założonych kształtów i wymiarów. Podczas kształtowania wyrobu z płaskiego krążka pod działaniem nacisku stempla tworzy się miseczką, odpowiadającą kształtem stemplowi (rys. 2.3e). Proces ten można prowadzić wieloetapowo, zmieniając kształt i wymiary stempla, aż do uzyskania założonego ostatecznego kształtu wyrobu.

W nowoczesnych metodach tłoczenia do nadawania kształtu obrabianym przedmiotom wykorzystuje się różne rodzaje energii, np. energię detonacji materiałów wybuchowych (tłoczenie wybuchowe), energię wyładowań elektrycznych w cieczy (tłoczenie elektrohydrauliczne) lub energię wysokoprężnych gazów (tłoczenie pneumatyczne).

### 2.3.5. Ciągnięcie

Ciągnięcie jest to obróbka mająca na celu zmianę kształtu lub pola przekroju poprzecznego materiału wyjściowego w wyniku przeciągania go przez otwór narzędzia zwanego ciągadłem, którego pole przekroju poprzecznego jest mniejsze niż pole przekroju materiału przeciąganego. Podczas ciągnięcia oprócz zmiany wymiarów poprawiają się własności mechaniczne wyrobu i pogarszają jego własności plastyczne. Ten rodzaj obróbki plastycznej stosuje się do wytwarzania prętów, drutów oraz rur bez szwu i ze szwem (rys. 2.3b). Aby uzyskać odpowiednie wymiary obrabianego przedmiotu, należy przeciągnąć go przez kilkanaście, a czasem kilkadziesiąt coraz mniejszych ciągałek. Ciągnięcie przeprowadza się na maszynach zwanych ciągarkami, które składają się z układu ciągałek o coraz mniejszych średnicach, przez które kolejno przechodzi obrabiany materiał. Ciągałka są wykonane z twardych i odpornych na ścieranie mate-

riałów (stali chromowej oraz spiekanych węglików wolframu i tytanu, a dla przedmiotów o małych wymiarach – z diamentu).

## 2.4. Prace ślusarskie

Ślusarstwo to ręczna obróbka metali i tworzyw sztucznych na zimno, prowadzona w celu wykonania przedmiotów użytkowych oraz przeprowadzenia robót montażowych i naprawy sprzętu, maszyn i urządzeń. Ten rodzaj obróbki metali był znany już w starożytności (przerabiano wówczas rudy miedzi, cyny, ołowiu i żelaza), jednak początkowo łączył się z kowalstwem. Dopiero w XIV w. nastąpiło rozdzielenie na dwa odrębne zawody, o dominujących odpowiednio cechach kowalskich i ślusarskich. Na przestrzeni lat następował rozwój ślusarstwa z podziałem na różne specjalności, jak np.:

- ślusarze maszynowi, wykonujący prace przy produkcji i remoncie maszyn i urządzeń;
- ślusarze narzędziowi, wykonujący prace przy produkcji narzędzi precyzyjnych i przyrządów.

Obecnie na skutek rozwoju przemysłu oraz mechanizacji i automatyzacji procesów produkcyjnych obróbka ręczna zeszała na dalszy plan, jednak całkowite wyeliminowanie jej jest niemożliwe – nadal pewne czynności (np. wykańczanie, składanie części w zespoły, dopasowywanie części) wykonuje się ręcznie, wykorzystując ślusarstwo. Pomocniczą operacją ślusarską jest ponadto trasowanie.

### **Do głównych operacji ślusarskich zalicza się:**

- ścinanie, przecinanie, wycinanie;
- gięcie, prostowanie;
- piłowanie;
- wiercenie, rozwiercanie;
- gwintowanie;
- skrobanie;
- montaż i demontaż maszyn i zespołów.

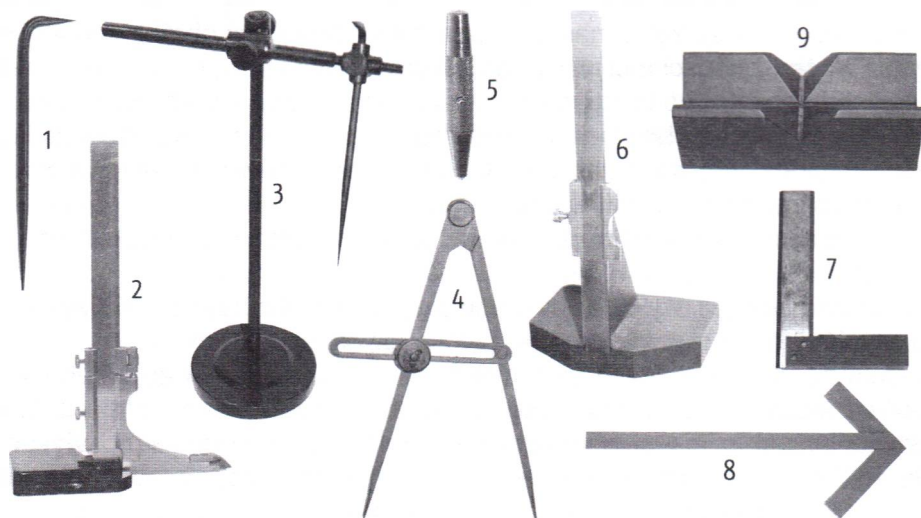
**Trasowanie** obejmuje czynności wyznaczania na powierzchni obrabianego materiału linii i punktów potrzebnych do wytworzenia określonego przedmiotu zgodnie z rysunkiem wykonawczym. Czynności te są wykonywane w produkcji jednostkowej i małoseryjnej. Rozróżnia się trasowanie:

- płaskie, gdy linie i punkty traserskie są wyznaczane na płaszczyźnie blach, płyt lub ścianek odlewów;
- przestrzenne, gdy linie i punkty są wyznaczane na bryle o dowolnym kształcie geometrycznym.

Ze względu na naddatek na obróbkę materiały poddane tej czynności muszą mieć wymiary większe niż podane na rysunku. Najważniejszym przyrządem wyposażenia stanowiska traserskiego jest żeliwna płyta traserska o gładkiej i płaskiej górnej powierzchni, służąca jako wspornik elementów trasowanych. Płyty

tej należy używać tylko do trasowania i dbać o prawidłowy stan jej powierzchni. Narzędzia do trasowania przedstawiono na rysunku 2.4. Są to:

- rysiki – stosowane do trasowania linii na przedmiocie,
- suwmiarki traserskie z podstawą – stosowane do wyznaczania linii poziomych,
- cyrkle traserskie – służące do trasowania okręgów,
- kątowniki – stosowane do wyznaczania linii pionowych i poziomych,
- znaczniki – stosowane do wyznaczania linii poziomych.



**Rys. 2.4.** Przyrządy traserskie

1 – rysik, 2 – suwmiarka traserska, 3 – znacznik, 4 – cyrkiel traserski, 5 – punktak, 6 – liniał traserski, 7 – kątownik, 8 – środkownik, 9 – pryzma traserska

W celu poprawienia widoczności trasowanych linii materiał, na którym się je wyznacza, można pomalować, np. kredą rozdrobnioną w wodzie, tuszem lub wodnym roztworem siarczanu miedzi. Przed przystąpieniem do pracy należy sprawdzić stan i jakość materiału przeznaczanego do trasowania oraz jego wymiary. Następnie wybiera się podstawę (bazę) traserską, czyli punkt, oś lub płaszczyznę, od której odmierza się wymiary na przedmiocie. Podczas trasowania na płaszczyźnie podstawami są dwie osie symetrii lub dwa obrobione boki. Czynność trasowania rozpoczyna się od wyznaczenia głównych osi symetrii przedmiotu. Gdy przedmiot składa się z odcinków linii prostych i krzywych, najpierw kreśli się linie proste, a później łączy je łukami.

Podczas wykonywania większej liczby jednakowych przedmiotów stosuje się trasowanie według wzorników. Wzornik nakłada się na obrabianą powierzchnię materiału i obwodzi ostrzem rysika wokół krawędzi wzornika. Ostrze powinno być prowadzone przy krawędzi pod kątem 45 stopni do powierzchni przedmiotu.

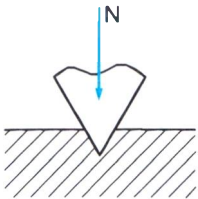
**Ścinanie, wycinanie i przecinanie** to operacje ślusarskie stosowane podczas odcinania kawałków prętów lub blach potrzebnych do dalszych operacji, wycinania rowków i otworów, ścinania warstwy metalu z wąskich powierzchni



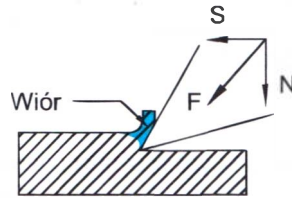
przedmiotu, usuwania zgorzelin z odkuwek, ścinania łbów nitów podczas demontażu itp. Podczas tych operacji następuje oddzielenie wierzchniej warstwy materiału od podstawowej, zwane skrawaniem. Ścinanie, wycinanie i przecinanie wykorzystują skrawanie materiału narzędziem w kształcie klina. Narzędzia te w zależności od operacji, którą się za ich pomocą wykonuje, nazywa się wycinakami lub przecinakami.

Gdy narzędzie o kształcie klina (przecinak) zostanie ustawione w sposób przedstawiony na rysunku 2.5, to pod wpływem siły nacisku (uderzenia)  $N$  klin rozdzieli materiał w miejscu przecinanym.

Jeśli przecinak ustawi się pod określonym kątem do obrabianej powierzchni (rys. 2.6), to siła  $F$  działająca wzdłuż jego osi rozłoży się na siły składowe:  $N$  – prostopadłą do powierzchni obrabianego materiału i powodującą zagłębianie się przecinaka w materiał, oraz  $S$  – równoległą do obrabianej powierzchni i powodującą przesuwanie się ostrza przecinaka wzdłuż powierzchni materiału. W wyniku tych działań nastąpi oddzielenie wierzchniej warstwy materiału i powstanie wiór.

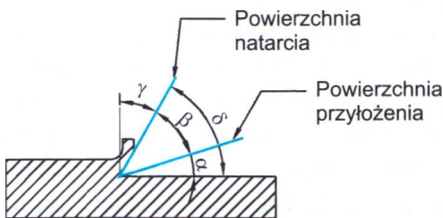


Rys. 2.5. Działanie ostrza klina



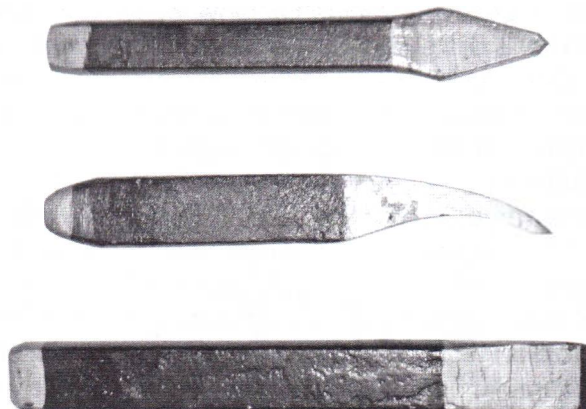
Rys. 2.6. Rozkład sił działających na ostrze klina (opis w tekście)

Na rysunku 2.7 przedstawiono charakterystyczne kąty ostrza narzędzia. Od wielkości tych kątów (ich właściwego doboru) zależy efektywność procesu skrawania. Kąt  $\alpha$  jest to kąt przyłożenia, kąt  $\beta$  to kąt ostrza, kąt  $\delta$ , równy sumie kątów  $\alpha$  oraz  $\beta$ , to kąt skrawania, natomiast kąt  $\gamma$  to kąt natarcia. W procesie skrawania występują także charakterystyczne powierzchnie: powierzchnia narzędzia zwrócona do materiału to powierzchnia przyłożenia, a powierzchnia, po której zsuwają się wióry, to powierzchnia natarcia. Kąt przyłożenia  $\alpha$  powinien przyjmować taką wartość, aby tarcie było jak najmniejsze. Im mniejszy jest kąt ostrza  $\beta$ , tym łatwiej narzędzie zagłębia się w materiał, a jeśli wartość kąta skrawania  $\delta$  jest duża, zbliżona do kąta prostego, ostrze trudno zagłębia się w materiał.



Rys. 2.7. Kąty skrawania (opis w tekście)

Do przecinania blach, płaskowników i prętów można używać przecinaków wykonanych ze stali, składających się z ostrza, chwytu i łba (rys. 2.8).



Rys. 2.8. Przykłady przecinaków

Wartości kątów ostrza są różne – w zależności od obrabianego rodzaju materiału – i wynoszą przykładowo:

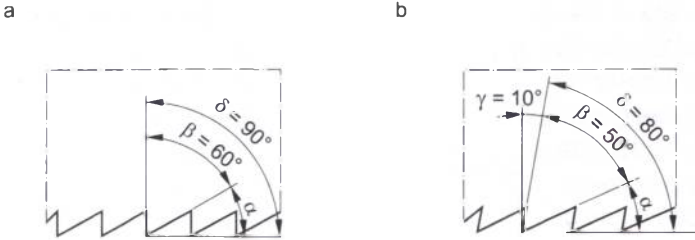
- dla aluminium  $35^\circ$ ,
- dla miedzi i mosiądzu  $45^\circ$ ,
- dla stali  $60^\circ$ ,
- dla żeliwa  $70^\circ$ .

Do wycinania w obrabianym materiale rowków i zagłębień służą wycinaki, bardzo podobne do przecinaków, a różniące się od nich tylko kształtem ostrza (proste, wygięte, czterokrawędziowe).

Do ścinania, czyli usuwania zbędnych warstw materiału, także używa się przecinaków. Podczas wykonywania operacji przecinania, wycinania i ścinania wykorzystuje się również młotki ślusarskie wykonane ze stali. Młotki monterskie, stosowane do pasowania części, wykonuje się z ołowiu, miedzi lub mosiądzu. Młotków gumowych i drewnianych można używać do prostowania blach. Podczas operacji ślusarskich używa się także kowadeł, imadeł czy też różnego rodzaju płyt.

Do ścinania i przecinania mechanicznego stosuje się młotki pneumatyczne lub elektryczne.

Do przecinania metali i innych tworzyw podczas prac ślusarskich najczęściej używa się piłki ręcznej. Składa się ona z ramki stałej lub nastawnej, rękojeści i brzeszczotu. Brzeszczot to cienka taśma stalowa z naciętymi wzdłuż jednej lub obu krawędzi zębami, służąca do przecinania materiału. Wymiary ich są znormalizowane. Brzeszczoty charakteryzują się także określoną liczbą zębów przypadającą na 25 mm długości. Materiały grube i miękkie przecina się brzeszczotami o liczbie 18 zębów na 25 mm, a materiały cienkie i twarde o liczbie 32 zębów na 25 mm (im twardszy materiał, tym zęby muszą być drobniejsze). Geometria ostrza brzeszczotu także zależy od rodzaju materiału przecinanego. Na rysunku 2.9a przedstawiono najczęściej stosowany kształt i geometrię ostrza zębów, a na rysunku 2.9b kształt zębów brzeszczotu do metali miękkich.

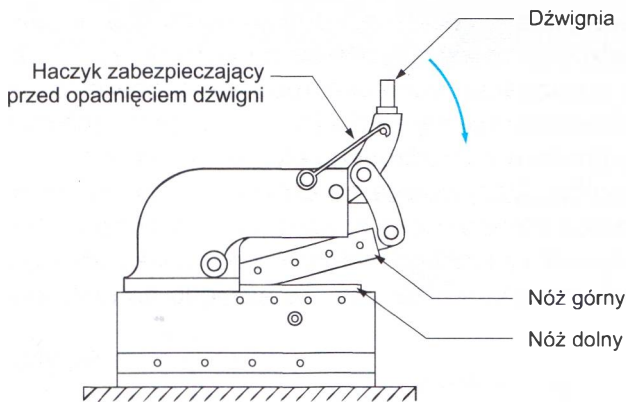


Rys. 2.9. Kształt zębów brzeszczotów

a – stosowany najczęściej, b – przeznaczony do metali miękkich

Mocując brzeszczot w ramce, należy ustawić go tak, aby ząbki były nachylnie ku uchwytowi. Nacisk na piłkę powinien być wywierany tylko podczas ruchu roboczego, czyli w kierunku do imadła, na którym jest umocowany obrabiany przedmiot. Przesuw piłki powinien wynosić  $2/3$  użytecznej długości brzeszczotu. Następną ważną zasadą podczas cięcia zakłada przecinanie przedmiotów płaskich wzdłuż dłuższej krawędzi ze względu na zachowanie prostoliniowości cięcia, a także sztywności ciętego materiału, co wpływa korzystnie na jakość operacji i trwałość narzędzi.

Do cięcia blach używa się także różnego rodzaju nożyc. Blachy stalowe cienkie o grubości do 1 mm tną się nożycami ręcznymi, a blachy o grubości do 5 mm i płaskowniki – nożycami dźwigniowymi (rys. 2.10).

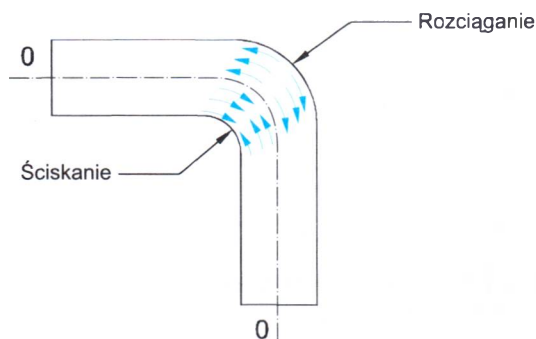


Rys. 2.10. Nożyce dźwigniowe

Do cięcia blach nadwoziowych używa się nożyc dźwigniowych lub ręcznych, napędzanych elektrycznie lub pneumatycznie. Blachy grube (o grubości do 32 mm) tną się nożycami równoległymi, czyli gilotynowymi.

**Gięcie i prostowanie** to operacje obróbki plastycznej, które mają na celu nadanie przedmiotowi zadanego kształtu za pomocą odpowiednich sił, bez stosowania obróbki skrawaniem. Obie operacje mogą być stosowane na zimno lub na gorąco. Materiały grubsze należy przed gięciem podgrzewać, ponieważ wykazują wtedy większą plastyczność i można je kształtować, używając mniejszej siły.

Podczas gięcia zachodzą w materiale odkształcenia plastyczne. Zewnętrzne warstwy materiału są rozciągane (po zakończeniu gięcia pozostają wydłużone na pewnym odcinku), a wewnętrzne warstwy są ściskane (po zakończeniu gięcia pozostają skrócone na pewnym odcinku), co przedstawiono na rysunku 2.11. Środkowa warstwa materiału nie ulega ani ściskaniu, ani rozciąganiu – jest to tzw. warstwa obojętna. Długość tej warstwy musi być równa długości materiału wyjściowego.



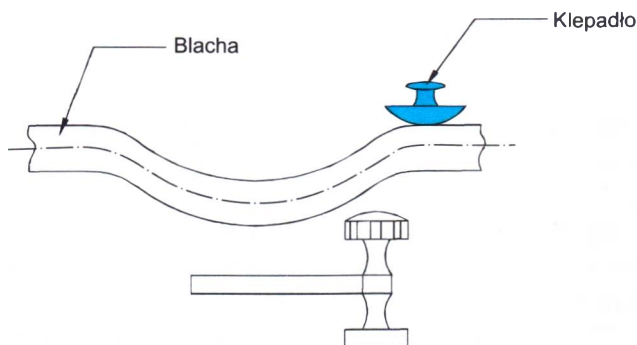
Rys. 2.11. Odkształcanie materiałów podczas gięcia

W zależności od założonych kształtów elementów giętych korzysta się z odpowiednich wzorów, określających długości materiału wyjściowego, zawartych w tablicach zamieszczanych w poradnikach dla ślusarzy, mechaników i in. W blacharstwie samochodowym cienkie blachy gnie się w szczękach imadła; gdy blachy są dłuższe, używa się jako przedłużenia szczęk dwóch kątowników. Jeszcze dłuższe zagięcia wykonuje się na maszynach zwanych krawędziarkami. W powypadkowych naprawach pojazdów najczęściej ma miejsce prostowanie w celu przywrócenia pierwotnych kształtów uszkodzonym elementom. W zależności od rodzaju wgniecenia (małe i płytkie czy duże i powierzchniowe) i rodzaju materiału, w którym nastąpiło, dobiera się odpowiednią metodę prostowania.

Wgniebnienia bardzo małe likwiduje się, uderzając młotkami dokładnie w sam środek wgniecenia. Gdy wgniecenia są małe i w płaskich powierzchniach, można stosować urządzenie do wyciągania wgnieceń (poduszkę powietrzną). Najczęściej do usuwania wgnieceń stosuje się młotki i klepadła (o różnych rozmiarach) pracujące po dwóch stronach uszkodzonego elementu (rys. 2.12).

**Piłowanie** jest rodzajem obróbki, który polega na skrawaniu z powierzchni obrabianego materiału za pomocą pilników cienkiej warstwy o grubości od 0,5 do 1,5 mm. Stosuje się je do usuwania zbędnego materiału z odkuwek i odlewów oraz podczas napraw i montażu maszyn i urządzeń. Ze względu na małą dokładność piłowanie ręczne pilnikami jest stosowane jako obróbka wstępna przed szlifowaniem. Pilnik składa się z części roboczej, na której znajdują się zęby, chwytu i drewnianej rękojeści. Istnieje wiele kryteriów podziału pilników.

Według kształtu przekroju poprzecznego pilniki można podzielić na pł-



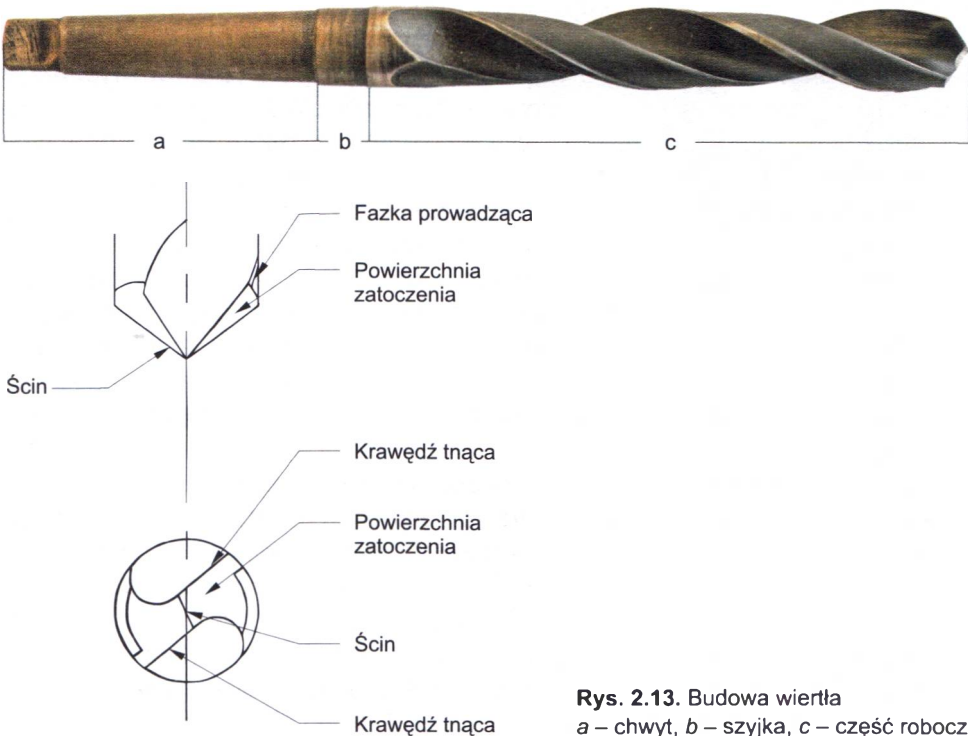
Rys. 2.12. Zastosowanie klepadła w prostowaniu

skie, kwadratowe, trójkątne, rombowe, trapezowe, owalne i okrągłe, a według rodzajów nacięć na pojedyncze jednorzędowe i wielorzędowe oraz podwójne jednorzędowe i wielorzędowe.

Najczęściej stosowane kryterium podziału to jednak liczba nacięć przypadających na 1 cm długości. Im większa jest liczba nacięć na pilniku, tym gładszą można otrzymać powierzchnię. Zdzieraki stosowane do obróbki zgrubnej mają od 5 do 10 nacięć, równiaki do formowania zasadniczego kształtu – do 28 nacięć, a gładziki nadające obrabianej powierzchni odpowiednią gładkość – do 80 nacięć. W przypadku bardzo małych powierzchni do piłowania wykańczającego z dużą dokładnością używa się pilników igielkowych, które są bardzo małe i nie mają drewnianych rękojeści. W zależności od rodzaju piłowanej powierzchni należy dobrać odpowiedni rodzaj pilnika i technikę piłowania. Ze względu na małą wydajność piłowania ręcznego coraz częściej stosuje się piłowanie mechaniczne za pomocą pilnikarek, maszyn o napędzie elektrycznym lub pneumatycznym. Pilnikarki mogą być pionowe (rzadko już używane), poziome lub wykonane jako przyrządy z giętkim wałkiem.

**Wiercenie** to rodzaj obróbki skrawaniem, mający na celu wykonywanie otworów za pomocą wiertła.

Wiertła są wykonywane ze stali szybko tnącej i węglików spiekanych. Wiertło składa się z części roboczej, szyjki i chwytu (rys. 2.13). Część robocza na obwodzie ma nacięte dwa rowki, służące do odprowadzania wiórów z wier-



**Rys. 2.13.** Budowa wiertła

a – chwyt, b – szyjka, c – część robocza

conego otworu. Wzdłuż tych rowków znajdują się fazki prowadzące (łysinki), mające na celu zmniejszenie tarcia między wiertłem a ściankami otworu. Aby jeszcze zmniejszyć to tarcie, część robocza wiertła jest lekko stożkowa, jej średnica zmniejsza się nieznacznie w kierunku od czoła do chwytu. Część skrawającą tworzą dwie krawędzie tnące o jednakowej długości, które łączą się ze sobą w poprzeczną krawędź tnącą, czyli ścin. Wartość kąta wierzchołkowego utworzonego przez krawędzie tnące zależy od rodzaju wierconego materiału. Im materiał – metal lub stop metali – jest twardszy, tym ten kąt jest mniejszy. Dla żelaza i stali wartość kąta wierzchołkowego wynosi  $118^\circ$ , dla miedzi  $125^\circ$ , dla aluminium  $140^\circ$ , a dla tworzyw sztucznych  $85...90^\circ$ . Do wiercenia otworów używa się wiertarek o napędzie ręcznym, elektrycznym lub pneumatycznym. Ze względu na charakter pracy można rozróżnić wiertarki przenośne i stałe.

Wiertła z chwytym walcowym są montowane w trójścękowych lub dwuszcękowych uchwytach wiertarek. Wiertła z chwytym stożkowym są osadzone w stożkowych gniazdach wiertarek (gdy wielkości chwytu i gniazda wiertarki są jednakowe) lub w specjalnych tulejach redukcyjnych, gdy ich wymiary się różnią. W czasie wiercenia za pomocą wiertarek ruch obrotowy i posuwowy wykonuje wiertło, a przedmiot obrabiany pozostaje w spoczynku. Dlatego bardzo ważne jest właściwe zamocowanie przedmiotu. W tym celu używa się różnorodnych imadeł, podstaw i podkładek. Przed wierceniem trasuje się osie otworu i punktuje punktamiem środek otworu. Następnie należy wytrasować cyrklem jeden okrąg o średnicy otworu (należy napunktować go w kilku miejscach) i drugi współśrodkowy okrąg o większej średnicy. Kolejno wiertłem wykonuje się wgłębienie i sprawdza jego współosiowość wobec wytrasowanych okręgów. Jeśli wgłębienie jest współosiowe, można wiercić dalej, jeśli nie – należy wycinakiem wyciąć rowek wzdłuż wytrasowanej osi, napunktować ponownie środek otworu i wiercić jeszcze raz. Przed wierceniem otworów przelotowych powierzchnie należy zabezpieczyć podkładkami. W przypadku otworów nieprzelotowych zaznacza się na wiertle głębokość otworu lub nakłada na nie pierścieni oporowy; jeśli wiertarka ma urządzenie do ustawiania odpowiedniej głębokości, należy z niego skorzystać, odpowiednio je ustawiając. Wierząc głębokie otwory, wiertło co pewien czas wyciąga się z materiału, aby je oczyścić. Podczas wiercenia można stosować ciecz obróbkowe olejowe i emulsje dostosowane do rodzaju wierconego materiału, powodujące chłodzenie wiertła i zmniejszanie tarcia.

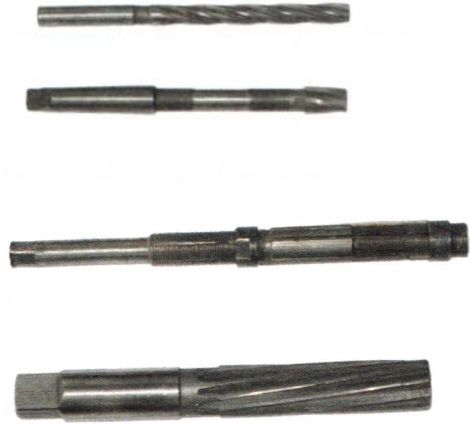
W celu uzyskania dużej dokładności oraz gładkości powierzchni lub otworu stożkowego stosuje się **rozwiercanie** za pomocą rozwiertaków. Otwory do połączeń nitowych czy śrubowych nie wymagają dużej dokładności powierzchni, ale te wykorzystywane do umieszczenia w nich wałków trzpieni lub tulei muszą być dodatkowo obrobione. W zależności od wymaganego kształtu otworu stosuje się rozwiertaki stożkowe lub walcowe, a w zależności od dokładności obróbki – rozwiertaki zdzieraki lub wykańczaki (rys. 2.14). Rozwiercanie może być wykonywane ręcznie lub mechanicznie.

**Gwintowanie** jest to operacja nacinania gwintu na powierzchni wałka lub otworu wzdłuż linii śrubowej. Połączenia gwintowe oraz ich zastosowanie zostaną omówione w dalszej części podręcznika (patrz punkt 3.5.7). Do nacinania gwintów zewnętrznych (śrub) służą narzynki, a gwintów wewnętrznych (nakrętek) – gwintowniki. Stosuje się je do gwintowania zarówno ręcznego, jak i maszynowego.

Narzynki (rys. 2.15) to stalowe, hartowane pierścienie, nagwintowane wewnątrz, z otworami tworzącymi krawędzie tnące i odprowadzającymi wióry. Narzynki mogą mieć kształt okrągły, kwadratowy lub sześciokątny oraz mogą być dzielone lub pełne. Gwinty zewnętrzne wykonuje się na sworzniach, których średnice muszą być mniejsze od średnic zewnętrznych gwintu (ich wielkość dobiera się na podstawie odpowiednich poradników mechanika, ślusarza itp.). Sworznie te muszą też mieć stożkowe zakończenia, aby łatwo było po umocowaniu ich w imadle nałożyć narzynkę prostopadłe do osi sworznia. Następnie obraca się narzynką w prawo i po każdym pełnym obrocie cofa o pół obrotu w lewo, aż do otrzymania całego gwintu.

Gwintowniki (rys. 2.16) składają się z części roboczej (złożonej z kolei z części skrawającej i wykańczającej) oraz chwytu.

Do całkowitego wykonania gwintu jest niezbędny gwintownik wstępny (oznaczony jedną kreską na obwodzie), zdzierak (oznaczony dwiema kreskami) i wykańczak (oznaczony trzema kreskami). Przedmiot, który ma być gwintowany, musi mieć odpowiednio dobrany wymiar otworu pod gwint. Umieszcza się go w imadle i używając kolejnych gwintowników, wykonuje gwint. Po każ-



Rys. 2.14. Różne rodzaje rozwiertaków



Rys. 2.15. Narzynka okrągła pełna



Rys. 2.16. Różne rodzaje gwintowników

dym obrocie w prawo należy cofnąć gwintownik o pół obrotu w lewo. Podczas gwintowania sprawdza się za pomocą kątownika prostopadłość położenia gwintownika.

## 2.5. Maszynowa obróbka skrawaniem

### 2.5.1. Rodzaje i charakterystyka

Obróbka skrawaniem polega na nadawaniu przedmiotowi określonego kształtu i rozmiarów poprzez usuwanie zbędnych warstw materiału za pomocą odpowiednich narzędzi. W maszynowej obróbce skrawaniem narzędzia są zamontowane w maszynach zwanych **obrabiarkami**.

Zależnie od rodzaju obrabianej powierzchni i wymagań wobec niej stosuje się różne rodzaje narzędzi skrawających i różne rodzaje obrabiarek.

Można rozróżnić następujące rodzaje maszynowej obróbki skrawaniem – w zależności od zastosowanych narzędzi skrawających i rodzaju ruchów, jakie wykonują podczas obróbki narzędzie i przedmiot obrabiany (patrz rys. 2.1):

- **toczenie** (przedmiot obrabiany wykonuje ruch obrotowy, a narzędzie, którym jest nóż tokarski, wykonuje ruch równoległy lub prostopadły do osi obrotu przedmiotu albo oba te ruchy jednocześnie; za pomocą toczenia uzyskuje się powierzchnie walcowe, stożkowe lub kuliste);
- **frezowanie** (przedmiot obrabiany wykonuje ruch prostoliniowy lub jednocześnie prostoliniowy i obrotowy, a narzędzie, którym jest frez, wykonuje ruch obrotowy; za pomocą frezowania, w zależności od kształtu frezu, można otrzymać powierzchnie krzywoliniowe oraz gwinty i koła zębate);
- **struganie** (przedmiot obrabiany wykonuje ruch prostoliniowy, podobnie jak narzędzie, którym jest nóż strugarski; za pomocą strugania obrabia się płaszczyzny);
- **wiercenie** (przedmiot obrabiany pozostaje w spoczynku, a narzędzie, którym jest wiertło, wykonuje jednocześnie ruch obrotowy i ruch posuwowy wzdłuż swojej osi obrotu; za pomocą wiercenia otrzymuje się otwory przelotowe lub nieprzelotowe);
- **szlifowanie** (przedmiot obrabiany porusza się ruchem prostoliniowym lub obrotowym, a narzędzie, którym jest ściernica, wykonuje ruch obrotowy).

Ze względu na dokładność uzyskiwanego kształtu i wymiarów obróbkę skrawaniem można podzielić na:

- **zgrubną** (usuwa się warstwę zewnętrzną materiału, zapewniając naddatki na dalszą obróbkę);
- **kształtującą** (nadaje się obrabianemu przedmiotowi kształt zgodny z rysunkiem technicznym, pozostawiając naddatki na powierzchniach, które mają być poddane dalszej obróbce wykańczającej);
- **wykańczającą** (nadaje się obrabianemu przedmiotowi ostateczny kształt i wymiary oraz zadaną chropowatość).



Aby skrawanie zapewniało określoną jakość obrabianego przedmiotu i prawidłową pracę narzędzi skrawających, muszą być określone warunki, czyli **parametry skrawania**:

- **prędkość skrawania**  $v$ , czyli droga, jaką w jednostce czasu przebywa krawędź tnąca narzędzia skrawającego względem powierzchni obrabianego przedmiotu, obliczana według wzoru

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \left[ \frac{\text{m}}{\text{min}} \right] \quad (2.2)$$

gdzie:

- $v$  – prędkość skrawania [m/min],
- $d$  – średnica przedmiotu obrabianego [mm],
- $n$  – prędkość obrotowa przedmiotu obrabianego [obr/min];
- **posuw**  $p$ , czyli droga, jaką przebywa ostrze narzędzia względem przedmiotu obrabianego, przypadająca na jeden obrót przedmiotu obrabianego (toczenie) lub narzędzia (wiercenie), wyrażona w milimetrach na obrót lub milimetrach na minutę (przy frezowaniu);
- **głębokość skrawania**  $g$ , czyli grubość warstwy materiału usuwanej podczas jednego przejścia narzędzia skrawającego, wyrażona w milimetrach, a w przypadku toczenia wyliczona według wzoru

$$g = \frac{D - d}{2} [\text{mm}] \quad (2.3)$$

gdzie:

- $D$  – średnica materiału przed obróbką [mm],
- $d$  – średnica materiału po obróbce w [mm].

## 2.5.2. Obrabiarki skrawające

W maszynowej obróbce skrawaniem nazwy obrabiarek pochodzą od nazw obróbki prowadzonej na danym typie obrabiarki. Tak więc toczenie wykonuje się na tokarkach, frezowanie na frezarkach, struganie na strugarkach, szlifowanie na szlifierkach, a wiercenie na wiertarkach.

**Tokarki** są to obrabiarki skrawające, na których oprócz operacji toczenia, czyli zdejmowania za pomocą noża wióra z obracającego się przedmiotu w celu nadania mu określonego kształtu i wymiarów, można wykonywać także inne operacje. Przy użyciu tokarek można toczyć powierzchnie zewnętrzne i wewnętrzne, wiercić, rozwiercać i przecinać, za pomocą dodatkowych przyrządów również frezować i szlifować. W tokarce należy zamocować obrabiany przedmiot i nadać mu ruch obrotowy oraz zamocować narzędzie skrawające, czyli nóż, i nadać mu posuw. Ze względu na różne kryteria tokarki można podzielić na:

- kłowe,
- uchwytowe,
- wielonożowe,

- rewolwerowe,
- karuzelowe,
- półautomatyczne,
- automatyczne.

Najbardziej rozpowszechnione są **tokarki kłowe** (rys. 2.17), w których obrabiany przedmiot jest mocowany w kłach wrzeciona (stąd nazwa). Wśród tokarek kłowych rozróżnia się z kolei tokarki:

- uniwersalne (pociągowe), z wałkiem pociągowym i śrubą pociągową umożliwiającą nacinanie gwintu;
- produkcyjne, bez śruby pociągowej, co uniemożliwia nacinanie gwintu;
- precyzyjne (stołowe), do ustawiania na stole i obróbki małych przedmiotów;
- ciężkie, stosowane w przemyśle ciężkim.



Rys. 2.17. Tokarka kłowa

Podstawowa część tokarki kłowej to łożo, żeliwny odlew w kształcie dwóch belek, na którym mocuje się pozostałe elementy tokarki. Po łożu przesuwają się suport z imakiem, w którym mocuje się noże tokarskie. Przekładnia zębata, śruba pociągowa i wałek pociągowy służą do nadania suportowi przesuwu wzdłużnego i poprzecznego. W głowicy znajduje się wrzeciennik z wrzecionem umożliwiającym zamontowanie obrabianego przedmiotu i nadanie mu ruchu obrotowego. Skrzynka biegów pozwala na zmianę obrotów wrzeciona. Na łożu jest osadzony konik z kłami, który służy do podtrzymywania przedmiotu toczącego.

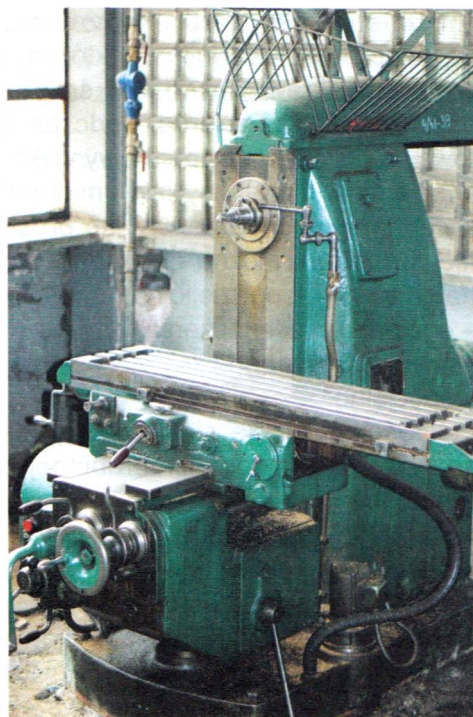
**Frezarki** są to najczęściej spotykane obrabiarki do obróbki powierzchni krzywoliniowych. Narzędzie, czyli frez, wykonuje zawsze ruch obrotowy, a zęby frezu ścinają z materiału wióry o zmiennej grubości. Frezowanie może być **współbieżne**, gdy kierunek ruchu posuwowego stołu frezarki jest zgodny z kierunkiem ruchu frezu, lub **przeciwbieżne**, gdy te dwa kierunki są przeciwne. Frezarki, podobnie jak tokarki, można ze względu na różne kryteria podzielić na:

- **ogólnego przeznaczenia**, do których należą frezarki stołowe, wspornikowe poziome (rys. 2.18), wspornikowe pionowe i bezwspornikowe;
- **specjalizowane**, do których należą kopiarki, frezarki do rowków i grawerki;

– specjalne branzowe, do których należą frezarki do wałów korbowych, gwintów i kół zębatych.

Na podstawie frezarki wspornikowej poziomej jest umocowany kadłub wraz z pionowymi prowadnicami, po których przesuwają się stół. W górnej części kadłuba znajduje się belka, służąca do zamocowania podtrzymki trzpienia frezarskiego. Trzpień frezarski mocuje się we wrzecionie.

**Strugarki** są to obrabiarki wykorzystywane do obrabiania płaszczyzn. Za ich pomocą można otrzymywać różnego rodzaju rowki – np. prostokątne i trapezowe. Struganie coraz częściej zastępuje się obecnie frezowaniem, które jest bardziej wydajne i ekonomiczne. Narzędzie (nóż strugarski) wykonuje prostoliniowy ruch posuwisto-zwrotny względem obrabianego przedmiotu. Ruch, podczas którego następuje skrawanie materiału, to ruch roboczy, a ruch powrotny to ruch jałowy.



Rys. 2.18. Frezarka wspornikowa pozioma

Szybkość ruchu jałowego jest większa niż ruchu roboczego. W zależności od kierunku ruchu noża można rozróżnić strugarki poziome i pionowe, czyli dłutownice. Istnieje także podział strugarek ze względu na wzajemne ruchy noża i przedmiotu obrabianego:

- **poprzeczne** (nóż wykonuje ruch roboczy, a stół z umocowanym przedmiotem poprzeczny ruch posuwowy);
- **wzdłużne** (stół z umocowanym na nim przedmiotem wykonuje ruch roboczy, a nóż ruch posuwowy);
- **pionowe**, czyli dłutownice (nóż wykonuje ruch roboczy w płaszczyźnie pionowej do poziomo umieszczonego na stole przedmiotu obrabianego).

**Wiertarki** są to obrabiarki służące do wiercenia, rozwiercania i pogłębiania otworów. Proces wiercenia został omówiony w podrozdziale 2.4, dotyczącym prac ślusarskich. Przedstawiono tam podział wiertarek ze względu na napęd i charakter pracy. Wiertarki można również – podobnie jak inne obrabiarki – podzielić na:

- **ogólnego przeznaczenia** (stojakowe słupowe i kadłubowe, wielowrzecionowe, na których można wiercić jednocześnie wiele otworów, oraz promieniowe, na których można wiercić otwory w różnych miejscach przedmiotu bez zmiany jego położenia);
- **specjalizowane** (współrzędnościowe, na których można wiercić otwory o bardzo dokładnym rozstawieniu osi dzięki dodatkowemu wyposażeniu w przyrządy optyczne).

Na rysunku 2.19 przedstawiono wiertarkę stojakową słupową.

**Szlifierki** są to obrabiarki przeznaczone do obróbki skrawaniem, w których narzędziem skrawającym jest ściernica, osetka lub taśma ścierna. Podczas szlifowania ruch roboczy obrotowy wykonuje ściernica. Obrabiany przedmiot może wykonywać ruch obrotowy lub prostoliniowy. Szlifierki można – podobnie jak inne obrabiarki – podzielić na:

- ogólnego przeznaczenia,
- specjalizowane,
- specjalne.

Częściej stosuje się jednak podział ze względu na rodzaj obrabianej powierzchni:

- **szlifierki do wałków**,
- **szlifierki do otworów**,
- **szlifierki do płaszczyzn**.

W kłowych szlifierkach do wałków obrabiany przedmiot umieszcza się w kłach wrzeciennika i konika. Bezklowe szlifierki do wałków mają dwie ściernice, z których jedna, robocza, służy do szlifowania, a druga, posuwowa, do obracania i przesuwania przedmiotu.

Można rozróżnić szlifierki do otworów:

- z wrzeciennikiem ściernicy znajdującym się na suporcie i wykonującym prostoliniowy ruch posuwisto-zwrotny,
- z wrzeciennikiem przedmiotu obrabianego wykonującym prostoliniowy ruch posuwisto-zwrotny.

Podział szlifierek do płaszczyzn opiera się na rozróżnieniu ustawienia osi wrzeciona – poziomym lub pionowym – oraz ruchu przedmiotu obrabianego ustawionego na stole. Szlifierki do płaszczyzn mogą być:

- z poziomą osią wrzeciona (stół wykonuje postępowy ruch posuwisto-zwrotny lub obrotowy),
- z pionową osią wrzeciona (stół wykonuje postępowy ruch posuwisto-zwrotny lub obrotowy).

Małe zakłady naprawcze wykorzystują maszyny uniwersalne, pozwalające wykonywać różne operacje technologiczne na jednym urządzeniu. Duże zakłady produkcyjne wymagają sprzętu specjalistycznego, gwarantującego bardzo dobrą jakość wyrobów i maksymalną wydajność produkcji. Te warunki spełniają **obrabiarce sterowane numerycznie CNC** (ang. *Computer Numerical Control*), które powstały w latach siedemdziesiątych XX w. w Stanach Zjednoczonych jako rozwinięcie obrabiarek NC (ang. *Numerical Control*), stworzonych z kolei w latach pięćdziesiątych XX w. na potrzeby lotnictwa wojskowego USA.



Rys. 2.19. Wiertarka stojakowa słupowa

Budowa obrabiarek CNC jest podobna do konwencjonalnych, omówionych w tym punkcie. Ruchy poszczególnych zespołów są obliczane, sterowane i kontrolowane przez wewnętrzny komputer. Korzyści ze stosowania obrabiarek CNC w porównaniu z tradycyjnymi maszynami to:

- większa wydajność dzięki większej szybkości skrawania i krótszym czasom przygotowawczym,
- jednakowa jakość produktów,
- mała liczba braków,
- krótsze cykle produkcyjne,
- większa elastyczność produkcji.

Dostrzegając te zalety, z roku na rok coraz więcej zakładów produkcyjnych, także mniejszych, stosuje obrabiarki CNC.

### 2.5.3. Narzędzia

Narzędzia stosowane do mechanicznej obróbki skrawaniem muszą być twarde oraz odporne na ścieranie i działanie wysokiej temperatury. Dlatego są wykonywane ze stali stopowych, węglików spiekanych i materiałów metaloceramicznych, omówionych w rozdziale 1. „Materiały konstrukcyjne”. Narzędzia skrawające – z uwagi na rodzaj obróbki, do jakiej są przeznaczone – dzieli się na:

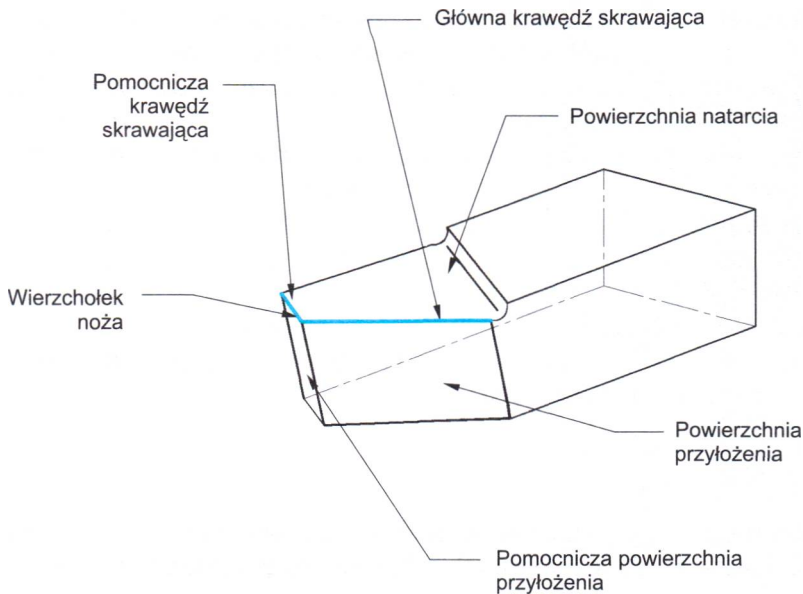
- noże (tokarskie, strugarskie);
- wiertła, rozwiertaki;
- frezy;
- narzędzia szlifierskie i in.

**Noże** do obróbki skrawaniem składają się z części roboczej, skrawającej materiał, i chwytu, służącego do właściwego zamocowania noża. Noże można podzielić ze względu na:

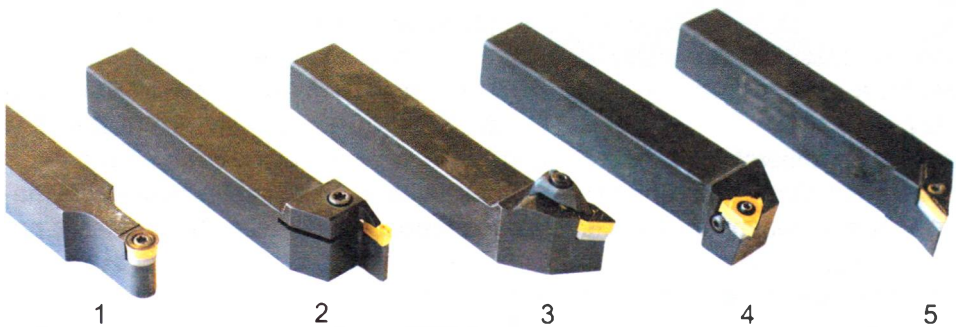
- rodzaj obróbki: tokarskie i strugarskie;
- dokładność obróbki: zdzieraki, gładziki i wykańczaki;
- położenie krawędzi tnącej: prawe (z częścią roboczą odchyloną w prawo w stosunku do ostrza) i lewe (z częścią roboczą odchyloną w lewo);
- sposób wykonania: jednolite (w całej objętości wykonane z jednego rodzaju materiału), z nakładkami w części roboczej z innych rodzajów materiałów (np. z węglików spiekanych) i zgrzewane (z częścią roboczą i chwytym wykonanymi z różnych materiałów i zgrzanymi ze sobą).

Na rysunku 2.20 przedstawiono elementy części roboczej noża tokarskiego.

Powierzchnia natarcia to powierzchnia, po której spływają wióry. Powierzchnia przyłożenia jest to powierzchnia skierowana do płaszczyzny obrabianej, pomocnicza powierzchnia przyłożenia to powierzchnia skierowana do powierzchni obrobionej. Główna krawędź skrawająca to linia przecięcia się powierzchni natarcia i przyłożenia. Pomocnicza krawędź skrawająca jest to linia przecięcia się powierzchni natarcia i pomocniczej powierzchni przyłożenia. Wierzchołek to punkt przecięcia się głównej krawędzi skrawającej i pomocniczej krawędzi skrawającej. Na rysunku 2.21 przedstawiono różne rodzaje noży tokarskich.



**Rys. 2.20.** Geometria noża tokarskiego



**Rys. 2.21.** Rodzaje noży tokarskich (przykłady)

1 – promieniowy, 2 – przecinak prawy, 3 – odsadzony prawy, 4 – do gwintów zewnętrznych, 5 – odsadzony spiczasty

**Frezy** to narzędzia skrawające wyposażone w wiele ostrzy. Mogą one być wykonane w całości z jednego materiału lub (tak jak w przypadku noży) z ostrzami np. z węglików spiekanych. Ze względu na dużą różnorodność powierzchni, jakie można uzyskać za pomocą frezowania (rowki, gniazda, zęby, gwinty itp.) różni się wiele rodzajów frezów. W zależności od kształtu ostrzy są to frezy:

- ścinowe (wykonane przez frezowanie),
- zataczane (wykonane przez wytaczanie lub szlifowanie).

Ze względu na kształt można rozróżnić frezy:

- walcowe,
- walcowo-czołowe,
- tarczowe,
- palcowe kształtowe itp.



**Rys. 2.22.** Rodzaje frezów  
a – walcowy, b – ślimakowy, c – tarczowy piłkowy, d – tarczowy

Na rysunku 2.22 przedstawiono różne rodzaje frezów.

**Wiertła i rozwiertaki** są omówione w podrozdziale 2.4 dotyczącym ślusarstwa.

**Narzędzia szlifierskie**, czyli ściernice, osetki, taśmy ścierne i pasty ścierne mogą być wykonane z materiałów naturalnych lub sztucznych. Do materiałów naturalnych należą:

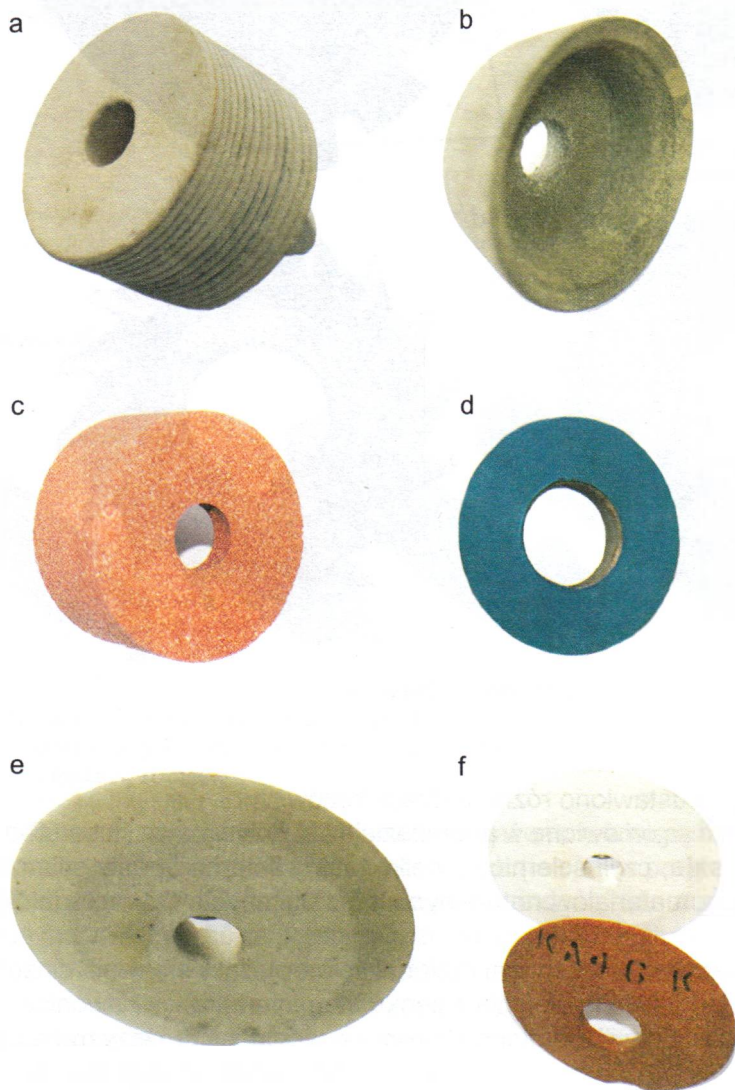
- kwarc (dwutlenek krzemu, bardzo tani materiał ścierny);
- korund (minerał składający się głównie z tlenku aluminium);
- diament (najtwardszy minerał, odmiana alotropowa węgla, najdroższy materiał ścierny).

Sztuczne materiały ścierne to:

- karborund (węgiel krzemu),
- elektrokorund (tlenek glinu),
- sztuczne diamenty.

Cechą charakterystyczną materiału ściernego jest jego ziarnistość, czyli wielkość ziaren, którą określa się na podstawie analizy sitowej.

Ziarna materiału ściernego związane spoiwem skrawają obrabiany materiał jak nóż, lecz krawędzie skrawające ziaren są bardzo małe. Ściernice charakteryzuje rodzaj materiału ściernego (rys. 2.23), wielkość ziarna oraz rodzaj spoiwa i struktura zależna od procentowego udziału materiału ściernego w objętości ściernicy.



**Rys. 2.23.** Różne rodzaje ściernic szlifierskich

a – do gwintów, b – garnkowa stożkowa, c – garnkowa walcowa, d – tarczowa, e – tarczowa kątowna, f – talerzowe



Najczęściej używa się ściernic ze spoiwem ceramicznym, odpornych na działanie wilgoci i łatwo wchłaniających ciecz obróbkowe, ale mało odpornych na uderzenia. Ściernice w zależności od przeznaczenia mogą mieć różne kształty, jak np. trzpieniowe, talerzowe lub płaskie pierścieniowe.

## 2.6. Wykańczająca obróbka powierzchni

Rozwój przemysłu maszynowego spowodował zwiększenie oczekiwań co do jakości produkowanych wyrobów. Na przestrzeni ostatnich lat wzrosły wymagania dotyczące dokładności wymiarów i dokładności kształtu oraz gładkości powierzchni gotowych części maszyn. Dlatego jest konieczne stosowanie dodatkowej obróbki wykańczającej, powierzchniowej. Elementy części maszyn poddane dodatkowej obróbce wykańczającej są odporniejsze na zużycie na skutek tarcia tocznego, zużycie ściernie podczas poślizgu, obciążenia udarowe i cieplne oraz korozję atmosferyczną i w wysokiej temperaturze. Warstwa powierzchniowa ma także wpływ na takie własności użytkowe wyrobów, jak szczelność, zdolność do tłumienia drgań, opory przepływu, trwałość pasowania i wytrzymałość połączeń spawanych.

Rozróżnia się trzy rodzaje obróbki powierzchniowej:

- bardzo dokładną, podczas której dąży się do uzyskania małych błędów wymiarowych (np. wewnętrzne powierzchnie pasowanych wciskowo tulei łożyskowych);
- ostateczną, której celem jest uzyskanie małych błędów kształtu (np. kontrolne liniały powierzchniowe);
- gładkościową, zmierzającą do uzyskania odpowiednio dużej gładkości powierzchni (np. ozdobne elementy nadwozi samochodów).

Istnieje wiele metod obróbki powierzchniowej, np.:

- skrawaniem,
- zgniotem,
- cieplną i ciepłno-chemiczną,
- ścierną,
- elektrochemiczną.

Metody te w większości odpowiadają rodzajom obróbki materiałów omówionym w poprzednich rozdziałach, różnią się jednak klasą dokładności uzyskiwanych wyrobów, co zależy od urządzeń stosowanych w czasie obróbki.

Obróbka wykańczająca charakteryzuje się:

- małymi przekrojami warstw skrawania,
- bardzo małą lub bardzo dużą prędkością skrawania,
- małym posuwem,
- małą ziarnistością narzędzi skrawających,
- specjalnym kształtem narzędzi.

**Toczenie gładkościowe** jest stosowane do obróbki wykańczającej elementów ze stopów metali nieżelaznych, stali i żeliwa. Można otrzymać tą metodą powierzchnię w 7.–6. klasie dokładności. Klasy dokładności omówiono w pierwszej części podręcznika, w rozdziale 3. „Tolerancje i pasowania”.

**Frezowanie gładkościowe** wykonuje się za pomocą głowic frezowych z ostrzami z węglików spiekanych lub diamentu; otrzymuje się powierzchnię w 8.–7. klasie dokładności.

**Gładzenie** (ang. *honing*), odmiana obróbki ścierniej, jest stosowane w celu poprawy dokładności wykonania i gładkości otworów. Wykonuje się je na obrabiarkach gładzarkach, które mają głowice z 3...12 osełkami z węglika krzemu lub elektrokorundu. Osełki te są dociskane do ścian otworu mechanicznie albo hydraulicznie. Gładzenie stosuje się do wykańczania gładzi cylindrów silnika, otworów w korbowodach i otworów w kołach zębatych. Za pomocą tej obróbki można uzyskać dokładność wymiarową w klasie 6.– 5.

**Dogładzanie oscylacyjne** (ang. *superfinish*), również rodzaj obróbki ścierniej, jest stosowane do wałów, płaszczyszyn i otworów. Wykonuje się je na obrabiarkach dogładzarkach lub tokarkach albo szlifierkach z odpowiednim oprzyrządowaniem. Osełki, przylegając do obrabianej powierzchni, wykonują ruch drgający i równocześnie powolny ruch postępowy posuwisto-zwrotny. Obróbka ta zmniejsza chropowatość powierzchni.

**Docieranie** (ang. *lapping*) także stanowi odmianę obróbki ścierniej i polega na usuwaniu mikronierówności powierzchni płaskich lub okrągłych za pomocą proszku ściernego. Wykonuje się je na obrabiarkach docierakach, które wbijają pod niewielkim naciskiem zawieszinę proszku ściernego z olejem lub naftą w obrabiany materiał. Docieranie wykorzystuje się w przemyśle samochodowym.

**Nagniatanie toczone** należy do metod obróbki powierzchniowej zgniotem. Wykonuje się je za pomocą utwardzonych elementów (kulek, krążków, wałków) dociskanych do obrabianych powierzchni, które także się poruszają. Nagniatanie powoduje zwiększenie gładkości powierzchni o 2...4 klasy dokładności.

**Nagniatanie udarowo-strumieniowe** to także obróbka zgniotem. Polega na nagniataniu powierzchni obrabianej śrutem lub kuleczkami za pomocą wyrzutnika pneumatycznego lub mechanicznego. Ten rodzaj obróbki stosuje się do wałów napędowych, sprężyn i resorów.

W związku z większymi wymaganiami co do chropowatości powierzchni, dokładności oraz wobec wprowadzania materiałów trudno skrawalnych (np. stopów tytanu) coraz częściej stosuje się nowe metody obróbki powierzchniowej. Jedną z nich jest **obróbka erozyjna**, polegająca na usuwaniu zbędnej warstwy materiału pod wpływem erozji, tj. ubywania drobnych cząstek obrabianej powierzchni. Obróbka elektroerozyjna wykorzystuje zjawisko powstawania uszkodzenia materiału pod wpływem wyładowań elektrycznych występujących między dwoma elektrodami, z których jedną jest przedmiot obrabiany. Proces ten zachodzi w odpowiednim środowisku ciekłym lub gazowym.

Do metod powierzchniowej obróbki erozyjnej należy także obróbka strumieniowa, polegająca na wykorzystaniu energii strumienia cząstek padających na materiał i powodujących jego miejscowe topienie się i odparowanie. Jeśli padającą wiązkę tworzą elektrony, obróbka nosi nazwę elektronowej, jeśli jony – jonowej, a jeżeli fotony emitowane przez laser – obróbki laserowej.

## 2.7. Maszyny i narzędzia do wytwarzania części pojazdów samochodowych

Niniejszy rozdział podręcznika jest poświęcony technologiom stosowanym do wytwarzania części maszyn. Wcześniej przedstawiono różne rodzaje obróbki i związane z nimi maszyny oraz urządzenia, które wykorzystuje się podczas tych procesów. W rozdziale 1. omówiono materiały konstrukcyjne oraz ich własności w powiązaniu z wymaganiami projektowania części maszyn. Znając wymagania, jakie musi spełnić projektowana część maszyny, wybiera się odpowiedni do nich materiał, a następnie dobiera właściwy rodzaj obróbki, a co za tym idzie – także maszyny i narzędzia. Współcześnie wytwarzany pojazd samochodowy jest bardzo skomplikowanym produktem. Składa się on z coraz większej liczby części, coraz bardziej zróżnicowanych pod względem materiałów i technologii wytwarzania, dlatego wymaga współpracy specjalistów z wielu dziedzin techniki. Każdy pojazd samochodowy dzieli się na kilka podstawowych zespołów, te na podzespoły, a podzespoły na pojedyncze części. Pozyskiwanie części do produkcji pojazdów samochodowych opiera się na:

- zakupie gotowych wyrobów służących do budowy różnych urządzeń, produkowanych przez wyspecjalizowane zakłady (np. śrub, nakrętek, przewodów elektrycznych, blach, łożysk tocznych);
- wykorzystywaniu wyrobów specjalistycznych zakładów produkujących części samochodowe (np. samochodowe układy hamulcowe, sprzęgła, amortyzatory);
- zleceniu wyspecjalizowanym zakładom spoza branży motoryzacyjnej produkcji części stosowanych tylko w pojazdach samochodowych (np. szyb samochodowych, wkładów filtracyjnych, przekładni zębatych).

Materiały stosowane do produkcji części samochodów dzieli się na metalowe i niemetalowe. W podrozdziale 1.6 przedstawiono części pojazdów samochodowych wykonane z metali i ich stopów, a w punkcie 1.7.2 części wykonane z niemetalu. Podczas wytwarzania części pojazdów samochodowych uwzględnia się ich własności technologiczne.

Materiały mające dobrą lejność, zarówno metale, jak i niemetalu (np. żeliwo, staliwo, odlewnicze stopy metali nieżelaznych i tworzywa sztuczne), obrabia się za pomocą odlewania, wykorzystując formierki do wykonywania form i różnego rodzaju maszyny odlewnicze.

Materiały charakteryzujące się dobrymi własnościami plastycznymi (np. stале, plastyczne stopy metali nieżelaznych i tworzywa sztuczne) obrabia się, wykorzy-

stując obróbkę plastyczną z użyciem pras, młotów, kuźniarek, walcarek i ciągarrek. Podczas obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej wykorzystuje się różnorodne piece i urządzenia do chłodzenia.

Obróbkę skrawaniem wykonuje się na takich maszynach, jak tokarki, frezarki, strugarki, szlifierki i wiertarki.

Narzędzia, które wykorzystuje się do produkcji części maszyn, bezpośrednio związane z rodzajem stosowanej obróbki, to ubijaki, ciągadła, kowadła, przeci-naki, młotki, kleszcze, narzynki, noże i wiertła (omawiane w tym rozdziale).

W produkcji części samochodowych tradycyjne narzędzia ręczne zastępuje się ze względu na czynniki ekonomiczne (większa wydajność) i technologiczne (lepsza jakość uzyskiwanych wyrobów) zmechanizowanymi ręcznymi narzędziami warsztatowymi o napędzie elektrycznym, pneumatycznym, hydraulicznym lub hydrauliczno-pneumatycznym. Przykładami takich narzędzi są pneumatyczna wyrzynarka, pneumatyczna szlifierka kątowna lub pneumatyczny klucz udarowy.

Stosowane w motoryzacji metody łączenia (spajania) części, czyli m.in. spawanie, zgrzewanie i lutowanie, są przedstawione w rozdziale 3. wraz z odpowiednimi maszynami i narzędziami.

## 2.8. Montaż

### 2.8.1. Wiadomości wstępne

Montaż polega na łączeniu poszczególnych części w zespoły i końcowym złożeniu zespołów w gotowy wyrób.

Zespoły składają się z pewnej liczby części połączonych tak, że pełnią określoną funkcję w pojazdach samochodowych, np. tłok silnika z korbowodem, sworzniem i pierścieniami. Organizacja montażu zależy od wielkości produkcji i wyposażenia technicznego zakładu. Rozróżnia się omówione dalej metody montażu.

#### **Montaż według całkowitej zamienności**

Montowane części są wykonane bardzo dokładnie, w wąskich tolerancjach wymiaru. Montaż jest prosty, ale koszt wykonania części wysoki. Metodę tę stosuje się w produkcji masowej i czasami seryjnej, także do produkcji samochodów.

#### **Montaż według selekcji**

Polega on na podziale części według ich rzeczywistych wymiarów na grupy w granicach wąskich tolerancji i odpowiednim ich oznakowaniu. Podczas montażu dobiera się części z odpowiedniej grupy. W przypadku tańszych części ogólne koszty zwiększają nakłady na pomiary i oznakowanie. Metodę tę stosuje się często w produkcji, także samochodów, np. przy montażu tłoków w cylindrach silników spalinowych.

### Montaż według zasady dopasowania

Jedną z części składowych dopasowuje się czasie montażu przez dodatkową obróbkę powierzchniową. Można stosować części o dużej tolerancji, ale dopasowywanie generuje dodatkowy koszt. Metodę tę stosuje się w produkcji jednostkowej i małoseryjnej.

### Montaż według zasady regulowania

Polega na dodaniu do łańcucha wymiarowego dodatkowego elementu (np. podkładki), umożliwiającego regulację wymiarów. Tą metodą uzyskuje się dużą dokładność wyrobu. Montaż taki stosuje się w produkcji seryjnej.

Operacje montażu mogą być prowadzone na dwa sposoby:

- **stacjonarny**, gdy wyrób jest montowany na jednym stanowisku roboczym;
- **ruchomy** (potokowy, przepływowy), gdy montowany wyrób jest przesuwany w czasie montażu z jednego stanowiska na drugie.

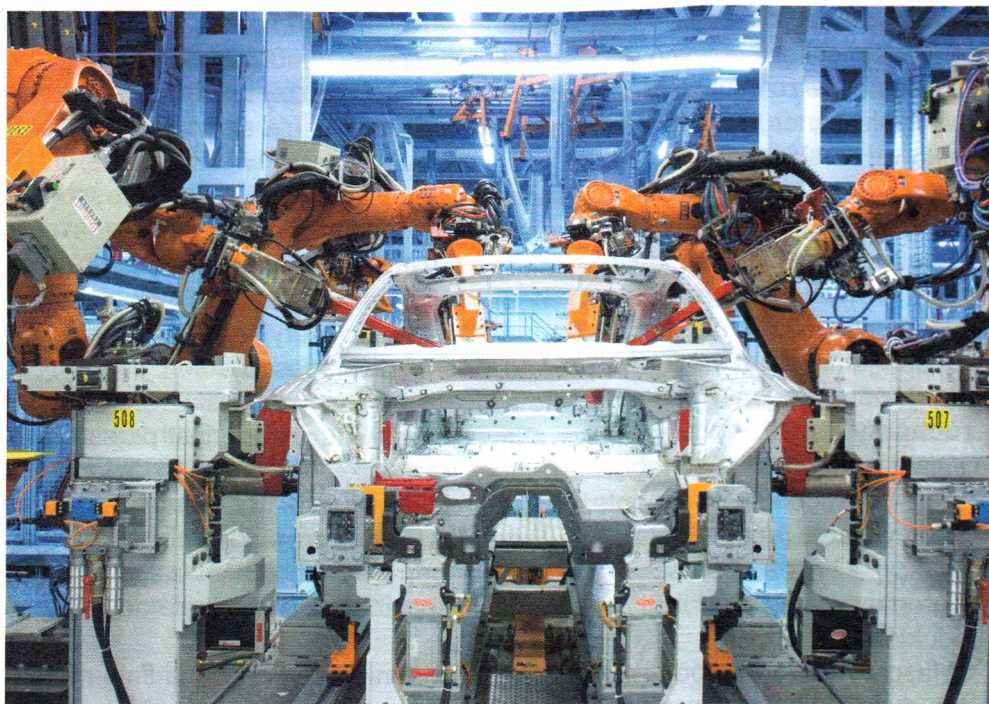
Pierwszą ruchomą linię montażową zaprojektował w 1913 r. Henry Ford w celu usprawnienia produkcji słynnego Forda T, przez co zrewolucjonizował proces produkcyjny wyrobów na całym świecie. Ruchoma linia montażowa spowodowała ogromny wzrost produkcji i obniżenie jej kosztów, co zwiększyło dostępność produktów.

Właściwy dobór metody montażu i odpowiednio przygotowana linia montażowa mają istotny wpływ na produkcję końcową, dlatego linie montażowe projektuje się specjalnie dla poszczególnych zakładów pracy, uwzględniając ich specyfikę produkcji.

Organizacja ruchomego montażu wymaga dużego nakładu pracy – należy dokładnie przeanalizować wszystkie kolejne operacje montażowe, ustalić czas ich trwania, połączyć je w odpowiednie grupy związane z poszczególnymi stanowiskami pracy oraz określić czas pracy całej linii montażowej. Następnym zadaniem, które trzeba rozwiązać podczas projektowania linii montażowych, jest dobór właściwych środków transportu, zapewniających ciągłość produkcji. Transport ten obejmuje dostarczanie części i zespołów z oddziałów produkcyjnych lub magazynów: na linie montażowe, na linii montażowej oraz transport gotowych wyrobów. Jako środków transportu używa się różnego rodzaju wózków ręcznych lub akumulatorowych, suwnic, dźwigów i przenośników. Zagadnienia te są dokładniej omówione w dalszej części podręcznika (patrz podrozdz. 4.9 „Maszyny i środki transportowe”).

Pojazd samochodowy jest końcowym produktem całego ciągu produkcyjnego, składającego się z wielu etapów.

Produkcja nadwozia rozpoczyna się w tłoczni, gdzie z odpowiedniej blachy wytłacza się zespoły dachu, płytę podłogową i ściany boczne. Następnie elementy te są transportowane za pomocą zautomatyzowanych linii do zakładu budowy nadwozi tzw. surowych, gdzie za pomocą zgrzewania następuje łączenie poszczególnych elementów. Wzdłuż linii do montażu są ustawione stanowiska monterów wyposażone w odpowiednie narzędzia. Linia montażu nadwozi jest wyposażona w podwieszane elastycznie zgrzewarki. Równolegle



Rys. 2.24. Przykładowa zautomatyzowana linia montażowa samochodów

do tej linii w wydzielonych gniazdach montażowych (dokach) są zgrzewane inne zespoły, np. błotniki lub drzwi. Montaż gniazdowy polega na wykonywaniu prac montażowych przez grupę kilku lub kilkunastu pracowników odpowiadających wspólnie za jakość wyrobów opuszczających gniazdo (dok). Nadwozia mają około 5000 zgrzein punktowych. „Surowe” nadwozia są przenoszone automatycznie do innych gniazd montażowych, gdzie następuje dopasowywanie drzwi, pokryw i błotników. Po kontroli jakości nadwozie zostaje skierowane do lakierni.

Połączenie nadwozia z pozostałymi zespołami odbywa się w zautomatyzowanych montowniach. Podczas montażu są stosowane różne systemy transportowe. W jednym z nich nadwozie stoi na odpowiedniej ramie na taśmie, a pracownik przemieszcza się razem z pojazdem, stojąc na pomoście przymocowanym do taśmy. W innym systemie transportowym pracownik stoi na ruchomym chodniku, którego ruch jest zsynchronizowany z ruchem taśmy. Na liniach montażowych są także stosowane przenośniki podwieszane, do których mocuje się nadwozia.

Aby usprawnić prace przy montowaniu np. przewodów hamulcowych, układu wylotowego, zawieszenia i innych zespołów umieszczonych pod pojazdem, nadwozie jest ułożone na linii montażowej na boku i przesuwa się dalej. Stanowiska, na których przykręca się poszczególne części, są wyposażone w różnego ro-

dzaju narzędzia o napędzie pneumatycznym, elektrycznym lub hydraulicznym (klucze, wkrętaki itp.). Najczęściej równolegle do głównej linii montażowej przebiega druga linia, na której następuje montaż innych zespołów, w odpowiednim momencie przenoszonych na główną linię montażową. W ciągu całego procesu montażu po kolejnych jego etapach następuje kontrola jakości.

Po zmontowaniu całego pojazdu i napełnieniu wszystkich instalacji właściwymi płynami sprawdza się:

- działanie silnika,
- działanie mechanizmu kierowniczego,
- ustawienie kół,
- działanie układu hamulcowego,
- poziom hałasu wewnątrz kabiny,
- ustawienie świateł reflektorów,
- szczelności nadwozia (w komorze zraszaczy).

Jeśli wynik sprawdzenia jest pozytywny, pojazd schodzi z linii produkcyjnej zaopatrzony w kompletną dokumentację techniczną i kartę identyfikacyjną.

## 2.8.2. Dokumentacja technologiczna montażu

Dokumentacja technologiczna montażu stanowi część całej dokumentacji procesu technologicznego otrzymywania gotowego wyrobu. Proces technologiczny, podstawowa część procesu produkcyjnego, jest prowadzony w celu uzyskania zadanych kształtów, wymiarów i właściwości oraz innych wymaganych parametrów przedmiotu, w tym wzajemnych połączeń części w wyrobie. Dokumentacja procesu technologicznego obejmuje wszystkie informacje i zalecenia związane z projektowaniem tego procesu.

### **Dokumentacja technologiczna zawiera zwykle:**

- dokumenty podstawowe, czyli karty technologiczne obróbki (dokumenty przedstawiające cały przebieg obróbki od materiału do gotowej części), karty instrukcyjne (przeznaczone dla pracownika bezpośrednio wykonującego daną operację, zawierające instrukcję wykonania danej operacji), zestawienia pomocy warsztatowych i normy zużycia materiałów;
- rysunki;
- dokumenty związane z organizacją produkcji;
- wykazy norm wykorzystywanych w procesie produkcyjnym.

### **Karty technologiczne montażu zawierają:**

- oznaczenie montowanego zespołu,
- zestawienie wszystkich operacji i zabiegów,
- zestawienie narzędzi i przyrządów używanych podczas montażu,
- określenie wymaganej dokładności montażu,
- określenie czasu poszczególnych operacji,
- szkic montowanego zespołu.

..... (Nazwa producenta)	<h1>KARTA MONTAŻU</h1>			Strona ...1... Strona ...2...
Nr .....		z dnia .....		
Wyrób: <b>AMORTYZATOR, typ</b> .....		Indeks.....		
Nr operacji	Nazwa operacji	Nr marki	Nazwisko	Uwagi
020	Mycie			
030	Montaż zaworu tłoka I			
035	Montaż zaworu tłoka II			
040	Montaż zaworu tłoka III			
050	Dokręcanie nakrętki			
060	Nitowanie radialne			
070	Czyszczenie automatyczne			
080	Rozładunek z selekcją braków			
100	Montaż prowadnicy			
110	Montaż sprężyny			
120	Zbrojenie tłoczyska i tłoka pływającego			
130	Montaż tłoczyska z uszczelnieniem			
140	Zamykanie amortyzatora			
150	Sprawdzanie charakterystyki			
160	Walcowanie amortyzatora			
170	Nabijanie tulejki stalowo - gumowej			
Zmontowano: .....		Braków: .....		
			Sprawdził (podpis i pieczęć)	

Rys. 2.25. Karta montażu (przykład)



**Organizacja montażu** jako końcowej części procesu technologicznego zależy od:

- wielkości produkcji,
- metody montażu,
- rozmiarów części montowanych,
- przewidywanego czasu montażu.

Dokumentacja technologiczna montażu w produkcji seryjnej składa się z kart technologicznych montażu poszczególnych zespołów i całego wyrobu. Przykładową kartę montażu przedstawiono na rysunku 2.25.

Dokumentację technologiczną montażu w produkcji jednostkowej stanowią rysunki złożeniowe.

Montaż ma miejsce nie tylko podczas produkcji nowych części i maszyn, ale także w procesie naprawczym – po demontażu i wymianie zużytych elementów wykonuje się montaż zespołów.

## 2.9. Przepisy bhp podczas wytwarzania części maszyn

Podczas obsługi maszyn i urządzeń każdy pracownik – w celu zapewnienia bezpieczeństwa w czasie pracy oraz bezpieczeństwa powszechnego – powinien przestrzegać następujących zasad:

- dbać o swoje zdrowie i bezpieczeństwo, a także o zdrowie osób, z którymi wykonuje pracę;
- używać w pracy środków ochrony osobistej i urządzeń ochronnych przewidzianych na danym stanowisku pracy;
- znać instrukcje obsługi i konserwacji maszyn i urządzeń, na których ma pracować;
- sprawdzić stan techniczny maszyn i urządzeń przed rozpoczęciem pracy;
- w razie wystąpienia usterek zgłosić je bezpośrednio przełożonemu;
- sprawdzić stan oświetlenia i wentylacji na stanowisku pracy;
- przygotować materiał do obróbki w sposób zapewniający maksymalne bezpieczeństwo pracy;
- zaznajomić się z dokumentacją technologiczną dotyczącą operacji na danym stanowisku;
- przygotować narzędzia kontrolno-pomiarowe potrzebne na danym stanowisku i sprawdzić ich stan;
- po zakończeniu pracy wyłączyć urządzenia i maszyny o napędzie elektrycznym spod napięcia;
- oczyścić stanowisko robocze po zakończeniu pracy;
- sprawdzić, czy pozostawione stanowisko nie stwarza zagrożeń dla innych osób;
- wypadki natychmiast zgłaszać przełożonemu.

**Przedstawione zalecenia są to ogólne zasady bezpieczeństwa, których należy zawsze przestrzegać!!!**

W zależności od wybranej techniki wytwarzania pojawiają się dodatkowe zagrożenia dla pracowników, wynikające ze specyfiki danego procesu pracy.

**W odlewniach** najwięcej wypadków zdarza się podczas przenoszenia i przewożenia ładunków. Zagrożeniem jest ciekły metal i oparzenia z nim związane. Czynnikiem szkodliwym są pyły krzemowe, gazy i pary wydzielane podczas topienia metalu.

**Podczas obróbki plastycznej** główne zagrożenie wypadkowe stanowią młoty, prasy i walcarki. Uciążliwy jest także hałas pracujących maszyn i wysoka temperatura pochodząca od pieców grzewczych.

**Podczas obróbki skrawaniem** najczęstsze wypadki to skaleczenia spowodowane niewłaściwym sposobem oczyszczania wiórów z urządzeń skrawających lub niestosowaniem osłon ochronnych części wirujących maszyn i urządzeń.

Przepisy bhp **podczas obsługi maszyn** omówiono dokładniej w podrozdziale 4.11.

## 2.10. Pytania i ćwiczenia kontrolne

1. Jakie znasz rodzaje technik wytwarzania?
2. Co to jest odlewanie i jakie własności muszą mieć materiały poddane tej obróbce?
3. Jakie znasz metody odlewania i jakie zalety mają odlewy wykonywane poszczególnymi metodami?
4. Przedstaw proces technologiczny odlewania.
5. Na czym polega obróbka plastyczna i jakie znasz jej rodzaje?
6. Co to jest kucie i w produkcji jakich części maszyn ma zastosowanie?
7. Na czym polega walcowanie i jakie wyroby otrzymuje się tą metodą?
8. Co to jest tłoczenie i jakich urządzeń używa się podczas tego procesu?
9. Na czym polegają prace ślusarskie i jakich używa się narzędzi ślusarskich?
10. Jakie znasz główne operacje ślusarskie i na czym one polegają?
11. Co to jest trasowanie, jakie znasz narzędzia traserskie i do czego one służą?
12. Jakie znasz charakterystyczne kąty ostrza i jaki mają one wpływ na obróbkę skrawaniem?
13. Omów parametry skrawania.
14. Na czym polega toczenie i jaka jest zasada działania tokarki?
15. Jakie znasz narzędzia stosowane do mechanicznej obróbki skrawaniem?
16. Na czym polega wykańczająca obróbka powierzchni?
17. Omów podstawowe zasady montażu maszyn i urządzeń.

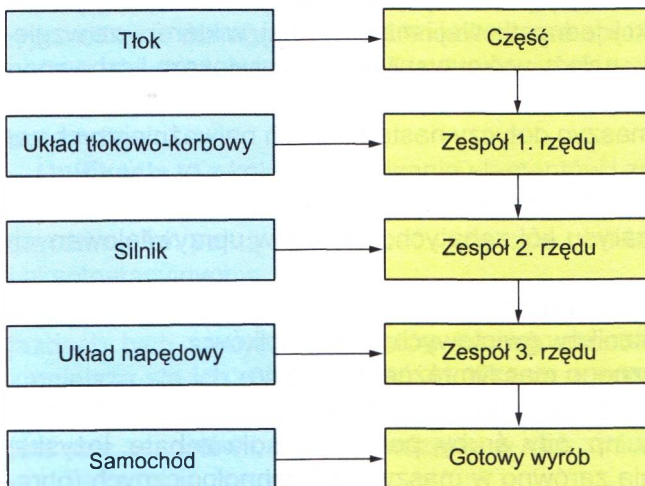
# 3. Części maszyn

## 3.1. Klasyfikacja i charakterystyka części maszyn

Każda maszyna lub urządzenie składa się z pewnej liczby elementów nazywanych **częściami**. Części tworzą zespoły spełniające określone funkcje w maszynie. **Zespołem** nazywa się zestaw części tworzących wyodrębnioną całość, który spełnia w maszynie określoną funkcję. W złożonych zespołach można wyodrębnić zespoły niższych rzędów, zwane także **podzespołami**. Zespoły spełniające w maszynie funkcje podstawowe są zespołami najniższych rzędów. Na przykład samochód składa się z wielu tysięcy 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 samochód (rys. 3.1). W konstrukcji samochodów zespoły wyższych rzędów często nazywa się układami (np. układy kierowniczy, hamulcowy, napędowy).

Części maszyn można podzielić na trzy podstawowe grupy:

- połączenia,
- łożyskowania,
- części napędów.



Rys. 3.1. Podział wyrobu 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 zwanych 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. Wymagania te określa się mianem cech użytkowych części maszyn. Zaprojektowanie optymalnej konstrukcji, spełniającej podane kryteria, jest niemożliwe bez znajomości rysunku technicznego, mechaniki, wytrzymałości materiałów, materiałoznawstwa, technologii wytwarzania i miernictwa. Stworzenie dobrej konstrukcji jest wynikiem szerokiej wiedzy technicznej oraz bogatych doświadczeń praktyki konstruktorskiej i eksploatacyjnej.

## 3.2. 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 zębatych, szeregów uprzywilejowanych wymiarów;
- rodzajów materiałów i ich właściwości;
- gotowych wyrobów, np. łączników gwintowych, nitów, kołków;
- warunków odbioru technicznego maszyn różnego rodzaju.

Wiele części maszyn, a nawet całe zespoły w różnych maszynach, mają takie same kształty i wymiary, np. nity, śruby, podkładki, koła zębate, łożyska, sprzęgła. Części te występują zarówno w maszynach technologicznych (obra-

biarkach), jak i w samochodach, samolotach, maszynach budowlanych itp. Ujednolicone kształty i wymiary tych części są określone ściśle w przepisach nazywanych normami. Normy dotyczące części maszyn określają nazwę, kształt, wymiary, materiał, własności wytrzymałościowe oraz zastosowanie i przeznaczenie określonej 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.

Normalizacja ułatwia konstruktorom opracowanie nowych maszyn oraz obniża koszty produkcji dzięki skróceniu czasu przygotowania i uruchomienia produkcji. Użytkownikom normalizacja ułatwia nabycie gotowych części, a także wymianę zużytych lub uszkodzonych części na nowe bez potrzeby ich dorabiania i dopasowywania. Uszkodzoną część maszyny można łatwo zidentyfikować za pomocą katalogu, jeśli się wie, z którego zespołu lub podzespołu maszyny została wymontowana. Znormalizowane nazewnictwo ułatwia też porozumiewanie się producentów i użytkowników.

Do 1 stycznia 1994 r. w Polsce funkcjonowały normy zakładowe (ZN), branżowe (BN) i krajowe (PN). Stosowanie wszystkich tych norm było obowiązkowe. Po 1 stycznia 1994 r. weszła w życie nowsza ustawa o normalizacji, zgodnie z którą funkcjonowały już tylko normy krajowe PN. Normy zakładowe ZN stały się częścią dokumentacji technicznej wyrobu, procesu lub usługi. Natomiast normy branżowe BN zlikwidowano lub przekształcono w PN. Stosowanie większości norm PN stało się dobrowolne.

**Od 1 stycznia 2003 r.** w Polsce obowiązuje nowa ustawa o normalizacji. 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 poprzez zmniejszenie liczby możliwych odmian danego wyrobu. Umożliwia ona obniżenie kosztów produkcji oraz ułatwia eksploatację maszyn. Przykładem typizacji mogą być stosowane typoszeroki wymiarowe łożysk tocznych, średnice i skoki gwintów, moduły kół zębatych itp.

**Unifikacja** to z kolei ujednoczanie elementów i zespołów stosowanych w maszynach podobnego typu. Stosowanie jednakowych sprawdzonych rozwiązań umożliwia ich pełną zamiennność i 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.

### 3.3. Zasady konstruowania i obliczania wytrzymałości części maszyn

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 analiz 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.

Podczas prac projektowych należy stosować zasady 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 taniść materiałów;
- możliwość stosowania prostych technik wytwarzania – technologiczność;
- niskie koszty i łatwość eksploatacji;
- zgodność z obowiązującymi normami i przepisami;
- uwzględnianie specyfiki użytkowania, np. temperatury, zanieczyszczenia środowiska itp.

Pozwala to na nadanie konstrukcji wymaganych cech, takich jak:

- właściwy układ przenoszenia obciążeń;
- lekkość i małe wymiary zewnętrzne;
- sprawność;
- przystosowanie maszyny do spełniania określonych zadań – funkcjonalność;
- trwałość i niezawodność;
- estetyka i ergonomiczność.

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. W fazie projektowo-konstrukcyjnej jest niezbędna ponadto znajomość technik wytwarzania, aby zaprojektowaną kon-

strukcję można było wykonać prostymi i tanimi metodami, czyli żeby była ona technologiczna.

Obliczenia wytrzymałościowe części maszyn przeprowadza się w celu ustalenia optymalnych wymiarów projektowanych części. Zdarza się, że wymiary części są narzucone przez wymagania geometryczne w celu zapewnienia funkcjonalności, ergonomii, estetyki wyrobu itp. Wówczas obliczenia wytrzymałościowe mają charakter sprawdzający. Wymagane minimalne wymiary części ustala się na podstawie podstawowego warunku wytrzymałościowego, który brzmi: **naprężenia rzeczywiste (obliczeniowe) nie mogą przekraczać naprężeń dopuszczalnych.**

Wartości naprężeń rzeczywistych ustala się na podstawie następujących zależności:

$$\sigma, \tau \text{ lub } p = \frac{F}{S} \leq k \quad (3.1)$$

oraz

$$\sigma \text{ lub } \tau = \frac{M}{W} \leq k \quad (3.2)$$

gdzie:

$\sigma$  – naprężenia normalne (prostopadłe do rozpatrywanego przekroju) podczas rozciągania, ściskania i zginania [Pa],

$\tau$  – naprężenia styczne (równoległe do rozpatrywanego przekroju) podczas ścinania i skręcania [Pa],

$p$  – naciski powierzchniowe [Pa],

$F$  – siła rozciągająca, ściskająca lub nacisk [N],

$S$  – pole powierzchni obciążonego przekroju poprzecznego [m<sup>2</sup>],

$M$  – moment zginający lub skręcający [N·m],

$W$  – wskaźnik wytrzymałości przekroju poprzecznego na zginanie  $W_x$  lub na skręcanie  $W_o$  [m<sup>3</sup>],

$k$  – naprężenia lub naciski dopuszczalne dla określonego stanu naprężeń [Pa].

Dla wyróżnienia stanu naprężenia przy symbolach naprężeń umieszcza się następujące indeksy wskazujące rodzaj obciążenia:  $r$  – rozciąganie,  $c$  – ściskanie,  $t$  – ścinanie,  $g$  – zginanie,  $s$  – skręcanie, a dodatkowo:  $j$  – przy obciążeniach jednostronnie zmiennych lub  $o$  – przy obciążeniach obustronnie zmiennych.

Z uwagi na występowanie w materiałach konstrukcyjnych dużych naprężeń, ich wartości wyraża się w megapaskalach [MPa]. Ponieważ  $1 \text{ MPa} = 1 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} =$

$$= \frac{1 \cdot 10^6 \text{ N}}{1 \cdot 10^6 \text{ mm}^2} = 1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \text{ więc wygodne jest określanie wymiarów przekrojów}$$

w mm<sup>2</sup>, a wskaźników wytrzymałości przekroju w mm<sup>3</sup>.

Poza prostymi stanami naprężeń wywoływanych rozciąganiem, ściskaniem, ścinaniem lub zginaniem w konstrukcjach mogą również występować złożone

stany naprężeń, np. ściskanie z równoczesnym zginaniem, zginanie ze skręcaniem itp. W takich przypadkach oblicza się tzw. naprężenie zastępcze. Gdy naprężenia mają jednakowy kierunek, naprężenia zastępcze

$$\sigma_z = \sigma_c + \sigma_g \leq k_c \quad (3.3)$$

Gdy naprężenia mają różne kierunki, zgodnie z hipotezą wytrzymałościową Hubera naprężenia zastępcze można wyrazić za pomocą wzoru

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_g^2 + (\alpha \cdot \tau)^2} \leq k_g \quad (3.4)$$

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

$$\alpha = \frac{k_c}{k_s} \quad (3.5)$$

oraz dla zginania ze skręcaniem

$$\alpha = \frac{k_{go}}{k_{sj}} \quad (3.6)$$

**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 pewności 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)

$$k_r = \frac{R_e}{x_e} \quad (3.7)$$

– dla materiałów kruchych (np. żeliwa)

$$k_r = \frac{R_m}{x_m} \quad (3.8)$$

$$k_c = \frac{R_c}{x_c} \quad (3.9)$$

**Jeśli obciążenia są zmienne**, do obliczenia wartości naprężenia dopuszczalnego za podstawę przyjmuje się wytrzymałość zmęczeniową, właściwą dla rodzaju występującego obciążenia  $Z$ , z odpowiednim indeksem wskazującym



na charakter obciążenia. Wartość naprężenia dopuszczalnego oblicza się wg wzoru:

$$k = \frac{Z}{x_z} \quad (3.10)$$

Typowe wartości współczynników bezpieczeństwa dla różnych rodzajów materiałów konstrukcyjnych podano w tablicy 3-1.

**Dopuszczalne naciski powierzchniowe** ustala się na podstawie naprężeń dopuszczalnych dla ściskania, ze szczególnym uwzględnieniem warunków współpracy części. W układach spoczynkowych najczęściej przyjmuje się:

$k_o = 0,8k_c$ ,  $k_{oj} \approx 0,8k_{cj}$ ,  $k_{oo} \approx 0,4k_{cj}$ . Dla układów ruchowych wartości dopuszczalnych nacisków powierzchniowych ustala się na podstawie odrębnych tablic. W połączeniach ustaloną wartość  $k_o$  odnosi się zawsze do części wykonanej z materiału o mniejszej wytrzymałości.

Przykładowe własności wytrzymałościowe wybranych gatunków stali, żeliw i stópów niezależnych przedstawiono w tablicach 3-2 do 3-4, a orientacyjne wartości naprężeń dopuszczalnych przy różnych rodzajach obciążenia ujęto w tablicy 3-5.

Tablica 3-1

Przeciętne wartości współczynników bezpieczeństwa

Materiał	$x_e$	$x_{m(c)}$	$x_z$
Stale, staliwa, żeliwa ciągliwe	2...2,3	–	3,5...4
Żeliwa szare	–	3,5	3
Stopy miedzi	3...4	–	4,5...6
Stopy aluminium	3,5...4	–	5...7

Tablica 3-2

Własności wytrzymałościowe wybranych gatunków stali

Materiał	Gatunek	Stan obróbki cieplnej*	Własności wytrzymałościowe [MPa]							
			$R_{m/c}$	$R_{m/e}$	$Z_{r/cj}$	$Z_{r/c}$	$Z_{g/j}$	$Z_{g/o}$	$Z_{s/j}$	$Z_{s/o}$
Stale niestopowe konstrukcyjne ogólnego przeznaczenia (wg PN-EN 10025-1)	S185		320	185	175	100	240	130	155	75
	S235JR		410	235	230	120	311	170	205	100
	E295		490	295	275	150	370	205	245	120
	E335		590	335	330	185	450	250	295	145
	E360		690	365	385	215	525	290	345	170
Stale niestopowe do utwardzania powierzchniowego i ulepszenia cieplnego (wg PN-EN 10027-1)	C10E	N	335	205	175	100	240	130	150	75
	C15E		375	225	200	110	270	150	175	90
	C22		410	245	230	125	310	170	205	100
	C25		450	275	250	140	340	190	225	110
	C35		530	315	300	165	400	220	265	130
	C45		600	355	340	190	460	250	300	150
	C55	650	380	365	200	495	270	325	160	
	C10E	H	410	245	230	125	310	170	205	100
	C15E	H	490	295	270	150	370	205	245	120
	C22	H	540	355	300	165	410	225	270	135
	C25	T	500	320	280	155	380	210	250	125
	C35	T	600	380	335	185	455	250	300	150
	C45	T	650	430	365	200	495	270	325	160
	C55	T	750	490	420	230	570	315	375	190

Tablica 3-2 (cd.)

Materiał	Gatunek	Stan obróbki cieplnej*	Własności wytrzymałościowe [MPa]							
			$R_{m/c}$	$R_{me}$	$Z_{\eta/cj}$	$Z_{rc}$	$Z_{gl}$	$Z_{go}$	$Z_{sj}$	$Z_{so}$
Stale stopowe konstrukcyjne do nawęglania (wg PN-EN 10084-1)	17Cr3	H	690	490	360	215	455	290	315	170
	20Cr4	H	780	640	435	240	515	325	355	195
	20MnCr5	H	1080	740	600	325	710	455	495	270
	20NiCr Mo2-2	H	930	780	520	290	615	390	425	230
Stale stopowe konstrukcyjne do ulepszenia cieplnego (wg PN-EN 10083-1)	28Mn6	T	780	540	435	240	515	325	360	195
	44SMn28	T	880	690	440	270	580	370	405	220
	34Cr4	T	880	740	550	300	645	410	450	220
	41Cr4	T	980	780	550	300	645	410	450	245
	42CrMo4	T	1030	880	580	320	680	430	475	255

\* N – normalizowanie, H – nawęglanie i hartowanie, T – ulepszenie cieplne.

Tablica 3-3

## Własności wytrzymałościowe wybranych gatunków żeliw

Materiał	Gatunek	Własności wytrzymałościowe [MPa]				
		$R_m$	$R_c$	$Z_{\eta}$	$Z_{cj}$	$Z_{rc}$
Żeliwo szare (wg PN-EN 1561:2000)	EN-GJL-150	150	800	60	180	–
	EN-GJL-200	200	800	90	240	45
	EN-GJL-250	250	1000	110	300	50
	EN-GJL-300	300	1150	130	360	90
	EN-GJL-350	350	1350	150	420	100

Tablica 3-4

## Własności wytrzymałościowe wybranych stopów nieżelaznych

Materiał	Gatunek		Postać	Własności wytrzymałościowe [MPa]							
	Znak	cecha		$R_m$	$R_e$	$Z_{\eta/cj}$	$Z_{rc}$	$Z_{gl}$	$Z_{go}$	$Z_{sj}$	$Z_{so}$
Brazy (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	BA10	Pręty i rury	500	300	220	155	320	190	190	110
		32		590	355	260	185	380	225	225	130
CuAl10Fe4Ni4	BA10	Pręty i rury	590	355	260	185	380	225	225	130	
	44										
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

Tablica 3-5

Orientacyjne wartości naprężeń dopuszczalnych przy różnych rodzajach obciążenia – do obliczeń 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	$k_o = 0,8k_c$	$k_{oj} = 0,8k_{cj}$	$k_{oo} = 0,4k_{cj}$

Uwaga: wartości  $Z_{go}$  podano w tablicach 3-2 i 3-4.

### Przykład 3.1

Oblicz naprężenia dopuszczalne w elementach konstrukcji rozciąganych w różny sposób, wykonanych ze stali gatunku S235.

#### Rozwiązanie

Rozróżniamy obciążenia rozciągające:

– statyczne, dla których naprężenia dopuszczalne można opisać wzorem

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

– jednostronnie zmiennie – dla nich naprężenia dopuszczalne

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

lub średnio

$$k_{rj} = 0,39 Z_{go}$$

– obustronnie zmiennie – naprężenia dopuszczalne można dla nich opisać jako

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

lub średnio

$$k_{rc} = 0,20 Z_{go}$$

Z tablicy 3-2 odczytujemy wartości  $R_e = 235$  MPa,  $Z_{rj} = 230$  MPa,  $Z_{rc} = 120$  MPa,  $Z_{go} = 170$  MPa. W tablicy 3-1 znajdujemy współczynniki bezpieczeństwa  $x_{e \max} = 2,3$ ,  $x_{e \min} = 2$ ,  $x_{z \max} = 4$ ,  $x_{z \min} = 3,5$ . Szukane naprężenia dopuszczalne obliczymy dwoma sposobami.

1. sposób

$$k_{r \min} = \frac{R_e}{x_{e \max}} = \frac{235}{2,3} = 102 \text{ MPa}, \quad k_{r \max} = \frac{R_e}{x_{e \min}} = \frac{235}{2} = 118 \text{ MPa}$$

$$k_{\eta \min} = \frac{Z_{\eta}}{\bar{x}_{z \max}} = \frac{230}{4} = 58 \text{ MPa}, \quad k_{\eta \max} = \frac{Z_{\eta}}{\bar{x}_{z \min}} = \frac{230}{3,5} = 66 \text{ MPa}$$

$$k_{rc \min} = \frac{Z_{rc}}{\bar{x}_{z \max}} = \frac{120}{4} = 30 \text{ MPa}, \quad k_{rc \max} = \frac{Z_{rc}}{\bar{x}_{z \min}} = \frac{120}{3,5} = 34 \text{ MPa}$$

## 2. sposób

$$k_{\eta} = 0,39Z_{go} = 0,39 \cdot 170 = 66 \text{ MPa}$$

$$k_{rc} = 0,20Z_{go} = 0,20 \cdot 170 = 34 \text{ MPa}$$

Widać, że wyniki uzyskane drugim sposobem mieszczą się w granicach wartości naprężeń dopuszczalnych wyznaczonych pierwszym sposobem. Orientacyjne wartości naprężeń wykorzystuje się jednak tylko w obliczeniach wstępnych – szacunkowych.

W przypadku obciążeń zmiennych często należy stosować obliczenia uwzględniające czynniki, które mają wpływ na wytrzymałość zmęczeniową, głównie wymiary części, rodzaje i wymiary karbów oraz stan powierzchni. Karby, czyli nagłe zmiany przekroju części, wywołują lokalne zwiększenie wartości naprężeń, czyli ich spiętrzenie lub koncentrację. W takich przypadkach współczynnik bezpieczeństwa  $x_z$  wymaga obliczenia wg wzoru

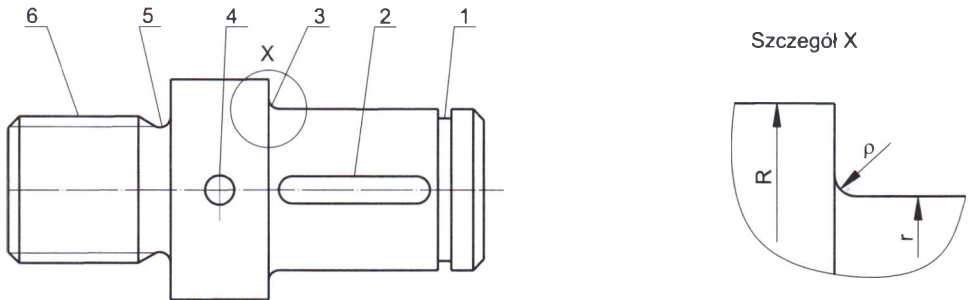
$$x_z = \frac{\beta}{\varepsilon} \cdot \delta \quad (3.11)$$

gdzie:

$\beta$  – współczynnik spiętrzenia naprężeń,

$\varepsilon$  – współczynnik uwzględniający wielkość przedmiotu i do niej proporcjonalny,

$\delta$  – współczynnik pewności, który wynosi 1,3...1,7.



**Rys. 3.2.** Rodzaje karbów występujących w częściach maszyn  
1, 2 – karby ostre, 3 do 5 – karby zaokrąglone, 6 – karby wielokrotne

Współczynnik spiętrzenia naprężeń można obliczyć na podstawie następujących zależności

$$\beta = \beta_k + \beta_p - 1 \quad (3.12)$$

$$\beta_k = 1 + \eta_k (\alpha_k - 1) \quad (3.13)$$

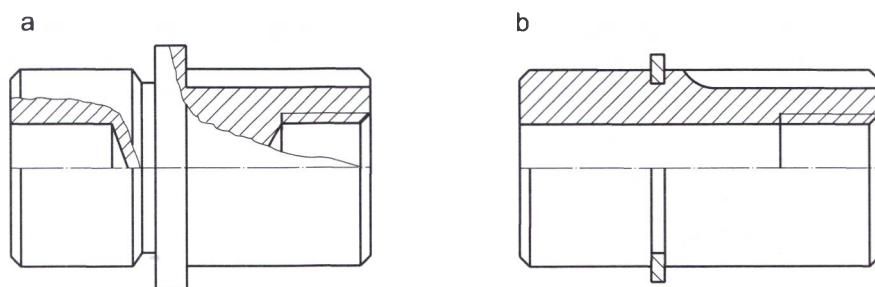
gdzie  $\eta_k$  jest współczynnikiem wrażliwości materiału na działanie karbu ( $\eta_k = 0$  dla żeliwa szarego,  $\eta_k = 0,4 \dots 0,9$  dla stali,  $\eta_k = 1$  dla szkła), natomiast  $\alpha_k$  – współczynnikiem kształtu, zależnym od ilorazu promienia zaokrąglenia  $\rho$  i mniejszego wymiaru  $r$  elementu oraz ilorazu większego wymiaru  $R$  i mniejszego wymiaru  $r$ , czyli

$$\alpha_k = f\left(\frac{\rho}{r}, \frac{R}{r}\right) \quad (3.14)$$

Dokładne wartości liczbowe współczynników  $\eta_k$  i  $\alpha_k$  znajdują się 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 część 1. podręcznika, rozdz. 3.). Zaleca się unikać ostrych przejść oraz – jeśli to możliwe – zaokrąglać przejścia odpowiednim promieniem ( $\rho = R - r$ ). Trzeba także dbać o gładkość powierzchni w krawędziach, stosować materiały niewrażliwe na działanie karbu oraz unikać konstrukcji o niepotrzebnie dużych wymiarach. Większość tych wymagań wpływa bezpośrednio na technologiczność konstrukcji.

**Technologiczność konstrukcji** jest zagadnieniem bardzo złożonym 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. Prosta i tania jest też jej obsługa oraz naprawa.



**Rys. 3.3.** Przykład nietechnologicznego (a) i 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.

## 3.4. Połączenia nierozłączne

### 3.4.1. Klasyfikacja połączeń nierozłącznych

Połączenia nierozłączne są połączeniami konstrukcyjnymi, których demontaż wymaga zniszczenia przynajmniej jednego elementu złącza. Do nierozłącznych należą połączenia:

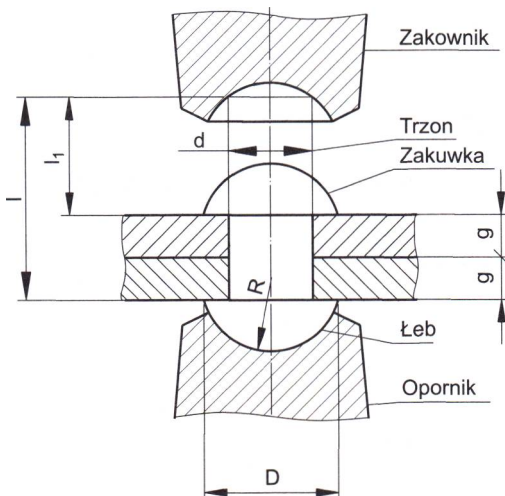
- nitowe,
- spawane,
- zgrzewane,
- lutowane,
- klejone,
- wciskowe.

Połączenia te zalicza się do grupy **połączeń stałych**, gdyż uniemożliwiają względny ruch połączonych części. Z tego względu są nazywane również połączeniami spoczynkowymi.

Konstrukcja połączeń nitowych wymaga stosowania dodatkowych części łączących (tzw. łączników) w postaci nitów i dlatego połączenia nitowe zalicza się do połączeń **pośrednich**. Pozostałe połączenia nierozłączne nie wymagają stosowania łączników, a elementy konstrukcji łączy się w nich za pomocą: spawów, zgrzein, lutów, klejenia oraz wcisku. Zalicza się je więc do połączeń **bezpośrednich**.

### 3.4.2. Połączenia nitowe

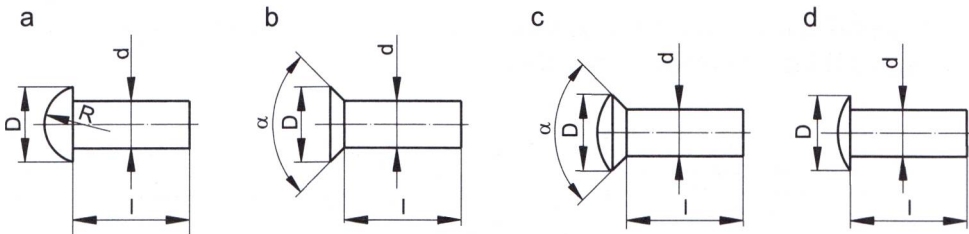
Proces nitowania (rys. 3.4) polega na włożeniu nitu do otworu przechodzącego przez dwie (lub więcej) łączone ścianki, podparciu łba nitu na oporniku (zwanym także wspornikiem) i rozkuciu lub sprasowaniu za pomocą zakuwnika wystają-



**Rys. 3.4.** Schemat nitowania  
 $g$  – grubości 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 ( $D = 1,6d$ )

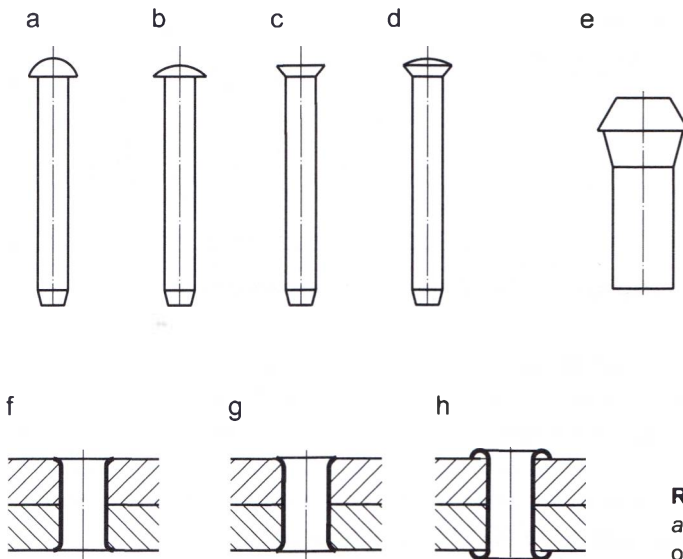
cego trzonu nitu, który spęczając się, przybiera kształt drugiego łba, zwanego zakuwką.

Kształtowanie zakuwki, nazywane zamykaniem nitu, może się odbywać na zimno (nity o średnicy nieprzekraczającej 20 mm) lub na gorąco (nity o średnicy ponad 20 mm). W konstrukcjach stalowych średnicę trzonu nitu  $d$  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 nitu ( $d_o = d$ ), 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  $l$  wyznacza się z zależności  $l = 1,12l_g + l_1$ , w której  $l_g$  oznacza długość trzonu, odpowiadającą grubości łączonych materiałów, natomiast  $l_1 = 1,4d$  jest długością trzonu na zakuwkę.



Rys. 3.5. Rodzaje nitów normalnych

a – nit z łbem kulistym, b – nit z łbem płaskim, c – nit z łbem soczewkowym, d – nit z łbem grzybkowym,  $\alpha = 75^\circ$  lub  $\alpha = 90^\circ$

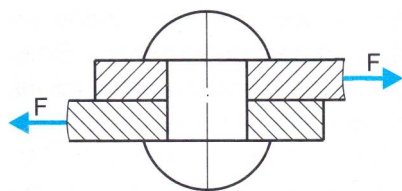


Rys. 3.6. Nity specjalne

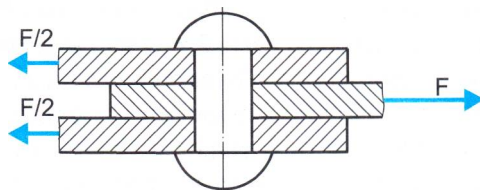
a do d – nity drobne, e – nity okrętowe, f do h – nity rurkowe

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

Nity mogą łączyć dwa elementy (rys. 3.7) lub więcej elementów (rys. 3.8) konstrukcji. W pierwszym przypadku nity są ścinane w jednym przekroju, natomiast w drugim liczba ścinanych przekrojów nitów wynosi dwa lub więcej.

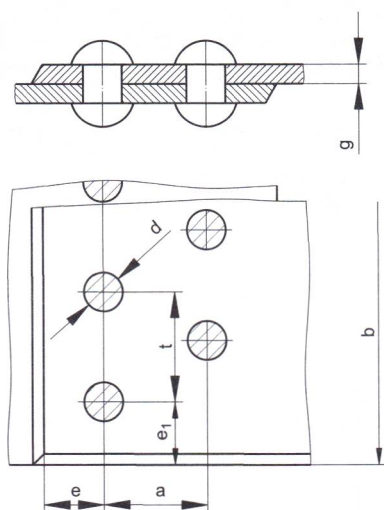


**Rys. 3.7.** Nit ścinany w jednym przekroju (tzw. jednościęty)

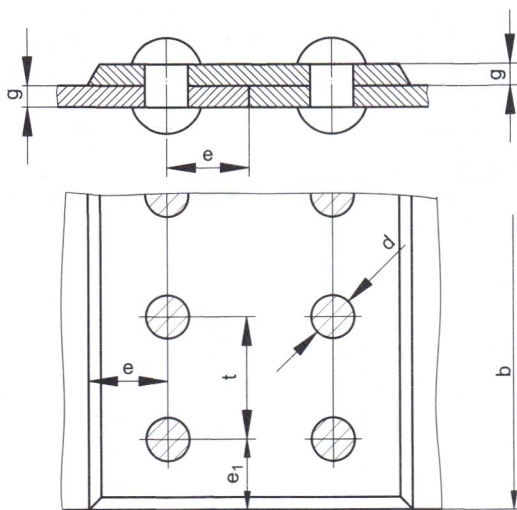


**Rys. 3.8.** Nit ścinany w dwóch przekrojach (tzw. dwucięty)

Połączenia nitowe mogą być zakładkowe (rys. 3.9), nakładkowe jednostronne (rys. 3.10) lub nakładkowe dwustronne (rys. 3.11).



**Rys. 3.9.** Połączenie nitowe zakładkowe



**Rys. 3.10.** Połączenie nitowe nakładkowe jednostronne

Zniszczenie połączenia nitowego najczęściej następuje wskutek:

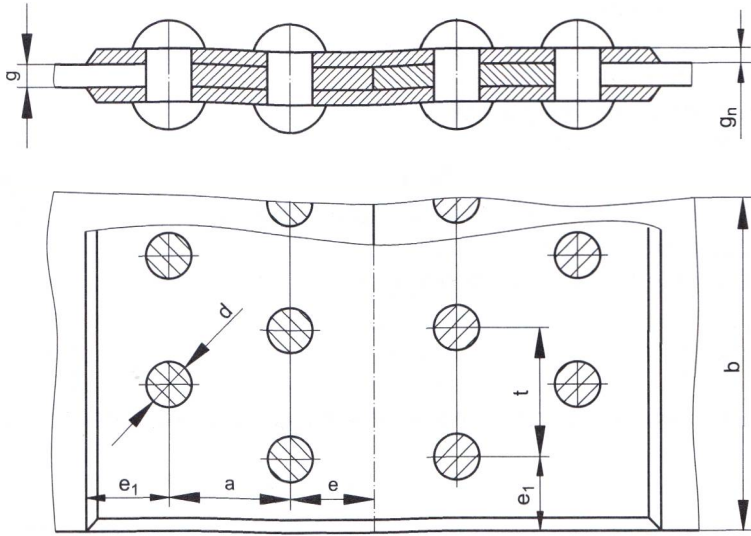
- ścięcia nitów (niespełnienie warunku wytrzymałości na ścinanie),
- owalizacji otworów lub nitów (niespełnienie warunku wytrzymałości na naciski powierzchniowe),
- rozerwania łączonych elementów w przekrojach osłabionych otworami pod nity (niespełnienie warunku wytrzymałości na rozciąganie).

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

$$\tau = \frac{F}{m \cdot n \cdot \frac{\pi \cdot d_o^2}{4}} \leq k_t$$

(3.15)





**Rys. 3.11.**  
Połączenie nitowe  
nakładkowe  
dwustronne

gdzie:

$F$  – siła zewnętrzna obciążająca połączenie,

$m$  – liczba ścinanych przekrojów w jednym nitcie,

$n$  – liczba nitów (w połączeniach zakładkowych liczba wszystkich nitów, w nakładkowych liczba nitów po jednej stronie połączenia),

$d_o$  – średnica otworów pod nity,

$k_t$  – dopuszczalne naprężenia ścinające dla materiału nitów.

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

$$p = \frac{F}{n \cdot g \cdot d_o} \leq k_o \quad (3.16)$$

gdzie:

$F$  – siła zewnętrzna obciążająca połączenie,

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

$g$  – grubość łączonych elementów (blach),

$d_o$  – średnica otworów pod nity,

$k_o$  – dopuszczalne naciski powierzchniowe.

W celu obliczenia wytrzymałości połączonych elementów na rozciąganie stosujemy wzór

$$\sigma = \frac{F_1}{b \cdot g - n_1 \cdot g \cdot d_o} \leq k_r \quad (3.17)$$

gdzie:

$F_1$  – siła zewnętrzna obciążająca połączenie w rozpatrywanym przekroju,

$b$  – szerokość łączonych elementów (pasów blach),

$g$  – grubość łączonych elementów (blach),  
 $n_1$  – liczba nitów w rozpatrywanym przekroju rozciągającym,  
 $d_o$  – średnica otworów pod nity,  
 $k_r$  – dopuszczalne naprężenia rozciągające.

Projektowanie połączenia nitowego należy rozpocząć od przyjęcia średnicy nitów. Zaleca się przyjmowanie średnicy nitów  $d \approx 2g$ , gdzie  $g$  jest grubością łączonych elementów. Przy tak dobranej średnicy nitów liczbę nitów  $n$  w połączeniu oblicza się na podstawie warunku:

– wytrzymałości na ścinanie  $k_t$  dla nitów jednociętych ( $m = 1$ ), za pomocą wzoru

$$n \geq \frac{4F}{m \cdot \pi \cdot d_o^2 \cdot k_t} \quad (3.18)$$

– wytrzymałości na naciski powierzchniowe  $k_o$  dla nitów dwuciętych, według zależności

$$n \geq \frac{F}{g \cdot d_o \cdot k_o} \quad (3.19)$$

Jeżeli przyjęta średnica nitów jest mniejsza niż grubość łączonych elementów, obliczenia przeprowadza się dla obu warunków wytrzymałościowych.

Następnie należy zaprojektować rozmieszczenie nitów w połączeniu (patrz rys. 3.9 do 3.11), przyjmując następujące parametry:  $g_n = 0,65g$ ,  $t_{\min} = 2,2d$ ,  $a = (2 \dots 3)d$ ,  $e_1 = (1,2 \dots 2)d$ ,  $e = (1,5 \dots 2)d$ . Takie rozmieszczenie nitów sprawia, że dalsze obliczenia wytrzymałościowe złącza z reguły nie są wymagane.

Na koniec sprawdza się wytrzymałość elementów na rozciąganie w przekrojach osłabionych otworami pod nity. W tym przypadku musi być spełniony warunek dotyczący szerokości  $b$  łączonych elementów

$$b \geq \frac{F_1}{g \cdot k_r} + n_1 \cdot d_o \quad (3.20)$$

### Przykład 3.2

Zaprojektować złącze nitowe zakładkowe, obciążone siłą rozciągającą  $F = 100$  kN. Grubość pasów blachy  $g = 8$  mm. Materiałem blachy jest stal E335, a materiałem nitów stal S235JR.

#### Rozwiązanie

Z tablicy 3-2 przyjmuje się granice plastyczności:

– dla stali E335:  $R_e = 335$  MPa,

– dla stali S235:  $R_e = 235$  MPa.

Na podstawie tablicy 3-5 dobiera się naprężenia dopuszczalne:

– dla stali E335:  $k_r = 0,48R_e = 161$  MPa,

– dla stali S235:  $k_r = 0,30R_e = 71$  MPa.

Założono, że nity będą zamykane na gorąco; średnica nitów  $d = 2g = 2 \cdot 8 = 16$  mm, a średnica otworów  $d_o = d + 1 = 16 + 1 = 17$  mm. W połączeniu zakładkowym liczba ścinanych przekrojów w jednym nicie  $m = 1$ , więc liczba nitów

$$n \geq \frac{4F}{m \cdot \pi \cdot d_o^2 \cdot k_t}$$

$$n \geq \frac{4 \cdot 100000}{1 \cdot 3,14 \cdot 17^2 \cdot 71} = 6,2$$

Zatem wymagana liczba nitów  $n = 7$ .

Wyznaczamy rozmieszczenie nitów:

$$t_{\min} = 2,2d_o = 2,2 \cdot 17 = 37,4 \text{ mm}, a = (2 \dots 3)d_o = 34 \dots 51 \text{ mm},$$

$$e_1 = (1,2 \dots 2)d_o = 20,4 \dots 34 \text{ mm}, e = (1,5 \dots 2)d_o = 25,5 \dots 34 \text{ mm}.$$

Przyjmujemy  $t = 38 \text{ mm}$ ,  $a = 35 \text{ mm}$ ,  $e_1 = 22 \text{ mm}$ ,  $e = 30 \text{ mm}$ .

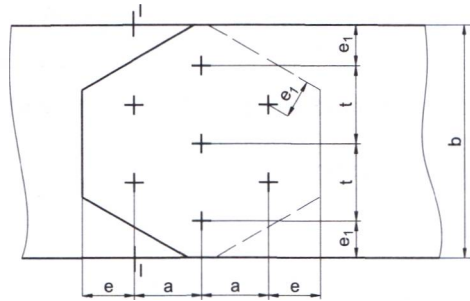
Wykonujemy szkic połączenia, który przedstawiono poniżej.

W skrajnym rzędzie (przekrój I-I) wartość siły rozciągającej jest największa, a liczba otworów  $n_1 = 2$ .

Obliczamy szerokość połączenia

$$b \geq \frac{F_1}{g \cdot k_r} + n_1 \cdot d_o$$

$$b \geq \frac{100000}{8 \cdot 160} + 2 \cdot 17 = 112,125 \text{ mm}$$



Przyjmujemy szerokość pasa blachy  $b = 120 \text{ mm}$ .

Sprawdzamy, czy rozmieszczenie nitów dla wartości  $e_1 = 22 \text{ mm}$  i  $t = 38 \text{ mm}$  jest możliwe na szerokości  $120 \text{ mm}$ . Na podstawie warunku

$$2e_1 + 2t = 2 \cdot 22 + 2 \cdot 38 = 120 \text{ mm}$$

wnioskujemy, że przyjęta szerokość połączenia oraz rozmieszczenie nitów są prawidłowe.

### Przykład 3.3

Zaprojektować połączenie nitowe pasa blachy grubości  $6 \text{ mm}$  z nakładką obustronną, obciążone siłą  $F = 30 \text{ kN}$ . Blacha jest wykonana ze stali E335, a nity – ze stali S235JR.

#### Rozwiązanie

Z tablic 3-2 oraz 3-5 dobieramy naprężenia dopuszczalne:

– dla stali E335:  $k_r = 0,48R_e = 161 \text{ MPa}$ ,

– dla stali S235:  $k_r = k_c = 0,48R_e = 115 \text{ MPa}$ ,  $k_o = 0,8k_c = 90 \text{ MPa}$ .

Średnica nitów  $d = 2g = 2 \cdot 6 = 12 \text{ mm}$ . Przyjmujemy, że nity będą zamykane na zimno, więc średnica otworów  $d_o = 12 \text{ mm}$ .

Liczbę nitów obliczamy z warunku wytrzymałości na naciski powierzchniowe (nity dwucięte)

$$n \geq \frac{F}{g \cdot d_o \cdot k_o}$$

$$n \geq \frac{30000}{6 \cdot 12 \cdot 90} = 4,6$$

Przyjmujemy liczbę nitów  $n = 5$  po jednej stronie złącza.

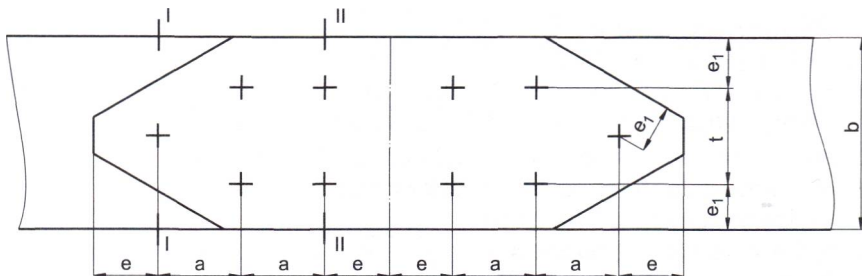
Wyznaczamy rozmieszczenie nitów:

$$t_{\min} = 2,2d_o = 2,2 \cdot 12 = 26,4 \text{ mm}, \quad a = (2 \dots 3)d_o = 24 \dots 36 \text{ mm},$$

$$e_1 = (1,2 \dots 2)d = 14,4 \dots 24 \text{ mm}, \quad e = (1,5 \dots 2)d_o = 18 \dots 24 \text{ mm}.$$

Przyjmujemy  $t = 30 \text{ mm}$ ,  $a = 26 \text{ mm}$ ,  $e_1 = 15 \text{ mm}$ ,  $e = 20 \text{ mm}$ .

Wykonujemy szkic połączenia (patrz niżej).



W skrajnym rzędzie (przekrój I-I) wartość siły rozciągającej łączone pasy blachy jest największa, a liczba otworów  $n_1 = 1$ .

Obliczamy szerokość połączenia

$$b \geq \frac{F_1}{g \cdot k_r} + n_1 \cdot d_o$$

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

Wyznaczamy rozmieszczenie nitów:

$$b = 2e_1 + t = 2 \cdot 15 + 30 = 60 \text{ mm}$$

i przyjmujemy szerokość pasa blachy  $b = 60 \text{ mm}$ .

Następnie obliczamy grubość nakładek:

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

i przyjmujemy  $g_n = 4 \text{ mm}$ .

Sprawdzamy nakładki na podstawie warunku wytrzymałości na rozciąganie w przekroju II-II, w którym siła rozciągająca nakładki jest największa, a liczba otworów  $n_1 = 2$ .

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

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

Przyjęta szerokość pasów blachy i nakładek  $b = b_n = 60 \text{ mm}$  jest więc prawidłowa.

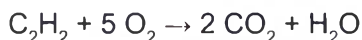
### 3.4.3. Połączenia spawane

Spawanie jest to łączenie części wykonanych z materiałów topliwych, głównie metali i ich stopów, przez stopienie brzegów łączonych elementów bez wywierania nacisku (z dodatkiem lub bez ciekłego spoiwa o składzie identycznym

lub zbliżonym do materiału spawanego). Spawać można stopy żelaza, niektóre stopy metali kolorowych (np. aluminium i miedzi) oraz niektóre termoplastyczne tworzywa sztuczne (np. PCV, PE). W wyniku spawania powstaje szew zwany **spoiną** (rys. 3.12).

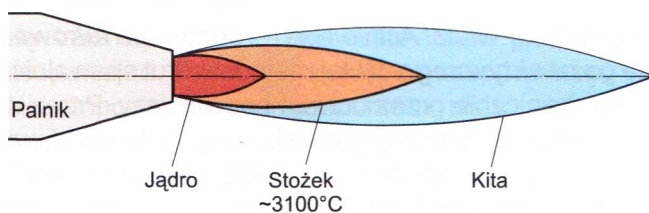
Rozróżnia się dwa podstawowe sposoby spawania: gazowe i elektryczne.

**Spawanie gazowe** to sposób, w którym wykorzystuje się ciepło uzyskiwane ze spalania gazów technicznych. Najczęściej jest to mieszanina acetylenu ( $C_2H_2$ ) i tlenu ( $O_2$ ). Do spalania gazów używa się palników, w których gazy mieszają się w odpowiednich proporcjach i spalają wg następującej reakcji:



Prawidłowe wyregulowanie palnika umożliwia uzyskanie płomienia o temperaturze do  $3100^\circ C$  (rys. 3.13), który poza działaniem temperatury nie wpływa nawęglając ani utleniając na spawany materiał.

Gazowo można spawać stale niskowęglowe i żeliwa, a po zastosowaniu odpowiednich topników także stopy aluminium i miedzi. Spawanie gazowe umożliwia wykonywanie połączeń elementów o zróżnicowanej



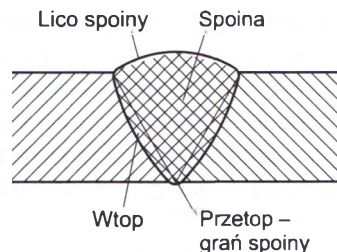
Rys. 3.13. Elementy płomienia palnika acetylenowo-tlenowego

grubości (np. blachy stalowe od 0,4 do 40 mm), w różnych pozycjach, oraz uzyskanie gładkiej powierzchni lica spoiny. Ze względu na stosunkowo małą wydajność oraz duże koszty, spawanie gazowe jest wypierane przez spawanie elektryczne.

Natomiast do cięcia metali używa się specjalnych palników, w których mieszanka gazów po roztopieniu metalu jest wzbogacana w tlen. Duża ilość tlenu powoduje szybkie utlenianie roztopionego metalu i dalsze jego roztopianie. Sposób ten nazywa się cięciem tlenowym.

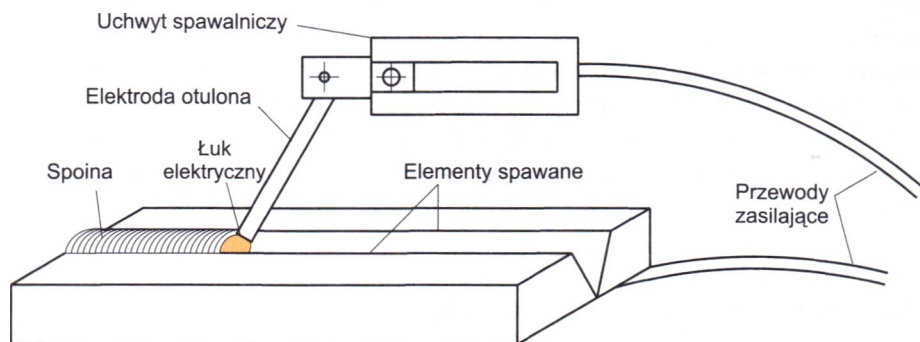
**Spawanie elektryczne**, najczęściej łukowe, polega na wytworzeniu łuku elektrycznego między elektrodą i materiałem spawanym. Wysoka temperatura łuku elektrycznego, dochodząca do  $6000^\circ C$ , umożliwia skuteczne stopienie spawanego materiału i spoina. Najbardziej rozpowszechniły się opisane niżej metody spawania elektrycznego.

• **MMA** (ang. *Manual Arc Welding*) – **spawanie łukowe elektrodą otuloną**. Jest to metoda spawania ręcznego, w której topliwa metalowa elektroda jest źródłem spoina, a spalana w łuku elektrycznym sprasowana otulina (zasadowa, rutyłowa lub celulozowa) wytwarza niezbędną atmosferę gazów ochronnych. Stopio-



Rys. 3.12. Elementy spoiny

na otulina okrywa gorącą spoinę warstwą żużla chroniącego przed działaniem atmosfery i zbyt szybkim stygnięciem. Metoda MMA jest uniwersalna pod względem gatunku spawanego materiału, rodzaju konstrukcji oraz pozycji i miejsca spawania. Wykorzystuje się ją w przemyśle stoczniowym, do spawania rurociągów, konstrukcji budowlanych (również pod wodą). Jest popularną metodą w małych warsztatach naprawczych.

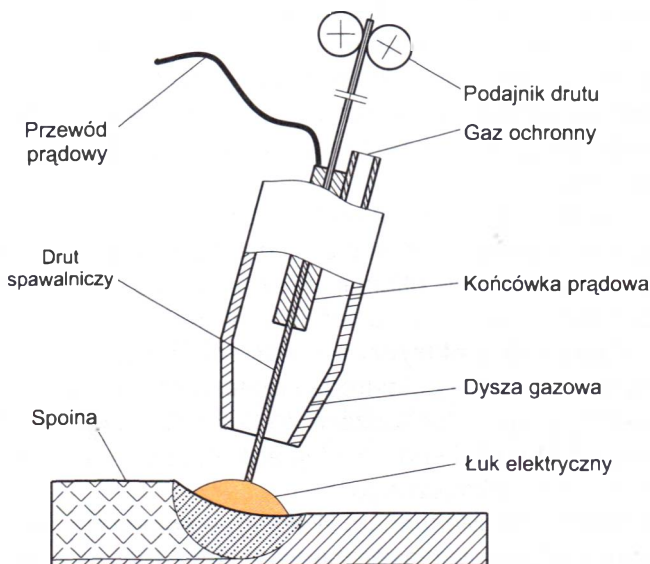


Rys. 3.14. Schemat spawania metodą MMA

- **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 uchwyty jest dozowany aktywny gaz osłony (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 metody MAG, z tą różnicą, że gaz ochronny (**argon** lub **hel**) nie jest aktywny i jego rola ogranicza się jedynie do osłony spoiny.

Spawanie metodami MAG i MIG może być stosowane do wykonywania wysokiej jakości połączeń tych metali i ich stopów, które dają się łączyć za pomocą spawania łuko-

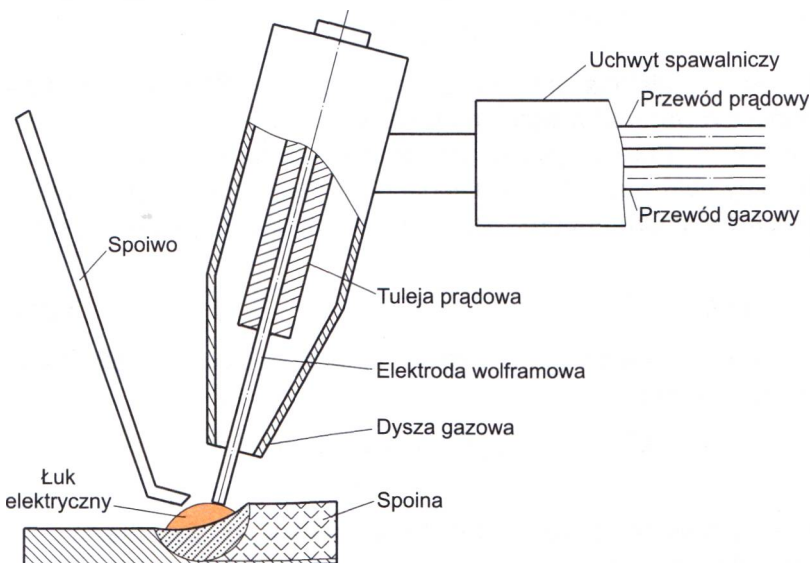


Rys. 3.15. Schemat końcówki uchwyty do spawania metodami MAG i MIG

wego. Należą do nich stale węglowe i niskostopowe, stale odporne na korozję oraz stopy aluminium, miedzi i niklu. Metody MAG i MIG szeroko wykorzystuje się także w samochodowych warsztatach naprawczych, ze względu na możliwość spawania cienkich blach.

• **TIG** (ang. *Tungsten Inert Gas*), inaczej zwana **GTAW** (ang. *Gas Tungsten Arc Welding*) – **spawanie łukowe nietopliwą elektrodą wolframową w osłonie gazu obojętnego**. Jest to najbardziej uniwersalna metoda spawania łukowego. Można nią spawać prawie wszystkie metale i stopy, we wszystkich pozycjach. Łuk elektryczny jarzy się między nietopliwą elektrodą wolframową a materiałem spawanym. Proces odbywa się w osłonie gazu obojętnego (**argonu** lub **helu**). Spoiwo może być podawane ręcznie lub automatycznie, w zależności od rodzaju zastosowanego procesu. Ponieważ w procesie spawania metodą TIG nie powstaje żużel, uzyskuje się wyjątkowo czystą, równą i gładką spoinę bez zanieczyszczeń. 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.

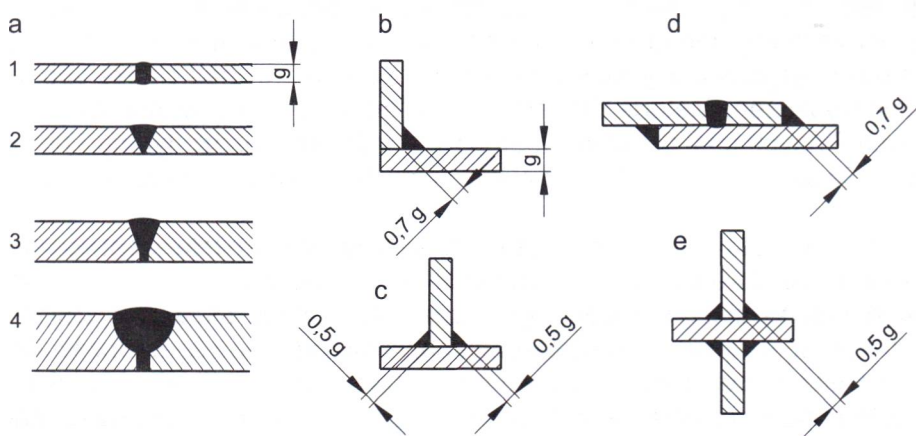
Nie wszystkie metale i ich stopy dają się spawać jednakowo łatwo. Łatwo spawalne są stale i staliwa o zawartości węgla do 0,25%. Wraz ze wzrostem zawartości węgla stale stają się trudniej i trudno spawalne. Stale zawierające ponad 0,4% węgla są już niespawalne. Podobnie jak węgiel na spawalność stali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



Rys. 3.16. Schemat uchwytu do spawania metodą TIG

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. 3.17a–e).

W celu uzyskania prawidłowego przetopu, który zależy od grubości łączonych elementów, w grubszych materiałach brzegi do spawania powinny być odpowiednio zukosowane i rozstawione. Elementów o grubości do 4 mm nie ukosuje się, a jedynie rozstawia na odległość 0,5 do 3 mm, uzyskując spoiny typu I. Grubsze elementy należy ukosować i wtedy, w zależności od sposobu ukosowania, stosuje się spoiny typu V, Y i U (rys. 3.17a).



Rys. 3.17. 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 najłabszym 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 za pomocą ogólnego wzoru

$$k' = z_o \cdot z \cdot k \quad (3.21)$$

który np. w odniesieniu do rozciągania, zginania jednostronnego i skręcania można przedstawić następująco

$$k'_r = z_o \cdot z \cdot k_r; \quad k'_{gj} = z_o \cdot z \cdot k_{gj}; \quad k'_s = z_o \cdot z \cdot k_s$$

gdzie:

$z_o$  – współczynnik wytrzymałości spoiny zależny od rodzaju obciążenia,

$z$  – współczynnik jakości spoiny.

Najczęściej przyjmowane wartości współczynnika  $z_o$  podano w tablicy 3-6.



Tablica 3-6

**Wartości współczynnika wytrzymałości spoiny  $z$** 

Spoiny czołowe			Spoiny pachwinowe
Przy rozciąganiu	Przy zginaniu	Przy ścinaniu	Dla wszystkich rodzajów obciążenia
0,75...0,9	0,8...0,9	0,65	0,65

Współczynnik jakości spoiny można przyjmować jako  $z = 1$ , jeśli spoina była wykonana zgodnie z wymaganiami technologicznymi, określającymi rodzaj, warunki i jakość spawania, oraz została dokładnie skontrolowana.

Przekrój obliczeniowy spoiny oblicza się wg wzoru

$$S' = a \cdot l \quad (3.22)$$

gdzie:

$a = g$  dla spoin czołowych;  $a = 0,7g$  lub  $a = 0,5g$  dla spoin pachwinowych;

$l$  – długość obliczeniowa spoiny.

Rzeczywista długość spoin zawsze jest większa niż obliczeniowa i wynosi:

– dla spoin czołowych

$$l_{rz} = l + 2a \quad (3.23)$$

– dla spoin pachwinowych

$$l_{rz} = l + 3a \quad (3.24)$$

Jeżeli chce się uzyskać długość obliczeniową spoiny równą szerokości łączonych elementów ( $l = b$ ), spoinę należy wyprowadzić na tzw. podkładki. Unika się w ten sposób kraterów na końcach spoiny, których nie bierze się pod uwagę w obliczeniach wytrzymałościowych spoin.

**Spoiny czołowe** oblicza się wg następujących warunków:

– spoiny rozciągane

$$\sigma_r = \frac{F_r}{S'_r} \leq k'_r \quad (3.25)$$

– spoiny zginane

$$\sigma_g = \frac{M_g}{W'_x} \leq k'_g \quad (3.26)$$

– spoiny skręcane

$$\tau = \frac{M_s}{W'_o} \leq k'_s \quad (3.27)$$

– spoiny ścinane

$$\tau = \frac{F_L}{S'_i} \leq k'_i \quad (3.28)$$

Spoiny pachwinowe oblicza się zawsze na ścinanie w przekroju niebezpiecznym, nawet gdy występuje złożony stan naprężeń. Stosuje się przy tym następujące warunki:

– dla obciążeń rozciągających, ściskających i ścinających

$$\tau = \frac{F}{S'} \leq k'_t \quad (3.29)$$

– dla obciążenia momentem zginającym

$$\tau = \frac{M_g}{W'_x} \leq k'_t \quad (3.30)$$

Występujące we wzorach (3.26) do (3.30) wskaźniki mają następujące znaczenia:

$W'_x$  – wskaźnik wytrzymałości spoiny na zginanie,

$W'_o$  – wskaźnik wytrzymałości spoiny na skręcanie.

#### Przykład 3.4

Dwa pasy blachy grubości  $g = 16$  mm ze stali S235JR połączono spoiną czołową. Obciążeniem będzie siła rozciągająca  $F = 140$  kN. Oblicz niezbędną szerokość płaskownika zapewniającą wytrzymałość złącza.

#### Rozwiązanie

Z tablicy 3-5 dla tego materiału odczytujemy dopuszczalne naprężenie  $k_r = 0,48R_g$ . W tablicy 3-2 znajdujemy wartość granicy plastyczności  $R_g = 235$  MPa. Zatem naprężenie dopuszczalne

$$k_r = 0,48 \cdot 235 = 113 \text{ MPa}$$

Przyjmujemy współczynnik wytrzymałości spoiny  $z_o = 0,8$  oraz współczynnik jakości spoiny  $z = 1$ .

Dla spoin czołowych

$$\sigma_r = \frac{F_r}{l \cdot g} \leq k'_r$$

Zatem długość spoiny

$$l \geq \frac{F_r}{k'_r \cdot g}$$

oraz

$$l = b$$

gdy podczas spawania spoinę wyprowadzimy na boczne podkładki.

Czyli

$$l = b \geq \frac{140\,000}{113 \cdot 16} = 77,4 \text{ mm}$$

Przyjmujemy szerokość pasów blachy  $b = 80$  mm.

**Przykład 3.5**

Tarczę sprzęgła kołnierзовego przyspawano spoiną pachwinową do końcówki wału pędnego wykonanego z rury  $\varnothing 40 \times 6$ . Tarczę i rurę wykonano ze stali C25 w stanie normalizowanym. Oblicz, jakim maksymalnym momentem skręcającym można obciążyć to połączenie.

**Rozwiązanie**

Z tablicy 3-5 odczytujemy wartość dopuszczalnego naprężenia skręcającego  $k_{so} = 0,55Z_{go}$ . W tablicy 3-2 odnajdujemy wartość wytrzymałości zmęczeniowej  $Z_{go} = 190 \text{ MPa}$ . Zatem

$$k_{so} = 0,55 \cdot 190 = 105 \text{ MPa}$$

Na podstawie danych w tablicy 3-6 obliczamy dopuszczalne naprężenia skręcające dla spoiny

$$k'_{so} = 0,65k_{so} = 0,65 \cdot 105 = 68 \text{ MPa}$$

Spoina będzie pierścieniem o średnicy zewnętrznej  $D$  i wewnętrznej  $d = D - 2a$ .

$$D = 40 \text{ mm}, g = 6 \text{ mm}, a = 0,7g = 0,7 \cdot 6 = 4,2 \text{ mm}, \text{ więc}$$

$$d = 40 - 2 \cdot 4,2 = 31,6 \text{ mm}$$

Wskaźnik wytrzymałości na skręcanie tego przekroju

$$W'_o \approx 0,2 \frac{D^4 - d^4}{D} = 0,2 \cdot \frac{40^4 - 31,6^4}{40} = 7814 \text{ mm}^3$$

Z warunku  $\tau = \frac{M_s}{W'_o} \leq k'_{so}$  obliczamy

$$M_s \leq k'_{so} \cdot W'_o = 68 \cdot 7814 = 531\,352 \text{ N} \cdot \text{mm} = 531,4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

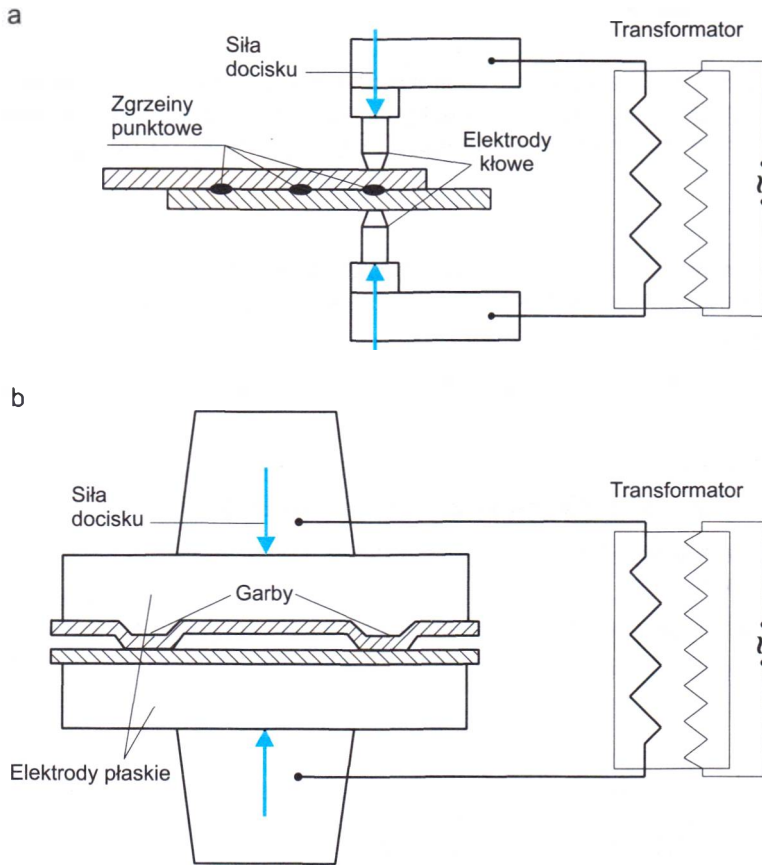
**3.4.4. Połączenia zgrzewane i lutowane****Połączenia zgrzewane**

**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, elektryczne** (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. Wsku-



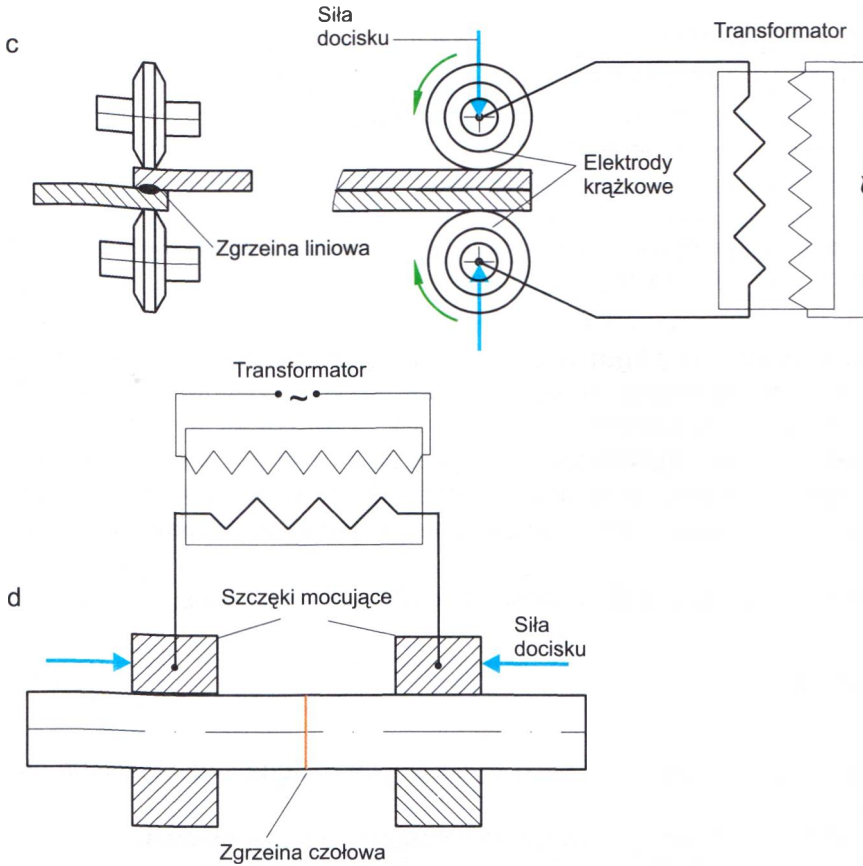
tek oporu elektrycznego miejsca styku nagrzewają się do temperatury białego żaru i wtedy łączy się ze sobą przez docisk. Zgrzewanie elektryczne oporowe wykonuje się za pomocą maszyn zwanych zgrzewarkami.

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

**Zgrzewanie punktowe** (rys. 3.18a) 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** jest ulepszoną wersją zgrzewania punktowego i służy do łączenia elementów konstrukcji o dużej powierzchni styku (rys. 3.18b). Wykonanie takiego połączenia wymaga wyłobienia garbów w jednym z łączonych elementów i zastosowania płytowych elektrod o kształcie odpowiednim do wykonanych garbów.

**Zgrzewanie liniowe** (rys. 3.18c) odbywa się za pomocą elektrod krążkowych. Stosuje się je, gdy jest wymagana szczelność połączenia, a grubość łączonych elementów nie przekracza 4 mm.

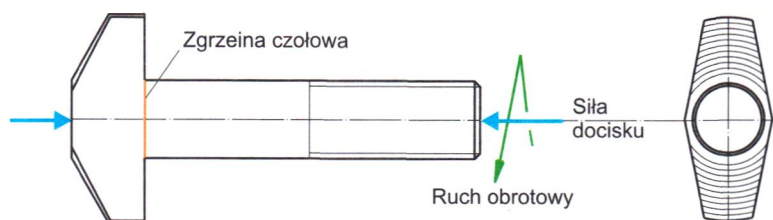


**Rys. 3.18.** Podstawowe rodzaje zgrzewania oporowego  
*a* – zgrzewanie punktowe, *b* – zgrzewanie garbowe, *c* – zgrzewanie liniowe, *d* – zgrzewanie elektryczne doczołowe

**Zgrzewanie doczołowe** wykorzystuje się przede wszystkim do łączenia powierzchni czołowych prętów i rur (rys. 3.18*d*). Rozróżnia się przy tym dwie metody nagrzewania:

- zwarciową, 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 iskry przyspieszającego proces nagrzewania.

**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 znajduje szerokie zastosowanie w produkcji różnych narzędzi, w których nie wszystkie elementy muszą być wykonane z drogiej stali narzędziowej (rys. 3.19).



Rys. 3.19. Szczęka klucza nastawnego wykonana ze stali narzędziowej zgrzana metodą tarcia ze śrubą wytworzoną ze stali konstrukcyjnej

**Zgrzewanie ogniskowe i gazowe** to stare i 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

$$k' = z_o \cdot k \quad (3.31)$$

gdzie:

$z_o = 0,70 \dots 0,85$  dla zgrzein czołowych wykonanych metodą zwarcia lub tarcia,

$z_o = 0,80 \dots 0,90$  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 obciążone siłami stycznymi, czyli pracowały na ścinanie. Średnicę zgrzein punktowych ustala się według następujących wzorów

$$d = 1,2g_{\min} + 4 \text{ mm, gdy minimalna grubość blach } g_{\min} \leq 3 \text{ mm} \quad (3.32)$$

$$d = 1,5g_{\min} + 5 \text{ mm, gdy } g_{\min} > 3 \text{ mm} \quad (3.33)$$

Obliczoną średnicę zgrzein zaokrągla się w górę do pełnych milimetrów.

Naprężenia dopuszczalne dla zgrzein punktowych obciążonych statycznie określa się za pomocą równania

$$k'_t = z_o \cdot k_r \quad (3.34)$$

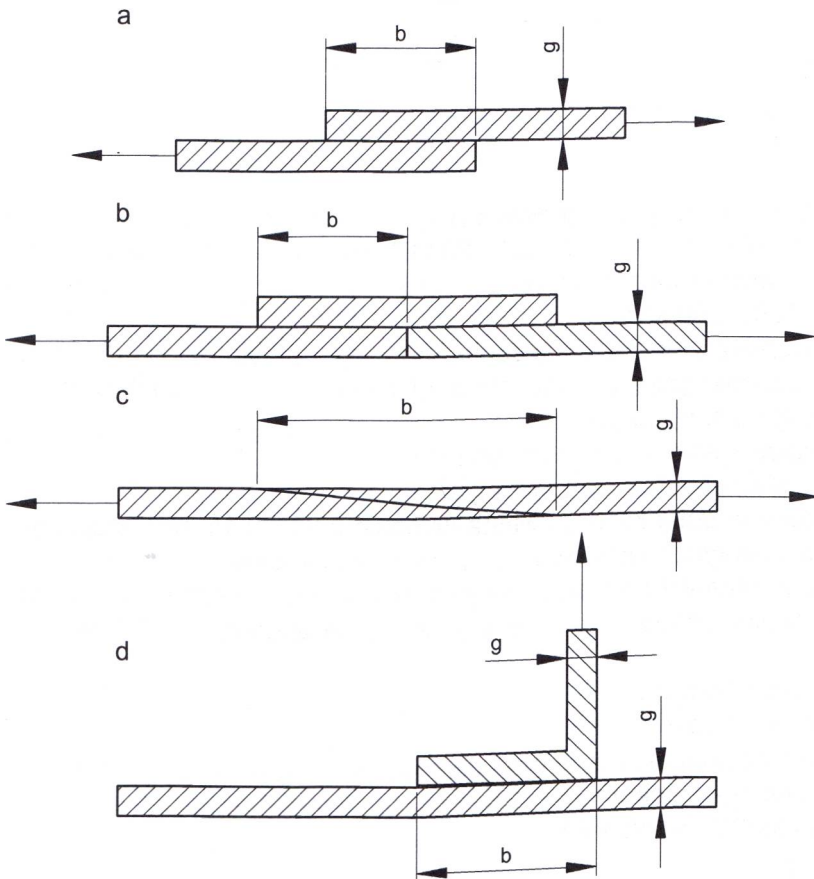
gdzie  $z_o = 0,35 \dots 0,50$ .

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

## Połączenia lutowane

**Lutowanie** polega na spajaniu metalowych części roztopionym spoiwem (zwanym lutem), którego temperatura topnienia jest niższa od temperatury łączonych elementów. Rozróżnia się **lutowanie miękkie**, wykonywane za pomocą lutów o temperaturze topnienia nieprzekraczającej  $500^{\circ}\text{C}$ , oraz **lutowanie twarde**, w którym wykorzystuje się luty o temperaturze topnienia powyżej  $500^{\circ}\text{C}$ . Połączenie roztopionego lutu z rozgrzanym materiałem powstaje wskutek przylegania (adhezji) oraz wzajemnego przenikania atomów z lutu do materiału lutowanego i odwrotnie (dyfuzji). Roztopiony lut powinien dobrze zwilżać łączące powierzchnie, dlatego przed lutowaniem powinny one być dokładnie oczyszczone i odtłuszczone. W trakcie lutowania stosuje się odpowiednie topniki (np. kalafonia, boraks). Lutuje się za pomocą lutownic, nagrzewnic indukcyjnych, palników gazowych, nagrzewania w piecach lub zanurzania w roztopionym lutowiu.

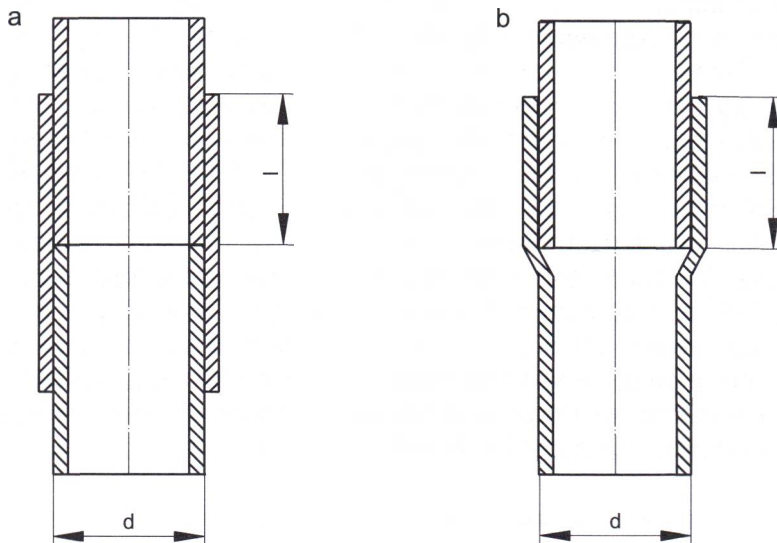
Złącze lutowane powinno być tak zaprojektowane, aby w spoinie występowały naprężenia styczne (ściananie). Połączenia lutowane najczęściej projektuje się jako zakładkowe, nakładkowe lub przykładowe (rys. 3.20).



Rys. 3.20. Połączenia lutowane

a – zakładkowe, b – nakładkowe, c – zakładkowe z zakładką gubioną, d – przykładowe

Połączenia lutowane wykorzystuje się również do spajania rur. Stosuje się wówczas złącza mufowe oraz kielichowe (rys. 3.21).



**Rys. 3.21.** 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  $100 \dots 250$  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  $0,01 \dots 0,15$  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

$$\tau = \frac{F}{b \cdot l} \leq k'_t$$

(3.35)



– dla połączeń rurowych

$$\tau = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot l} \leq k'_t \quad (3.36)$$

### Przykład 3.6

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 3.2 odczytujemy wartość  $R_e = 335$  MPa. Obliczamy naprężenia dopuszczalne

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

Złącze jest obciążone siłą ścinającą, więc oblicza się je za pomocą wzoru

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

Ustalamy średnicę zgrzein

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

Przyjmujemy  $d = 6$  mm.

Obliczamy wartość dopuszczalnego naprężenia ścinającego

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

Obliczamy liczbę zgrzein

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

Przyjmujemy liczbę zgrzein  $n = 3$ .

### Przykład 3.7

Gwintowaną końcówkę ze stali 20MnCr5 połączono zgrzeiną czołową – tarciovą z tłoczykiem amortyzatora o średnicy  $D = 12$  mm, wykonanego ze stali S335. Wyznacz maksymalne dopuszczalne obciążenie złącza.

#### Rozwiązanie

Na amortyzator, a więc również na złącze, działają przemiennie siły rozciągające i ścisające (tzw. obciążenia tętniące).

Na podstawie tablicy 3-5 dobieramy dopuszczalne naprężenie  $k_{rc} = 0,2Z_{go}$ .

Z tablicy 3-2 dla stali S 335 odczytujemy parametr  $Z_{rc} = 185$  MPa.

Obliczamy naprężenia dopuszczalne

$$k_{rc} = 0,2 \cdot 185 = 37 \text{ MPa}$$

$$k'_{rc} = 0,8k_{rc} = 0,8 \cdot 37 = 30 \text{ MPa}$$

Pole przekroju zgrzeiny

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 12^2}{4} = 113 \text{ mm}^2$$

Siłę obustronnie tętniącą, którą można obciążyć amortyzator, obliczamy na podstawie nierówności

$$F_{rc} \leq S \cdot k'_{rc}$$

$$F_{rc} \leq 113 \cdot 30 = 3390 \text{ N} = 3,4 \text{ kN}$$

Zatem maksymalne dopuszczalne obciążenie złącza wynosi 3,4 kN.

### 3.4.5. Połączenia klejone

**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 mają wpływ siły spójności klejonego materiału, siły spójności utwardzonego kleju oraz siły przyczepności między klejem a materiałem klejonym.

Proces technologiczny klejenia przebiega w następującej kolejności:

- przygotowanie powierzchni,
- przygotowanie kleju,
- nałożenie kleju na powierzchnie klejone,
- utwardzanie kleju,
- kontrola jakości spoiny.

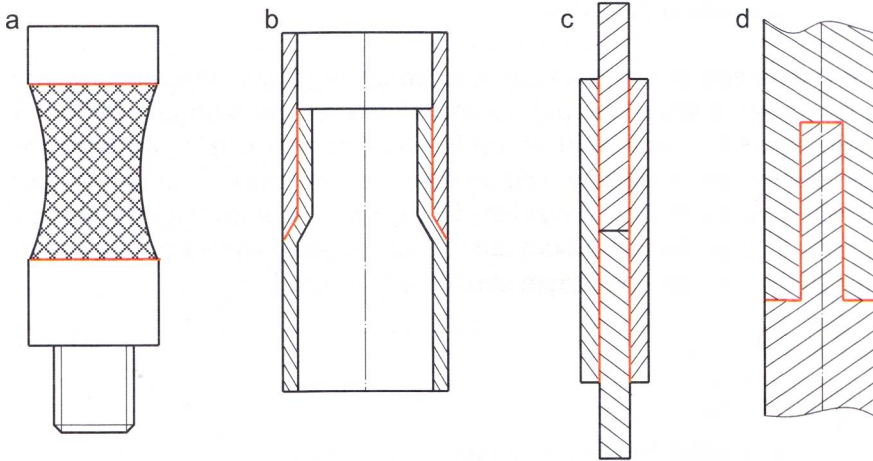
Powierzchnie klejone muszą być czyste, wolne od smarów, produktów korozji, farb, lakierów i innych zanieczyszczeń. Do oczyszczenia powierzchni klejonych stosuje się metody mechaniczne, chemiczne i elektrochemiczne. Przed czyszczeniem powierzchnie odtłuszcza się benzyną ekstrakcyjną, rozpuszczalnikiem tri, tetra, acetonem lub roztworami alkaicznymi.

Połączenia klejone wykonuje się przeważnie jako złącza zakładkowe, rzadziej doczołowe. Złącza doczołowe stosuje się do łączenia elementów metalowych z niemetalowymi o różnych polach powierzchni przekroju poprzecznego (rys. 3.22a). Najkorzystniejsze właściwości mają jednak klejone złącza zakładkowe, nakładkowe i wpuszczane (rys. 3.32b–d).

Niezmiernie ważny jest prawidłowy dobór kleju, odpowiedniego dla łączonych elementów i późniejszych warunków pracy. Równie ważne jest prawidłowe przygotowanie kleju. Kleje suche wymagają podgrzewania, natomiast kleje chemo-utwardzalne trzeba wymieszać z odpowiednim utwardzaczem. Sposób przygotowania kleju zawsze jest podany przez producenta na opakowaniu lub w 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.



Rys. 3.22. Złącza klejone

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

**Kleje epoksydowe**, produkowane na bazie żywic epoksydowych, są chemo-utwardzalne i przed zastosowaniem wymagają wymieszania z utwardzaczem. Do klejenia metali, jak również do ich laminowania, wykorzystuje się utwardzacze PAC, TFF lub Z1. Klejenie odbywa się w temperaturze pokojowej bez konieczności dociskania łączonych elementów. Najbardziej rozpowszechnionymi klejami z tej grupy są *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. Są one dostępne pod handlowymi nazwami *Borsol* (utwardzany w temp. 70...80°C) oraz *Żywica AW* (utwardzana w temp. 180°C).

**Kleje poliuretanowe** produkowane w Polsce, mające postać gęstej cieczy, występują 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 wywrzeć 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 bez dostępu 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 małą opornością elektryczną. Z powodzeniem zastępują połączenia lutowane, gdy obciążenie nie przekracza 1 A/cm<sup>2</sup>. Polski *Elektroklej* można stosować do montażu diod, tranzystorów i innych elementów elektronicznych małej mocy.

### 3.4.6. Połączenia wciskowe

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

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

$$W_{\max} = |-L_{\min}| \quad (3.37)$$

$$W_{\min} = |-L_{\max}| \quad (3.38)$$

Uzyskany wcisk – o wartości

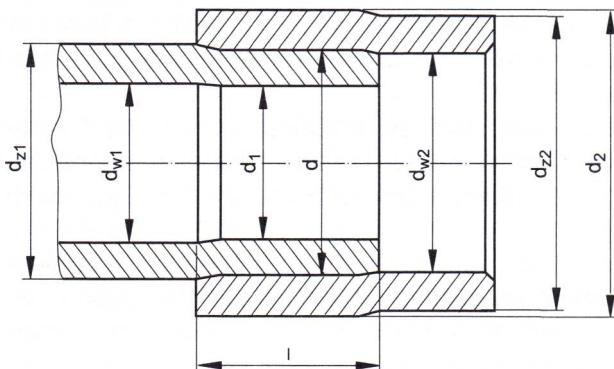
$$W = d_{z1} - d_{w2} \quad (3.39)$$

powoduje docisk na powierzchniach styku, będący wynikiem działania odkształceń sprężystych w łączonych częściach (rys. 3.23). Docisk ten wywołuje z kolei znaczną siłę tarcia, zdolną do przeciwstawienia się siłom wzdłużnym lub momentowi skręcającemu, które obciążają połączenie. Siła wtlaczania powinna być o 30% większa od wzdłużnej siły tarcia w połączeniu.

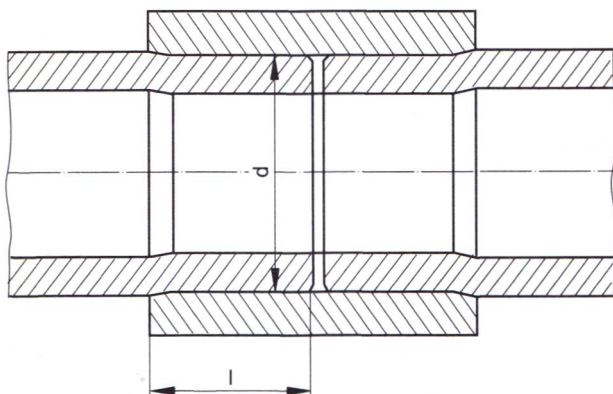
**Połączenia wciskowe** mogą być **bezpośrednie** (rys. 3.23) lub **pośrednie**, w których wykorzystuje się łącznik w postaci mufy, pierścienia lub innego elementu łączącego (rys. 3.24).

Ze względu na sposób montażu rozróżniamy **połączenia**:

- **wtlaczane**, uzyskiwane w wyniku wciśnięcia czopa w oprawę na prasie;
- **roztlaczane**, powstałe poprzez rozwałcowanie rurowego czopa w otworze oprawy;
- **skurczowe**, tworzone przez podgrzanie oprawy do temperatury umożliwiającej swobodne nasunięcie jej na czop;
- **rozprężne**, wytwarzane dzięki oziębieniu czopa zestalonym  $\text{CO}_2$  (temp.  $-70^\circ\text{C}$ ) lub ciekłym azotem (temp.  $-190^\circ\text{C}$ );



**Rys. 3.23.** Połączenie wciskowe bezpośrednie – wymiary czopa i oprawy przed zamontowaniem i po zamontowaniu



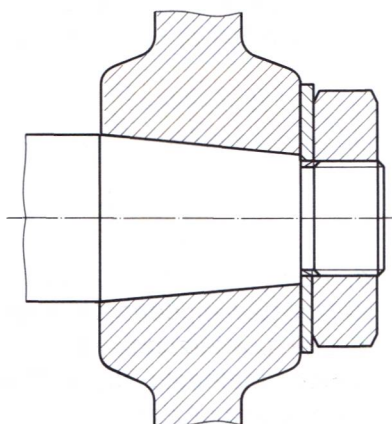
Rys. 3.24. Połączenie wciskowe pośrednie

– **kombinowane (skurczowo-rozprężne)**, stosowane przy dużych wartościach wcisku.

Szczególnym rodzajem połączeń wciskowych są połączenia właczane stożkowe, w których naciski powierzchniowe, a więc i obciążenie, mogą być regulowane wzdłużnym przesunięciem czopa względem oprawy (rys. 3.25).

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 3.25. Połączenie właczane stożkowe

**Obliczanie połączeń wciskowych.** Do obliczeń połączeń włączanych wykorzystujemy następujące wzory:

– w przypadku obciążenia złącza siłą wzdłużną

$$F \leq T = \mu \cdot p \cdot \pi \cdot d \cdot l \quad (3.40)$$

– przy obciążeniu złącza momentem skręcającym

$$M \leq T \cdot d/2 = 0,5\mu \cdot p \cdot \pi \cdot d \cdot l \quad (3.41)$$

gdzie:

- $\mu$  – współczynnik tarcia,
- $p$  – minimalny nacisk powierzchniowy,
- $d$  – poprzeczny wymiar złącza,
- $l$  – długość złącza.

Montażowy wcisk skuteczny  $W$  oblicza się na podstawie równania:

$$W = p \cdot d \left( \frac{c_1}{E_1} + \frac{c_2}{E_2} \right) \quad (3.42)$$

gdzie:

$p$  – minimalny nacisk powierzchniowy,

$d$  – poprzeczny wymiar złącza,

$$c_1 = \frac{1 + \Delta_1^2}{1 - \Delta_1^2} - \nu_1 \quad (3.43)$$

$$c_2 = \frac{1 + \Delta_2^2}{1 - \Delta_2^2} + \nu_2 \quad (3.44)$$

$E_1$  i  $E_2$  – moduły Younga, odpowiednio dla materiału czopa i oprawy (dla stali  $E = 2,1 \cdot 10^5$  MPa, dla żeliwa  $E = 0,9 \cdot 10^5$  MPa, dla stopów miedzi  $E = 0,85 \cdot 10^5$  MPa),  
 $\nu_1$  i  $\nu_2$  – liczby Poissona, odpowiednio dla materiału czopa i oprawy (dla stali  $\nu = 0,3$ , dla żeliwa  $\nu = 0,25$ , dla stopów miedzi  $\nu = 0,35$ ),

$$\Delta_1 = \frac{d_{w1}}{d_{z1}} \approx \frac{d_1}{d} \quad (3.45)$$

$$\Delta_2 = \frac{d_{w2}}{d_{z2}} \approx \frac{d}{d_2} \quad (3.46)$$

$d, d_1, d_2, d_{w1}, d_{w2}, d_{z1}, d_{z2}$  – oznaczenia wymiarów wg rysunku 3.23.

Na podstawie podanych zależności oblicza się wymagany wcisk, zakładając, że naciski powierzchniowe nie przekraczają wartości dopuszczalnych dla zastosowanego materiału. Niespełnienie tego warunku powoduje zniszczenie złącza już w trakcie montażu.

Powierzchnie łączone za pomocą wcisku powinny być gładkie. W przeciwnym razie wierzchołki nierówności ulegają ścinaniu podczas montażu, a wartość nominalnego (rzeczywistego) wcisku się zmniejsza. Z podanych względów należy obliczać nominalną wartość wcisku, która wynosi

$$W' = W + 1,2(R_{z1} + R_{z2}) \quad (3.47)$$

gdzie  $R_{z1}$  i  $R_{z2}$  są parametrami chropowatości łączonych powierzchni.

W połączeniach skurczowych wartość skutecznego wcisku uzyskujemy głównie w wyniku działania naprężeń rozciągających w stygnącej części (oprawie). Duże wartości tych naprężeń, nawet bliskie granicy plastyczności  $R_e$ , nie szkoda połączeniu, natomiast zapewniają jego dużą wytrzymałość. Oprawę nagrzewa się aż do temperatury umożliwiającej osiągnięcie wymiaru otworu gwarantującego swobodne wsunięcie czopa.

Względny przyrost cieplny średnicy nominalnej  $d$  określa się wg zależności

$$\varepsilon = \alpha (t_2 - t_1) \quad (3.48)$$

Zgodnie z prawem Hooke'a

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (3.49)$$

a w zależności od wartości wciску

$$\varepsilon = \frac{W}{d} \quad (3.50)$$

gdzie:

$\alpha$  – liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej dla materiału oprawy,

$t_1$  – temperatura otoczenia bliska temperatury pracy złącza,

$t_2$  – temperatura nagrzania oprawy,

$\sigma$  – rozciągające naprężenie cieplne w połączeniu ( $\sigma < R_e$ ),

$E$  – moduł Younga materiału oprawy.

Przyjmuje się następujące wartości współczynników liniowej rozszerzalności cieplnej:

– dla stali  $\alpha = 11 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ,

– dla żeliwa  $\alpha = 10 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ,

– dla stopów miedzi  $\alpha = 18 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ .

Temperaturę nagrzania oprawy można obliczyć z przekształcenia wzoru (3.48) jako

$$t_2 = \frac{\varepsilon}{\alpha} + t_1$$

a po uwzględnieniu wzoru (3.50) otrzymuje się

$$t_2 = \frac{W}{\alpha \cdot d} + t_1 \quad (3.51)$$

Ze względów montażowych wartość wciску  $W$  określa się jako sumę maksymalnego wciску rzeczywistego po ostygnięciu oprawy  $W_{\max} = \varepsilon \cdot d$  oraz luzu niezbędnego do swobodnego montażu połączenia  $W_i = (0,1 \dots 0,15)d$ , czyli

$$W = W_{\max} + W_i \quad (3.52)$$

### Przykład 3.8

Na kole żeliwnym osadzono skurczowo wieniec zębaty ze stali 34Cr4 w stanie ulepszonej cieplnie. Wymiary elementów złącza podano na rysunku 3.26. Wyznaczyć wartość wciску, temperaturę nagrzania wieńca zębatego oraz maksymalny moment obrotowy, który może wytrzymać to połączenie.

#### Rozwiązanie

Wartość maksymalnego wciску wyznacza się po założeniu, że naprężenia w stygnącym wieńcu wynoszą 0,6...0,8 granicy plastyczności (z tabl. 3-2 dla stali 34Cr4 T granica plastyczności  $R_e = 880 \text{ MPa}$ ).

Przyjmujemy  $\sigma = 0,7R_e$ .

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \approx \frac{0,7R_e}{E} = \frac{0,7 \cdot 880}{2,1 \cdot 10^5} = 0,0029$$

$$W_{\max} = \varepsilon \cdot d = 0,0029 \cdot 450 = 1,3 \text{ mm}$$

Dla średnicy zewnętrznej koła  $d_{z1} = d = 450 \text{ mm}$  otwór w wieńcu powinien mieć średnicę  $d_{w2} = d - W_{\max} = 450 - 1,3 = 448,7 \text{ mm}$ .

Wymagana temperatura nagrzania wieńca montowanego w temperaturze otoczenia  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  powinna wynosić

$$t_2 = \frac{W_{\max} + W_i}{\alpha \cdot d} + t_1 = \frac{W_{\max} + 0,001d}{\alpha \cdot d} + t_1 = \frac{1,3 + 0,001 \cdot 450}{11 \cdot 10^{-6} \cdot 450} + 20 = 374^\circ\text{C}.$$

Maksymalny moment, którym można obciążyć to połączenie, wynika z siły tarcia i jest opisany wzorem

$$M \leq T \cdot d/2 = 0,5\mu \cdot p \cdot \pi \cdot d \cdot l$$

Występujące w połączeniu naciski powierzchniowe  $p$  oblicza się, przekształcając wzór (3.42). Najpierw jednak należy obliczyć wartości współczynników  $c_1$  i  $c_2$ . Na podstawie wymiarów z rysunku 3.26 ustala się wartości  $\Delta_1$  i  $\Delta_2$ .

$$\Delta_1 = \frac{d_{w1}}{d_{z1}} \approx \frac{d_1}{d} = \frac{0}{450} = 0$$

$$\Delta_2 = \frac{d_{w2}}{d_{z2}} \approx \frac{d}{d_2} = \frac{450}{470} = 0,96$$

$$c_1 = \frac{1 + \Delta_1^2}{1 - \Delta_1^2} - \nu_1 = \frac{1 + 0}{1 - 0} - 0,25 = 1 - 0,25 = 0,75$$

$$c_2 = \frac{1 + \Delta_2^2}{1 - \Delta_2^2} + \nu_2 = \frac{1 + 0,96^2}{1 - 0,96^2} + 0,3 = 24,3$$

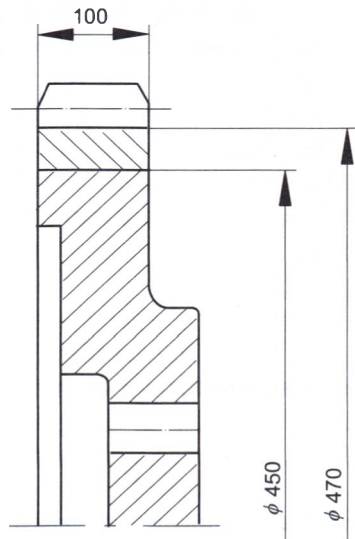
Po przekształceniu wzoru (3.41) obliczamy

$$p = \frac{W}{d \left( \frac{c_1}{E_1} + \frac{c_2}{E_2} \right)} = \frac{1,3}{450 \left( \frac{0,75}{0,9 \cdot 10^5} + \frac{24,3}{2,1 \cdot 10^5} \right)} = 23,3 \text{ MPa}.$$

Jeśli przyjmiemy, że współczynnik tarcia  $\mu = 0,1$ , obliczymy, że maksymalny moment obrotowy, którym można obciążyć to połączenie, wyniesie

$$M \leq 0,5\mu \cdot p \cdot \pi \cdot d \cdot l = 0,5 \cdot 0,1 \cdot 23,3 \cdot 3,14 \cdot 450 \cdot 100 = 164\,615 \text{ N} \cdot \text{mm} = 164,6 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Podsumujmy więc uzyskane wyniki. Wymagany wcisk wynosi 1,3 mm. Jeśli połączenie będzie montowane w temperaturze pokojowej, wieńiec zębaty należy nagrzać do  $374^\circ\text{C}$ . Połączenie to może być obciążone momentem obrotowym o wartości  $164,6 \text{ N} \cdot \text{m}$ .



Rys. 3.26. Podstawowe wymiary podzespołu z przykładu 3.8.



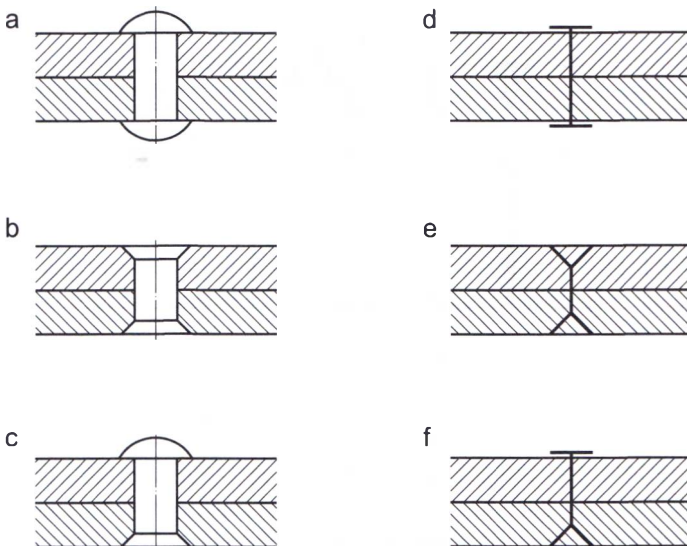
### 3.4.7. Oznaczanie połączeń nierozłącznych na rysunkach technicznych

Na rysunkach technicznych w zasadzie wszystkie części powinny być przedstawione w sposób rzeczywisty, z uwzględnieniem wszystkich szczegółów i proporcji wymiarowych. Jednak takiego przedstawienia szczegółów wymaga się jedynie na rysunkach wykonawczych. Na rysunkach złożeniowych jest to bowiem niemożliwe ze względu na stosowane zmniejszenie przedstawianego obiektu oraz jego czytelność i pracochłonność wykonywania. W normach dotyczących rysunku technicznego dopuszczono możliwość przedstawiania na rysunkach 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 znajduje się na rysunku. Wybór stopnia uproszczenia rysowanych części zależy od rodzaju rysunku oraz jego podziałki:

- 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, zwany również uproszczeniem schematycznym lub umownym, ale jego wykorzystanie ograniczono głównie do sporządzania schematów mechanizmów.

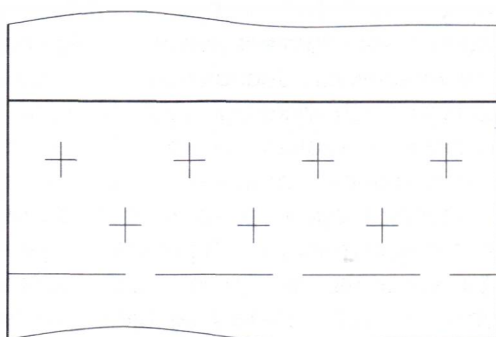
**Nity** na rysunkach wykonawczych rysuje się bez uproszczeń, natomiast rysunki połączeń nitowych można przedstawić w uproszczeniu (rys. 3.27). W rzucie na płaszczyznę prostopadłą do osi nitów położenie nitów zaznacza się krzyżykami. Natomiast na rzutach lub przekrojach równoległych do osi nitów rysuje się je w uproszczeniu, przy czym jeden lub dwa nity rysuje się w uproszczeniu, a pozostałe zaznacza jedynie pionową cienką kreską (rys. 3.28).



**Rys. 3.27.** Połączenia nitowe  
a do c – bez uproszczeń,  
d do f – w uproszczeniu

**Połączenia spawane** na rysunkach technicznych przedstawia się w uproszczeniu, gdy wymaga się przedstawienia szczegółów połączenia, albo w sposób umowny, który podano w normie PN-EN 22553:1997.

W uproszczeniu spoiny czołowe i pachwinowe od strony lica zaznacza się krótkimi łukami, rysowanymi liniami cienkimi. Od strony przeciwnej grań spoiny czołowej zaznacza się linią ciągłą grubą, a spoinę – cienkimi przerywanymi łukami. Spoiny otworowe od strony lica oznaczają się kółkami rysowanymi liniami cienkimi, a od strony przeciwnej – krzyżykami wykonywanymi także liniami cienkimi. Zarysy spoin na przekrojach rysuje się linią ciągłą grubą, a przekrój spoiny można zaczerpnąć (rys. 3.29).

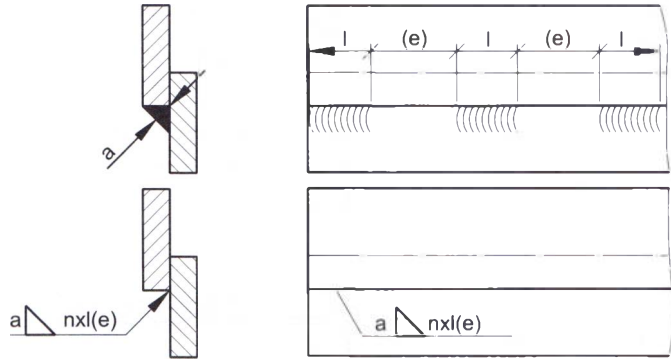


Rys. 3.28. Uproszczony rysunek połączenia nitowego z szeregiem jednakowych nitów

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

Rys. 3.29. Przykładowe oznaczenia wybranych spoin na rysunkach technicznych

W umownych oznaczeniach spoin zaznacza się jedynie miejsce połączenia linią ciągłą grubą, a na odnośnikach linii wskazujących lico spoiny oznacza się kolejno: grubość  $a$ , symbol rodzaju i długość całkowitą spoiny  $l$  wraz z kraterami (rys. 3.29). Rysunki i symbole rodzajów spoin opisano



Rys. 3.30. Pachwinowa spoina przerywana w uproszczeniu i oznaczeniu umownym

w pierwszej części niniejszego podręcznika (patrz rozdz. 1).

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. 3.30).

**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, a krawędzie brzegów zgrzewanych elementów wewnątrz zgrzeiny – linią ciągłą cienką. Zgrzeiny punktowe i liniowe w przekroju zaznacza się owalem, rysowanym linią grubą, a ich obszar się kropkuje. W widoku zgrzeiny punktowe oznacza się okręgami wypełnionymi wewnątrz łukami. Natomiast zgrzeiny liniowe przedstawia się za pomocą zachodzących na siebie owali. Widoki zgrzein punktowych i liniowych rysuje się linią kreskową grubą (rys. 3.31).

Sposób umownego oznaczania zgrzein na rysunkach określono w normie PN-EN 22553:1997. Zgrzeiny czołowe zaznacza się linią grubą, a na linii odniesienia połączonej z linią wskazującą zgrzeinę umieszcza się symetrycznie symbol zgrzeiny (patrz rys. 3.31).

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  $l$ .

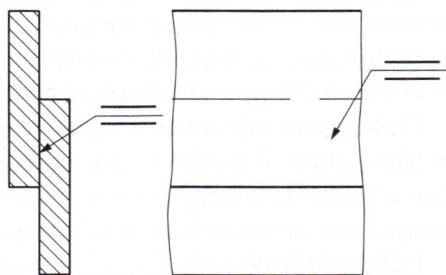
**Połączenia lutowane** z reguły tworzą złącza zakładkowe. Uproszczone rysunki tych połączeń wykonuje się według ogólnych zasad, natomiast przy umownym oznaczaniu obowiązują takie same zasady jak dla połączeń zgrzewanych. Przykład umownego przedstawienia połączenia lutowanego pokazano na rysunku 3.32.

Połączenia klejone rysuje się tylko w jednym stopniu uproszczenia. Na przekroju miejsce połączenia oznacza się bardzo grubą linią lub niewypełnionym odstępem, jeśli połączone elementy są zaczernione. Spoinę klejoną oznacza się

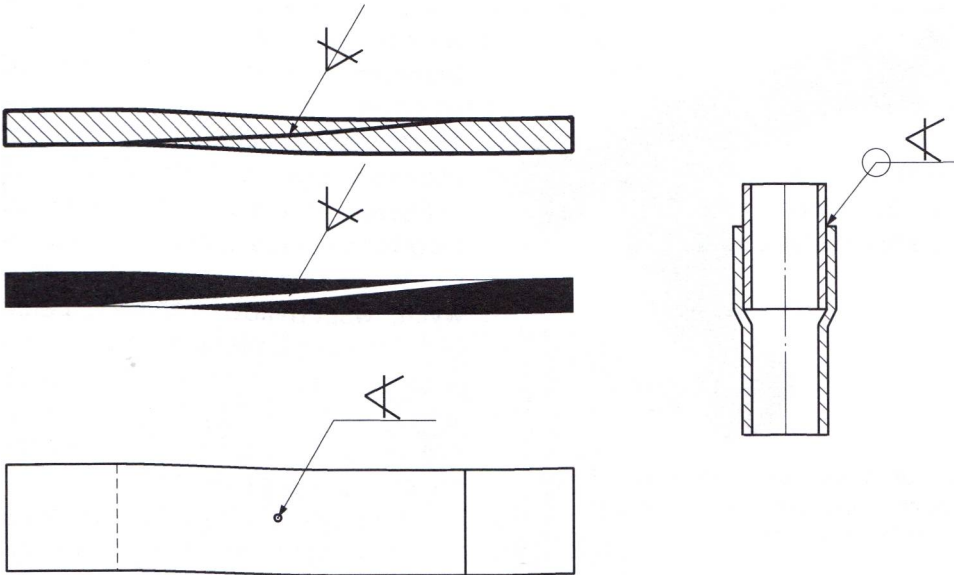
	Widoki i przekroje w uproszczeniu	Oznaczenia umowne
Zgrzeina czołowa w przekroju		
Zgrzeina czołowa w widoku		
Zgrzeiny punktowe		
Zgrzeina liniowa		

Rys. 3.31. Przykłady oznaczania zgrzein na rysunkach

linią wskazującą, w razie potrzeby uzupełnioną linią odniesienia, nad którą wpisuje się informacje o rodzaju kleju, a na linii wskazującej lub nad linią odniesienia umieszcza się odpowiedni symbol spoiny. Gdy połączenie ma być wykonane na całym obwodzie, wówczas w miejscu połączenia linii wskazującej z linią odniesienia umieszcza się okrąg o średnicy 3...5 mm (rys. 3.33).



Rys. 3.32. Umowne przedstawienie spoiny lutowanej



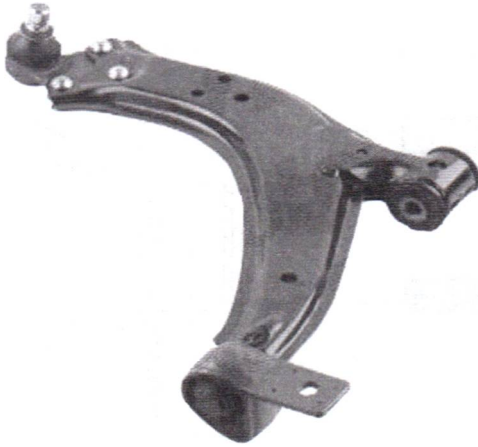
Rys. 3.33. Oznaczanie połączeń klejonych na rysunkach

### 3.4.8 Połączenia nierozłączne w pojazdach samochodowych

Dynamiczny rozwój techniki motoryzacyjnej jest możliwy dzięki osiągnięciom inżynierii materiałowej. W początkowym okresie budowy samochodów podstawowym materiałem konstrukcyjnym były stopy żelaza. We współczesnych pojazdach samochodowych są nim nie tylko stopy żelaza, lecz także materiały nieżelazne (np. stopy miedzi, aluminium i cynku) oraz niemetalowe, takie jak guma, szkło i tworzywa sztuczne. Ostatnio w budowie samochodów coraz częściej stosuje się także kompozyty charakteryzujące się doskonałymi właściwościami wytrzymałościowymi. Kompozyty składają się z dwóch lub więcej komponentów o różnych właściwościach, często o warstwowej budowie. Konsekwencją występowania w jednej konstrukcji elementów z materiałów o różnych właściwościach jest radykalna zmiana technik ich łączenia – zarówno podczas produkcji, jak i późniejszych napraw. Zmiany te umożliwiły zmniejszenie masy pojazdów oraz racjonalizację zużycia materiałów.

W budowie pojazdów samochodowych wykorzystuje się wszystkie rodzaje połączeń nierozłącznych opisanych wcześniej w niniejszym podrozdziale.

**Połączenia nitowe** stosuje się wtedy, gdy jest wymagana pewność i trwałość połączenia, a złącze ma charakter zakładkowy lub nakładkowy. Nitowane są np. taśmy hamulców taśmowych, niektóre elementy ramowych podwozi samochodów ciężarowych oraz blaszane poszycia autobusów. Typowym przykładem złącza nitownego jest połączenie wahacza z przegubem kulistym (rys. 3.34).



**Rys. 3.34.** Wahacz zawieszenia przedniego z przynitowanym przegubem zwrotnicy (Citroën Xsara Picasso)



**Rys. 3.35.** Tarcza sprzęgła samochodu Żuk z przynitowanymi okładzinami ciernymi

Za pomocą nitowania łączy się również elementy metalowe z niemetalowymi. Nitowane są na przykład okładziny cierne szczęk hamulcowych w samochodach ciężarowych i tarcz sprzęgłowych (rys. 3.35).

**Połączenia spawane** nadal są nieodzowne i niezastąpione, zwłaszcza w konstrukcjach podwozi ramowych, wsporników wahaczy, belek oraz innych elementów o konstrukcji blachownicowo-rurowej (rys. 3.36 i 3.37). Dzięki wprowadzeniu metod spawania MAG, MIG i TIG połączenia spawane stosuje się w konstrukcjach nie tylko stalowych, lecz także wykonywanych ze stopów metali nieżelaznych. Ma to szczególne znaczenie w rozwoju współczesnych konstrukcji nadwozi wykonywanych z kompozytów aluminiowo-stalowych.

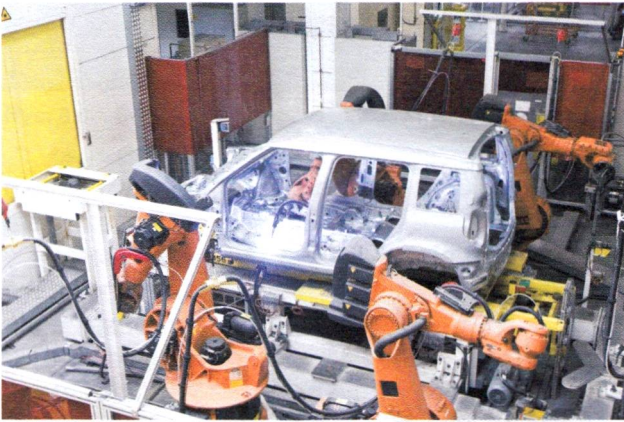


**Rys. 3.37.** Spawane złącze belki zawieszenia tylnego



**Rys. 3.36.** Spawana konstrukcja wspornika zderzaka samochodu BMW

**Połączenia zgrzewane** są bardzo często wykorzystywane w budowie pojazdów samochodowych. Części samochodowe zgrzewa się głównie elektrycznie i tarciowo. Zgrzeinami czołowymi łączy się pręty wykonane z różnych gatunków stali, np. zawory dolotowe i wylotowe, tłoczyska amortyzatorów, cylindry elementów hydraulicznych, wały napędowe, wały turbin sprężarek, śruby i nakrętki do tłoczonych elementów blaszanych. Zgrzeiny punktowe i garbowe stosuje się do łączenia cienkich blach oraz blach z różnymi tłoczonymi kształtkami. Typowym przykładem zastosowania zgrzewania punktowego i garbowego jest samośne nadwozie samochodowe (rys. 3.38).

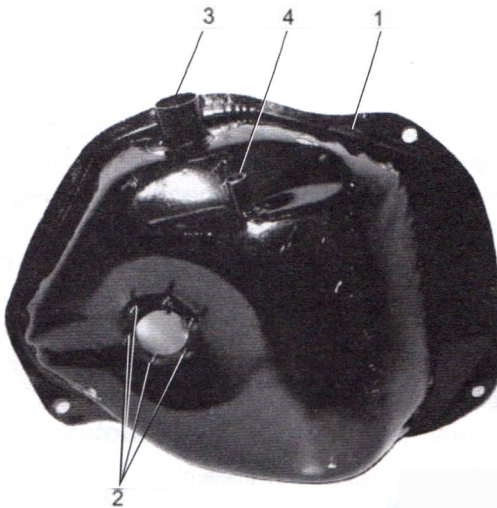


**Rys. 3.38.** Zrobotyzowane stanowisko zgrzewania punktowego nadwozia

Zgrzeiny liniowe spotyka się w elementach, które muszą być szczelne. Liniowo zgrzewa się np. stalowe zbiorniki paliwa (rys. 3.39).

**Złącza lutowane** również gwarantują szczelność połączenia. Ponadto zapewniają dobre przewodnictwo elektryczne. Złącza lutowane w samochodach wykorzystuje się do mocowania króćców zbiorników paliwa, chłodnic, przewodów ciśnieniowych oraz w instalacjach elektrycznych.

**Połączenia klejone** stały się często wykorzystywanymi w pojazdach samochodowych metodami łączenia dzięki dynamicznemu rozwojowi che-



**Rys. 3.39.** Zbiornik paliwa samochodu FIAT 126P z kołnierzem (1) ze zgrzeiną liniową, zamocowanymi zgrzeinami czołowymi śrubami (2) wokół otworu przeznaczonego na czujnik poziomu paliwa oraz przylutowanymi lutem twardym króćcami wlewu (3) i odpowietrzenia (4)

mii i inżynierii materiałowej. Oprócz klejonych elementów tapicerki, wkleja się szyby do nadwozia (rys. 3.40), przykleja się wewnętrzne lusterka wsteczne do szyb oraz nawet tak odpowiedzialne części jak okładziny cierne klocków hamulcowych (rys. 3.41). Szyby współczesnych samochodów także są sklejane z kilku warstw, dzięki czemu mają większą wytrzymałość, a po stłuczeniu nie rozpryskują się na drobne kawałki.



Rys. 3.40. Szyby samochodowe przyklejone do nadwozia

**Połączenia wciskowe** to ostatni z omawianych rodzajów połączeń nierozłącznych, którego zastosowanie w konstrukcjach samochodów odgrywa bardzo istotną rolę. Szerokie zastosowanie wynika przede wszystkim z zalet połączeń wciskowych. Podczas montażu samochodów i ich części wykorzystuje się połączenia właczane, skurczowe i rozprężne oraz rozłtaczane.



Rys. 3.41. Klejone klocki hamulcowe

Połączenia właczane stosuje się m.in. do osadzania sworzni tłokowych w tłokach, łożysk tocznych na wałach i w piastach, tulei metalowo-gumowych w wahaczach (rys. 3.42), stożkowych końcówek przegubów w gniazdach drążków, zwrotnic i popychaczy, panewek łożysk ślizgowych niedzielonych w rozrusznikach, kołków ustalających.

Skurczowo i rozprężnie osadza się np. tuleje cylindrów w kadłubach niezelewnych, gniazda zaworów w głowicach, czopy osi w wahaczach tylnego zawieszenia, wieńce zębate na kołach zamachowych (rys. 3.43).

Połączenia rozłtaczane wykorzystuje się w chłodnicach wykonanych ze stopów aluminium, a także do osadzania zaślepek płaszcza cieczowego kadłuba silnika oraz osa-



Rys. 3.42. Wahacz z osadzonymi tulejami metalowo-gumowymi





Rys. 3.43. Koło zamachowe z osadzonym skurczowo wieńcem zębatym

dzania różnego rodzaju pokryw na silnikach elektrycznych i innych częściach elektrotechnicznych.

Połączenia wciskowe spotyka się również w zakuwanych lub zaprasowywanych końcówkach różnego rodzaju cięgien występujących w układach sterowania pojazdów samochodowych.

Przedstawione przykłady są tylko niewielką częścią połączeń nierozłącznych występujących w pojazdach samochodowych. Wskazują jednak na różnorodność stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych oraz technologii wykonania. Rozwój przemysłu motoryzacyjnego wymaga coraz nowszych rozwiązań konstrukcyjno-technologicznych, a mechanicy samochodowi powinni śledzić te zmiany, aby sprostać współczesnym wymaganiom.

## 3.5. Połączenia rozłączne

### 3.5.1. Klasyfikacja połączeń rozłącznych

**Połączenia rozłączne** są połączeniami konstrukcyjnymi, 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 zaliczamy **połączenia**:

- **wpustowe, wielowpustowe, wielokarbowe, kołkowe, sworzniowe i 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.

Rozłącznymi połączeniami zdecydowanie spoczynkowymi są połączenia kołkowe i klinowe. Pozostałe połączenia w zależności od zastosowania mogą być zarówno spoczynkowe, jak i ruchowe.

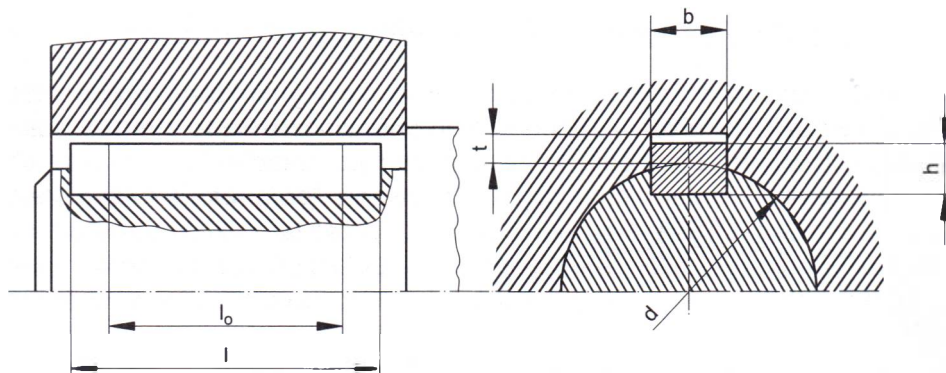
### 3.5.2. Połączenia wpustowe

**Połączenia wpustowe** stanowią grupę rozłącznych pośrednich połączeń kształtowych. Stosuje się je do łączenia wałów z piastami kół zębatych, 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 możliwość przemieszczania się piasty wzdłuż osi wału, wówczas połączenie wpustowe ma charakter ruchowy.

Rolę łączników w połączeniach wpustowych pełnią **wpusty** (rys. 3.44). 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 piaście powinna być taka, aby między grzbietem wpustu a dnem rowka w piaście zapewnić wymagany luz 0,2...0,4 mm.

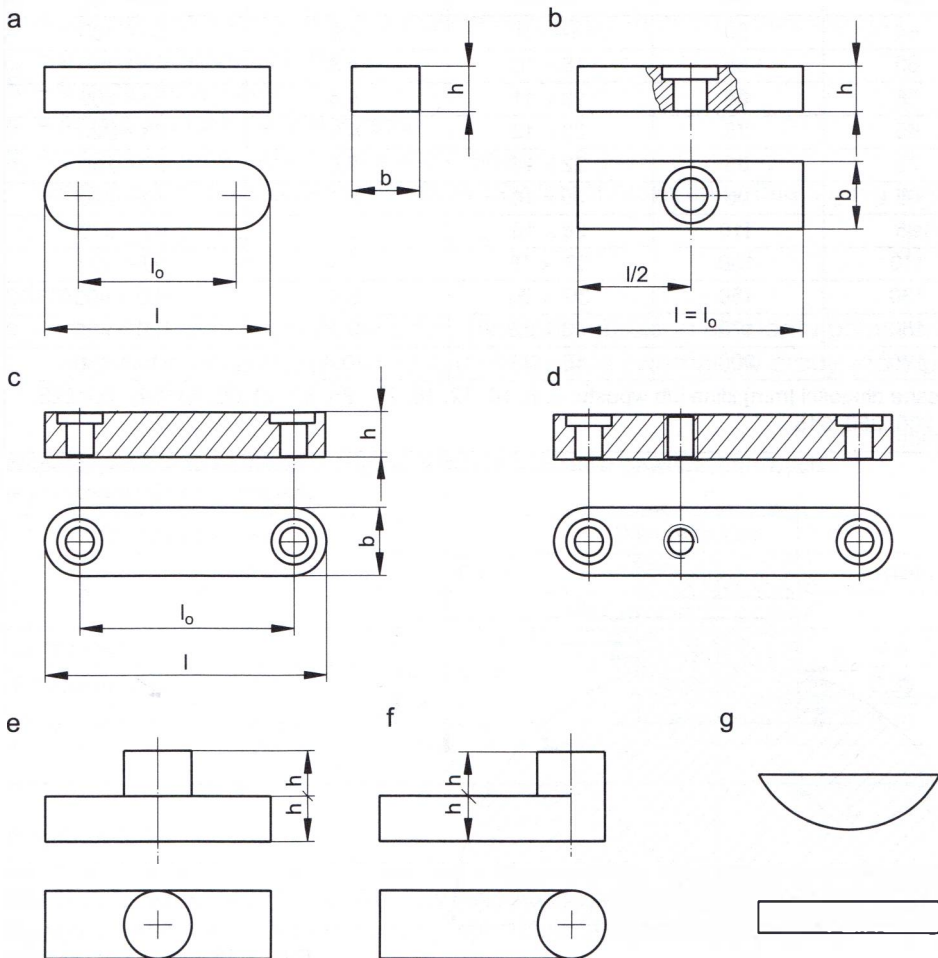


**Rys. 3.44.** Połączenie wpustowe z wpustem pryzmatycznym zaokrąglonym  
 $d$  – średnica połączenia,  $b$  – szerokość wpustu,  $h$  – wysokość wpustu,  $l_0$  – długość czynna wpustu,  $l = (l_0 + b)$  – długość całkowita wpustu,  $t$  – głębokość rowka w piaście

W zależności od kształtu wpusty mogą być pryzmatyczne (wg PN-70/M-85005), czólenkowe (wg PN-88/M-85008) lub czopkowe (wg PN-73/M-85047). Kształt i wymiary wybranych rodzajów i odmian wpustów przedstawiono na rysunku 3.45. Wpusty wykonuje się ze stali węglowych gatunku E335, E360, C45 i C55.

**Obliczanie połączeń wpustowych.** Szerokość  $b$  i wysokość  $h$  wpustów ustala się w zależności od średnicy połączenia  $d$  (tabl. 3-7), natomiast długość wpustu  $l$  wyznacza się na podstawie obliczeń z warunku wytrzymałości bocznych powierzchni wpustu na naciski powierzchniowe (rys. 3.46).

Jeżeli obliczona długość wpustu  $l$  przekroczy wartości podane w tablicy albo chce się zapewnić lepsze prowadzenie w połączeniu ruchowym, można stosować



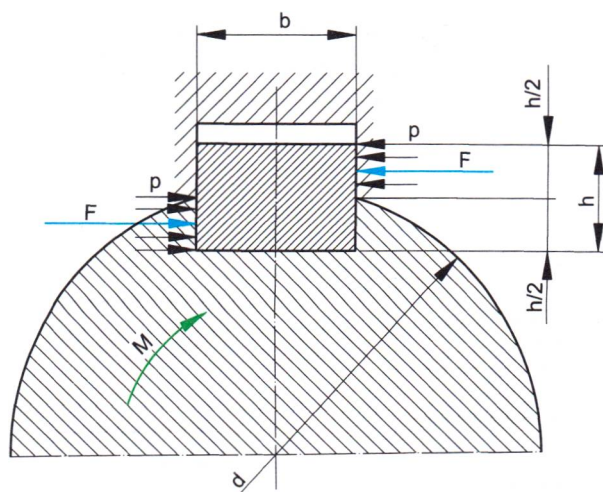
**Rys. 3.45.** Rodzaje wpustów

a – pryzmatyczny zaokrąglony, b – pryzmatyczny ścięty jeduotworowy, c – pryzmatyczny zaokrąglony dwuotworowy, d – pryzmatyczny zaokrąglony dwuotworowy wyciskowy, e – czopkowy symetryczny, f – czopkowy niesymetryczny, g – czólenkowy pryzmatyczny

**Wymiary klinów wpuszczanych i wpustów pryzmatycznych oraz rowków na wpusty**  
 (na podstawie PN-70/M-85005 i PN-73/M-85031)

d [mm]		b × h [mm]	t [mm]	l [mm]
ponad	do			
6	8	2 × 2	1	6 ÷ 20
8	10	3 × 3	1,4	6 ÷ 36
10	12	4 × 4	1,8	8 ÷ 45
12	17	5 × 5	2,3	10 ÷ 56
17	22	6 × 6	2,8	14 ÷ 70
22	30	8 × 7	3,3	18 ÷ 90
30	38	10 × 8	3,3	22 ÷ 110
38	44	12 × 8	3,3	28 ÷ 140
44	50	14 × 9	3,8	36 ÷ 160
50	58	16 × 10	4,3	45 ÷ 180
58	65	18 × 11	4,4	50 ÷ 200
65	75	20 × 12	4,9	56 ÷ 220
75	85	22 × 14	5,4	63 ÷ 250
85	95	25 × 14	5,4	70 ÷ 280
95	110	28 × 16	6,4	80 ÷ 320
110	130	32 × 18	7,4	90 ÷ 360
130	150	36 × 20	8,4	100 ÷ 400
150	170	40 × 22	9,4	100 ÷ 400
170	200	45 × 25	10,4	110 ÷ 450

Zalecane długości [mm] klina lub wpustu: 6, 8, 10, 12, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315.


**Rys. 3.46.** Obciążenie wpustu

wać dwa wpusty, rozłożone równomiernie na obwodzie połączenia. Takie rozwiązanie jest jednak kłopotliwe technologicznie podczas wykonywania rowków pod wpusty i montażu połączenia.

Po dobraniu wymiarów poprzecznych wpustu z tablicy 3-7 wyznacza się siłę  $F$  działającą na powierzchnię boczną wpustu

$$F = \frac{2M}{d} \quad (3.53)$$

gdzie  $M$  jest wartością momentu obrotowego, który obciąża połączenie. Warunek wytrzymałości wpustu na naciski powierzchniowe jest następujący

$$p = \frac{F}{l_o \cdot \frac{h}{2} \cdot n} \leq k_o \quad (3.54)$$

gdzie:

$F$  – siła obwodowa wynikająca z przenieszonego momentu obrotowego,

$l_o$  – czynna długość wpustu,

$h$  – wysokość wpustu,

$n$  – liczba wpustów w połączeniu,

$k_o$  – dopuszczalne naciski powierzchniowe.

Wartości dopuszczalnych nacisków powierzchniowych ustala się wg wzoru

$$k_o = z \cdot k_c \quad (3.55)$$

gdzie:

$k_c$  – dopuszczalne naprężenie ściskające najsłabszego elementu połączenia,

$z$  – współczynnik zależny od rodzaju połączenia i warunków pracy, który podano w tablicy 3-8.

Tablica 3-8

**Współczynnik  $z$  do obliczania dopuszczalnych nacisków powierzchniowych w połączeniach wpustowych**

Rodzaj połączenia	Warunki pracy		
	ciężkie	średnie	lekkie
	Wartość współczynnika $z$		
Spoczynkowe	0,35	0,6	0,8
Przesuwne bez obciążenia	0,15	0,25	0,30
Przesuwne pod obciążeniem	0,03	0,06	0,10

**Przykład 3.9**

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. 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 3-7 dla  $d = 40$  mm dobieramy wpust pryzmatyczny zaokrąglony o wymiarach poprzecznych  $b \times h = 12 \times 8$  mm.

Na podstawie danych zawartych w tablicach 3-1 do 3-5 ustalamy wartości dopuszczalnych naprężeń ściskających:

– dla stali C45  $k_c = 0,48R_e = 0,48 \cdot 355 = 170$  MPa,

– dla żeliwa EN-GJL-200  $k_c = \frac{R_c}{x_c} = \frac{800}{3,5} = 229$  MPa,

– dla stali E360  $k_c = 0,48R_e = 0,48 \cdot 360 = 173$  MPa.

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

$$k_o = z \cdot k_c$$

Na podstawie tablicy 3-8 przyjmujemy  $z = 0,8$ , więc

$$k_o = 0,8 \cdot 170 = 136$$
 MPa

Po przekształceniu wzoru (3.54) obliczamy minimalną czynną długość jednego wpustu

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

Natomiast całkowita długość wpustu

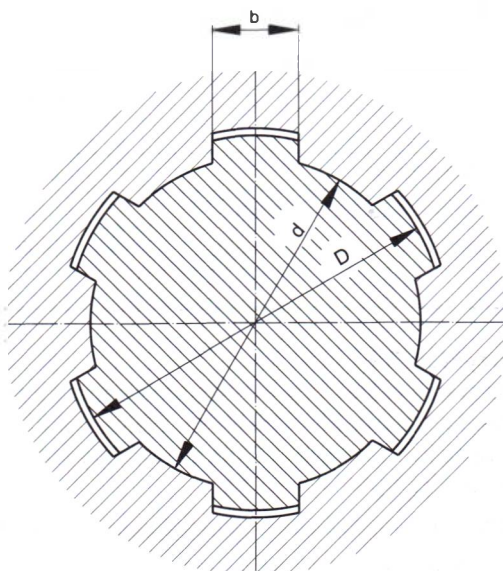
$$l = l_o + b = 36,8 + 12 = 48,8$$
 mm

Przyjmujemy zalecaną długość wpustu  $l = 50$  mm.

Na podstawie tablicy 3-7 dobieramy wpust pryzmatyczny zaokrąglony  $8 \times 12 \times 50$  wg PN-70/M-85005.

### 3.5.3. Połączenia wielowypustowe

**Połączenia wielowypustowe** stanowią grupę 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. 3.47). Połączenie tego rodzaju zwykle jest spoczynkowe. Gdy oprócz przenoszenia momentu obrotowego od połączenia

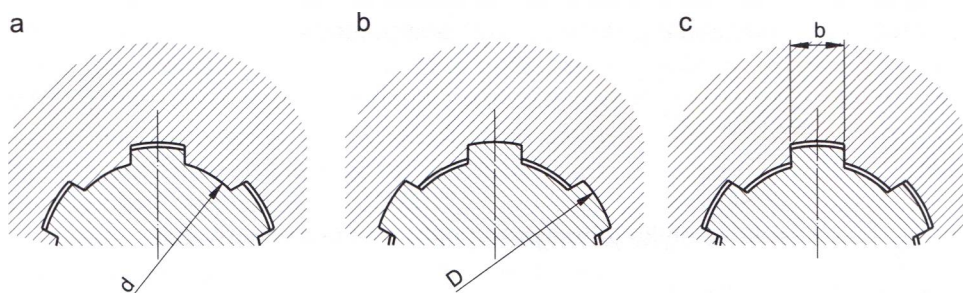


Rys. 3.47. Połączenie wielowypustowe

wymaga się także możliwości przemieszczania się piasty wzdłuż osi wału, wówczas jest to połączenie ruchowe.

Zwarta konstrukcja połączenia wielowypustowego oraz małe naciski powierzchniowe występujące w jego elementach (co umożliwia przenoszenie dużych obciążeń) powodują, że połączenia te są często stosowane w budowie maszyn. 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. W zależności od warunków pracy stosuje się połączenia serii lekkiej (połączenia spoczynkowe), średniej (połączenia ruchowe) lub ciężkiej (przy bardzo dużych obciążeniach o zmiennym kierunku i dużej częstotliwości zmian). Wymiary wielowypustów serii lekkiej i średniej określono w normie (PN-ISO 14:1994). Wypusty serii średniej są o 1...2 mm wyższe od wypustów serii lekkiej. Wielowypusty serii ciężkiej nie są znormalizowane.

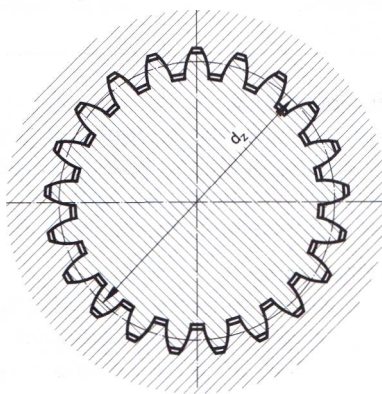
Osiowanie części połączonych wielowypustowo odbywa się najczęściej na średnicy wewnętrznej  $d$  połączenia. Rzadziej spotyka się osiowanie na średnicy zewnętrznej  $D$  lub powierzchniach bocznych wielowypustów (rys. 3.48). Dobór pasowania połączenia wielowypustowego zależy od rodzaju połączenia (spoczynkowe, ruchowe) i sposobu osiowania.



**Rys. 3.48.** Sposoby osiowania połączeń wielowypustowych  
a – na wewnętrznej średnicy  $d$  czopa, b – na zewnętrznej średnicy  $D$  wypustów, c – na bocznych powierzchniach wypustów

Specyficznym rodzajem są wielowypustowe połączenia zębate o ewolwentowym zarysie wypustów (wg PN-ISO 4156:1999). Spotyka się je coraz powszechniej ze względu na dużą wytrzymałość połączenia tego rodzaju. Stosowana w praktyce liczba ewolwentowych wypustów (zębów) wynosi od 6 do 61 – zależnie od ich wysokości (rys. 3.49). Osiowanie tego połączenia odbywa się na ewolwentowych bocznych powierzchniach wypustów, a pasowanie na średnicy podziałowej  $d_2$ .

**Obliczanie połączeń wielowypustowych** polega na określeniu nacisków na powierzch-



**Rys. 3.49.** Połączenie wielowypustowe zębate

niach bocznych wypustów, które to naciski nie mogą przekroczyć wartości nacisków dopuszczalnych. Średnicę  $d$  połączenia wyznacza się na podstawie obliczeń wytrzymałościowych wału, w których pomija się istnienie wypustów. Dla przyjętej średnicy dobieramy wymiary przekroju poprzecznego wg normy PN-ISO 14:1994. Następnie ustalamy długość połączenia z warunku wytrzymałości połączenia na naciski powierzchniowe.

Po założeniu, że siła obwodowa w połączeniu działa w połowie wysokości wypustów, średnią średnicę połączenia wyznacza się na podstawie równania

$$D_{sr} = \frac{D + d}{2} \quad (3.56)$$

Siłę obwodową  $F$ , wynikającą z przenieszonego momentu obrotowego  $M_o$ , wyznacza się na podstawie wzoru

$$F = \frac{2M_o}{D_{sr}} = \frac{4M_o}{D + d} \quad (3.57)$$

Ze względu na tolerancję wykonania elementów połączenia (szerokości wypustów i rowków oraz ich podziałki) przyjmuje się, że tylko 75% powierzchni bocznych wypustów bierze udział w przenoszeniu obciążenia. Stąd warunek wytrzymałościowy połączenia jest określony następująco

$$p = \frac{F}{0,75h_o \cdot l_o \cdot n} \leq k_c \quad (3.58)$$

gdzie:

$h_o = \frac{D - d}{2}$  – wysokość styku jednego wypustu z rowkiem w piastce,

$l_o$  – czynna długość połączenia,

$n$  – liczba wypustów,

$k_c = z \cdot k_{c0}$  – dopuszczalne naciski powierzchniowe dla słabszego elementu połączenia (wartości  $z$  – patrz tabl. 3-8).

### Przykład 3.10

Tarcza przesuwna sprzęgła kłowego, włączanego w stanie nieobciążonym, jest połączona wielowypustem z wałem o średnicy  $d = 42$  mm. Zewnętrzna średnica  $D = 48$  mm, a liczba wypustów  $n = 8$ . Wał i tarczę wykonano ze stali C45T. Dobrac długość piasty tarczy dla obciążenia momentem obrotowym  $M_o = 1200$  N · m.

#### Rozwiązanie

Z danych podanych w tablicy 3-8 wynika, że tarcza sprzęgła jako połączenie przesuwne bez obciążenia pracuje w średnich warunkach, dla których współczynnik  $z = 0,25$ . Na podstawie tablic 3-1 do 3-5 ustalamy naprężenia dopuszczalne

$$k_{c0} = 0,48R_o = 0,48 \cdot 430 = 205 \text{ MPa}$$

zatem



$$k_o = z \cdot k_c = 0,25 \cdot 205 = 51 \text{ MPa}$$

Wartość siły obwodowej obciążającej wpusty

$$F = \frac{2M_o}{D_{sr}} = \frac{4M_o}{D+d} = \frac{4 \cdot 1200 \cdot 10^3}{48+42} = 53\,333 \text{ N} = 53,3 \text{ kN}$$

Wysokość powierzchni nacisku w tym połączeniu

$$h_o = \frac{D-d}{2} = \frac{48-42}{2} = 3 \text{ mm}$$

Po przekształceniu wzoru (3.58) obliczamy wymaganą długość piasty

$$l_o \geq \frac{F}{0,75h_o \cdot k_o \cdot n} = \frac{53\,333}{0,75 \cdot 3 \cdot 51 \cdot 8} = 58,1 \text{ mm}$$

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

### 3.5.4. Połączenia wielokarbowe

**Połączenia wielokarbowe** są kolejnym specyficznym rozwiązaniem 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. 3.50).

Duża liczba wypustów na obwodzie ( $z = 20 \dots 70$ ) umożliwia dowolne ustawianie piasty względem czopa i powoduje, że naciski powierzchniowe w złączu są niewielkie. Minimalny kąt  $\varphi_{\min}$  regulacji ustawienia wynika z liczby wypustów  $z$  i można go przedstawić za pomocą wzoru

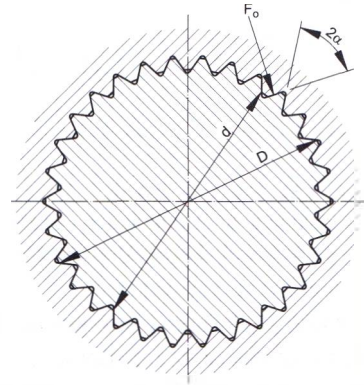
$$\varphi_{\min} = \frac{360^\circ}{z} \quad (3.59)$$

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

$$F_n = \frac{2M_o}{D_{sr}} \cos \alpha = \frac{4M_o}{D+d} \cos \alpha \quad (3.60)$$

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

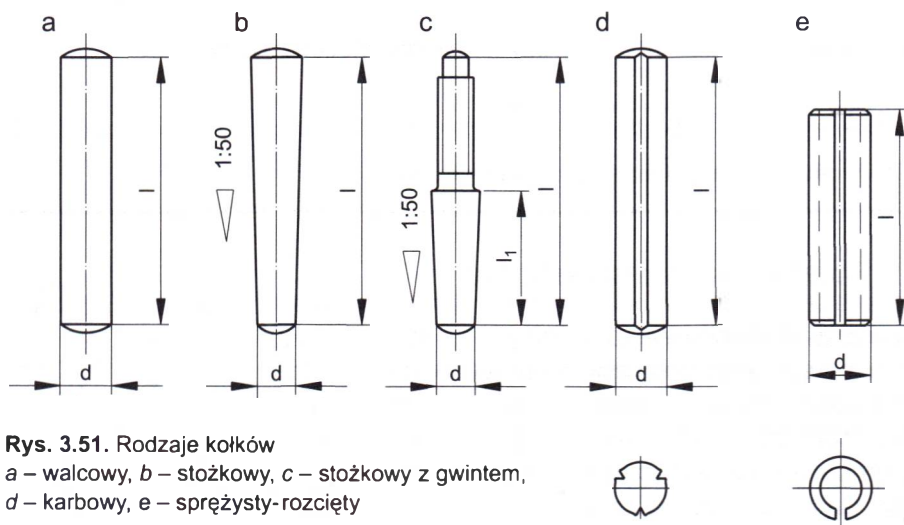
$$p = \frac{F_n}{0,75h_o \cdot l_o \cdot n} \leq k_o \quad (3.61)$$



Rys. 3.50. Połączenie wielokarbowe

### 3.5.5. Połączenia kołkowe i sworzniowe – technologia wykonania i obliczanie

**Połączenia kołkowe** są najtańszymi rozłącznymi pośrednimi połączeniami kształtowymi. Kołki (rys. 3.51) wykorzystuje się do łączenia części maszyn, ustalania ich wzajemnego położenia lub jako elementy zabezpieczające połączenie przed nadmiernym przeciążeniem.



**Rys. 3.51.** Rodzaje kołków

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

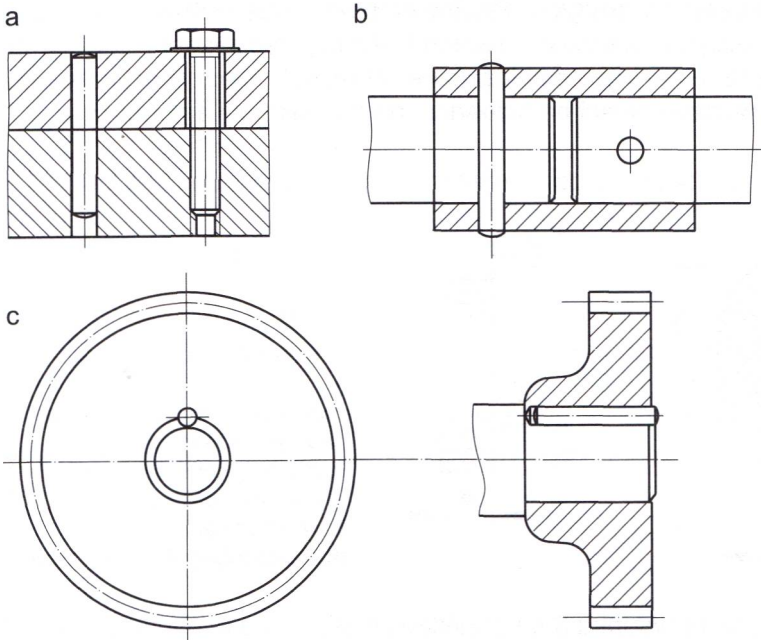
Kołki walcowe i stożkowe (wg PN 89/M-85020) są powszechnie stosowane do łączenia oraz ustalania położenia części. Zależnie od wymagań konstrukcyjnych kołki wstawia się wg pasowania np. H7/n6 lub H7/p6. Otwory przeznaczone na kołki są rozwiercane, a kołki są szlifowane. Kołki z gwintem zewnętrznym (wg PN-EN 28737:2001), pokazane na rysunku 3.51, lub z gwintem wewnętrznym (wg PN-EN 28736:2001) stosuje się w celu umożliwienia demontażu połączenia, gdy np. otwór na kołek jest nieprzelotowy.

Kołki karbowe służą do połączeń o małej wielkości i dokładności wykonania. Trzy karby równomiernie rozmieszczone na obwodzie połączenia tworzą na całej długości lub na jej części zgrubienia (wg PN-EN ISO 8740:2002 do PN-EN ISO 8745:2002) utrzymujące sprężystość kołek w otworze.

Kołki sprężyste (wg PN-EN ISO 8750:2008) spełniają z reguły rolę ustalającą wzajemne położenie części łączonych w inny sposób (np. wkrętami).

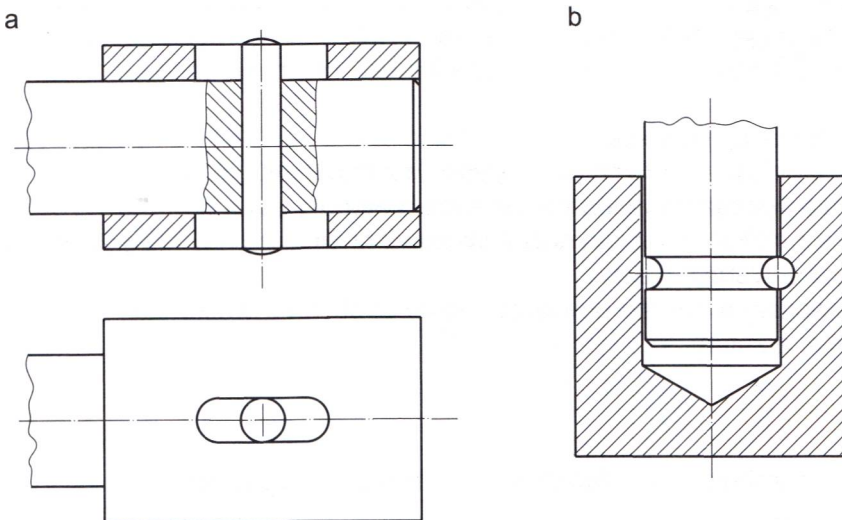
Kołki wykonuje się ze stali konstrukcyjnych węglowych oraz stali stopowych do ulepszenia cieplnego.

Połączenia kołkowe z reguły są połączeniami spoczynkowymi o charakterze ustalającym lub przenoszącymi obciążenia z kołkami poprzecznymi lub wzdłużnymi (rys. 3.52). Niewielki przekrój kołków, przenoszący obciążenia, powoduje, że połączenia te nie mogą być mocno obciążane, co ogranicza ich zastosowanie.



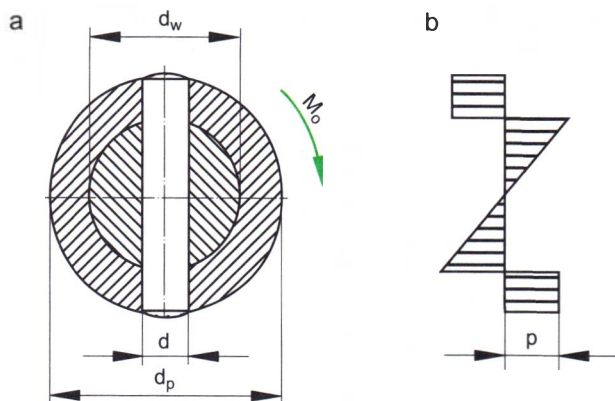
**Rys. 3.52.** Połączenia kołkowe  
*a* – ustalające, *b* – poprzeczne, *c* – wzdłużne

Czasami, gdy jest wymagany względny ruch połączonych części, stosuje się połączenia kołkowe ruchowe (rys. 3.53). Połączenia te najczęściej umożliwiają przesuwanie się drążka w tulei (ruchy poprzeczne) lub obrót tulei na drążku (ruchy styczne).



**Rys. 3.53.** Połączenia kołkowe ruchowe  
*a* – przesuwne, *b* – obrotowe

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

W przedstawionym na rysunku 3.54 przykładzie siła ścinająca kołek

$$F_t = \frac{2M_o}{d_w} \quad (3.62)$$

gdzie:

$M_o$  – moment obrotowy,

$d_w$  – średnica wałka.

Warunek wytrzymałości kołka na ścinanie przedstawia się następująco:

$$\tau = \frac{4F_t}{\pi \cdot d_w^2 \cdot n} \leq k_t \quad (3.63)$$

gdzie:

$\tau$  – naprężenia ścinające kołek,

$n$  – liczba przekrojów ścinanych (w przykładzie z rys. 3.44  $n = 2$ ),

$k_t$  – naprężenia dopuszczalne na ścinanie dla materiału kołka.

Przyjmuje się trójkątny rozkład nacisków powierzchniowych w otworze wałka i prostokątny w otworach piasty.

Siła  $F_w$  wywołująca naciski powierzchniowe w otworze wałka działa na 2/3 średnicy wałka, a zatem

$$F_w = \frac{3M_o}{2d_w} \quad (3.64)$$

Naciski powierzchniowe w otworze wałka oblicza się wg wzoru

$$p = \frac{4F_w}{d \cdot d_w} \leq k_o \quad (3.65)$$

Siła  $F_p$ , wywołująca naciski powierzchniowe w otworach tulei, działa w połowie grubości tulei, więc

$$F_p = \frac{4M_o}{d_w + d_p} \quad (3.66)$$

Naciski powierzchniowe w otworach tulei można obliczyć na podstawie wyrażenia

$$p = \frac{F_p}{d(d_p - d_w)} \leq k_o \quad (3.67)$$

gdzie  $k_o$  – dopuszczalne naciski powierzchniowe dla słabszego materiału połączenia wg tablicy 3-8.

W połączeniach kołkowych wzdłużnych (rys. 3.52c) kołek pracuje tak jak wpust. Połączenie oblicza się z warunku wytrzymałości na naciski powierzchniowe

$$p = \frac{F}{d \cdot l_o} \leq k_o \quad (3.68)$$

gdzie:

$F = \frac{2M_o}{d_w}$  – siła obwodowa w połączeniu,

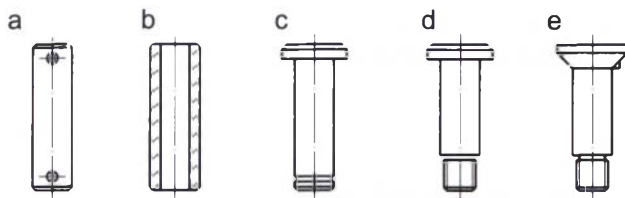
$d$  – średnica kołka,

$l_o$  – czynna długość kołka,

$k_o$  – dopuszczalne naciski powierzchniowe dla słabszego materiału połączenia dobierane wg tablicy 3-8.

**Połączenia sworzniowe.** Sworznie (rys. 3.55) to grubsze kołki pasowane zwykle luźno i wymagające zabezpieczenia przed przesunięciem wzdłuż osi połączenia. Kształty i wymiary sworzni są znormalizowane. Opisano je w następujących normach:

- PN-EN 22340:2000 (sworznie bez łba),
- PN-EN 22341:2000 (sworznie z łbem),
- PN-97/M-83007 (sworznie z czopem gwintowanym z łbem walcowym),
- PN-97/M-83009 (sworznie z łbem stożkowym i noskiem).

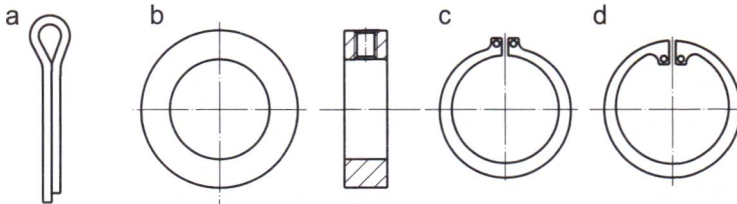


Rys 3.55. Rodzaje sworzni

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

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

Zabezpieczenie sworzni przed przesunięciem wzdłuż osi połączenia uzyskuje się za pomocą łbów, kołków, zawleczek, pierścieni osadczych lub sprężynujących (rys. 3.56).



**Rys. 3.56.** 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 sworzeń jest pasowany ciasno w obu łączonych elementach, stosuje się rzadziej. Sworzeń w takim połączeniu jest ścinany najczęściej w dwóch przekrojach, a jego średnicę wyznacza się z warunku wytrzymałości na ścinanie. Następnie sprawdza się sworzeń na naciski powierzchniowe. Warunek ścinania można przedstawić za pomocą wyrażenia

$$\tau = \frac{2F}{\pi \cdot d^2} \leq k_t$$

z którego wyznacza się średnicę sworzni

$$d \geq \sqrt{\frac{2F}{\pi \cdot k_t}} \quad (3.69)$$

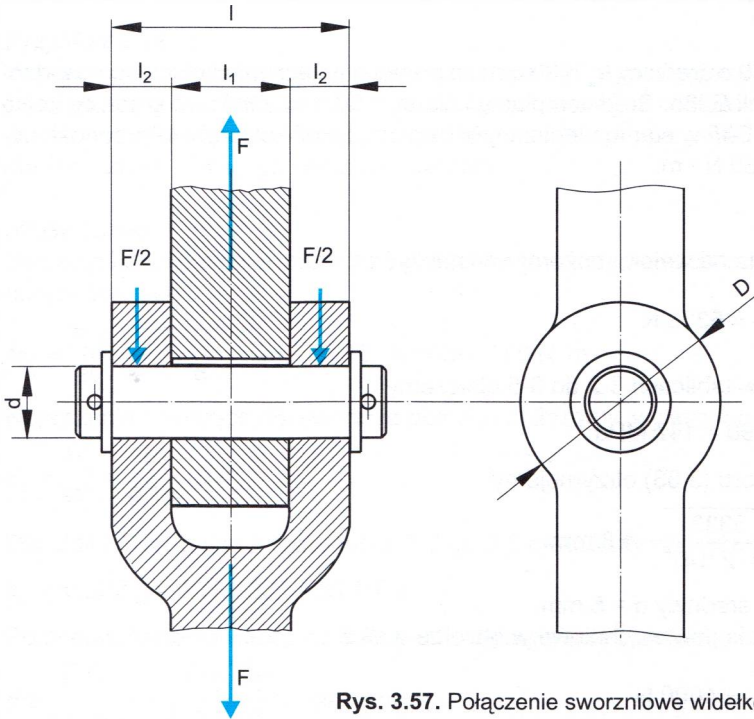
Z reguły połączenia sworzniowe są jednak połączeniami ruchowymi, w których sworzeń jest pasowany luźno w jednym z elementów łączonych, a ciasno w drugim. Takie połączenie stanowi najczęściej przegub ucho-widełki (rys. 3.57). Sworzeń w takim układzie oblicza się z warunku wytrzymałości na zginanie i sprawdza na naciski powierzchniowe w otworach widełek.

Moment zginający sworzeń jest opisany za pomocą wzoru

$$M_g = \frac{F(l_1 + 2l_2)}{8} = \frac{F \cdot l}{8} \quad (3.70)$$

a naprężenia zginające w sworzniu – wyrażeniem

$$\sigma_g = \frac{M_g}{W_x} \leq k_g \quad (3.71)$$



Rys. 3.57. Połączenie sworzniowe widelkowe

gdzie:

$W_x$  – wskaźnik wytrzymałości sworznia na zginanie, który dla sworzni pełnych wynosi  $0,1 d^3$ , natomiast dla sworzni drążonych o średnicy wydrążenia  $d_o$  jest opisany wzorem

$$W_x = 0,1 \frac{d^4 - d_o^4}{d}$$

$k_g$  – dopuszczalne naprężenie zginające (zależnie od stanu obciążenia przyjmuje się  $k_g = k_{g1}$  lub  $k_g = k_{g0}$ ).

Naciski powierzchniowe w otworze ucha można opisać za pomocą wzoru

$$p_u = \frac{F}{d \cdot l_1} \leq k_o \quad (3.72)$$

a w otworach widełek

$$p_w = \frac{F}{2d \cdot l_2} \leq k_o \quad (3.73)$$

gdzie  $k_o$  – dopuszczalne naciski powierzchniowe dla słabszego materiału połączenia (dobierane wg tablicy 3-8).

**Przykład 3.11**

Na wałku ze stali E360 o średnicy  $d_w = 30$  mm za pomocą połączenia kołkowego osadzone koło zębate ze stali E335. Średnica piasty koła  $d_p = 50$  mm. Obliczyć średnicę kołka wykonanego ze stali C55 w stanie ulepszonym cieplnie, jeżeli koło zębate przenosi moment obrotowy  $M_o = 80 \text{ N} \cdot \text{m}$ .

**Rozwiązanie**

Siłę tnącą, która działa na wałek, możemy wyznaczyć ze wzoru

$$F_t = \frac{2M_o}{d_w} = \frac{2 \cdot 80 \cdot 10^3}{30} = 5333 \text{ N}$$

Z danych zawartych w tablicach 3-2 do 3-5 obliczamy

$$k_t = 0,30R_e = 0,30 \cdot 490 = 147 \text{ MPa}$$

Z przekształcenia wzoru (3.63) otrzymujemy

$$d \geq \sqrt{\frac{4F}{\pi \cdot n \cdot k_t}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5333}{3,14 \cdot 2 \cdot 147}} = 4,8 \text{ mm}$$

Przyjmujemy kołek o średnicy  $d = 5$  mm.

Siła wywołująca naciski powierzchniowe w otworze wałka

$$F_w = \frac{3M_o}{2d_w} = \frac{3 \cdot 80 \cdot 10^3}{2 \cdot 30} = 4000 \text{ N}$$

Naciski powierzchniowe wynikające z działania obliczonej siły

$$\rho = \frac{4F_w}{d \cdot d_w} = \frac{4 \cdot 4000}{5 \cdot 30} = 107 \text{ MPa}$$

Dla stali E360 i statycznych obciążeń, wykorzystując dane w tablicach 3-2 do 3-5, obliczamy

$$k_o = 0,8k_c = 0,8 \cdot 0,48R_e = 0,8 \cdot 0,48 \cdot 360 = 138 \text{ MPa}$$

Ponieważ obliczone naciski są mniejsze niż dopuszczalne ( $\rho < k_o$ ), warunek wytrzymałości na naciski powierzchniowe w otworze wałka jest spełniony.

Siła wywołująca naciski powierzchniowe w otworach piasty

$$F_p = \frac{4M_o}{d_w + d_p} = \frac{4 \cdot 80 \cdot 10^3}{30 + 50} = 4000 \text{ N}$$

a naciski powierzchniowe związane z działaniem tej siły

$$\rho = \frac{F_p}{d(d_o - d_w)} = \frac{4000}{5 \cdot (50 - 30)} = 40 \text{ MPa}$$

Dla stali E335 i statycznych obciążeń, korzystając z danych zawartych w tablicach 3-2 do 3-5, wyznaczamy

$$k_o = 0,8k_c = 0,8 \cdot 0,48R_e = 0,8 \cdot 0,48 \cdot 335 = 129 \text{ MPa}$$

Obliczone naciski są mniejsze niż dopuszczalne ( $\rho < k_o$ ), więc warunek wytrzymałości na naciski powierzchniowe w otworach piasty również jest spełniony.

Należy zatem zastosować kołek o średnicy 5 mm.



**Przykład 3.12**

W żeliwnym tłoku zastosowano sworzeń ze stali 20Cr4, nawęglany i hartowany. Sworzeń jest pasowany luźno w piastach tłoka. Długości sworznia: całkowita  $l = 72$  mm, w korbowodzie  $l_1 = 38$  mm, w piastach tłoka  $l_2 = 16$  mm. Obustronnie zmienne obciążenie sworznia  $F = \pm 20$  kN. Obliczyć średnicę sworznia.

**Rozwiązanie**

Sworzeń luźno pasowany oblicza się z warunku wytrzymałości na zginanie. Moment zginający sworzeń

$$M_g = \frac{F \cdot l}{8} = \frac{20 \cdot 10^3 \cdot 72}{8} = 175 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{mm} = 180 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Naprężenia zginające dla sworznia pełnego obliczamy, wykorzystując wzór

$$\sigma_g = \frac{M_g}{W_x} = \frac{M_g}{0,1d^3} \leq k_{go}$$

Dla stali 20Cr4 na podstawie tablic 3-2 do 3-5 określamy naprężenia dopuszczalne

$$k_{go} = 0,28Z_{go} = 0,28 \cdot 325 = 91 \text{ MPa}$$

Po przekształceniu wzoru na naprężenia zginające otrzymujemy

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{M_g}{0,1k_{go}}} = \sqrt[3]{\frac{175 \cdot 10^3}{0,1 \cdot 91}} = 26,8 \text{ mm}$$

Przyjmujemy  $d = 27$  mm.

Ponieważ w motoryzacji stosuje się sworznie drażone, przyjmujemy sworzeń o średnicy zewnętrznej  $d = 28$  mm i średnicy wydrążenia  $d_o = 14$  mm.

Sprawdzamy wytrzymałość sworznia, porównując wskaźniki wytrzymałości przekroju:

– dla sworznia pełnego

$$W_x = 0,1d^3 = 0,1 \cdot 27^3 = 1968,3 \text{ mm}^3$$

– dla sworznia drażonego

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

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

Sprawdzamy naciski powierzchniowe na sworznie.

Dla stali 20Cr4, korzystając z danych w tablicach 3-2 do 3-5, określamy naprężenia dopuszczalne

$$k_{oo} = 0,4k_{cj} = 0,4 \cdot 0,39 Z_{go} = 0,4 \cdot 0,39 \cdot 325 = 50,7 \text{ MPa}$$

Naciski powierzchniowe w korbowodzie

$$p = \frac{F}{d \cdot l_1} = \frac{20 \cdot 10^3}{28 \cdot 38} = 18,8 \text{ MPa} < k_{oo} = 50,7 \text{ MPa}$$

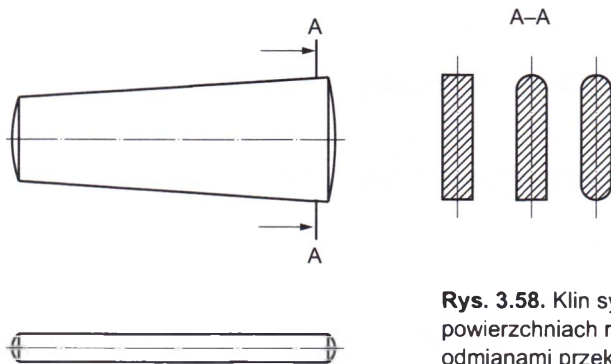
Naciski powierzchniowe w tłoku

$$p = \frac{F}{d \cdot 2l_2} = \frac{20 \cdot 10^3}{28 \cdot 2 \cdot 16} = 22,3 \text{ MPa} < k_{\infty} = 50,7 \text{ MPa}$$

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

### 3.5.6. Połączenia klinowe

**Połączenia klinowe** są rozłącznymi pośrednimi połączeniami kształtowymi. Elementami złącznymi są w nich kliny (rys. 3.58), czyli elementy o powierzchniach roboczych (płaskich lub walcowych) pochylonych względem siebie pod kątem  $\alpha$ , nazywanym kątem rozwarcia klina.



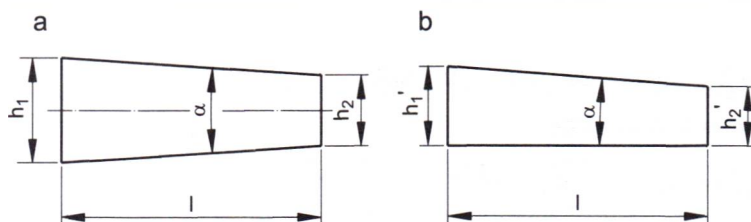
**Rys. 3.58.** Klyn symetryczny o płaskich i walcowych powierzchniach roboczych z zaznaczonymi możliwymi odmianami przekrojów

Kliny mogą być dwustronne – symetryczne (rys. 3.59a), jak też jednostronne – niesymetryczne (rys. 3.59b). Kliny symetryczne charakteryzuje zbieżność określona zależnością

$$\Delta = \frac{h_1 - h_2}{l} = 2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \quad (3.74)$$

Natomiast kliny niesymetryczne charakteryzuje pochylenie definiowane jako

$$\lambda = \frac{h'_1 - h'_2}{l} = \operatorname{tg} \alpha \quad (3.75)$$

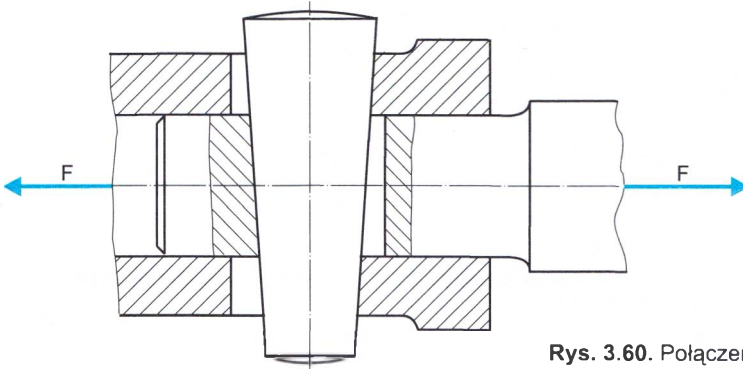


**Rys. 3.59.** Kliny i ich wymiary charakterystyczne  
a – symetryczny, b – niesymetryczny

**Połączenia klinowe** mogą być **poprzeczne**, **wzdłużne** i **nastawne** (rys. 3.60). W połączeniach poprzecznych klin (najczęściej symetryczny) jest wbity prostopadle do osi połączenia. Połączenia poprzeczne mogą łączyć wały z tulejami lub tworzyć złącza typu ucho-widelki. 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. Jest on spełniony, gdy siła tarcia jest większa od składowej siły  $F$ , równoległej do roboczej powierzchni klina. Składowa ta dąży do wypchnięcia klina z połączenia. Warunek samohamowności jest opisany następującą nierównością:

$$\Delta = \frac{h_1 - h_2}{l} = 2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} < 2\mu \quad (3.76)$$

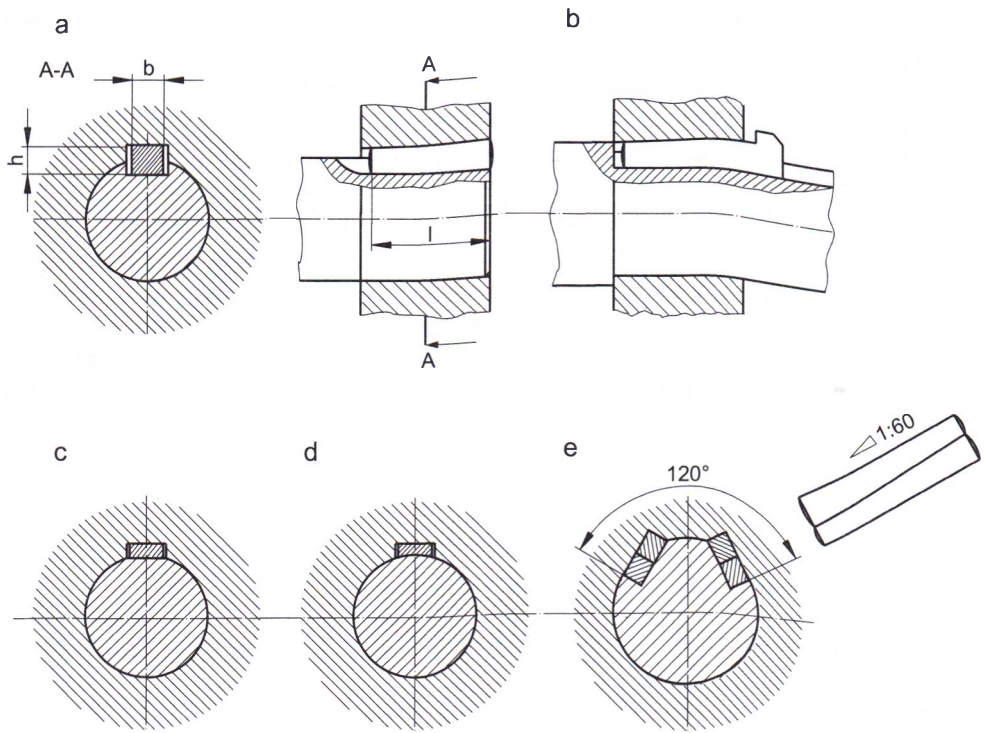
gdzie  $\mu$  oznacza współczynnik tarcia dla materiału klina i powierzchni z nim współpracujących.



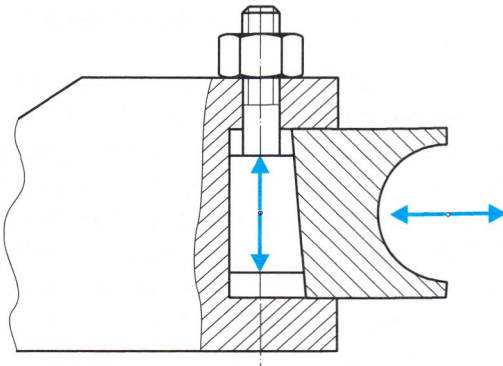
Rys. 3.60. Połączenie klinowe poprzeczne

Połączenia wzdłużne klinem równoległym do osi łączonych części (rys. 3.61) stosuje się do łączenia wałów z piastami kół pasowych, zębatych i in. oraz zabezpieczania piast przed przesuwaniem się na wałach. Kliny wzdłużne są niesymetryczne i mogą być wpuszczane zaokrąglone, ścięte i z noskiem (wg PN-M-85031:1973), płaskie (wg PN-M-85034:1990), wklęsłe (wg PN-M-85036:1990) i styczne (wg PN-M-85007:1990). Znormalizowane wymiary klinów wpuszczanych przedstawiono w tabelicy 3-7. Pochylenie klinów  $\lambda$  wynosi od 1:60 do 1:100. Pochylenie to zapewnia samohamowność klinów w połączeniach. Takie samo pochylenie musi mieć dno rowka w piaście. Kliny wykonuje się ze stali węglowych (C), konstrukcyjnych (S) lub maszynowych (E). Wbijają się je między odpowiednie powierzchnie wału i dna 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 klinowe nastawne (rys. 3.62) wykorzystuje się do regulacji wzajemnego położenia części oraz do utrzymania stałych napięć w połączeniach pomimo zużywania się współpracujących części.



**Rys. 3.61.** Połączenia klinowe wzdłużne  
 a – klinem wpuszczanym ściętym, b – klinem wpuszczanym noskowym, c – klinem płaskim,  
 d – klinem wklęsłym, e – klinami stycznymi



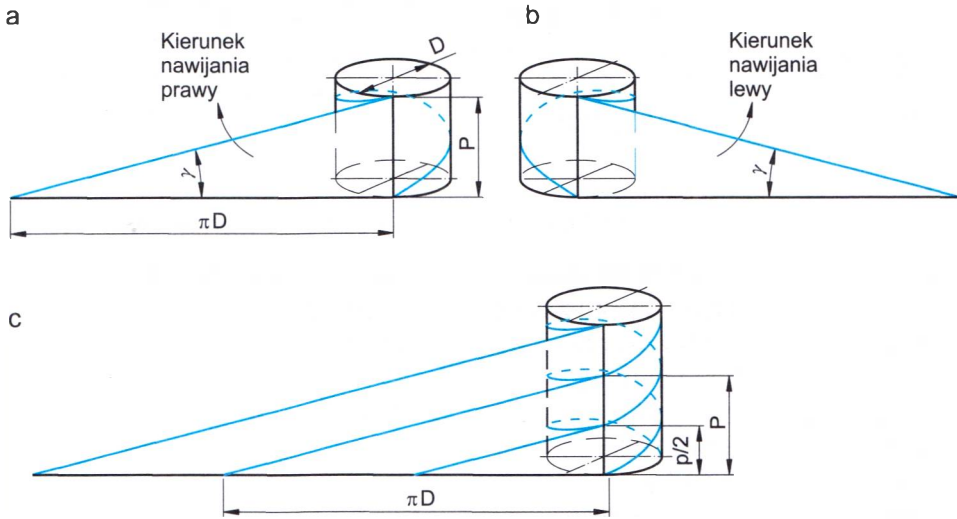
**Rys. 3.62.** Połączenie klinowe nastawne

### 3.5.7. Połączenia gwintowe

**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 bądź stożek o średnicy  $D$  równi pochyłej o długości podstawy  $L = \pi \cdot D$  i wysokości  $P$  (rys 3.63a, b). Odpowiednio do kierunku nawijania linii śrubowej gwint może być prawy lub lewy.

Gdy liczba linii śrubowych nawijanych na walec albo stożek jest większa niż 1, a odległość między nimi  $P_1$  jest krotnością wysokości  $P$ , wówczas mamy do czynienia z gwintem wielokrotnym (rys. 3.63c), np. z nawinięcia dwóch linii śrubowych powstaje gwint dwukrotny.



**Rys. 3.63.** Powstawanie linii śrubowej  
a – pojedynczej prawej, b – pojedynczej lewej, c – dwukrotnej prawej

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

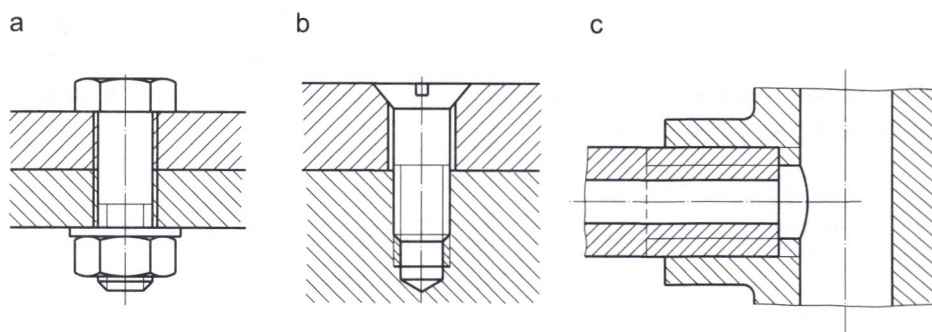
$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{P}{\pi \cdot D} \quad (3.77)$$

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 linii śrubowych (gwintów)  $n$ -krotnych ich podziałka jest określona wzorem

$$P_z = \frac{P}{n} \quad (3.78)$$

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

**Połączenia gwintowe** są najczęściej stosowanymi w budowie maszyn rozłącznymi połączeniami kształtowymi. Powstają przez skojarzenie elementu o gwincie zewnętrznym (śruby) z elementem mającym odpowiedni gwint wewnętrzny (nakrętki). Połączenia gwintowe mogą być pośrednie, gdy są realizowane przy użyciu śruby i nakrętki (rys. 3.64a) lub wkręta (rys. 3.64b), albo bezpośrednie, gdy gwinty są wykonane bezpośrednio w łączonych elementach (rys. 3.64c).



**Rys. 3.64.** Rodzaje połączeń gwintowych

a – pośrednie za pomocą śruby z nakrętką, b – pośrednie wkrętem, c – bezpośrednie

Gwinty charakteryzują następujące podstawowe wielkości (rys. 3.65):

$d$  – średnica zewnętrzna gwintu zewnętrznego (śruby),

$D$  – średnica dna wrębów gwintu wewnętrznego (nakrętki),

$d_1$  – średnica wewnętrzna śruby,

$D_1$  – średnica otworu nakrętki,

$d_2$  – średnica podziałowa śruby,

$d_3$  – średnica rdzenia śruby,

$D_2$  – średnica podziałowa nakrętki,

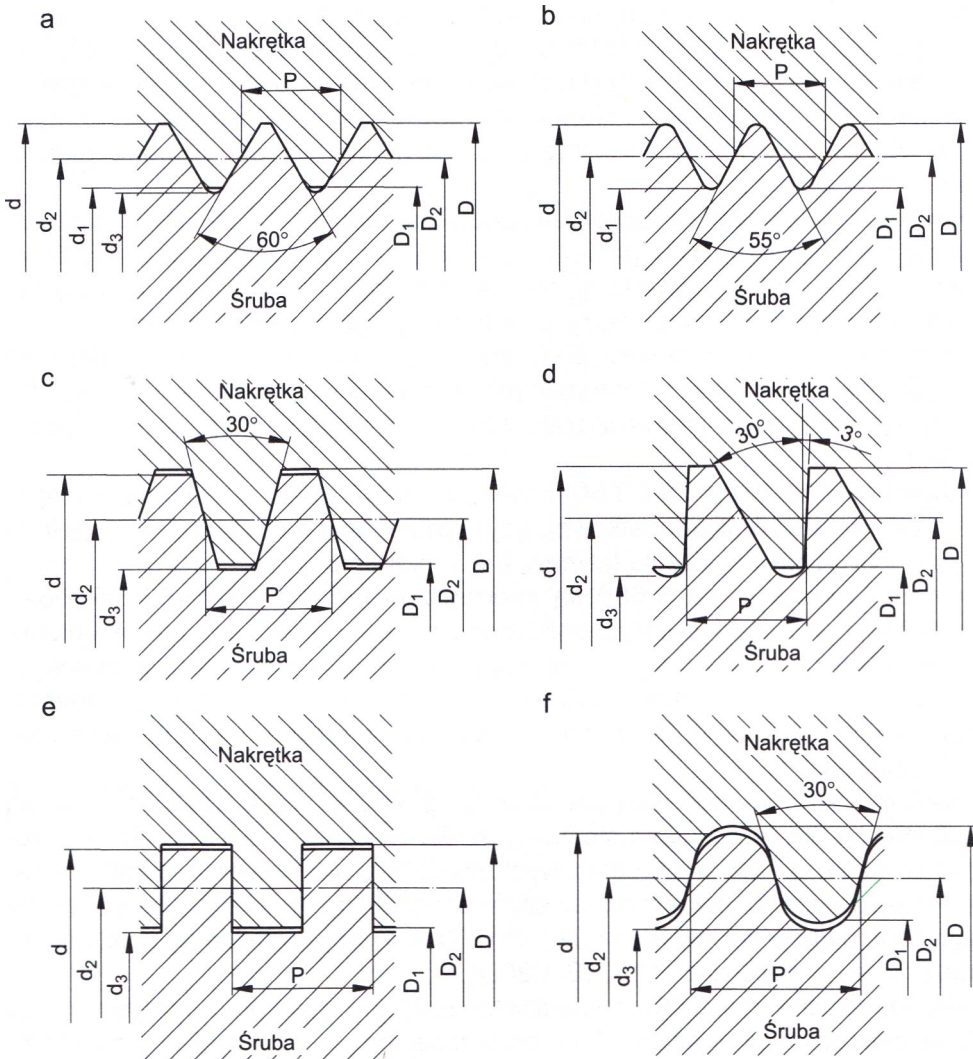
$P$  – skok gwintu,

$\alpha$  – kąt rozwarcia gwintu (mierzony między bokami zarysu).

Do gwintów powszechnie stosowanych należą gwinty trójkątne i trapezowe. Rzadziej stosuje się gwinty okrągłe i prostokątne oraz gwinty stożkowe i toczone.

**Gwinty metryczne** (rys. 3.65a) o zarysie trójkątnym i kącie rozwarcia  $\alpha = 60^\circ$  są podstawowym rodzajem połączeń gwintowych stosowanych w budowie maszyn. Są znormalizowane (wg PN-ISO 965-1:2001, PN-ISO 965-2:2001, PN-ISO 965-3:2001), oznaczane i wymiarowane w milimetrach. Oznaczenie gwintu metrycznego o skoku zwykłym (uprzywilejowanym) składa się z symbolu M (gwint metryczny), za którym występuje wartość średnicy zewnętrznej gwintu  $d$ , podana w milimetrach (np. M10). Natomiast oznaczenie gwintu metrycznego drobnozwojnego zawiera symbol M (gwint metryczny), za którym umieszcza się dwie wartości:  $d \times P$ , gdzie  $d$  jest średnicą zewnętrzną gwintu w milimetrach, a  $P$  – skokiem gwintu w milimetrach (np. M10 $\times$ 1). Gwinty lewe dodatkowo oznaczają się literami LH na końcu oznaczenia. Gwinty metryczne są samohamowne. Oznacza to, że nie odkręcają się samoczynnie pod wpływem obciążeń działających wzdłuż osi gwintu. Gwinty metryczne stosuje się głównie w połączeniach spoczynkowych. Wymiary wybranych gwintów metrycznych podano w tabelicy 3-9.

**Gwinty rurowe walcowe** (rys. 3.65b), znormalizowane wg PN-ISO 228-1:2003, są gwintami trójkątnymi calowymi. Stosuje się je powszechnie do łączenia przewodów rurowych. Kąt gwintu rurowego wynosi  $55^\circ$ , a jego wymiary są określone w calach. Skok gwintu określa się liczbą zwojów gwintu na 1 cal jego długości. Gwinty rurowe oznaczają się literą G z podaniem wielkości gwintu w calach (np. G1 $\frac{1}{2}$ ”).



Rys. 3.65. Zarysy i wymiary gwintów

a – trójkątny metryczny, b – rurowy walcowy, c – trapezowy metryczny ISO, d – trapezowy niesymetryczny, e – prostokątny, f – okrągły

**Gwinty trapezowe** mogą być metryczne ISO (rys. 3.65c), znormalizowane wg PN-ISO 2901:1995, albo niesymetryczne (rys. 3.65d), ujęte w normie PN-M-02019:1988. Służą one do tworzenia dokładnych połączeń ruchomych i są stosowane głównie w mechanizmach śrubowych. Gwinty trapezowe charakteryzują się dużą wytrzymałością i sprawnością. Dodatkową ich zaletą jest możliwość regulacji luzów między śrubą i nakrętką (nakrętki dwudzielne). Gwinty trapezowe metryczne stosuje się w mechanizmach śrubowych obciążonych w obu kierunkach, natomiast najbardziej wytrzymałe gwinty niesymetryczne – w mechanizmach obciążonych jednokierunkowo, np. w podnośnikach samocho-

dowych. W zależności od potrzeb stosuje się różne skoki gwintów trapezowych dla tej samej średnicy. Rozróżniamy gwinty trapezowe drobnozwojne, uprzywiłejowane (zwykłe) i grubozwojne o dużym skoku, dlatego w oznaczeniu gwintu zawsze podaje się jego skok. Największe skoki występują w gwintach trapezowych wielokrotnych, które wykorzystuje się w mechanizmach niesamohamownych.

Gwinty trapezowe metryczne oznacza się symbolem Tr, za którym umieszcza się dwie wartości:  $d \times P$ , gdzie  $d$  jest średnicą zewnętrzną gwintu w milimetrach, a  $P$  – skokiem gwintu w milimetrach (np. Tr 32×6). W oznaczeniu gwintów trapezowych niesymetrycznych występuje symbol S, po którym również występują dwie wartości:  $d \times P$  oznaczające takie same parametry jak dla gwintów trapezowych metrycznych (przykładowe oznaczenie: S 40×8). Wymiary wybranych gwintów trapezowych metrycznych podano w tablicy 3-10.

**Gwinty prostokątne** (rys. 3.65e) nie są znormalizowane i stosuje się je sporadycznie w produkcji jednostkowej, gdyż ich zadania z powodzeniem spełniają gwinty trapezowe, które są łatwiejsze w wykonaniu.

**Gwinty okrągłe** (rys. 3.65f) są znormalizowane (wg PN-M-02035:1984). Charakteryzuje je duża wytrzymałość zmęczeniowa, wynikająca z zaokrąglonego zarysu gwintu. Oznacza się je, podając symbol RD oraz średnicę zewnętrzną gwintu. Gwinty okrągłe stosuje się w połączeniach spoczynkowych obciążonych udarowo i często rozłączanych, np. w złączach wagonowych i hakach dźwigowych.

**Gwinty stożkowe** powstają podobnie jak gwinty walcowe z tą różnicą, że są nacinane na powierzchniach stożkowych. Stosowane są do łączenia przewodów rurowych, paliwowych smarowych itp. Dzięki stożkowemu kształtowi zapewniają szczelność połączeń oraz szybki montaż i demontaż. Stożkowe gwinty metryczne ujęto w normie PN-M-02033:1990, a gwinty szczelne do połączeń rurowych – w normie PN-ISO 10226-1:2006.

**Gwinty toczne** (rys. 3.66) są specjalnym rodzajem gwintów, w których między śrubę i nakrętkę wprowadzono kulki przetaczające się po wklęsłych powierzchniach roboczych gwintu. Ze względu na dużą dokładność i małe opory ruchu gwinty toczne wykorzystuje się np. w mechanizmach posuwu stołów obrabiarek numerycznych, sprzęcie pomiarowym oraz mechanizmach kierowniczych niektórych samochodów ciężarowych.



Rys. 3.66. Model śrubowego mechanizmu tocznego



Tablica 3-9

**Wymiary wybranych gwintów metrycznych (na podstawie PN-ISO 965-2:2001)**

Oznaczenie	$P$ [mm]	$D = d$ [mm]	$D_2 = d_2$ [mm]	$D_1 = d_1$ [mm]	$d_3$ [mm]
M4	0,7	4	3,545	3,242	3,141
M5	0,8	5	4,480	4,134	4,019
M6	1	6	5,350	4,917	4,773
M8	1,25	8	7,188	6,647	6,466
M8×1	1	8	7,350	6,917	6,773
M10	1,5	10	9,026	8,376	8,160
M10×1,25	1,25	10	9,188	8,647	8,466
M12	1,75	12	10,863	10,106	9,653
M12×1,25	1,25	12	11,188	10,647	10,466
M14	2	14	12,701	11,835	11,546
M14×1,5	1,5	14	13,026	12,376	12,160
M16	2	16	14,701	13,835	13,546
M16×1,5	1,5	16	15,026	14,376	14,160
M18	2,5	18	16,376	15,294	14,933
M18×2	2	18	16,701	15,835	15,546
M18×1,5	1,5	18	17,026	16,376	16,160
M20	2,5	20	18,376	17,294	16,933
M20×2	2	20	18,701	17,835	17,546
M20×1,5	1,5	20	19,026	18,376	18,160

Tablica 3-10

**Wymiary wybranych gwintów trapezowych metrycznych ISO (na podstawie PN-ISO 2901:1995)**

Oznaczenie	$D$ [mm]	$P$ [mm]	$D_1 = d_1$ [mm]	$D_2 = d_2$ [mm]	$d_3$ [mm]	$D$ [mm]
Tr16×2	16	2	14,5	15	14	16,5
Tr16×4	16	4	12,5	14	12	16,5
Tr18×2	18	2	16,5	17	16	18,5
Tr18×4	18	4	14,5	16	14	18,5
Tr20×2	20	2	18,5	19	18	20,5
Tr20×4	20	4	16,5	18	16	20,5
Tr22×3	22	3	19,5	20,5	19	22,5
Tr22×5	22	5	17,5	19,5	17	22,5
Tr22×8	22	8	15	18	14	23
Tr24×3	24	3	21,5	22,5	21	24,5
Tr24×5	24	5	19,5	21,5	19	24,5
Tr24×8	24	8	17	20	16	25
Tr26×3	26	3	23,5	24,5	23	26,5
Tr26×5	26	5	21,5	23,5	21	26,5
Tr26×8	26	8	19	22	18	27
Tr28×3	28	3	25,5	26,5	25	28,5
Tr28×5	28	5	23,5	25,5	23	28,5
Tr28×8	28	8	21	24	20	29

Tablica 3-10 (cd.).

Oznaczenie	$D$ [mm]	$P$ [mm]	$D_1 = d_1$ [mm]	$D_2 = d_2$ [mm]	$d_3$ [mm]	$D$ [mm]
Tr30×3	30	3	27,5	28,5	27	30,5
Tr30×6	30	6	25,5	27,5	25	31
Tr30×10	30	10	21	25	20	31
Tr32×3	32	3	29,5	30,5	29	32,5
Tr32×6	32	6	27	29	26	33
Tr32×10	32	10	23	27	22	33
Tr34×3	34	3	31,5	32,5	31	34,5
Tr34×6	34	6	29	31	28	35
Tr34×10	34	10	25	29	24	35
Tr36×3	36	3	33,5	34,5	33	36,5
Tr36×6	36	6	31	33	30	37
Tr36×10	36	10	27	31	26	37
Tr38×3	38	3	35,5	36,5	35	38,5
Tr38×7	38	7	32	34,5	31	39
Tr38×10	38	10	29	33	28	39
Tr40×3	40	3	37,5	38,5	37	40,5
Tr40×7	40	7	34	36,5	33	41
Tr40×10	40	10	31	35	30	41

Tolerancje wymiarów są znormalizowane dla gwintów:

- metrycznych wg PN-ISO 995-3:2001,
- rurowych walcowych wg PN-ISO 228-1:2003,
- trapezowych metrycznych ISO wg PN-ISO 2903:1996,
- trapezowych niesymetrycznych wg PN-M-02119:1988.

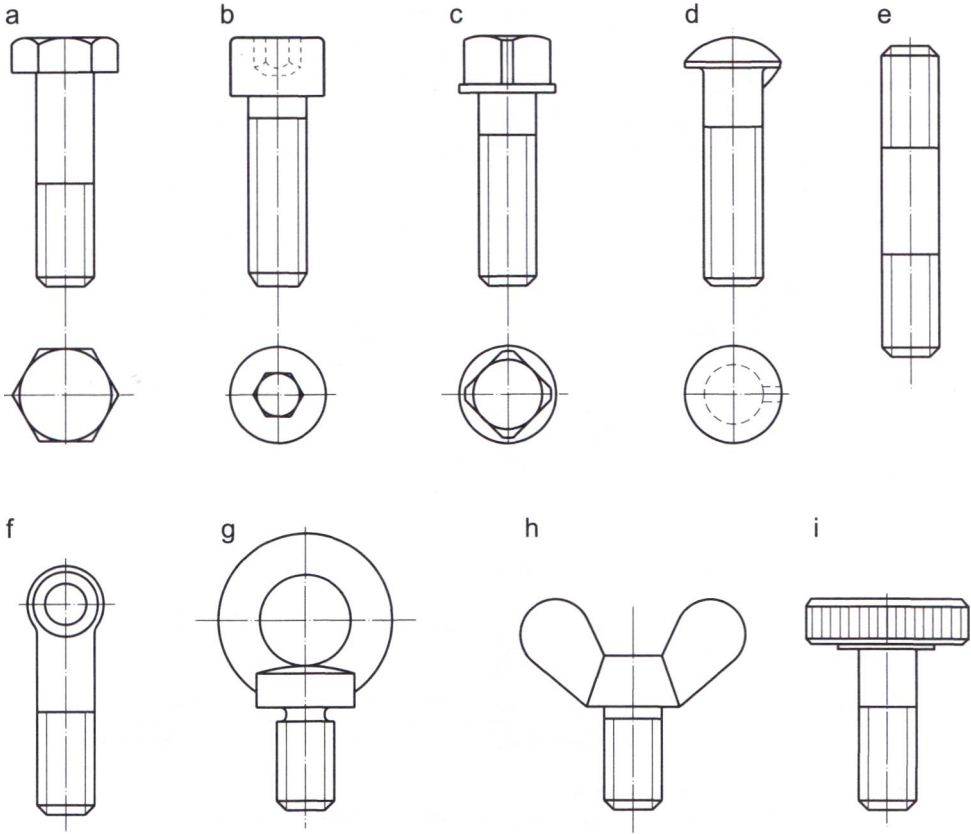
Pasowanie gwintów zewnętrznych z wewnętrznymi realizuje się na średnicach podziałowych śruby i nakrętki.

W pośrednich połączeniach gwintowych przeważnie używa się znormalizowanych łączników gwintowych w postaci śrub, wkrętów i nakrętek.

**Śruby** to łączniki z gwintem zewnętrznym, zakończone łbami o różnych kształtach, najczęściej sześciokątnych (rys. 3.67). Kształt, wymiary i materiał śrub są znormalizowane. Na przykład śruby z łbem sześciokątnym z gwintem od M1,6 do M64, klasy dokładności A i B, scharakteryzowano w normie PN-EN ISO 4014:2011.

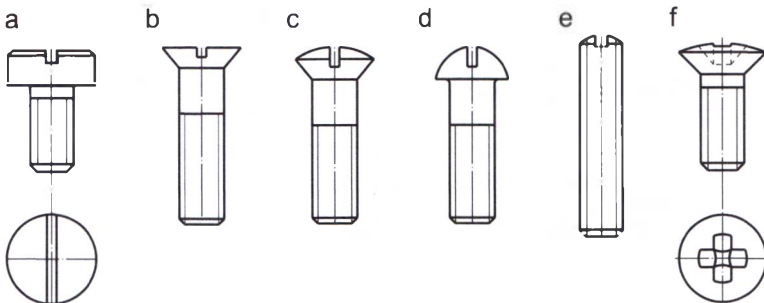
Śruby tworzą połączenia gwintowe z nakrętkami.

**Wkręty** to łączniki z gwintem zewnętrznym, które na łbie mają nacięte rowki lub gniazda pod wkrętak i tworzą połączenie gwintowe z częścią, w której jest nacięty gwint wewnętrzny. Podobnie jak śruby, wkręty różnią się kształtem łbów (rys. 3.68). Wkręty są objęte normami, w których podano kształt, wymiary i materiał ich wykonania. Na przykład wkręty z łbem walcowym z rowkiem klasy dokładności A z gwintem od M1,6 do M10 scharakteryzowano w normie PN-EN ISO 1207:1999.



**Rys. 3.67.** Przykłady śrub różnego rodzaju

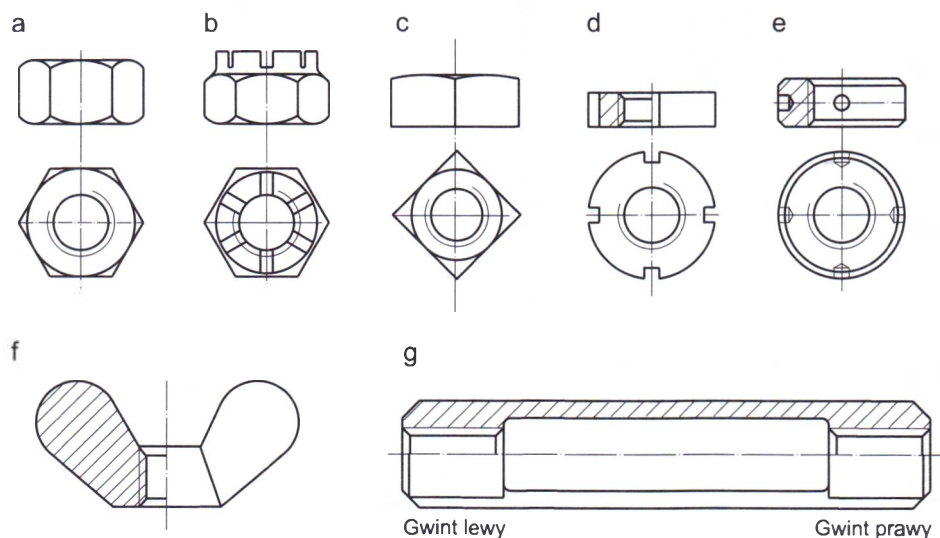
a – śruba z łbem sześciokątnym, b – śruba z łbem walcowym z gniazdem sześciokątnym, c – śruba z łbem kwadratowym, d – śruba z łbem grzybkowym z noskiem, e – śruba dwustronna, f – śruba oczkowa, g – śruba z uchem, h – śruba skrzydełkowa, i – śruba z łbem radełkowym



**Rys. 3.68.** Przykłady wkrety różnego rodzaju

a – wkręt z łbem płaskim, b – wkręt z łbem stożkowym, c – wkręt z łbem soczewkowym, d – wkręt z łbem kulistym, e – wkręt bez łba, f – wkręt z łbem soczewkowym z gniazdem krzyżowym

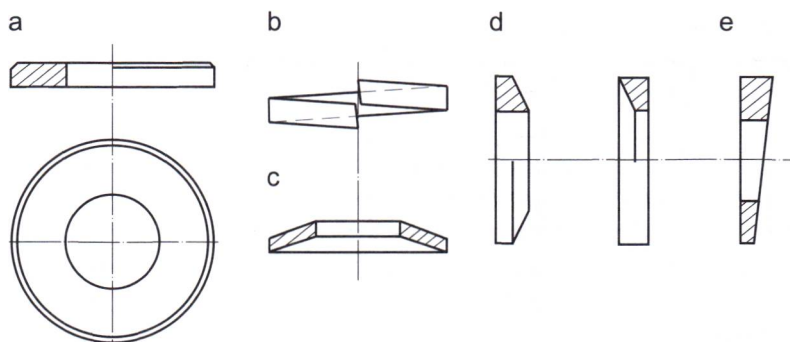
**Nakrętki** to łączniki z gwintem wewnętrznym, które tworzą połączenia gwintowe ze śrubami. Nakrętki, tak jak łby śrub, mają zróżnicowany kształt, aby zaspokoić różne potrzeby konstrukcyjne (rys. 3.69). Podobnie jak śruby i wkręty, nakrętki są znormalizowane. Na przykład nakrętki sześciokątne z kołnierzem stożkowym z gwintem od M5 do M20 scharakteryzowano w normie PN-EN 1661:2000.



**Rys. 3.69.** Najczęściej stosowane nakrętki

a – sześciokątna, b – koronowa, c – kwadratowa, d – okrągła rowkowa, e – okrągła otworowa, f – skrzydełkowa, g – rzymska

**Podkładki** (rys. 3.70) są ważnym uzupełnieniem połączeń gwintowych. Służą one do zmniejszenia nacisku między nakrętką lub łbem wkręta a powierzchnią łączonych elementów (podkładki płaskie), zabezpieczania połączenia przed odkręcaniem (podkładki sprężyste) oraz do zabezpieczania śrub i wkrętów przed zginaniem (podkładki kuliste lub klinowe).



**Rys 3.70.** Rodzaje podkładek

a – płaska, b, c – sprężysta, d – stożkowa, e – klinowa

**Montaż połączeń gwintowych.** Do montażu połączeń gwintowych używa się kluczy lub wkrętek dostosowanych do rodzaju nakrętki albo łba śruby lub wkręta. Pod obracający się element połączenia gwintowego zawsze montuje się podkładkę. Moment dokręcania nakrętek lub wkrętów powinien być dostosowany do wybranego rodzaju gwintu i materiału, z którego jest wykonane połączenie. Moment dokręcania połączeń gwintowych jest szczególnie istotny w urządzeniach pracujących pod ciśnieniem (np. głowice silników spalinowych) oraz części szybko wirujących. Złącza należy zabezpieczyć przed samoczynnym odkręcaniem, stosując podkładki sprężyste, podkładki odginane, przeciwnakrętki, zawlecзки w nakrętkach koronowych albo odpowiednie kleje.

### Zasady obliczania gwintów

Obliczenia gwintów można podzielić na dwa rodzaje:

- wyznaczanie momentu niezbędnego do obracania nakrętki lub wkręta oraz samohamowności i sprawności gwintu,
- obliczenia wytrzymałościowe.

**Oznaczenia.** We wzorach podanych w dalszej części niniejszego podrozdziału przyjęto następujące oznaczenia:

$Q$  – siła osiowa obciążająca połączenie gwintowe,

$F$  – siła niezbędna do obracania nakrętki,

$F_r$  – siła ręki działająca na klucz,

$Q_t$  – siła poprzeczna działająca na jedną śrubę,

$Q_0$  – siła napięcia wstępnego,

$Q'$  – siła napięcia resztkowego,

$Q_r$  – osiowa siła robocza,

$Q_z$  – osiowa siła zastępcza,

$\rho$  – kąt tarcia,

$\rho'$  – pozorny kąt tarcia,

$\mu'$  – pozorny współczynnik tarcia obliczany wg zależności  $\mu' = \mu / \cos(\alpha/2) = \operatorname{tg} \rho'$ , gdzie  $\mu$  oznacza współczynnik tarcia między śrubą i nakrętką, natomiast  $\alpha$  – kąt rozwarcia gwintu,

$D_z$  – średnica zewnętrzna nakrętki,

$D_w$  – średnica wewnętrzna nakrętki,

$r_w$  – średnie ramię siły tarcia na powierzchni oporowej nakrętki,

$M_1$  – moment obrotowy śruby lub nakrętki odpowiadający sile tarcia w gwincie,

$M_2$  – moment siły tarcia na powierzchni oporowej nakrętki lub śruby,

$l$  – czynna długość klucza,

$S_0$  – pole powierzchni styku gwintu śruby i nakrętki,

$S_r$  – pole powierzchni przekroju poprzecznego rdzenia śruby.

Moment obrotowy śruby lub nakrętki  $M_1$  odpowiadający sile tarcia w gwincie, niezbędny do obracania nakrętki, oblicza się wg wzoru

$$M_1 = F \cdot \frac{d_s}{2} = 0,5Q \cdot d_s \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \rho')$$

(3.79)

gdzie

$$d_s = \frac{D + d_1}{2}$$

natomiast  $D$  i  $d_1$  są odpowiednimi średnicami gwintu wg rysunku 3.65.

Moment siły tarcia na powierzchni oporowej nakrętki lub śruby  $M_2$  oblicza się za pomocą równania

$$M_2 = Q \cdot \mu \cdot r_{sr} \quad (3.80)$$

w którym

$$r_{sr} = \frac{D_z + D_w}{4}$$

Aby obrócić nakrętkę wokół osi śruby (lub śruby w nakrętce), należy pokonać opór sił tarcia i wynikające z niego momenty  $M_1$  (w gwincie) oraz  $M_2$  (na powierzchni oporowej). Zatem całkowity moment

$$M_s = M_1 + M_2 \quad (3.81)$$

Obracając nakrętkę lub śrubę, do klucza o długości czynnej  $l$  należy przyłożyć siłę ręki o wartości  $F_r$ , więc

$$M_s = F_r \cdot l \quad (3.82)$$

Gwint jest samohamowny, jeśli pod obciążeniem  $Q$  samoczynny obrót nakrętki względem śruby jest niemożliwy i może nastąpić wyłącznie po przyłożeniu dodatkowej siły wywołującej moment obrotowy. Warunek samohamowności można zapisać jako

$$\gamma \leq \rho' \quad (3.83)$$

Sprawność gwintu jest określana stosunkiem pracy użytecznej, polegającej na podniesieniu ciężaru  $Q$  na wysokość skoku gwintu  $P$ , do pracy włożonej w wykonanie jednego pełnego obrotu momentem  $M$ . Sprawność tę można więc opisać za pomocą wzoru

$$\eta = \frac{L_u}{L} = \frac{Q \cdot P}{2\pi \cdot M} \quad (3.84)$$

Pod wpływem obciążenia osiowego  $Q$  gwint jest narażony na zniszczenie przez naciski występujące na powierzchniach styku gwintu śruby i nakrętki oraz na ścinanie u podstawy zarysu gwintu. Ponadto rdzeń śruby jest rozciągany lub ściskany. Natomiast podczas obciążenia siłą poprzeczną śruba jest ścinana.

Obliczanie gwintu śruby i nakrętki opiera się na założeniu, że wytrzymałość gwintu na naciski powierzchniowe jest większa niż wytrzymałość rdzenia śruby, co zapisuje się w postaci nierówności

$$S_o \cdot k_o \geq S_r \cdot k_r \quad (3.85)$$

Można to osiągnąć przez ustalenie odpowiedniej wysokości nakrętki, czyli liczby współpracujących zwojów gwintu. Z rozwinięcia warunku (3.85) otrzymuje się nierówność

$$H \geq \frac{k_r \cdot d_1 \cdot P}{4k_o \cdot d_s \cdot t_n} \quad (3.86)$$

gdzie  $t_n = \frac{d - D_1}{2}$  jest tzw. głębokością nośną gwintu.

Wysokość nakrętki można obliczać również z warunku wytrzymałości na naciski powierzchniowe w postaci

$$p = \frac{Q}{S_o \cdot z} \quad (3.87)$$

gdzie:

$z = \frac{H}{P}$  – liczba zwojów nakrętki,

$S_o = \frac{\pi}{4}(d^2 - D_1^2)$  – powierzchnia nacisku jednego zwoju.

Po podstawieniu podanych zależności do wzoru (3.87) otrzymuje się warunek

$$p = \frac{4Q \cdot P}{\pi(d^2 - D_1^2)H} \leq k_o \quad (3.88)$$

stąd

$$H \geq \frac{4Q \cdot P}{\pi(d^2 - D_1^2)k_o} \quad (3.89)$$

W obliczeniach gwintów przyjmuje się następujące wartości dopuszczalnych nacisków powierzchniowych:

$k_o \approx 0,3k_c$  dla połączeń spoczynkowych,

$k_o \approx (0,1 \dots 0,2)k_c$  dla połączeń ruchowych.

W praktyce, z uwagi na dobre prowadzenie nakrętki po gwincie śruby, w połączeniach ruchowych przyjmuje się minimalną liczbę zwojów gwintu  $z_{\min} = 7$ , co odpowiada wysokości nakrętki  $H \geq 7P$ , która równocześnie zabezpiecza gwint przed nadmiernymi naciskami powierzchniowymi.

Wytrzymałości gwintu na ścinanie przy podstawie zarysu nie oblicza się, ponieważ jest ona zapewniona odpowiednio wyznaczoną wysokością nakrętki z warunku na naciski powierzchniowe.

W zależności od warunków pracy połączenia gwintowego wytrzymałość rdzenia śruby obliczamy w zróżnicowany sposób wg podanych pięciu przypadków.

1. Gdy śruba jest obciążona tylko osiową siłą  $Q$  rozciągającą lub ściskającą (rys. 3.71), wówczas wykorzystujemy warunek

$$\sigma_r = \frac{Q}{S_r} = \frac{Q}{\pi \cdot d_3^2} \leq k_r$$

skąd

$$d_3 \geq 1,13 \sqrt{\frac{Q}{k_r}} \quad (3.90)$$



Rys. 3.71. Połączenie gwintowe obciążone tylko osiową siłą rozciągającą

2. Gdy śruba jest obciążona osiową siłą  $Q$  i jednocześnie momentem skręcającym  $M_s$  (rys 3.72), wówczas w rdzeniu śruby występują obciążenia rozciągające

$$\sigma_r = \frac{Q}{S_r} = \frac{4Q}{\pi \cdot d_3^2} \quad (3.91)$$

oraz naprężenia skręcające

$$\tau = \frac{M_s}{W_o} = \frac{0,5Q \cdot d_s \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \rho') + Q \cdot \mu \cdot \rho_{sr}}{0,2 d_3^3} \quad (3.92)$$

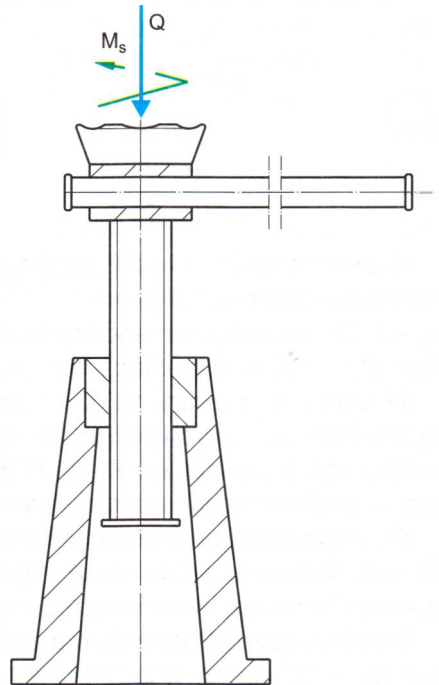
Naprężenia zastępcze oblicza się najczęściej wg hipotezy wytrzymałościowej Hubera, na podstawie wzoru

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_r^2 + (\alpha \cdot \tau)^2} \quad (3.93)$$

gdzie  $\alpha = \frac{k_r}{k_s}$

W praktyce opisany przypadek oblicza się wstępnie za pomocą wzoru (3.90), po przyjęciu do obliczeń zwiększonego obciążenia  $Q_z = 1,3Q$ . Natomiast po dokonaniu wyboru gwintu należy sprawdzić wytrzymałość śruby wg wzoru (3.93).

Ze względu na możliwość wyginania się (wyboczenia) długich smukłych śrub utwierdzonych jednym końcem w gwincie nakrętki i obciążonych siłą osiową na drugim końcu, przyjmujemy wstępnie gwint o średnicy rdzenia o 1,5 do 1,7 razy większej od obliczonej. Dokładne określenie wytrzymałości śruby na wyboczenie wymaga zastosowania specjalnych metod



Rys 3.72. Śruba obciążona siłą osiową  $Q$  i momentem skręcającym  $M_s$



obliczeniowych (wzory Eulera, Tetmajera-Jasińskiego lub empiryczny wzór Johnsona).

3. Gdy śruba jest obciążona wstępnie osiową siłą zacisku  $Q_0$ , a następnie siłą roboczą  $Q$  (rys. 3.73), aby można było zachować szczelność połączenia.

Przypadki takiego obciążenia występują powszechnie podczas montażu pokryw (głowic) do korpusów zbiorników ciśnieniowych, silników, sprężarek oraz kołnierzy ciśnieniowych przewodów rurowych. Między łączone elementy zakłada się uszczelkę i skręca się je śrubami. Śruby muszą być dokręcone tak, aby w wyniku obciążenia ciśnieniem roboczym zachować szczelność połączenia. Szczelność połączenia będzie zachowana, gdy wystąpi w nim tzw. napięcie resztkowe  $Q_r$ , będące różnicą siły zacisku  $Q_0$  i siły roboczej  $Q$ , które powinno osiągać wartość

$$Q_r = Q_0 - Q = (0,2 \dots 0,3)Q$$

Zatem siła docisku śruby powinna wynosić

$$Q_0 = (1,2 \dots 1,3)Q \quad (3.94)$$

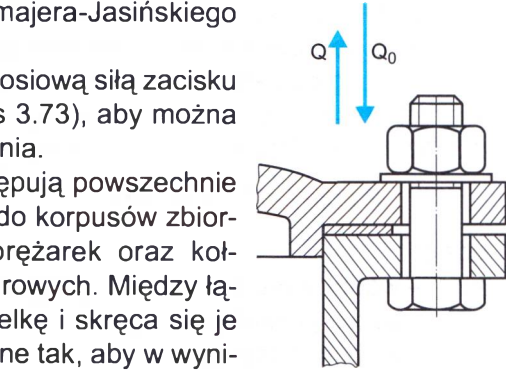
Dla śrub o średnicach mniejszych niż 60 mm do obliczenia średnicy rdzenia śruby stosuje się wzór

$$d_3 \geq 1,13 \sqrt{\frac{Q_0}{k_r}} + 5 \text{ [mm]} \quad (3.95)$$

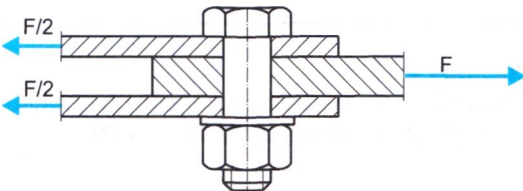
a następnie sprawdza się wytrzymałość śruby z warunku (3.93).

Projektowanie tego typu połączeń jest trudne, zwłaszcza gdy siła  $Q_0$  nie jest zachowana podczas montażu. Dlatego do montażu takich połączeń zaleca się używanie kluczy dynamometrycznych, co zapewnia uzyskanie właściwej wartości siły  $Q_0$  oraz zabezpiecza śrubę przed przecięciem, a uszczelkę przed nadmiernymi naciskami powierzchniowymi.

4. Gdy śruba jest ciasno pasowana w otworze i obciążona siłą poprzeczną  $F$ , wówczas połączenie pracuje tak samo jak połączenie sworzniowe ze sworzniem ciasno pasowanym (rys. 3.74). Oblicza się je z ogólnego warunku wytrzymałości na ścinanie



Rys. 3.73. Śruba obciążona siłą wstępną  $Q_0$  i roboczą  $Q$



Rys. 3.74. Ciasno pasowana w otworze śruba obciążona siłą ścinającą  $F$

$$\tau = \frac{F_t}{S_t} \leq k_t$$

5. Gdy śruba jest osadzona luźno w otworze i obciążona siłą poprzeczną  $F$ , jest narażona na działanie momentów gnących (rys 3.75). Aby zabezpieczyć śrubę przed zginaniem, należy ją mocno dokręcić w celu wywołania na powierzchniach oporowych tła śruby i nakrętki siły tarcia, równoważącej obciążenie  $F$ . Zatem musi być spełniony warunek

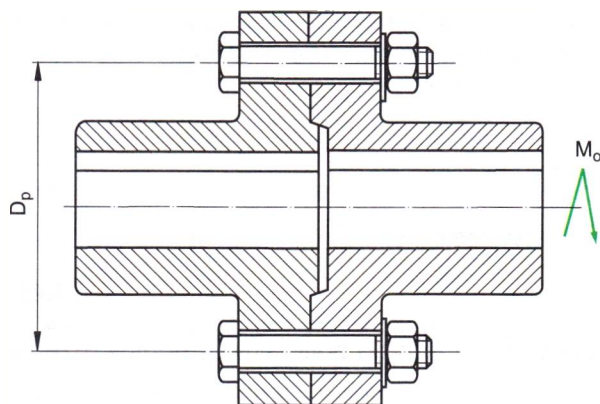
$$F \leq k \cdot i \cdot T = k \cdot i \cdot Q \cdot \mu \quad (3.96)$$

gdzie:

$k$  – współczynnik pewności; przyjmuje się  $k = 0,4 \dots 0,8$ ,

$i$  – liczba powierzchni styku,

$\mu$  – współczynnik tarcia.



Rys 3.75. Śruby luźno pasowane w otworach i obciążone siłą poprzeczną, pochodzącą od momentu obrotowego

Ze wzoru (3.96) wyznacza się dla śruby siłę osiową

$$Q \geq \frac{F}{k \cdot i \cdot \mu} \quad (3.97)$$

Średnicę rdzenia śruby oblicza się wstępnie z zależności (3.90), w której jako siłę należy wstawić  $Q_0 = 1,3Q$ , a następnie z warunku (3.93) sprawdza się wytrzymałość śruby.

### Przykład 3.13

Oblicz gwint dla cięgna pokazanego na rysunku 3.71, wykonanego w całości ze stali E335 i obciążonego statyczną siłą  $Q = 10$  kN.

### Rozwiązanie

Przyjmujemy statyczne obciążenie połączenia na podstawie tablic 3-2 i 3-5 oraz wyznaczamy dopuszczalne wartości naprężeń

$$k_r = k_c = 0,48R_e = 0,48 \cdot 335 = 161 \text{ MPa}$$

$$k_o = 0,3k_r = 0,3 \cdot 161 = 48 \text{ MPa}$$

Korzystamy ze wzoru (3.90) do obliczenia średnicy rdzenia śruby

$$d_3 = 1,13 \sqrt{\frac{Q}{k_r}} = 1,13 \sqrt{\frac{10\,000}{161}} = 8,9 \text{ mm}$$

Z tablicy 3-9 przyjmujemy gwint M12, dla którego  $d_3 = 9,653 \text{ mm}$ , i odczytujemy pozostałe jego wymiary, niezbędne do obliczenia wysokości nakrętki

$$d = D = 12 \text{ mm},$$

$$d_1 = D_1 = 10,106 \text{ mm},$$

$$P = 1,75 \text{ mm}.$$

Zgodnie z wzorem (3.89)

$$H \geq \frac{4Q \cdot P}{\pi(d^2 - D_1^2)k_o} = \frac{4 \cdot 10\,000 \cdot 1,75}{3,14 \cdot (12^2 - 10,106^2) \cdot 48} = 11,1 \text{ mm}$$

Ostatecznie przyjmujemy  $H = 12 \text{ mm}$ .

### Przykład 3.14

Obliczyć śrubę i wysokość nakrętki podnośnika śrubowego o udźwigu  $Q = 15 \text{ kN}$  i wysokości podnoszenia  $h = 200 \text{ mm}$ , przedstawionego na rysunku 3.72. Śrubę wykonano ze stali C35 ulepszonej cieplnie, a nakrętkę z brązu Ba 1032. Ze względu na rzadkie używanie tego podnośnika można przyjąć, że obciążenie jest statyczne. Współczynniki tarcia są następujące: w połączeniu nakrętka-śruba  $\mu_1 = 0,08$ , między łbem śruby i obrotową koroną podnośnika  $\mu_2 = 0,15$ .

### Rozwiązanie

Na podstawie tablic 3-2 do 3-5 ustalamy wartości naprężeń dopuszczalnych:

– dla materiału śruby

$$k_r = k_c = 0,48R_e = 0,48 \cdot 380 = 182 \text{ MPa}$$

$$k_o = 0,15k_c = 0,15 \cdot 182 = 27 \text{ MPa}$$

$$k_s = 0,3R_e = 0,3 \cdot 300 = 90 \text{ MPa}$$

– dla materiału nakrętki

$$k_o = 0,15k_c = 0,15 \cdot 0,48 \cdot R_e = 0,15 \cdot 0,48 \cdot 300 = 21,5 \text{ MPa}$$

Obciążenie zastępcze

$$Q_z = 1,3Q = 1,3 \cdot 15 = 19,5 \text{ kN}$$

Obliczamy wstępnie średnicę rdzenia śruby

$$d_3 \geq 1,13 \sqrt{\frac{Q_z}{k_r}} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{19\,500}{180}} = 11,8 \text{ mm}$$

Ze względu na wyboczenie śruby przyjmujemy wstępnie z tablicy 3-10 gwint o średnicy rdzenia 1,6 razy większej, o oznaczeniu Tr24×5 i wymiarach:  $d = 24 \text{ mm}$ ,  $D = 24,5 \text{ mm}$ ,  $d_2 = D_2 = 21,5 \text{ mm}$ ,  $d_3 = 19 \text{ mm}$ ,  $D_1 = 19,5 \text{ mm}$ ,  $P = 5 \text{ mm}$ .

Sprawdzamy wytrzymałość gwintu dla złożonego stanu naprężeń

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{P}{\pi \cdot d_2} = \frac{5}{3,14 \cdot 21,5} = 0,074, \text{ czyli } \gamma = 4^\circ 15'$$

$$\mu' = \operatorname{tg} \rho' = \frac{\mu_1}{\cos 15^\circ} = \frac{0,08}{0,9659} = 0,083, \text{ więc } \rho' = 4^\circ 24'$$

$$M_1 = 0,5Q \cdot d_s \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \rho') = 0,5 \cdot 15\,000 \cdot 21,75 \cdot \operatorname{tg} 8^\circ 39' = 24\,387 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Przyjmujemy następujące wymiary łba śruby:  $D_z = 40 \text{ mm}$  oraz  $D_w = 20 \text{ mm}$ . Obliczmy więc kolejno

$$r_{sr} = \frac{D_z + D_w}{4} = 15 \text{ mm}$$

$$M_2 = Q \cdot \mu_2 \cdot r_{sr} = 15\,000 \cdot 0,15 \cdot 15 = 33\,750 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$M_s = M_1 + M_2 = 24\,387 + 33\,750 = 58\,138 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$\sigma_c = \frac{4Q}{\pi \cdot d_3^2} = \frac{4 \cdot 15\,000}{3,14 \cdot 19^2} = 52,9 \text{ MPa}$$

$$\tau = \frac{M_s}{0,2d_3^3} = \frac{58\,138}{0,2 \cdot 19^3} = 42,4 \text{ MPa}$$

$$\alpha = \frac{k_c}{k_s} = \frac{182}{90} = 2,02 \approx 2$$

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_c^2 + (\alpha \cdot \tau)^2} = \sqrt{52,9^2 + (2 \cdot 42,4)^2} \approx 100 \text{ MPa} < k_c = 182 \text{ MPa}$$

Warunek wytrzymałości jest zatem spełniony i dla śrub krótkich, w których nie występuje wyboczenie, można przyjąć gwint o średnicy  $d_3$ , bliskiej wstępnie obliczonej.

Obliczamy wysokość nakrętki

$$H \geq \frac{4Q \cdot P}{\pi(d_2 - D_1^2)k_o} = \frac{4 \cdot 15\,000 \cdot 5}{3,14 \cdot (24^2 - 19,5^2) \cdot 27} = 18 \text{ mm}$$

Ze względu na sztywność połączenia powinien być spełniony warunek

$$H \geq 7P = 7 \cdot 5 = 35 \text{ mm}$$

Przyjmujemy wysokość nakrętki  $H = 35 \text{ mm}$ .

### Przykład 3.15

W cylindrze o średnicy wewnętrznej  $d_w = 300 \text{ mm}$  panuje ciśnienie  $p = 0,6 \text{ MPa}$ . Pokrywa cylindra jest przykręcona 12 śrubami ze stali E335 (z przykładu 3.13 wartość  $k_r = 161 \text{ MPa}$ ), rozmieszczonych równomiernie na obwodzie podziałowym kołnierza pokrywy (patrz rys. 3.73). Obliczyć średnicę i dobrać gwint śrub mocujących.

### Rozwiązanie

Ciśnienie w cylindrze napiera na pokrywę siłą

$$Q_c = p \cdot S_w = p \frac{\pi \cdot d_w^2}{4} = 0,6 \cdot \frac{3,14 \cdot 300^2}{4} = 42\,390 \text{ N}$$

Przypadająca na jedną śrubę siła

$$Q = \frac{Q_c}{12} = \frac{42\,390}{12} = 3533 \text{ N}$$

Siła zacisku

$$Q_0 = 1,3Q = 1,3 \cdot 3533 = 4593 \text{ N}$$

Średnica rdzenia śrub

$$d_3 \geq 1,13 \sqrt{\frac{Q_0}{k_r}} + 5 = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{4593}{161}} + 5 = 11 \text{ mm}$$

Z tablicy 3-9 dobieramy gwint M14.

### Przykład 3.16

Sprężko sztywne kołnierzone (patrz rys. 3.75) przenosi moment obrotowy  $M_o = 900 \text{ N} \cdot \text{m}$ . Liczba śrub  $n = 6$ . Śruby są rozmieszczone równomiernie na obwodzie o średnicy  $D_p = 80 \text{ mm}$ . Obliczyć średnicę śrub ciasno pasowanych oraz alternatywnie luźno pasowanych w otworach. Śruby wykonano ze stali C35 w stanie ulepszonym cieplnie (z przykładu 3.14 wartości  $k_c = 181 \text{ MPa}$ ,  $k_t = k_s = 90 \text{ MPa}$ ), a współczynnik tarcia między tarczami sprężki  $\mu = 0,25$ .

#### Rozwiązanie

Siła obwodowa (tnąca) obciążająca jedną śrubę

$$F_1 = \frac{2M_o}{n \cdot D_p} = \frac{2 \cdot 900 \cdot 10^3}{6 \cdot 80} = 3750 \text{ N}$$

Średnicę trzpienia dla śrub ciasno pasowanych ustalamy z warunku wytrzymałości na ścinanie

$$\tau = \frac{F_1}{S_t} = \frac{4F_1}{\pi \cdot d^2} \leq k_t; \text{ stąd } d \geq \sqrt{\frac{4F_1}{3,14k_t}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3750}{3,14 \cdot 90}} = 7,3 \text{ mm.}$$

Przyjmujemy średnicę śruby  $d = 8 \text{ mm}$  z gwintem M8.

Średnicę rdzenia śrub luźno pasowanych ustalamy z warunku (3.97), przyjmując współczynnik pewności  $k = 0,8$

$$Q \geq \frac{F_1}{k \cdot i \cdot \mu} = \frac{3750}{0,8 \cdot 1 \cdot 0,25} = 18\,750 \text{ N}$$

$$Q_0 = 1,3Q = 1,3 \cdot 18\,750 = 24\,375 \text{ N}$$

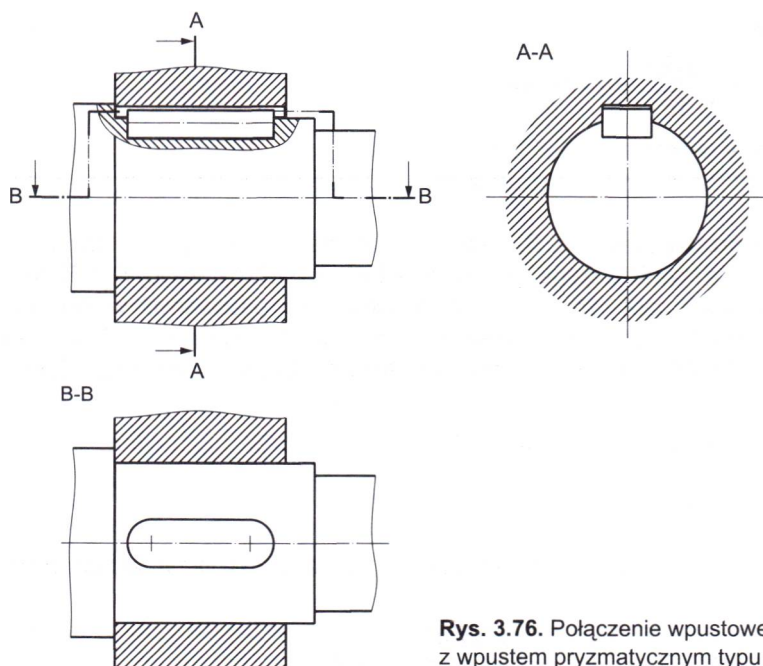
$$d_3 = 1,13 \sqrt{\frac{Q_0}{k_r}} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{24\,375}{181}} = 13,1 \text{ mm}$$

Z tablicy 3-9 dobieramy śruby z gwintem M16.

Jak wynika z porównania wykonanych obliczeń, śruby luźno pasowane muszą być znacznie grubsze lub wykonane z mocniejszego materiału niż śruby ciasno pasowane.

### 3.5.8. Oznaczanie połączeń rozłącznych na rysunkach technicznych

**Połączenia wpustowe** (rys. 3.76) przedstawia się na rysunkach w sposób rzeczywisty. Na rysunkach złożeniowych wpustu się nie wymiaruje, natomiast rodzaj, typ i wymiary tego wpustu oraz numer właściwej normy podaje się w wykazie części nad tabliczką rysunkową – np. *wpust pryzmatyczny A 16×10×100 PN-M-85005:1970*.

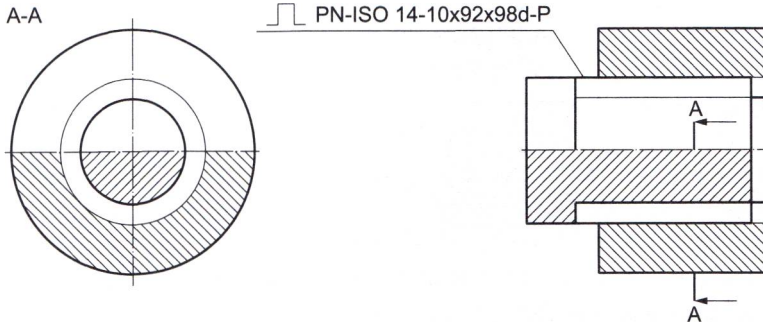


**Rys. 3.76.** Połączenie wpustowe z wpustem pryzmatycznym typu A

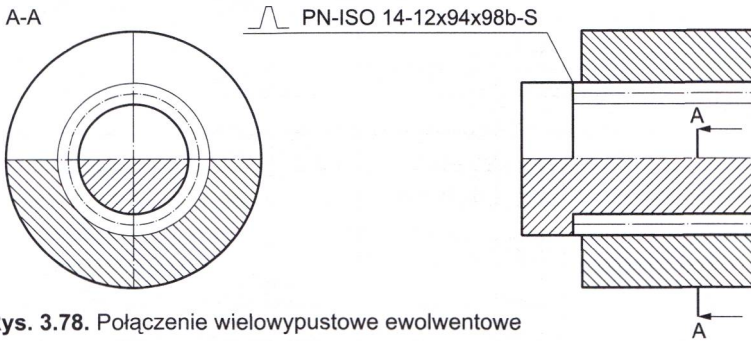
**Połączenia wielowypustowe i wielokarbowe** przedstawia się na rysunkach zgodnie z normą PN-EN ISO 6413:2001 w sposób szczegółowy (patrz rys. 1.80 w pierwszej części podręcznika) lub uproszczony, z podaniem nad linią odniesienia symbolu zarysu oraz numeru normy i parametrów wielowypustu. Jako przykład na rysunku 3.77 przedstawiono połączenie wielowypustowe równoległe.

Połączenia wielowypustowe ewolwentowe i wielokarbowe (taki sam symbol zarysu) rysuje się w uproszczeniu podobnie jak równoległe, lecz z zaznaczeniem średnicy podziałowej połączenia linią punktową cienką. Na rysunku 3.78 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.

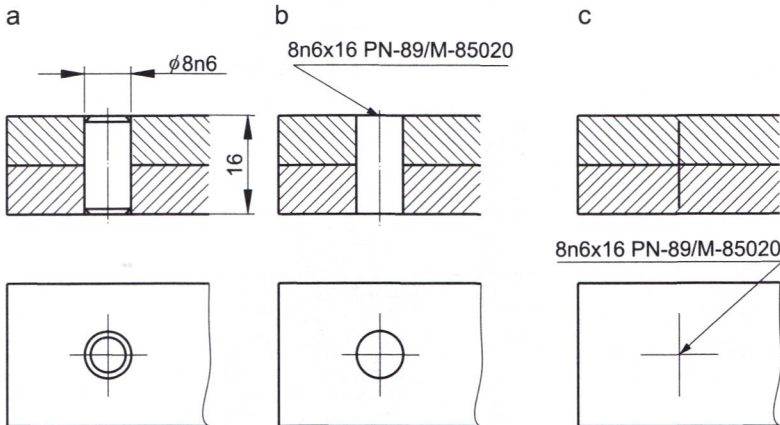
**Połączenia kołkowe** można rysować w sposób dokładny (patrz rys. 3.52 i 3.53), z podaniem wymiarów połączenia, w sposób uproszczony lub umowny. Kołki przedstawione w sposób uproszczony lub umowny wymiaruje się przez podanie nad linią odniesienia odpowiednich oznaczeń i numeru normy (rys 3.79).



**Rys. 3.77.** Przedstawienie uproszczone połączenia wielowypustowego równoległego o następujących parametrach: 10 – liczba wypustów, 92 – średnica wewnętrzna ( $d$ ), 98 – średnica zewnętrzna ( $D$ ),  $d$  – osiowanie na średnicy wewnętrznej,  $P$  – połączenie przesuwne

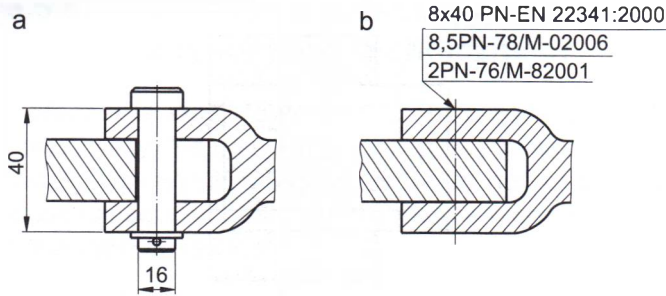


**Rys. 3.78.** Połączenie wielowypustowe ewolwentowe



**Rys. 3.79.** Rysunki połączenia kółkowego  
a – szczegółowy, b – uproszczony, c – umowny

Podobnie przedstawia się i wymiaruje (w uproszczeniu lub w sposób umowny) **połączenia sworzniowe**, przy czym podaje się odpowiednie symbole i numery norm sworznia oraz elementów zabezpieczających go przed wysunięciem z połączenia (rys 3.80).



**Rys. 3.80.** 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. 3.81.** Rysowanie połączeń gwintowych na rysunkach złożeniowych



**Połączenia klinowe**, podobnie jak wpustowe, przedstawia się na rysunkach w sposób rzeczywisty (patrz rys. 3.60 do 3.62). Klinów na rysunkach złożeniowych nie wymiaruje się, a rodzaj, typ, wymiary wpustu i numer normy wpisuje się w wykazie części nad tabliczką rysunkową – np. *klin wpuszczany ścięty 8×7×25 PN-M85031:1973*.

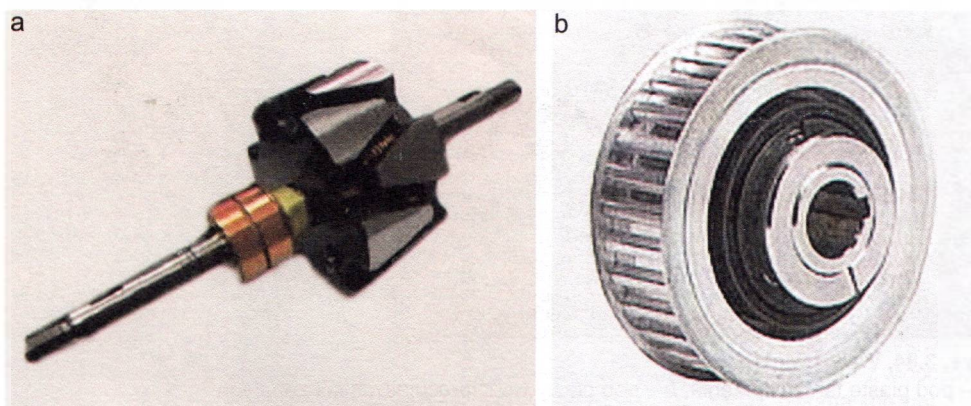
**Połączenia gwintowe** bezpośrednie rysuje się w sposób szczegółowy lub uproszczony, natomiast elementy łączące połączeń pośrednich na rysunkach złożeniowych zgodnie z normą PN-EN ISO 6410-1:2000 przedstawia się w sposób uproszczony lub umowny (patrz podrozdz. 1.11.2 w pierwszej części podręcznika). Przykłady niektórych połączeń gwintowych pośrednich przedstawiono na rysunku 3.81.

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 4014:2004*.

### 3.5.9. Połączenia rozłączne w pojazdach samochodowych

Połączenia rozłączne są szeroko wykorzystywane 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 połączeń klinowych nie stosuje się w pojazdach samochodowych.

**Połączenia wpustowe.** Spośród połączeń wpustowych w pojazdach samochodowych najczęściej występują połączenia z wpustem pryzmatycznym (rys. 3.82a, b) i czółenkowym (rys. 3.83). Służą do łączenia czopów wałów z pia-



**Rys. 3.82.** Przykład zastosowania połączenia z wpustem pryzmatycznym  
a – wirnik alternatora z rowkami pod wpusty, b – koło pasowe zębate ze sprzęgłem przeciążeniowym i rowkiem na wpust



**Rys. 3.83.** Gniazdo wpustu czółenkowego na końcu wału rozrządu

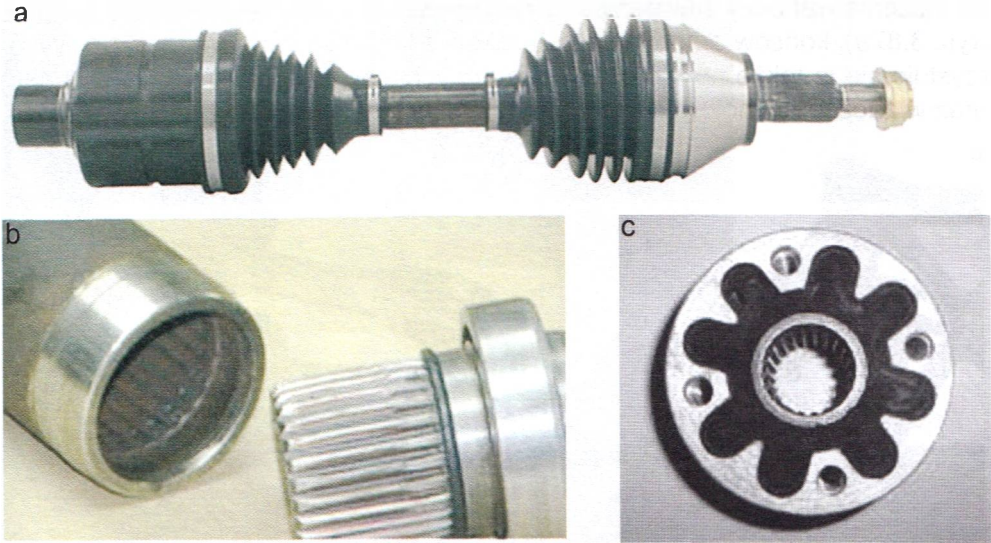
stami kół pasowych, zębatych i in. Są to przeważnie połączenia stałe, obciążone niewielkim momentem obrotowym.

**Połączenia wielowypustowe i wielokarbowe.** Mocniej obciążone wały i osie, zwłaszcza gdy wymaga się ruchomego połączenia, są łączone ze współpracującymi częściami za pośrednictwem wielowypustów (rys. 3.84) i wielokarbów (rys. 3.85). Można je znaleźć m.in. na czopach wałów napędowych i półosi, na wałkach skrzynek przekładniowych, w otworach piast tarcz sprzęgłowych oraz przegubów.



**Rys. 3.84.** Wały z wielowypustami

a – pod piastę tarczy sprzęgła, b – pod piasty współpracujących kół zębatych

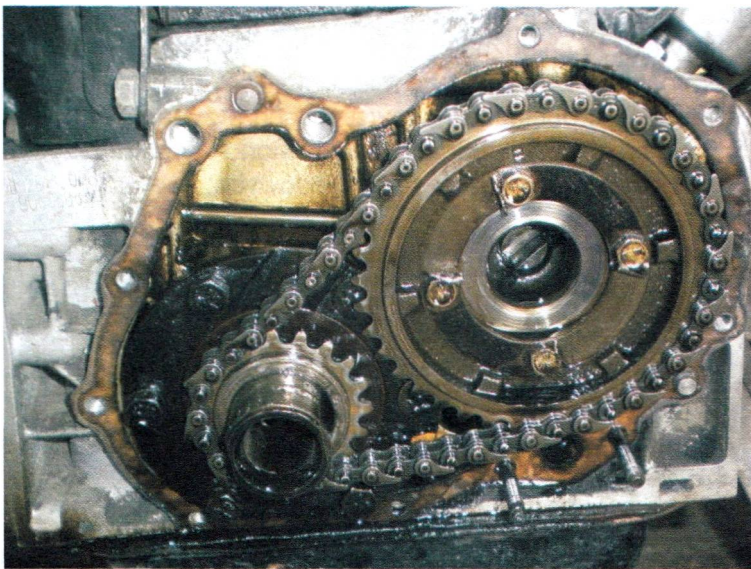


**Rys. 3.85.** Wielokarby

a – na końcu półosi z gwintem do mocowania piasty, b – na wałku i w tulei sprzęgła tulejowego, c – w otworze przegubu elastycznego

**Połączenia kolkowe.** Kolki w pojazdach samochodowych służą głównie do ustalania wzajemnego położenia współpracujących elementów (rys. 3.86). Niekiedy połączenie z kolkiem poprzecznym można spotkać w mechanizmach ręcznego podnoszenia szyb, gdzie służy do połączenia korbki z wałkiem.

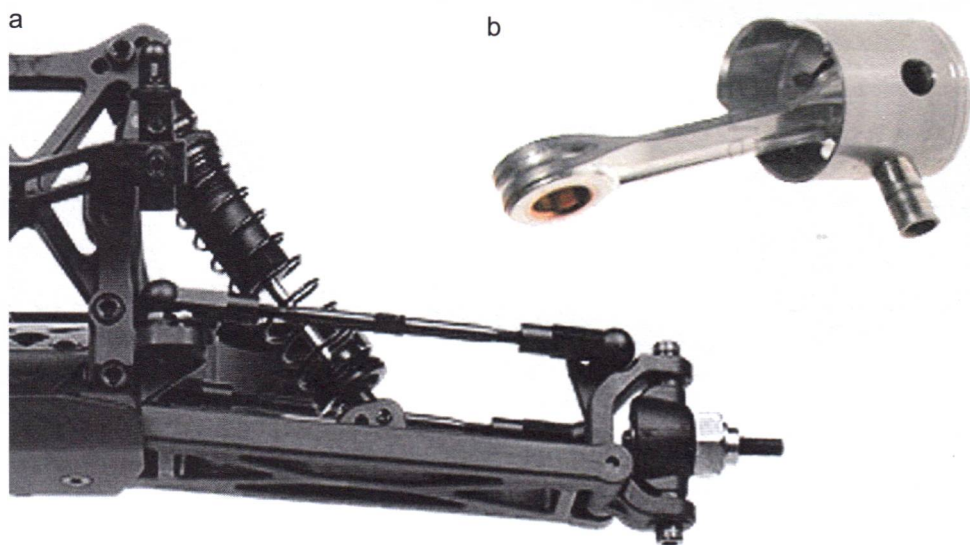
**Połączenia sworzniowe** w pojazdach samochodowych wykorzystuje się do zapewnienia względnego ruchu wahliwego łączonych elementów. Służą m.in.



**Rys. 3.86.**

Mechanizm rozrzędu – po zdemontowaniu osłony – z widocznymi dwoma kolkami ustalającymi na obwodzie połączenia

do łączenia wahaczy zawieszenia z nadwoziem pojazdu i elementami zwrotnic (rys. 3.87a), końców amortyzatorów, tłoków z korbowodami (rys. 3.87b). Wykorzystuje się je także np. do osadzania popychaczy zaworów (patrz rys. 3.88c) oraz w zaczepach holowniczych samochodów ciężarowych.



**Rys. 3.87.** Połączenia sworzniowe

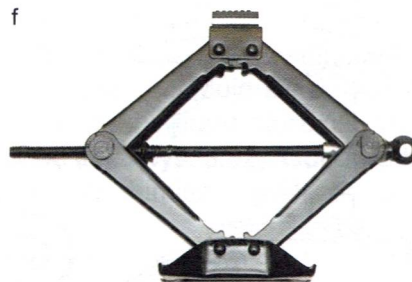
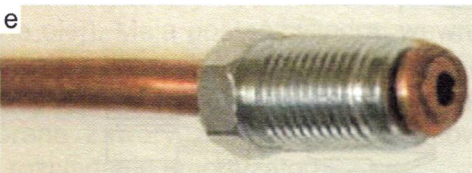
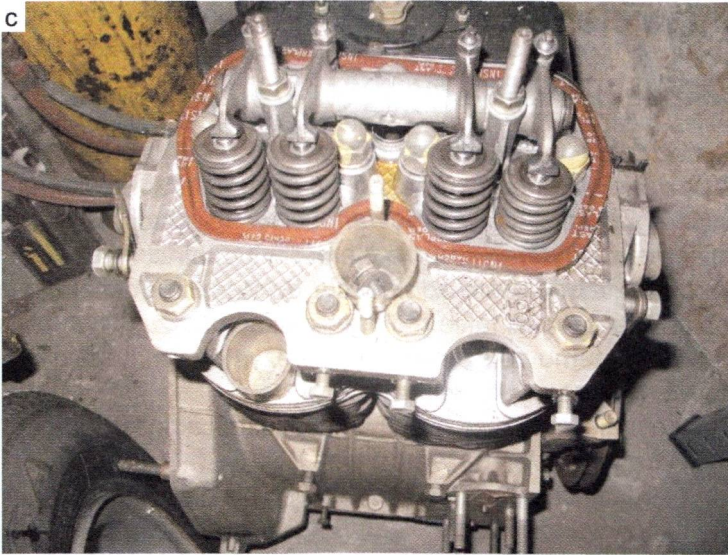
a – wahacza z nadwoziem i zwrotnicą, b – tłoka z korbowodem (faza montażu)

**Połączenia gwintowe** w pojazdach samochodowych są wszechobecne. Występują we wszystkich zespołach samochodu w różnych postaciach. Łączą elementy nadwozia, podwozia, silnika, skrzynki biegów, zawieszenia i wszystkich innych zespołów. W samochodzie można spotkać połączenia zarówno pośrednie (np. śruba-nakrętka, wkręt-korpus), jak i bezpośrednie (np. gwintowany króciec czujnika temperatury cieczy chłodzącej, wkręcony bezpośrednio w kadłub silnika lub obudowę termostatu). Zależnie od umieszczenia i spełnianej funkcji połączenia gwintowe mogą być obciążone wg wszystkich przypadków opisanych w rozdziale 3.5.7. Na rysunkach 3.88a–f przedstawiono wybrane przykłady zastosowania tych połączeń w pojazdach samochodowych.



**Rys. 3.88.** Przykłady połączeń gwintowych w pojazdach samochodowych

a – wkręcany uchwyt do holowania samochodu (śruba obciążona jedynie siłą rozciągającą), b – śruby mocujące hak holowniczy, mocno dokręcone w celu wywołania wymaganej siły tarcia (śruby ciasno pasowane w takim zastosowaniu występują rzadziej)



**Rys. 3.88** cd. c – połączenia gwintowe silnika, w których występują złożone stany naprężeń (rozciąganie ze skręcaniem), oraz sworzniowe połączenia popychaczy zaworów, d – zabezpieczona przez zagniecenie nakrętka mocująca piastę koła z osią oraz śruby do mocowania obręczy koła jezdnego, e – gwintowana końcówka ciśnieniowego przewodu hamulcowego, f – podnośnik śrubowy z wyposażenia samochodu osobowego

## 3.6. Połączenia i elementy podatne

### 3.6.1. Klasyfikacja i charakterystyka połączeń podatnych

**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:

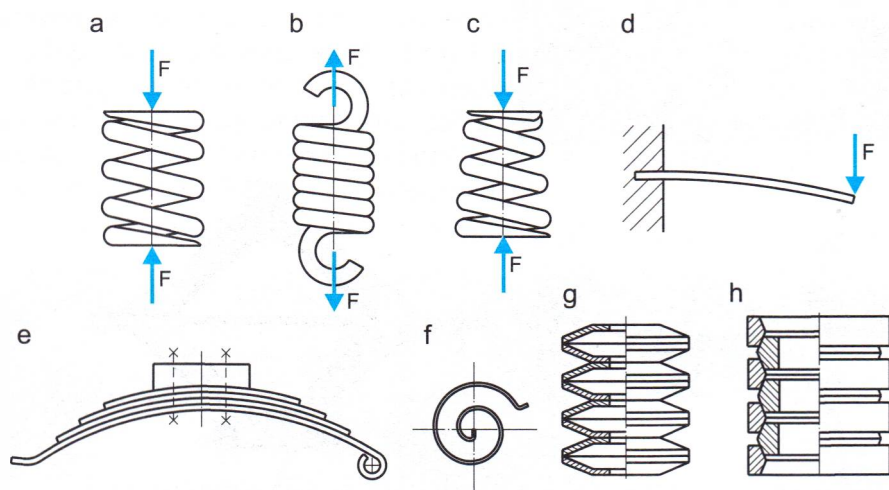
- nadanie elementowi wykonanemu ze sztywnego i sprężystego materiału odpowiedniego kształtu – i wówczas są to **sprężyny**,
- zastosowanie materiału o małej sprężystości i dużej odkształcalności – jak np. w **elementach gumowych** i **metalowo-gumowych**.

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.



**Rys. 3.89.** 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

W zależności od kształtu rozróżniamy sprężyny śrubowe (walcowe i stożkowe), płaskie, spiralne, talerzowe i pierścieniowe (rys. 3.89). Zależnie od rodzaju obciążenia występują sprężyny ściskane, naciągowe, zginane i skręcane.

**Elementy gumowe i metalowo-gumowe** (rys. 3.90) – dzięki dobrym właściwościom 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. silent-bloków). Oprócz gumy w nowszych konstrukcjach na elementy sprężyste wykorzystuje się elastomery (żele).



Rys. 3.90. Elementy podatne

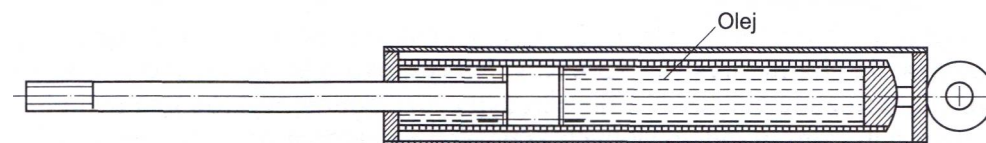
a – gumowe i metalowo-gumowe, b – wkładka żelowa amortyzatora rowerowego

**Sprężyny gazowe** stanowią zespół cylindra ciśnieniowego z tłoczyskiem zakończonym tłokiem (rys. 3.91). 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.



Rys. 3.91. Schemat sprężyny gazowej

**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. 3.92). Odpowiednio dobrane zawory zapewniają zróżnicowanie siły tłumienia podczas ściskania i rozciągania amortyzatora.



Rys. 3.92. Schemat amortyzatora hydraulicznego

### 3.6.2. Materiały stosowane na elementy podatne

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. Ich oznaczanie opisano w normie PN-EN 10027-1:2005.

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.

### 3.6.3. Obliczanie sprężyn

**Sprężyny śrubowe** obliczamy z warunku wytrzymałości na skręcanie drutu w sprężynie.

Podstawową cechą użytkową sprężyn jest ich sztywność wyrażona zależnością

$$C = \frac{F}{f} \text{ lub } C' = \frac{M}{\varphi} \quad (3.98)$$

gdzie:

$F$  – siła obciążająca sprężynę ściskaną, rozciąganą lub zginaną,

$f$  – strzałka ugięcia sprężyny,

$M$  – moment skręcający sprężynę,

$\varphi$  – kąt skręcenia [rad].

Wykres obrazujący zależność obciążenia od odkształcenia sprężyny nazywa się charakterystyką sprężyny. Na rysunku 3.93 pokazano charakterystykę sprężyny ściskanej. Dla sprężyny rozciąganej wykres jest symetrycznym odbiciem przedstawionych krzywych względem osi pionowej (obciążenia).



Podstawowymi parametrami sprężyn śrubowych (rys. 3.94) są:

$d$  – średnica drutu,

$D$  – średnica podziałowa,

$D_z$  – średnica zewnętrzna,

$D_w$  – średnica wewnętrzna,

$\delta = \frac{D}{d}$  – współczynnik kształtu sprężyny,

$a$  – prześwit między dwoma czynnymi zwojami sprężyny nieobciążonej,

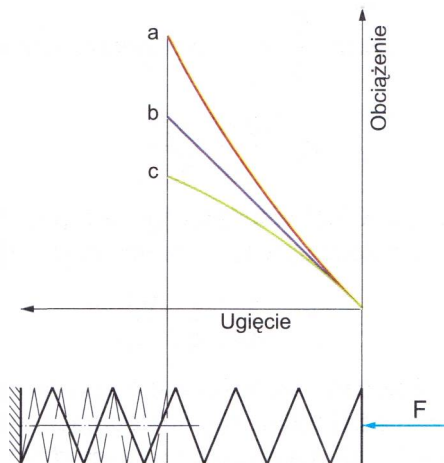
$a_k = (0,1 \dots 0,2)d$  – prześwit między dwoma czynnymi zwojami sprężyny obciążonej,

$s = a + d$  – skok zwojów czynnych sprężyny,

$l$  – długość czynnej części sprężyny,

$z$  – liczba zwojów czynnych.

Do obliczania sprężyn śrubowych wykorzystuje się różne wzory. Ugięcie wstępne sprężyny



**Rys. 3.93.** Charakterystyka sprężyny ściskanej  
 $a$  – o sztywności rosnącej (tzw. charakterystyka progresywna),  
 $b$  – o stałej sztywności,  $c$  – o sztywności malejącej (tzw. charakterystyka degresywna)

$$f = n \cdot f_1$$

(3.99)

gdzie:

$f$  – całkowite ugięcie sprężyny pod działaniem siły  $F$ ,

$f_1$  – ugięcie jednego czynnego zwoju,

$n$  – liczba zwojów czynnych.

Dla sprężyn z napięciem wstępnym (montażowym) o wartości  $F_p = (0,1 \dots 0,6)F$  całkowite ugięcie wyznacza się wg wzoru

$$f = \frac{f_r \cdot F_k}{F_k - F_p} \quad (3.100)$$

gdzie:

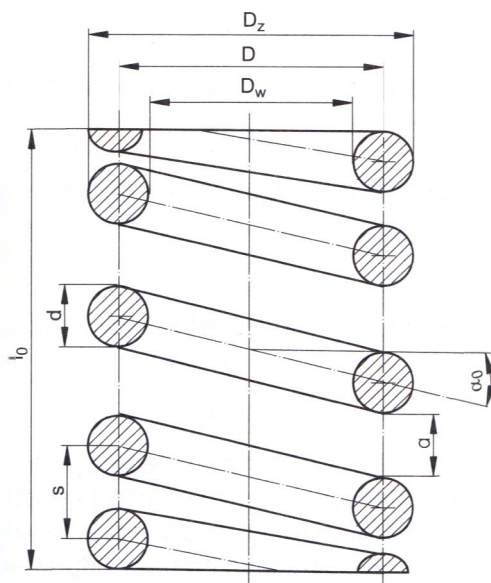
$F_k$  – całkowite obciążenie robocze,

$F_p$  – napięcie wstępne (montażowe),

$f_r$  – ugięcie robocze sprężyny.

Warunek wytrzymałościowy na skęcanie drutu sprężyny jest opisany nierównością

$$\tau = \frac{F_k \cdot D}{2} \cdot K \leq k_s \quad (3.101)$$



**Rys. 3.94.** Charakterystyczne wymiary sprężyny śrubowej

Ponieważ  $\frac{D}{d} = \delta$ , po przekształceniu otrzymuje się

$$F_k \leq \frac{0,4k_s \cdot d^2}{\delta \cdot K} \quad (3.102)$$

gdzie  $K$  jest współczynnikiem poprawkowym, uwzględniającym wpływ na wytrzymałość sprężyny innych czynników niż skręcanie, zdefiniowanym w postaci

$$K = \frac{4\delta - 1}{4\delta - 4} + \frac{0,615}{\delta} \quad (3.103)$$

Zalecane wartości współczynnika kształtu  $\delta$  zależą od średnicy drutu. W obliczeniach stosuje się następujące wartości:

$\delta = 5 \dots 12$  dla drutu o średnicy  $d = 1 \dots 2,5$  mm,

$\delta = 4 \dots 10$  dla drutu o średnicy  $d = 3 \dots 5$  mm,

$\delta = 4 \dots 9$  dla drutu o średnicy  $d = 6 \dots 12$  mm.

Ugięcie  $f$  sprężyny śrubowej oblicza się wg wzoru

$$f = \frac{8F_k \cdot D^3 \cdot n}{G \cdot d^4} \quad \text{lub} \quad f = \frac{8F_k \cdot \delta^3 \cdot n}{G \cdot d} \quad (3.104)$$

gdzie  $G$  jest modulem sprężystości poprzecznej (dla stali sprężynowych  $G = 0,8 \cdot 10^5$  MPa).

Zakłada się wartość ugięcia jednego czynnego zwoju sprężyny  $f_1$ , oblicza się ugięcie całkowite  $f = n \cdot f_1$ , a z przekształconej zależności (3.103) można obliczyć liczbę zwojów czynnych  $n$ . Całkowitą liczbę zwojów  $n_c$  wyznacza się jako

$$n_c = n + (1,5 \dots 2) \quad (3.105)$$

Długość sprężyny w stanie swobodnym oblicza się za pomocą wzoru

$$L_0 = (a + d)n_c = (a_k + d)n_c + f \quad (3.106)$$

Skok zwojów sprężyny w stanie swobodnym jest opisany równaniem

$$s = \frac{L_0}{n_c} \quad (3.107)$$

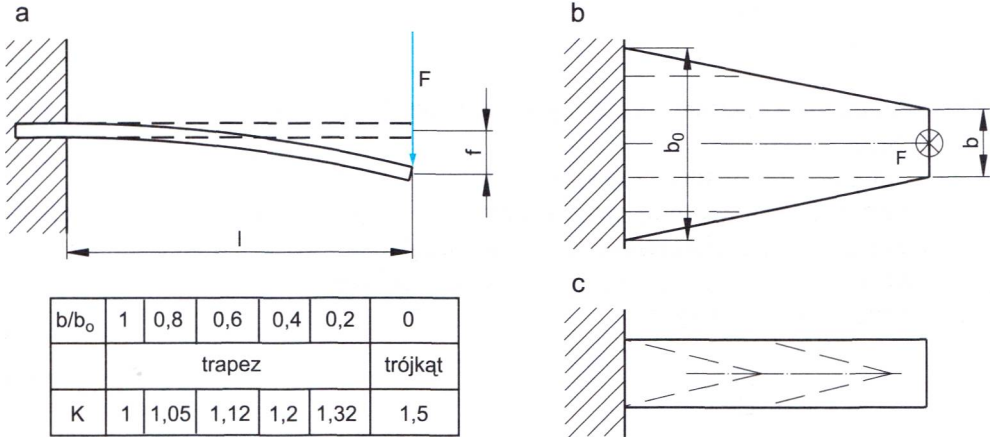
Wznios linii śrubowej sprężyny można wyznaczyć na podstawie zależności

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{s}{\pi \cdot D} \quad (3.108)$$

**Sprężyny płaskie** występują jako:

- pojedyncze o stałym przekroju poprzecznym (rys. 3.96a),
- wielokrotne – tzw. resory, które powstają z teoretycznej sprężyny o kształcie trapezu podzielonego na pasy odpowiadające szerokości resoru (rys. 3.96b, c).

Sprężyny płaskie oblicza się z warunku wytrzymałości na zginanie. Z uwagi na symetryczną budowę i sposób zamocowania sprężyny płaskie traktuje się



**Rys. 3.95.** Sprężyny płaskie

a – obciążenie i strzałka ugięcia, b – sprężyna trapezowa, c – sprężyna wielokrotna, powstała z podziału trapezu na pasy i nałożenia ich na siebie

najczęściej jako belki sztywno zamocowane jednostronnie. Podane dalej wzory przedstawiono dla obu rodzajów sprężyn płaskich – zarówno pojedynczych, jak i wielokrotnych.

Warunek wytrzymałości dla sprężyny płaskiej, która jest zginana, można opisać za pomocą nierówności

$$\sigma_g = \frac{M_g}{W_x} \leq k_g \quad (3.109)$$

w której:

$$M_g = F \cdot l \quad (3.110)$$

$$W_x = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (3.111)$$

gdzie  $b$  i  $h$  są odpowiednio szerokością i wysokością zginanego przekroju.

Strzałkę ugięcia oblicza się wg następujących wzorów:

– dla sprężyn pojedynczych

$$f = \frac{F \cdot l^3}{3E \cdot J_x} \quad (3.112a)$$

– dla sprężyn wielokrotnych (resorów)

$$f = K \cdot \frac{F \cdot l^3}{3E \cdot J_x \cdot n} \quad (3.112b)$$

gdzie:

$E$  – moduł Younga (dla stali sprężynowych  $E = 2,15 \cdot 10^5$  MPa),

$J_x$  – osiowy moment bezwładności przekroju, który oblicza się jako

$$J_x = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (3.113)$$

$K$  – współczynnik kształtu dla sprężyn wielokrotnych, który podano na rysunku 3.95,

$n$  – liczba elementów sprężyny wielokrotnej.

Zakłada się maksymalną wartość strzałki ugięcia  $i$  i na podstawie wzorów (3.112a) lub (3.112b) oblicza się siłę  $F$  obciążającą sprężynę, a po podstawieniu jej do wzoru (3.109) oblicza się wysokość  $h$  przekroju:

– dla sprężyn pojedynczych

$$h \leq \frac{2l^2 \cdot k_g}{3f \cdot E} \quad (3.114a)$$

– dla sprężyn wielokrotnych (resorów)

$$h \leq \frac{2l^2 \cdot k_g \cdot K}{3f \cdot E} \quad (3.114b)$$

Następnie wyznacza się szerokość  $b$  przekroju (dla obu rodzajów sprężyn) wg wzoru

$$b \geq \frac{6F \cdot l}{h^2 \cdot k_g} \quad (3.115)$$

przy czym dla sprężyn wielokrotnych (resorów) dodatkowo oblicza się szerokość  $b_0$  na podstawie zależności

$$b = \frac{b_0}{n} \quad (3.116)$$

gdzie  $n$  – krotność sprężyny (liczba piór resoru).

### Przykład 3.17

Obliczyć wymiary ściskanej sprężyny śrubowej, wykonanej z drutu okrągłego ze stali sprężynowej chromowo-manganowej ( $k_s = 430$  MPa). Robocze maksymalne obciążenie sprężyny  $F_k = 2000$  N, napięcie wstępne (montażowe)  $F_p = 300$  N, ugięcie robocze  $f_r = 50$  mm.

#### Rozwiązanie

Przyjmujemy współczynnik kształtu  $\delta = 7$ .

Obliczamy całkowitą strzałkę ugięcia

$$f = \frac{f_r \cdot F_k}{F_k - F_p} = \frac{50 \cdot 2000}{2000 - 300} = 58,8 \text{ mm}$$

Wyznaczamy współczynnik poprawkowy

$$K = \frac{4\delta - 1}{4\delta - 4} + \frac{0,615}{\delta} = \frac{4 \cdot 7 - 1}{4 \cdot 7 - 4} + \frac{0,615}{7} = 1,21$$

Po przekształceniu wzoru (3.102) obliczamy średnicę drutu

$$d \geq \sqrt{\frac{F_k \cdot \delta \cdot K}{0,4k_s}} = \sqrt{\frac{2000 \cdot 7 \cdot 1,21}{0,4 \cdot 430}} = 9,92 \text{ mm}$$

Przyjmujemy  $d = 10 \text{ mm}$ .

Średnica podziałowa sprężyny

$$D = \delta \cdot d = 7 \cdot 10 = 70 \text{ mm}.$$

Z przekształconego wzoru (3.104) obliczamy liczbę czynnych zwojów sprężyny

$$n = \frac{G \cdot d \cdot f}{8F_k \cdot \delta^3} = \frac{0,8 \cdot 10^5 \cdot 10 \cdot 58,8}{8 \cdot 2000 \cdot 7^3} = 8,57$$

Przyjmujemy  $n = 9$ .

Całkowita liczba zwojów

$$n_c = n + 2 = 11$$

Dobieramy prześwit między zwojami sprężyny obciążonej

$$a_k = 0,15d = 0,15 \cdot 10 = 1,5 \text{ mm}.$$

Na podstawie wzoru (3.106) obliczamy długość sprężyny w stanie nieobciążonym

$$L_0 = (a + d)n_c = (a_k + d)n_c + f = (1,5 + 10) \cdot 11 + 58,8 = 334 \text{ mm}.$$

Długość w stanie obciążonym

$$L_k = (a_k + d)n_c = (1,5 + 10) \cdot 11 = 275 \text{ mm}.$$

Średnica zewnętrzna

$$D_z = D + d = 70 + 10 = 80 \text{ mm}.$$

Średnica wewnętrzna

$$D_w = D - d = 70 - 10 = 60 \text{ mm}.$$

### Przykład 3.18

Resor obciążony siłą  $F = 5000 \text{ N}$  powinien mieć strzałkę ugięcia  $f = 55 \text{ mm}$ . Długość obliczeniowa  $l_0$ , stanowiąca połowę długości całkowitej resoru, wynosi  $400 \text{ mm}$ . Resor wykonano ze stali sprężynowej chromowo-molibdenowej, dla której  $k_{gi} = 530 \text{ MPa}$ , a moduł Younga  $E = 2,15 \cdot 10^5 \text{ MPa}$ . Liczba piór resoru  $n = 7$ . Obliczyć wymiary przekroju poprzecznego resoru.

Rozwiązanie

Z tabeli zamieszczonej na rysunku 3.95 dla  $\frac{b}{b_0} = \frac{1}{n} = 0,143$  za pomocą interpolacji liniowej ustalamy wartość  $K = 1,35$  i obliczamy grubość pióra

$$h \leq \frac{2l^2 \cdot k_{gi} \cdot K}{3f \cdot E} = \frac{2 \cdot 400^2 \cdot 530 \cdot 1,35}{3 \cdot 55 \cdot 2,15 \cdot 10^5} = 6,45 \text{ mm}$$

Przyjmujemy  $h = 6$  mm.

Następnie obliczamy szerokość pióra

$$b \geq \frac{6F \cdot l_o}{h^2 \cdot k_{gj} \cdot n} = \frac{6 \cdot 5000 \cdot 400}{6^2 \cdot 530 \cdot 7} = 89,8 \text{ mm}$$

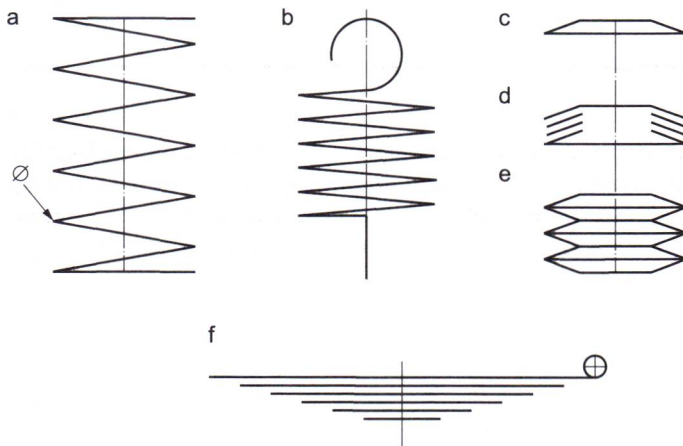
Przyjmujemy  $b = 90$  mm.

### 3.6.4. Oznaczanie sprężyn na rysunkach technicznych

Widoki i przekroje sprężyn przedstawiono na rysunkach 3.89 i 3.95 oraz w pierwszej części podręcznika. Rysowane zgodnie z normą PN-EN ISO 2162-1 widoki i przekroje stosuje się zarówno na rysunkach wykonawczych sprężyn, jak i na rysunkach złożeniowych. Wszystkie wymiary sprężyn podaje się na rysunku, a pozostałe wymagania i dane niezbędne do ich wykonania oraz sprawdzenia zamieszcza się w wymaganiach technicznych lub w tabliczce umieszczonej w prawym górnym rogu rysunku.

Uproszczenia rysunkowe sprężyn (rys. 3.96) 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 normy PN-EN ISO 5261 (np. □).

Jeśli końce sprężyn są nieoszlifowane, na rysunku należy podać sposób ich zakończenia. Sprężyny prawozwójne oznacza się symbolem RH, a lewozwójne – LH.



**Rys. 3.96.** Uproszczenia rysunkowe sprężyn

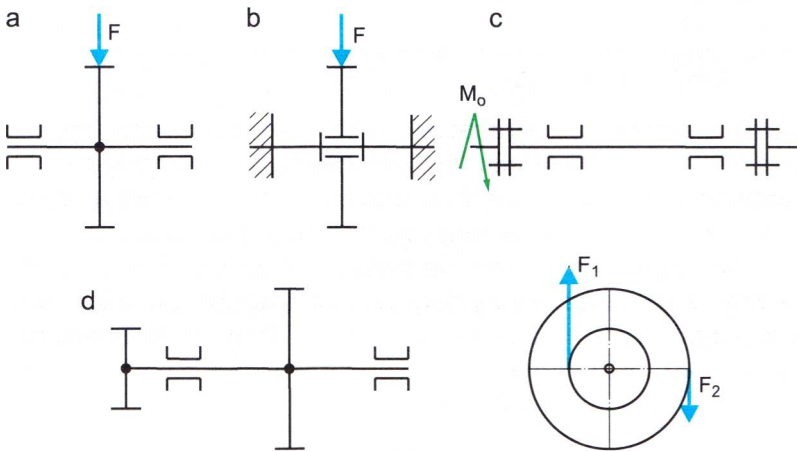
a – śrubowa walcowa ściskana, b – śrubowa walcowa naciągowa, c – talerzowa pojedyncza, d, e – talerzowa wielokrotna, f – płaska wielokrotna (resor) z jednostronnym zakończeniem oczkowym

## 3.7. Osie i wały

### 3.7.1. Ogólna charakterystyka osi i wałów

**Osie** służą do podtrzymywania innych części wykonujących ruch obrotowy. Mogą one być ruchome lub nieruchome. Ułożyskowana i obracająca się razem z osadzonymi na niej częściami oś jest ruchoma (rys. 3.97a). Jeśli natomiast ułożyskowane części obracają się na osi sztywno zamocowanej w podporach, to taka oś jest nieruchoma (rys. 3.97b). Osie nie przenoszą momentu obrotowego i są głównie zginane.

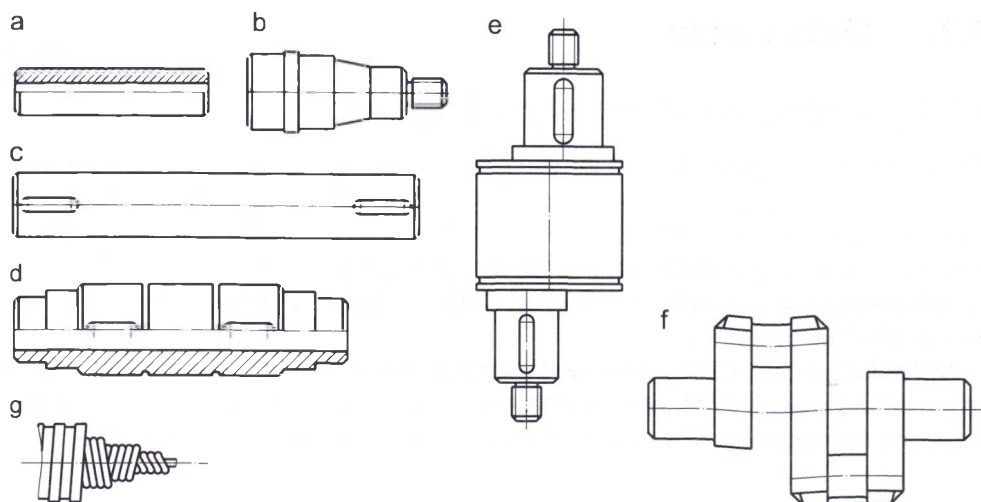
**Wały** służą przede wszystkim do przenoszenia momentu obrotowego i wtedy są skręcane (rys. 3.97c). Gdy osadzone na wale części są obciążone siłą poprzeczną do osi wału, wówczas jest on dodatkowo zginany (rys. 3.97d).



Rys. 3.97. Osie i wały na schematach

a – oś ruchoma, b – oś stała, c – wał skręcany, d – wał skręcany i zginany

**Osie i wały sztywne** są to pręty, najczęściej o przekroju okrągłym. Ze względu na kształt zewnętrzny rozróżnia się osie i wały **gładkie**, **stopniowane** (**schodkowe**) oraz **kształtowe**, a ze względu na kształt przekroju **pełne** i **drażnione** (rys. 3.98). Osie i wały drażnione stosuje się w celu zmniejszenia ciężaru konstrukcji. Osie i wały najczęściej są stopniowane narastająco wzdłuż osi od końca do środka obustronnie, gdy są montowane w korpusach dzielonych, lub jednostronnie, gdy montuje się je w korpusach niedzielonych. Stopniowanie średnicy umożliwi efektywniejsze wykorzystanie materiału. Wraz z narastającymi wartościami momentów zginających zwiększa się pole powierzchni przekroju, a wraz z nim wskaźnik wytrzymałości przekroju na zginanie. Wały skręcane, w których nie występuje zginanie, są najczęściej gładkie (mają jednakową średnicę).



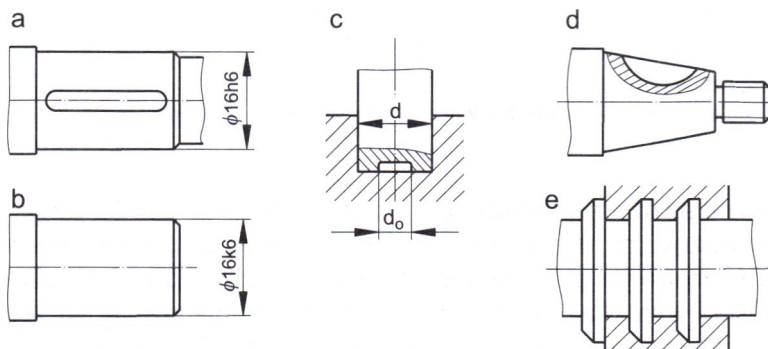
**Rys. 3.98.** Rodzaje osi i wałów

a – drążona oś gładka, b – pełna oś stopniowana, c – pełny wał gładki, d – drążony wał stopniowany, e, f – wał wykorbiony, g – wał giętki

Nazewnictwo wałów bierze się najczęściej od spełnianych funkcji (np. wał główny, napędowy, rozrządu) lub kształtu (np. wał wykorbiony, korbowy).

W niektórych urządzeniach stosuje się wały giętkie, które umożliwiają dowolne ustawienie końcówki roboczej (wrzeciona) względem źródła napędu.

Odcinki osi i wałów, których powierzchnie stykają się ze współpracującymi częściami, nazywamy czopami. Czopy wymagają dokładnej obróbki, a ich średnice i tolerancje są często znormalizowane (rys. 3.99). Dotyczy to zwłaszcza czopów współpracujących z łożyskami.



**Rys. 3.99.** Rodzaje czopów

a, b – poprzeczny stały, c – wzdłużny, d, e – poprzeczno-wzdłużny

### 3.7.2. Materiały stosowane na osie i wały

Rodzaj materiału, z którego wykonano oś lub wał, zależy od przeznaczenia, wymaganej wytrzymałości i sztywności tego elementu. Właściwości wybranego materiału decydują pośrednio o wymiarach części współpracujących (np. łożysk,



kół, sprzęgieł, hamulców), które często są znormalizowane. Osie i wały wykonuje się z węglowych stali konstrukcyjnych i maszynowych. Typowym materiałem wałów są stale C35 i C45 w stanie ulepszonym cieplnie. Wykorzystuje się również stale stopowe do ulepszania cieplnego. Gdy bardziej istotna jest twardość powierzchni niż wytrzymałość rdzenia osi lub wału, stosuje się stale do nawęglania. Na wały korbowe dużych maszyn i urządzeń czasami stosuje się odlewy z żeliwa modyfikowanego lub sferoidalnego.

Przy doborze materiału należy uwzględnić fakt, że duża wytrzymałość materiału nie jest potrzebna, gdy o wymiarach przesądzają wymagania dotyczące jego sztywności giętej lub skrętej.

### 3.7.3. Obliczanie osi i wałów

Obliczanie osi i wałów polega na:

- wyznaczeniu metodami statyki wszystkich sił czynnych (obciążeń) i biernych (reakcji podpór),
- obliczeniu momentów gnących i skręcających w przekrojach niebezpiecznych,
- wyznaczeniu średnic w przekrojach niebezpiecznych.

Do obliczeń wytrzymałościowych przyjmuje się następujące wartości wskaźników wytrzymałości przekroju:

- dla osi i wałów o pełnym przekroju kołowym wskaźniki na zginanie i skręcanie

$$W_x \approx 0,1d^3 \text{ oraz } W_o \approx 0,2d^3 \quad (3.117)$$

- dla osi i wałów drążonych o przekroju pierścieniowym wskaźniki na zginanie i skręcanie

$$W_x \approx 0,1 \frac{d^4 - d_o^4}{d} \text{ oraz } W_o \approx 0,2 \frac{d^4 - d_o^4}{d} \quad (3.118)$$

Podstawiając współczynnik wydrążenia  $\beta = \frac{d_o}{d}$  otrzymuje się odpowiednio

$$W_x \approx 0,1d^3(1 - \beta^4) \text{ oraz } W_o \approx 0,2d^3(1 - \beta^4) \quad (3.119)$$

Dla wytrzymałości osi i wałów najkorzystniejszy współczynnik wydrążenia  $\beta = 0,4 \dots 0,6$ .

Średnice osi i wałów oblicza się za pomocą następujących zależności:

- 1) na zginanie

$$\sigma_g = \frac{M_g}{0,1d^3} \leq k_g \text{ – dla osi pełnych} \quad (3.120a)$$

oraz

$$\sigma_g = \frac{M_g}{0,1d^3(1 - \beta^4)} \leq k_g \text{ – dla osi drążonych} \quad (3.120b)$$

2) na skręcanie

$$\tau_s = \frac{M_s}{0,2d^3} \leq k_s \quad \text{– dla osi pełnych} \quad (3.121a)$$

oraz

$$\tau_s = \frac{M_s}{0,2d^3(1-\beta^4)} \leq k_s \quad \text{– dla osi drażonych} \quad (3.121b)$$

We wzorach (3.120) i (3.121) wartości naprężeń dopuszczalnych przyjmuje się w zależności od rodzaju obciążenia ( $k_{go}$ ,  $k_{sj}$  lub  $k_{so}$ );

3) na jednoczesne zginanie i skręcanie

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_g^2 + (\alpha \cdot \tau)^2} = \frac{M_z}{W_x} \leq k_{go} \quad (3.122)$$

Naprężenia gnące i skręcające można przedstawić jako

$$\sigma_g = \frac{M_g}{W_x} \quad \text{oraz} \quad \tau_s = \frac{M_s}{W_o}$$

Przyjmujemy zastępczy moment zredukowany

$$M_z = \sqrt{M_g^2 + \left(\frac{\alpha \cdot M_s}{2}\right)^2} \quad (3.123)$$

w którym współczynnik redukujący  $\alpha$  oblicza się następująco:

– przy skręcaniu tętającym  $\alpha = \frac{k_{go}}{k_{sj}}$

– przy skręcaniu wahadłowym  $\alpha = \frac{k_{go}}{k_{so}}$

oraz podstawiamy do wzoru (3.122) odpowiednie wskaźniki wytrzymałości przekroju i otrzymujemy:

– dla wału pełnego

$$\sigma_z = \frac{M_z}{0,1d^3} \leq k_{go}$$

czyli

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{10M_z}{k_{go}}} \quad (3.124)$$

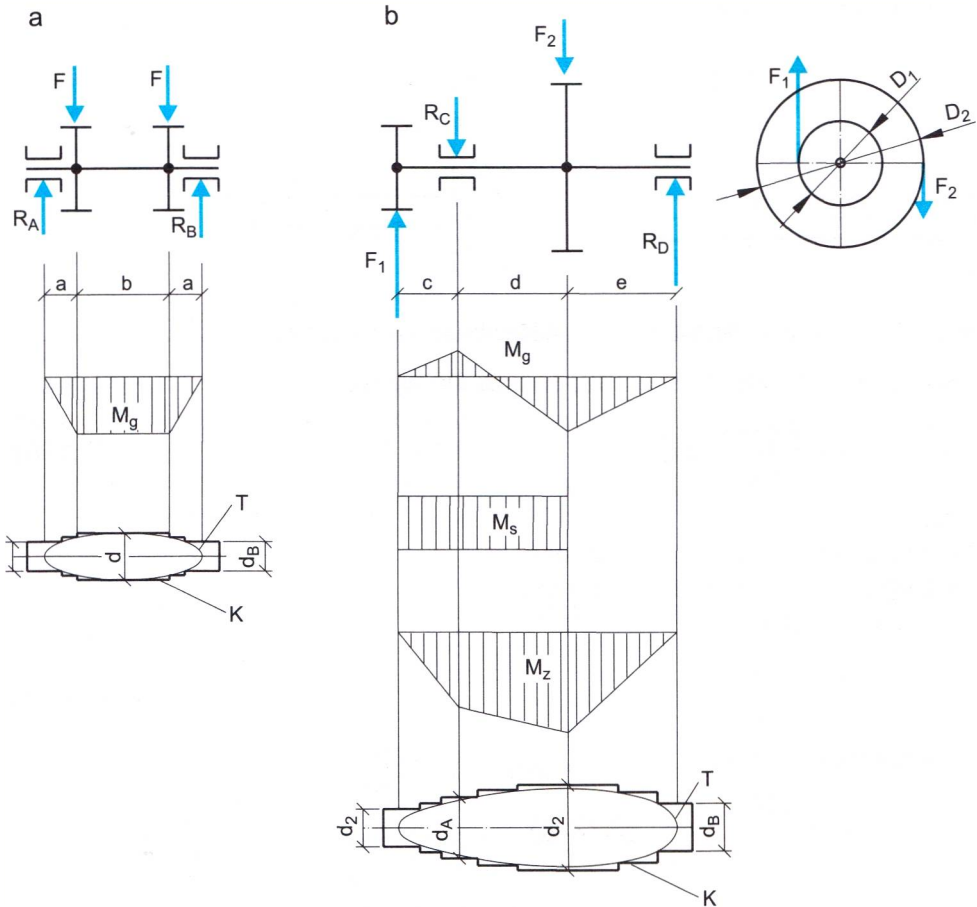
– dla wału drażonego

$$\sigma_z = \frac{M_z}{0,1d^3(1-\beta^4)} \leq k_{go}$$

zatem

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{10M_z}{(1-\beta^4)k_{go}}} \quad (3.125)$$

Obliczeniom powinno towarzyszyć wykonywanie szkiców rozkładu obciążeń, wykresów momentów gnących, skręcających i zastępczych, jak również narysowanie szkicu teoretycznego kształtu wału o stałej wytrzymałości, na którym obrysowuje się zarys kształtu rzeczywistego (rys. 3.100).



**Rys. 3.100.** Szkice do obliczeń osi i wałów  
 $T$  – teoretyczny kształt o stałej wytrzymałości,  $K$  – kształt rzeczywisty

W większości przypadków należy sprawdzić sztywność giętą osi lub wału i skrętną wału. Wzory do obliczania strzałek ugięcia są podane w poradnikach technicznych dla mechaników.

W najprostszym przypadku strzałka ugięcia osi lub wału obciążonego symetrycznie jak na rysunku 3.101 jest opisana wzorem

$$f = \frac{F \cdot l^3}{48E \cdot J_x} \quad (3.126)$$

gdzie:

$E$  – moduł Younga,

$J_x$  – osiowy moment bezwładności:

– dla osi pełnej

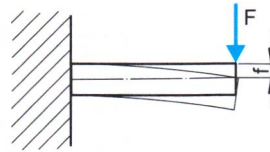
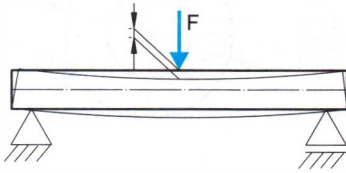
$$J_x = \frac{\pi \cdot d^4}{64}$$

(3.127a)

– dla osi drążonej

$$J_x = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$$

(3.127b)



**Rys. 3.101.** Schematy odkształcenia osi i wałów obciążonych siłą poprzeczną

Kąt skręcenia wału (rys. 3.102) oblicza się wg wzoru

$$\phi = \frac{M_s \cdot l}{G \cdot J_o} \text{ [rad]}$$

(3.128)

gdzie:

$G$  – moduł sprężystości poprzecznej,

$J_o$  – biegunowy moment bezwładności:

– dla osi pełnej

$$J_o = \frac{\pi \cdot d^4}{32}$$

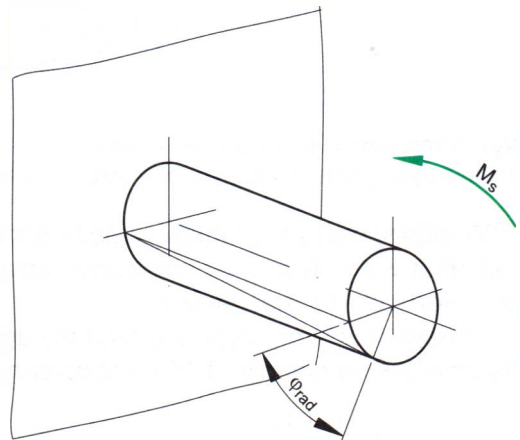
(3.129a)

– dla osi drążonej

$$J_o = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32} \quad (3.129b)$$

Gdy oś jest zamocowana jednym końcem, strzałkę ugięcia liczy się tak jak dla sprężyny płaskiej (wzór 3.112).

**Rys. 3.102.** Odkształcenie wału obciążonego momentem skręcającym



**Przykład 3.19**

Obliczyć średnicę ruchomej osi, której schemat przedstawiono na rysunku 3.100, dla następujących danych:  $F = 80 \text{ kN}$ ,  $a = 250 \text{ mm}$ . Oś ma być wykonana ze stali C45 w stanie ulepszonym cieplnie ( $k_{go} = 80 \text{ MPa}$ ).

*Rozwiązanie*

Obciążenie jest symetryczne, zatem

$$R_A = R_B = F = 80 \text{ kN}$$

Obliczamy maksymalny moment zginający

$$M_g = F \cdot a = 80\,000 \cdot 250 = 20 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Obliczamy średnicę osi pełnej

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{10M_g}{k_{go}}} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 20 \cdot 10^6}{80}} = 135,7 \text{ mm}$$

Przyjmujemy oś o średnicy  $d = 140 \text{ mm}$ .

**Przykład 3.20**

Obliczyć średnice wału, którego schemat przedstawiono na rysunku 3.100b, dla następujących danych:  $F_1 = 10\,000 \text{ N}$ ,  $F_2 = 5000 \text{ N}$ ,  $D_1 = 120 \text{ mm}$ ,  $D_2 = 240 \text{ mm}$ ,  $c = 80 \text{ mm}$ ,  $d = 160 \text{ mm}$ ,  $e = 160 \text{ mm}$ . Wał ma być wykonany ze stali C35 w stanie ulepszonym cieplnie ( $k_{go} = 60 \text{ MPa}$ ,  $k_{so} = 35 \text{ MPa}$ ).

*Rozwiązanie*

Z warunku równowagi sił i ich momentów wyznaczamy reakcje w podporach

$$F_1 - R_c - F_2 + R_D = 0$$

$$F_1 \cdot c + F_2 \cdot d - R_D(d + e) = 0$$

$$R_D = \frac{F_1 \cdot c + F_2 \cdot d}{d + e} = \frac{10\,000 \cdot 80 + 5000 \cdot 160}{160 + 160} = 5000 \text{ N}$$

$$R_c = F_1 - F_2 + R_D = 10\,000 - 5000 + 5000 = 10\,000 \text{ N}$$

(zwrot reakcji założono prawidłowo).

Obliczamy momenty gnące w przekrojach niebezpiecznych (w płaszczyznach symetrii osadzonych kół i łożysk)

$$M_{gc} = F_1 \cdot c = 10\,000 \cdot 80 = 800\,000 \text{ N} \cdot \text{mm} = 800 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{g2} = R_D \cdot e = 5000 \cdot 160 = 800\,000 \text{ N} \cdot \text{mm} = 800 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Momenty gnące na końcach wału są równe 0.

Moment skręcający między kołami

$$M_s = F_1 \cdot \frac{D_1}{2} = F_2 \cdot \frac{D_2}{2} = 10\,000 \cdot \frac{120}{2} = 5000 \cdot \frac{240}{2} = 600\,000 \text{ N} \cdot \text{mm} = 600 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Wyznaczamy współczynnik redukujący

$$\alpha = \frac{k_{go}}{k_{so}} = \frac{60}{35} = 1,7$$

Obliczamy momenty zastępcze

$$M_{z1} = M_s = 600 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{zc} = \sqrt{M_{gc}^2 + \left(\frac{\alpha \cdot M_s}{2}\right)^2} = \sqrt{800^2 + \left(\frac{1,7 \cdot 600}{2}\right)^2} = 949 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{z2} = \sqrt{M_{g2}^2 + \left(\frac{\alpha \cdot M_s}{2}\right)^2} = \sqrt{800^2 + \left(\frac{1,7 \cdot 600}{2}\right)^2} = 949 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{ze} = 0$$

Obliczamy średnice przekrojów niebezpiecznych

$$d_1 \geq \sqrt[3]{\frac{10M_z}{k_{go}}} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 600\,000}{60}} = 46,4 \text{ mm}$$

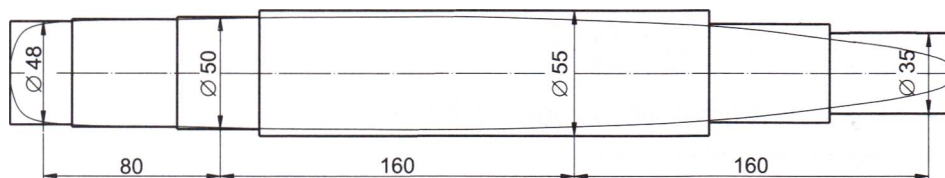
$$d_c \geq \sqrt[3]{\frac{10M_z}{k_{go}}} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 949\,000}{60}} = 54,1 \text{ mm}$$

$$d_2 \geq \sqrt[3]{\frac{10M_z}{k_{go}}} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 949\,000}{60}} = 54,1 \text{ mm}$$

Z uwagi na brak obciążenia momentem zastępczym średnicę wału w przekroju e obliczymy z warunku wytrzymałości na ścinanie siłą  $R_e$ , przyjmąwszy  $k_{to} = k_{so}$

$$d_e \geq \sqrt{\frac{4R_e}{\pi \cdot k_{to}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5000}{3,14 \cdot 35}} = 13,5 \text{ mm.}$$

Sporządzamy szkic wału o stałej wytrzymałości i ustalamy ostateczne wymiary wału (rys. 3.103).



**Rys. 3.103.** Szkic wału o stałej wytrzymałości i obrysowany na nim rzeczywisty kształt wału

Ze względów konstrukcyjnych i technologicznych ostatecznie przyjmujemy następujące wartości średnic:

$$d_1 = 48 \text{ mm,}$$

$$d_c = 50 \text{ mm,}$$

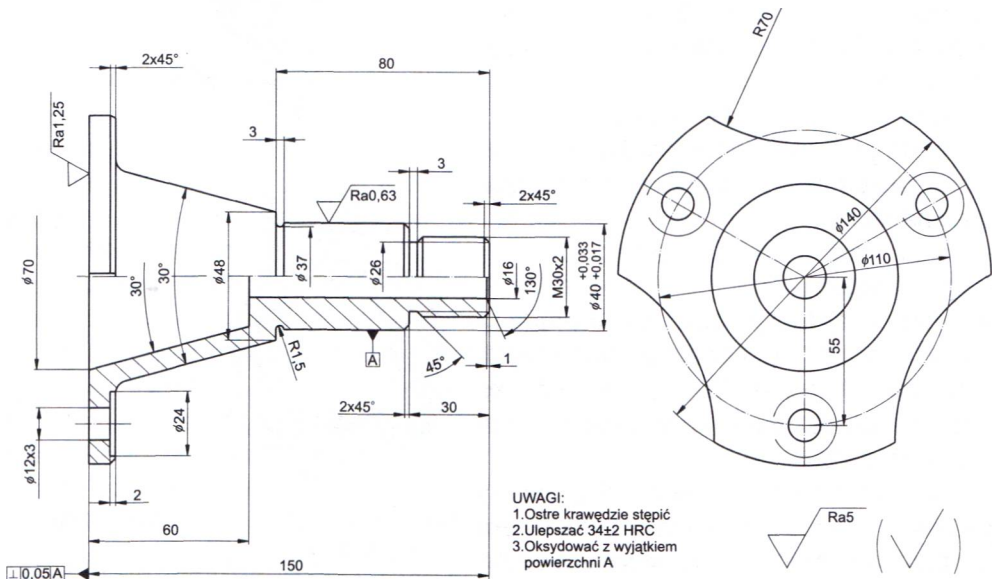
$$d_2 = 55 \text{ mm,}$$

$$d_e = 35 \text{ mm.}$$

### 3.7.4. Oznaczanie osi i wałów na rysunkach technicznych

Na rysunkach wykonawczych osie i wały rysuje się bez uproszczeń. Części o prostej budowie wystarczy przedstawić w jednym rzucie głównym. Oś lub wał należy rysować w położeniu poziomym z czopami o większych średnicach po lewej stronie. Rysunki osi lub wałów o bardziej skomplikowanej budowie przedstawia się w kilku rzutach oraz przekrojach i kładach (rys 3.104). W szczególnych przypadkach, np. przy dużym zmniejszeniu, zarys osi lub wału można uprościć, a odpowiednio powiększone szczegóły przedstawić obok, zaznaczając miejsce szczegółu kółkiem narysowanym cienką linią (patrz rys. 1.87 w pierwszej części podręcznika). Wymiarując wał lub oś, należy podać wszystkie średnice oraz bezpośrednio lub pośrednio określić długości wszystkich stopni.

Na rysunkach złożeniowych stosuje się uproszczenia rysunkowe i nie przedstawia się powiększonych szczegółów. W drugim stopniu uproszczenia można pominąć rysowanie gwintów, wielowypustów, rowków itp., gdy przedstawienie ich na rysunku nie jest konieczne, a rysunek jest wykonany w dużym zmniejszeniu. Znormalizowane czopy i inne szczegóły konstrukcyjne należy przedstawiać zgodnie z obowiązującymi normami.



Rys. 3.104. Przykład rysunku osi w dwóch rzutach, z wykorzystaniem przekroju części symetrycznej

## 3.8. Łożyskowanie

### 3.8.1. Klasyfikacja łożysk

**Łożyska** zapewniają stałe położenie elementów maszyn poruszających się ruchem obrotowym (np. koło względem piasty, wał korbowy w kadłubie silnika) i umożliwiają przenoszenie obciążeń oraz zmniejszają tarcie podczas ruchu względnego obracających się części. Układ łożysk, który zapewnia prawidłową współpracę elementów maszyn, nazywa się **łożyskowaniem**.

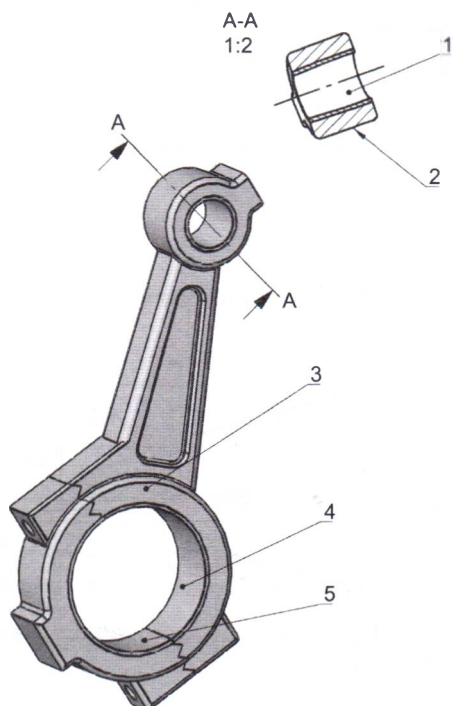
Łożyska są obciążone siłami związanymi z ciężarem osi i wałów oraz wzajemną współpracą poszczególnych elementów (patrz obliczanie reakcji w belkach). Aby prawidłowo wypełniać swoje zadania, powinny charakteryzować się małymi oporami ruchu (ponieważ wywołują straty energii), niezawodnością działania oraz odpornością na zużycie w wyniku normalnej pracy. Elementy łożysk mogą się po sobie ślizgać lub toczyć i w związku z tym rozróżniamy **łożyska ślizgowe** i **toczne**.

#### Łożyska ślizgowe

Łożyska ślizgowe charakteryzuje bezpośredni styk powierzchni roboczych czopów i ich gniazd, a w wyniku ruchu obrotowego następuje ślizganie się części po sobie. Powstaje tarcie ślizgowe, które niestety sprzyja wydzielaniu się dużej ilości ciepła. Jest to niewątpliwa wada tego rozwiązania. Ale łożyska ślizgowe mają też liczne zalety:

- mogą przenosić duże obciążenia,
- można je montować w środku wału, jeżeli zastosuje się łożyska dzielone (tzw. półpanewki),
- pracują ciszej niż łożyska toczne,
- tłumią drgania,
- gwarantują dużą dokładność montażu,
- przy małych wymiarach zewnętrznych są dokładniejsze i lżejsze niż łożyska toczne (zastosowanie w urządzeniach precyzyjnych).

Łożysko ślizgowe najczęściej tworzy panewka o odpowiednio ukształtowanym otworze, współpracująca z czopem będącym częścią wału lub osi. Panewki mogą stanowić oddzielną część zamocowaną w korpusie albo być wykonane bezpo-



**Rys. 3.105.** Przykłady łożysk ślizgowych w korbowodzie

1 – niedzielone łożysko (tzw. tulejka) główki korbowodu, 2 – główka korbowodu, 3 – stopa korbowodu, 4, 5 – dzielone łożysko (tzw. półpanewki) stopy korbowodu



średnio w obudowie. Panewka może występować jako tuleja w całości (łożysko niedzielone) lub jako zespół złożony z połówek (łożysko dzielone).

W zależności od kierunku przenoszenia sił łożyska dzielimy na:

- poprzeczne, przenoszące obciążenia prostopadłe do osi wału;
- wzdłużne, przekazujące obciążenia zgodne z kierunkiem osi obrotu wału;
- poprzeczno-wzdłużne, umożliwiające przeniesienie obciążeń prostopadłych i wzdłuż osi wału.

Ze względu na sposób zamocowania panewki w kadłubie rozróżniamy łożyska:

- stałe, tj. panewka nie porusza się względem kadłuba;
- wahlive (samonastawne), gdy panewka ma możliwość wychylania się w różne strony w kadłubie.

Z uwagi na sposób smarowania występują łożyska:

- hydrostatyczne, w których smar między współpracujące powierzchnie jest podawany pod ciśnieniem;
- hydrodynamiczne, w których w wyniku obrotu czopa względem panewki przy pewnej prędkości powstaje tzw. klin smarowy rozdzielający współpracujące powierzchnie.

Zależnie od kształtu współpracujących elementów łożyska można podzielić na:

- walcowe,
- stożkowe,
- kulkowe,
- pryzmatyczne.

Łożyska walcowe muszą mieć luzy ze względu na smarowanie, rozszerzalność cieplną i zasadę działania. Jeżeli jest konieczne kasowanie luzów z uwagi na dokładność wykonania pewnych elementów, lepiej zastosować łożyska stożkowe, kulkowe lub pryzmatyczne. Trzeba się wtedy liczyć ze zwiększeniem siły tarcia w łożysku w wyniku zwiększenia nacisku i z jego szybszym zużyciem.

W łożyskach ślizgowych może występować tarcie:

- suche, gdy poruszające się po sobie powierzchnie nie są smarowane;
- płynne, jeżeli między poruszającymi się powierzchniami stale utrzymuje się warstewka smaru;
- mieszane, jeśli tylko niektóre wierzchołki nierówności współpracujących powierzchni stykają się ze sobą, a większość powierzchni jest rozdzielona smarem.

Opracowując konstrukcję łożyska, dąży się do uzyskania podczas eksploatacji tarcia płynnego, które zapewnia minimalne zużycie. Warunkiem uzyskania tarcia płynnego jest zapewnienie w łożysku ciśnienia smaru przekraczającego naciski powierzchniowe pochodzące od obciążenia. Bardzo niekorzystne jest częste zatrzymywanie i rozruch współpracujących elementów (np. panewki na wale korbowym najbardziej zużywają się przy rozruchu silnika po dłuższym postoju samochodu). Prawidłowe smarowanie zależy od ciśnienia smaru, chropowatości powierzchni, luzu w łożysku, lepkości i jakości oleju lub smaru oraz prędkości obrotowej powierzchni współpracujących. Zapewnienie prawidłowej pracy łożyska ślizgowego jest więc bardzo trudne.

### Łożyska toczne

W łożyskach tocznych między współpracującymi powierzchniami są umieszczone elementy toczne. Wiadomo, że łatwiej jest toczyć ciężar niż go ciągnąć. Wynika to z mniejszych wartości sił tarcia tocznego niż tarcia ślizgowego. Szerokie wykorzystanie łożysk tocznych wynika z ich zalet, do których należą:

- małe opory tarcia podczas pracy,
- małe opory tarcia podczas rozruchu, zwłaszcza przy częstym unieruchamianiu maszyny,
- małe opory tarcia przy małej prędkości obrotowej (współczynnik tarcia w bardzo małym stopniu zależy od prędkości obrotowej),
- duża niezawodność pracy,
- duża trwałość,
- małe wymiary wzdłużne w stosunku do poprzecznych.

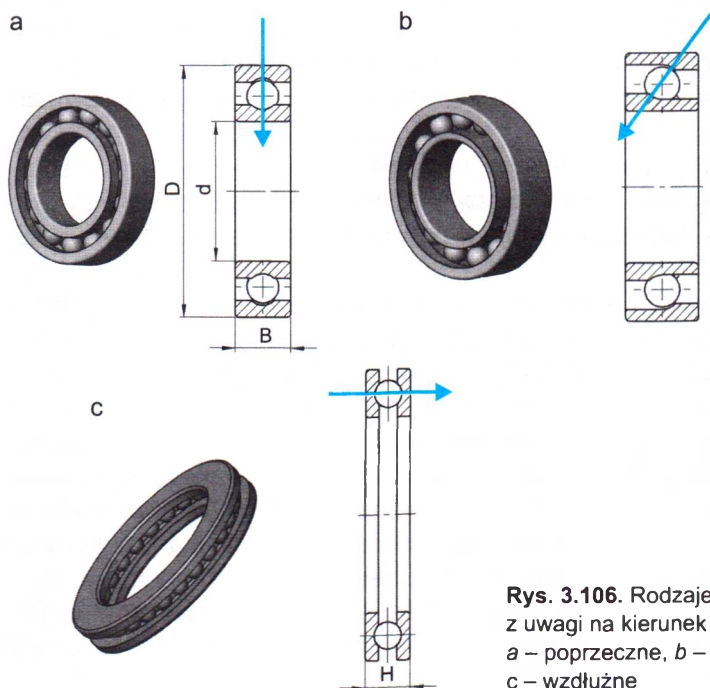
W zależności od kierunku przenoszenia sił łożyska toczne, podobnie jak ślizgowe, dzielimy na:

- poprzeczne,
- wzdłużne,
- poprzeczno-wzdłużne.

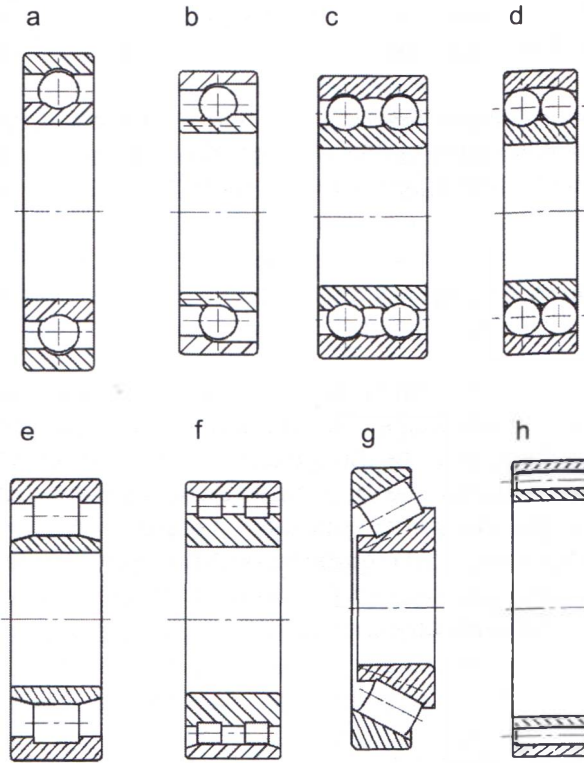
Prawie wszystkie łożyska poprzeczne mogą przenosić niewielkie obciążenia wzdłużne. O przynależności łożyska do danego rodzaju decyduje wartość obciążeń wzdłużnych w stosunku do poprzecznych.

Z uwagi na kształt elementów nośnych rozróżnia się łożyska toczne:

- kulkowe,



**Rys. 3.106.** Rodzaje łożysk kulkowych z uwagi na kierunek przenoszonego obciążenia  
 a – poprzeczne, b – poprzeczno-wzdłużne, c – wzdłużne

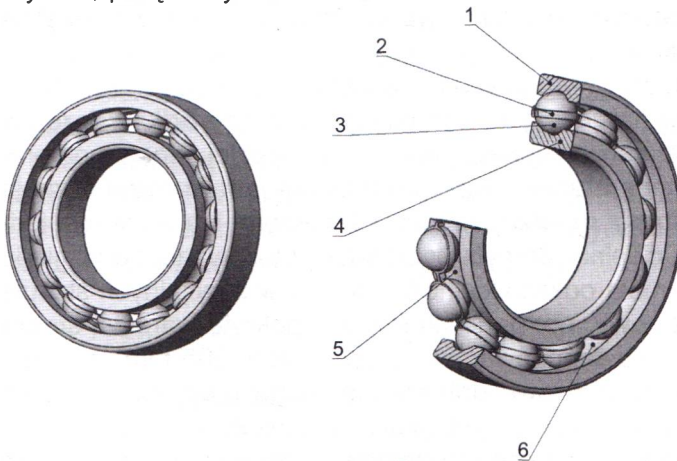


**Rys. 3.107.** Wybrane rodzaje łożysk tocznych

a – kulkowe zwykłe, b – kulkowe skośne, c – kulkowe dwurzędowe, d – kulkowe dwurzędowe wahlliwe, e – walcowe bez prowadzenia na pierścieniu wewnętrznym, f – walcowe dwurzędowe, g – stożkowe, h – igielkowe

– walczkowe (z elementami tocznymi o kształcie walcowym, stożkowym lub baryłkowym).

Najbardziej rozpowszechnione łożysko kulkowe (rys. 3.108) składa się z pierścienia zewnętrznego 1, pierścienia wewnętrznego 4, kulek 3 oraz połówek koszyka 2, połączonych nitami.



**Rys. 3.108.** Budowa łożyska kulkowego zwykłego

1 – pierścień zewnętrzny, 2 – koszyk, 3 – kulka, 4 – pierścień wewnętrzny, 5 – bieżnia pierścienia wewnętrznego, 6 – bieżnia pierścienia zewnętrznego

Występują również łożyska bez pierścienia zewnętrznego lub zawierające same elementy toczne osadzone podczas montażu na smarze (np. łożyska igiełkowe).

Z powodu dużej różnorodności, w celu zapewnienia zamienności, podstawowe wymiary łożysk tocznych (średnica zewnętrzna  $D$ , średnica wewnętrzna  $d$ , szerokość łożyska  $b$  oraz promienie zaokrąglenia krawędzi pierścienia  $r_1$  i  $r_2$ ) są znormalizowane.

### 3.8.2. Materiały stosowane na łożyska

#### Łożyska ślizgowe

Praca łożyska ślizgowego zależy w dużym stopniu od własności materiałów czo-pa i panwi łożyska. Czopy wałów są najczęściej stalowe, natomiast na panwie łożysk stosuje się materiały łożyskowe, które cechują się dużą wytrzymałością mechaniczną, odpornością na ścieranie i korozję, dobrym przewodzeniem ciepła i łatwością obróbki. W silnikach pojazdów samochodowych panewki wykonuje się z taśmy stalowej (o zawartości węgla 0,1%) o grubości od 1 do 4 mm, powleczoną warstwą stopu łożyskowego o grubości od 0,1 do 0,5 mm. Do najczęściej stosowanych należą stopy łożyskowe na osnowie:

- cyny (białe metale),
- miedzi (brązy),
- aluminium.

Najpopularniejsze z nich są stopy: cynowo-antymonowo-miedziowy, ołowiowo-cynowo-antymonowo-miedziowy, ołowiowo-cynowo-antymonowy. Właściwie dobrany skład chemiczny stopów umożliwia uzyskanie odpowiednich właściwości oraz dostosowanie do wymaganego obciążenia i prędkości obrotowej. We współczesnych łożyskach ślizgowych coraz częściej wykorzystuje się nowe rodzaje materiałów. Są to np. intermetale, czyli związki międzymetaliczne, będące połączeniem tytanu i aluminium. Wynikowa struktura związku jest zupełnie inna niż struktura składników.

Stopami o dużej twardości i wytrzymałości, wykorzystywanymi w łożyskach ślizgowych pracujących w najcięższych warunkach, są **brązy odlewnicze** cynowe i ołowiowe. **Mosiądze** są mniej wytrzymałe, lecz bardziej odporne na pracę w podwyższonej temperaturze. Dobre własności antykorozyjne mają natomiast **stopy aluminium z miedzią, niklem i krzemem**. Ich wadą jest jednak duża rozszerzalność cieplna. **Żeliwo** jest rzadziej stosowane, ze względu na dość dużą twardość i małą odkształcalność. Do celów specjalnych stosuje się **panewki wielowarstwowe**, np. panewki stalowe pokryte warstwą srebra (o grubości 0,5...0,7 mm), następnie warstwą ołowiu (ok. 0,005 mm) z dodatkiem indu. Materiały wielowarstwowe dobiera się drogą prób, odpowiednio do warunków pracy łożysk (np. w tłokowych silnikach lotniczych).

Jeżeli smarowanie łożysk jest bardzo utrudnione lub ze względu na warunki pracy należy go unikać (w tradycyjnej formie), stosuje się **panewki z materiałów porowatych**. Najczęściej są to tuleje prasowane, spiekane i nasycane ole-

jem. Po rozgrzaniu łożyska smar wypływa na powierzchnię panwi, a po obniżeniu temperatury cofa się w głąb porów.

Poza stopami metali na panewki łożysk wykorzystuje się również tworzywa sztuczne (**polimery**). Są one często stosowane ze względu na korzystne właściwości ślizgowe, takie jak: mały współczynnik tarcia suchego, zdolność samodocierania, odporność na ścieranie, dobre tłumienie drgań, cichobieżność, odporność na korozję i łatwość kształtowania. Wadami polimerów są przede wszystkim słabe właściwości mechaniczne, mała przewodność cieplna i duża rozszerzalność, a także zmiana wymiarów wskutek zmian warunków otoczenia. Właściwości polimerów poprawia się, stosując różne metody ich modyfikacji.

### Łożyska toczne

Specyfika pracy łożyska tocznego polega na prawie punktowym styku elementu tocznego z bieżnią. Powstają wtedy bardzo duże naciski jednostkowe, czyli naprężenia stykowe na powierzchni materiału. Na łożyska toczne jest więc wymagany materiał twardy i o dużej odporności na ścieranie. Cechy takie wykazują **stale łożyskowe**, spośród których najczęściej są stosowane dwa gatunki: **100Cr6** (dawniej ŁH15) oraz **100CrMnSi6-4** (poprzednio ŁH15SG). Skład chemiczny tych stali zgodnie z normą PN-EN ISO 683-17:2004 (dotyczącą stali na łożyska kulkowe i waleczkowe) jest następujący: węgiel (C) do ok. 1% (nadaje dużą twardość i odporność na ścieranie), chrom (Cr) ok. 1,5% (nadaje wymaganą hartowność elementom tocznym). Stale łożyskowe mają też ściśle określoną zawartość składników stopowych i zanieczyszczeń oraz odpowiednią strukturę. Zazwyczaj stal ta jest poddawana obróbce cieplnej, dzięki której uzyskuje twardość od 58 do 65 HRC. Stale węglowo-chromowe nie są odporne na korozję. Najbardziej powszechnymi rodzajami stali nierdzewnych, z których wykonuje się pierścienie łożysk i elementy toczne, są stale o dużej zawartości chromu: X65Cr14 oraz X105CrMo17.

Coraz więcej firm produkujących łożyska toczne wykorzystuje w nich nowsze rozwiązania – **materiały ceramiczne**. Materiałem stosowanym powszechnie na pierścienie łożyskowe i elementy toczne jest azotek krzemu klasy łożyskowej. Składa się on z drobnych, wydłużonych ziaren beta-azotku krzemu, rozłożonych w masie szklanej. Materiał ten charakteryzuje się korzystnymi właściwościami istotnymi dla łożysk tocznych, takimi jak: duża twardość, mała gęstość, mała rozszerzalność cieplna, duża rezystywność elektryczna, mała stała dielektryczna i obojętność na działanie pola magnetycznego.

### 3.8.3. Dobór i obliczanie łożysk

#### Obliczanie łożysk ślizgowych

Polega ono na wyznaczeniu wymiarów łożyska z uwagi na warunki wytrzymałościowe: naciski powierzchniowe i zginanie. Dodatkowo łożyska ślizgowe sprawdza się na rozgrzewanie. Sposób obliczania jest odmienny dla łożysk poprzecznych i wzdłużnych.

**Obliczanie łożysk ślizgowych poprzecznych.** Nacisk powierzchniowy  $p$  na styku czopa i panewki

$$p = \frac{F}{S} \leq k_o \quad (3.130)$$

gdzie:

$F$  – obciążenie wywołujące nacisk [N],

$k_o$  – dopuszczalny nacisk powierzchniowy [MPa],

$S$  – pole powierzchni przekroju, w którym są rozważane naprężenia [mm<sup>2</sup>].

Dla czopa pole powierzchni przekroju przyjmuje się jako rzut czopa na powierzchnię prostopadłą do kierunku działania siły i oblicza ze wzoru

$$S = d \cdot l \quad (3.131)$$

gdzie:

$d$  – średnica czopa,

$l$  – długość czopa.

Naprężenia zginające czop łożyska

$$\sigma_g = \frac{M_g}{W_x} \leq k_{go} \quad (3.132)$$

gdzie:

$M_g$  – moment zginający działający na czop,

$W_x$  – wskaźnik wytrzymałości przekroju poprzecznego czopa na zginanie.

Zakładamy, że zbliżamy się w obliczeniach do wartości granicznych, a wtedy obie nierówności możemy potraktować jako równości i po podzieleniu ich stronami otrzymujemy

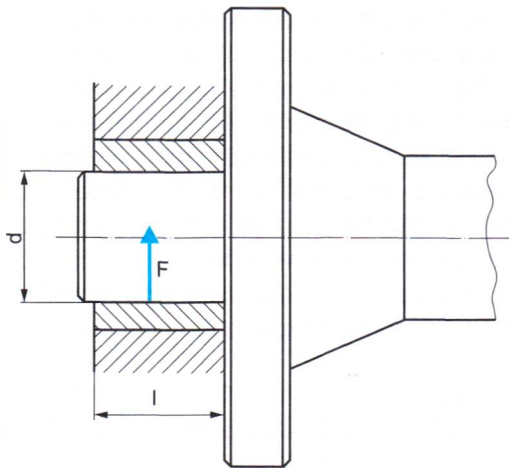
$$\frac{l^2}{d^2} = \frac{0,2k_{go}}{k_o} \quad (3.133)$$

Wprowadzamy nową wielkość  $\lambda = \frac{l}{d}$ , przekształcamy równanie i uzyskujemy

zależność

$$\lambda \approx 0,45 \sqrt{\frac{k_{go}}{k_o}} \quad (3.134)$$

Z uwagi na materiał panewki i czopa oraz budowę łożyska przyjmujemy



Rys. 3.109. Schemat obciążenia łożyska poprzecznego

$\lambda = 0,3 \dots 4$  (najczęściej  $\lambda = 1,6$ )

Porównując wzory służące do obliczeń na naciski powierzchniowe oraz zależność  $\lambda$  otrzymujemy wzór na średnicę czopa

$$d = \sqrt{\frac{F}{\lambda \cdot k_o}} \quad (3.135)$$

Ponadto łożysko ślizgowe podczas pracy nagrzewa się, więc trzeba sprawdzić, czy nadmiar ciepła nie spowoduje jego uszkodzenia. Musi być spełniony warunek

$$p_{sr} \cdot v \leq (p_{sr} \cdot v)_{dop} \quad (3.136)$$

gdzie:

$p_{sr}$  – średni nacisk powierzchniowy w łożysku [MPa],

$v$  – prędkość na obwodzie czopa [m/s], zależna od średnicy czopa oraz prędkości obrotowej,

$p_{sr} \cdot v$  – umowna miara ciepła wytwarzanego w łożysku w wyniku tarcia  $\frac{MN}{m \cdot s}$ .

Przykładowe dopuszczalne wartości parametru  $(p_{sr} \cdot v)_{dop}$ :

– dla łożysk silników spalinowych  $(p_{sr} \cdot v)_{dop} = 1 \dots 2 \frac{MN}{m \cdot s}$ ,

– dla łożysk prądnic i silników elektrycznych  $(p_{sr} \cdot v)_{dop} = 7 \dots 12 \frac{MN}{m \cdot s}$ .

**Obliczanie łożysk ślizgowych wzdłużnych.** Łożyska tego rodzaju oblicza się tylko na naciski powierzchniowe i sprawdza na nagrzewanie. Nacisk powierzchniowy w łożysku oblicza się za pomocą wzoru

$$p_{sr} = \frac{F}{S} \leq k_o \quad (3.137)$$

gdzie:

$F$  – obciążenie łożyska,

$S$  – pole powierzchni pracującej łożyska.

Na przykład dla łożyska z rysunku 3.110:

$$S = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \quad (3.138)$$

Przy sprawdzaniu łożyska na nagrzewanie do obliczenia prędkości  $v$  wirującego czopa przyjmuje się średnią arytmetyczną średnic powierzchni pracującej, opisaną wzorem

$$d_{sr} = \frac{D+d}{2} \quad (3.139)$$

Zależność warunku na nagrzewanie jest taka sama jak dla łożyska poprzecznego – wzór (3.136).

### Dobór łożysk tocznych

Dobór łożysk tocznych polega na wyborze określonego typu łożyska oraz ustaleniu jego wymiarów w zależności od warunków pracy oraz konstrukcji urządzenia, w którym będzie zamontowane. Dla każdego łożyska ujętego w katalogu łożysk podano następujące podstawowe parametry:

- **nośność ruchową  $C$** , czyli wartość obciążenia przenoszonego przez łożysko do pierwszych oznak zniszczenia, które mogą zacząć się pojawiać po 1 milionie obrotów (ok. 500 h pracy);
- **nośność spoczynkową  $C_0$** , czyli dopuszczalne obciążenie łożyska wywołujące odkształcenie plastyczne nie większe niż 0,0001 średnicy elementu tocznego nie obracającego się lub obracającego się bardzo wolno (do 10 obr/min);
- **maksymalną prędkość obrotową**.

Przy doborze głównym zadaniem jest wybranie takiego łożyska tocznego, które spełni rzeczywiste warunki pracy i eksploatacji. Żądana trwałość łożyska  $L$  (podawana w milionach obrotów) jest opisana zależnością

$$L = \left( \frac{C}{F} \right)^p \quad (3.140)$$

gdzie:

$C$  – nośność ruchowa łożyska z katalogu łożysk tocznych [daN],

$F$  – obciążenie równoważne (zastępcze) łożyska [daN],

$p$  – wykładnik potęgi; dla łożysk kulkowych  $p = 3$ , dla łożysk wałeczkowych  $p = 10/3$ .

Wartość trwałości można podawać również w godzinach pracy łożyska  $L_h$  (tzw. trwałość godzinowa); wtedy należy zastosować wzór

$$L_h = \frac{10^6 L}{60n} = \frac{16\,660}{n} \left( \frac{C}{F} \right)^p \quad (3.141)$$

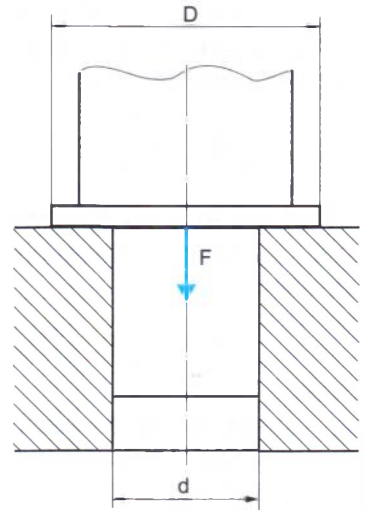
gdzie  $n$  – prędkość obrotowa łożyska [obr/min].

Najczęściej na łożysko działają siły zarówno poprzeczne, jak i wzdłużne. Podczas doboru łożyska wykorzystujemy jedną wielkość, zwaną obciążeniem równoważnym (zastępczym)  $F$ , podawanym zazwyczaj w daN, które zastępuje działanie wszystkich sił. Wielkość ta jest określona równaniem

$$F = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \quad (3.142)$$

gdzie:

$X$  – współczynnik obciążenia promieniowego,



Rys. 3.110. Schemat obciążenia łożyska wzdłużnego



$F_r$  – obciążenie poprzeczne (promieniowe) [daN],

$Y$  – współczynnik obciążenia osiowego,

$F_a$  – obciążenie wzdłużne (osiowe) [daN].

Wartości współczynników  $X$  oraz  $Y$  zależą od rodzaju łożyska i znajdują się w katalogu łożysk tocznych. Trzeba pamiętać, że nazwa „łożysko poprzeczne” oznacza łożysko przenoszące nie tylko obciążenie poprzeczne, lecz także częściowo siłę wzdłużną (oczywiście z przewagą obciążenia poprzecznego). Analogiczna sytuacja występuje w odniesieniu do łożysk wzdłużnych.

W katalogu łożysk tocznych podaje się wartość współczynnika  $e$ , który charakteryzuje konstrukcję łożyska pod względem zdolności do przenoszenia dodatkowych obciążeń. Współczynniki  $X$  i  $Y$  zależą od wartości stosunku sił  $F_a/F_r$  w porównaniu z wartością współczynnika  $e$ . Na przykład dla łożysk kulkowych zwykłych przy  $F_a/C_o = 0,014 \dots 0,56$  wartość  $e$  wynosi  $0,27 \dots 0,53$ . Jeżeli  $F_a/F_r \leq e$ , to wartość obciążenia osiowego jest pomijalnie mała i wtedy współczynniki obciążenia przyjmują wartości  $X = 1$  oraz  $Y = 0$ . Natomiast przy  $F_a/F_r > e$  wartości  $X$  i  $Y$  odczytuje się z tabel i obciążenie zastępcze oblicza się według wzoru (3.141). Sposób doboru łożysk oraz wszelkie współczynniki i wzory niezbędne do obliczeń znajdują się w katalogu łożysk tocznych CBKŁT.

### 3.8.4. Oznaczanie łożysk na rysunkach technicznych

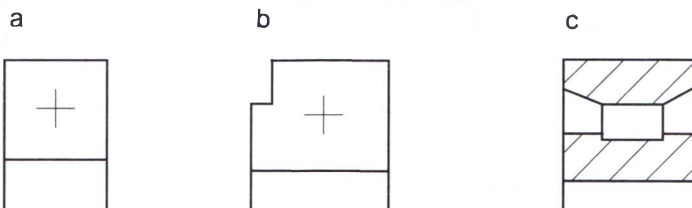
**Łożyska ślizgowe** rysuje się tak samo jak wałki i tulejki w przekroju. Ogólne zasady rysowania tych elementów opisano w pierwszej części podręcznika.

**Łożyska toczne** na rysunkach technicznych można przedstawiać umownie ogólnie lub szczegółowo.

Umownie w sposób ogólny (zgodnie z PN-EN ISO 8826-1) łożyska toczne można przedstawiać trzema sposobami:

- 1) bez pokazywania jakichkolwiek szczegółów (łożysko to kwadrat z krzyżykiem w środku) – rys. 3.111a;
- 2) z podaniem rzeczywistego zarysu przekroju poprzecznego łożyska, ale dalej tylko z krzyżykiem w środku – rys. 3.111b;
- 3) z pokazaniem zakreskowanych pól przekrojów pierścieni wewnętrznego i zewnętrznego łożyska; jest to sposób rzadko używany, przy czym pierścienie zaleca się kreskować w tym samym kierunku – rys. 3.111c.

Natomiast umowne szczegółowe przedstawienie (wg PN-EN ISO 8826-2) umożliwi rozpoznanie rodzaju łożyska tocznego za pomocą określonych sym-









Rys. 3.111. Umowne ogólne przedstawienie łożyska

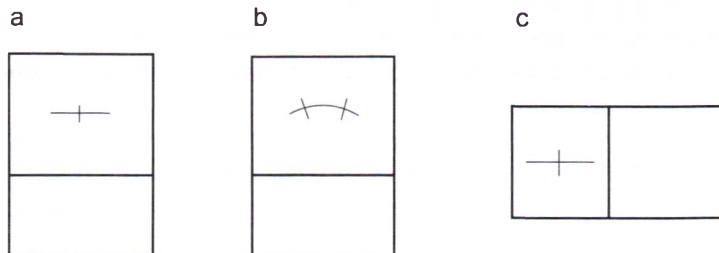
boli – schematycznie. Linie leżące w środku prostokąta, który przedstawia łożysko toczne, nie są przypadkowym krzyżykiem, lecz graficznym znakiem, umownie odzwierciedlającym budowę i konstrukcję tego łożyska. Umowne znaki szczegółowe przedstawiono w tablicy 3-11.

Tablica 3-11

**Elementy graficzne stosowane w umownym szczegółowym przedstawieniu łożysk tocznych**

Nr linii	Element	Zastosowanie
1		Ciągła linia prosta oznacza oś elementu tocznego bez możliwości samonastawiania
2		Ciągły łuk kołowy oznacza oś elementu tocznego z możliwością samonastawiania
3		Krótką linia prosta przecinająca linie nr 1 lub nr 2 pod kątem 90° podaje liczbę rzędów elementów tocznych
4		Okrąg przedstawia łożysko z elementem tocznym w kształcie kulki
5		Szeroki prostokąt przedstawia łożysko z elementem tocznym w kształcie waleczka
6		Wąski prostokąt przedstawia łożysko z elementem tocznym w kształcie igiełki

Przykłady zastosowania elementów graficznych przedstawiono na rysunku 3.112. Na rysunku 3.112a zobrazowano łożysko kulkowe poprzeczne z elementem tocznym, którego kształt nie jest do końca ustalony. Może to być łożysko kulkowe lub walcowe. Gdyby kreska pozioma cienka była dłuższa, mogłoby to być łożysko igiełkowe. Na rysunku 3.112b wyraźnie widać dwa rzędy elementów tocznych. Mogą to być kulki lub baryłki, ponieważ długi łuk oznacza możliwość samonastawiania, czyli jest to łożysko wahliwe, a tylko kulki i baryłki mają możliwości poruszania się po łuku. Na rysunku 3.112c pokazano dłuższą linię prostopadłą do osi obrotu łożyska, co wskazuje na możliwość przenoszenia obciążeń wzdłużnych (tzw. łożysko oporowe). Elementami tocznymi mogą być kulki lub waleczki. We wszystkich przypadkach widać, że tego rodzaju rysunek nie do końca oddaje budowę, ale pokazuje zasadę działania i główne cechy konstrukcyjne łożyska tocznego (np. jedno- czy dwurzędowe). Na tym polega uszczegółowienie rysunku umownego.



**Rys. 3.112.** Umowne szczegółowe przedstawienie łożysk

a – łożysko kulkowe lub walcowe, b – łożysko wahliwe dwurzędowe – kulkowe lub baryłkowe, c – łożysko oporowe – kulkowe lub waleczkowe

## 3.9. Przekładnie zębate

### 3.9.1. Wiadomości wstępne

**Przekładnie mechaniczne** to mechanizmy służące do przenoszenia napędu z wału czynnego (napędzającego) na wał bierny (napędzany). Najczęściej przenoszenie napędu wiąże się ze zmianami wartości momentu obrotowego lub prędkości obrotowej, a ogólnie – mocy.

**Przełożenie kinematyczne  $i$**  jest to stosunek prędkości kątowej koła czynnego (napędzającego) do prędkości kątowej koła biernego (napędzanego):

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (3.143)$$

gdzie:

- $\omega_1$  – prędkość kątowa koła czynnego [rad/s],
- $\omega_2$  – prędkość kątowa koła biernego [rad/s],
- $n_1$  – prędkość obrotowa koła czynnego [obr/min],
- $n_2$  – prędkość obrotowa koła biernego [obr/min].

Przekładnię zmniejszającą prędkość ( $\omega_1 < \omega_2$ ) nazywa się **reduktorem**. Jest nim np. przekładnia główna w samochodzie. Natomiast przekładnię zwiększającą prędkość ( $\omega_1 > \omega_2$ ) określa się mianem **multiplikatora** (przykładem jest tzw. nadbieg w klasycznej trzywałkowej skrzynce biegów). Reduktor zwiększa moment obrotowy przenoszony przez przekładnię, a multiplikator zmniejsza go.

W zależności od sposobu przenoszenia ruchu obrotowego rozróżnia się przekładnie:

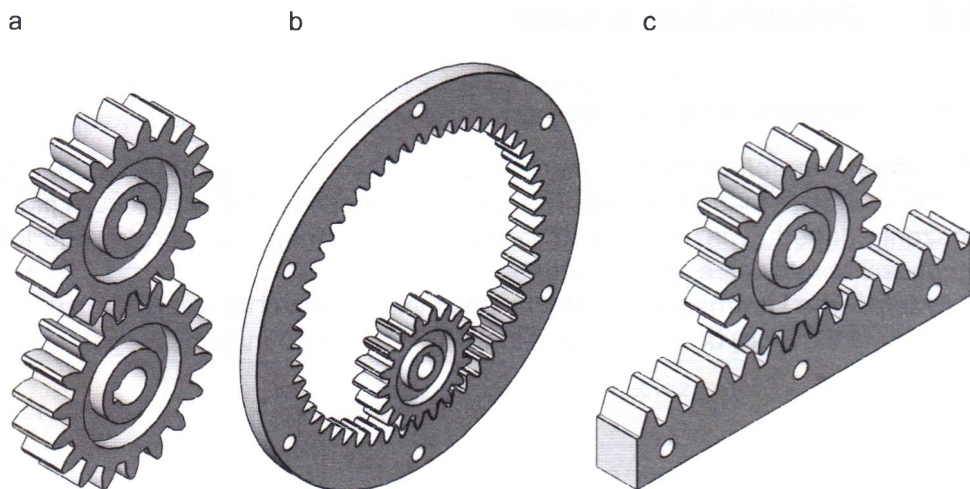
- cierne;
- cięgnowe, w tym:
  - pasowe,
  - łańcuchowe;
- zębate.

### 3.9.2. Klasyfikacja i charakterystyka przekładni zębatych

**Przekładnia zębata** składa się co najmniej z dwóch kół zębatych, mogących przenosić ruch, a więc i moment obrotowy. Występuje wiele różnych rodzajów przekładni zębatych.

Ze względu na rodzaj zazębienia rozróżnia się przekładnie o zazębieniu:

- zewnętrznym;
- wewnętrznym;
- koła zębatego z zębatką, w tym:
  - walcowego koła z zębatką prostą,
  - stożkowego koła z zębatką pierścieniową.



**Rys. 3.113.** Rodzaje zazębień

a – zewnętrzne, b – wewnętrzne, c – koła zębatego z zębatką prostą

W zależności od rodzaju uzębienia kół przekładnie zębate dzieli się na:

- walcowe z kołami o zębach:
  - prostych,
  - skośnych,
  - daszkowych (strzałkowych);
- stożkowe z kołami o zębach:
  - prostych,
  - skośnych,
  - krzywoliniowych (łukowych);
- zębatkowe, w których występuje zębatka stanowiąca wycinek koła zębatego o średnicy dążącej do nieskończoności (okrąg staje się linią prostą).

Ze względu na ruchomość osi rozróżnia się przekładnie zębate o osiach:

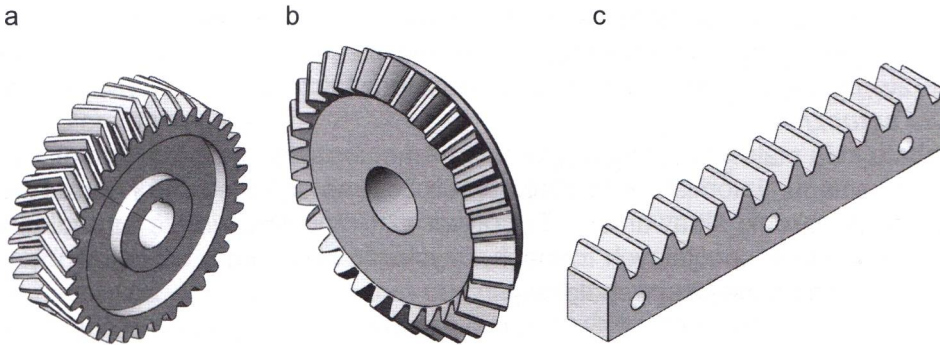
- stałych,
- ruchomych (obiegowe).

Z uwagi na wzajemne położenie osi przekładnie zębate dzieli się na:

- równoległe (mają równoległe osie kół, np. przekładnie walcowe w skrzynce biegów);
- kątowe (mają przecinające się osie kół, np. przekładnie stożkowe);
- wichrowate (mają nieprzecinające się osie kół, np. przekładnia główna hipoidalna oraz ślimakowa przekładnia kierownicza).

Zależnie od rodzaju powierzchni, na której występuje zazębienie, przekładnie zębate można podzielić na:

- czołowe (walcowe i stożkowe),
- śrubowe (ślimakowe walcowe i globoidalne oraz hiperboloidalne walcowe lub stożkowe).



**Rys. 3.114.** Przykłady rodzajów kół zębatach  
 a – koło walcowe o zębach daszkowych, b – koło stożkowe o zębach prostych, c – zębátka

### 3.9.3. Materiały stosowane na koła zębate

Wybór rodzaju materiału zastosowanego do produkcji koła zębatego zależy od wielu czynników. Podstawowymi wymaganiami dotyczącymi przekładni zębatach są:

- duża niezawodność,
- mały stosunek masy do przenoszonej mocy,
- niskie koszty wykonania i eksploatacji.

Sprostanie podanym wymaganiom nie jest łatwe. Ostateczna jakość wymienionych cech zależy nie tylko od poprawności konstrukcji i jakości wykonania, lecz także od zastosowanych materiałów. Wymagania w stosunku do materiałów używanych na koła zębate dotyczą skomplikowanych warunków pracy, które obejmują przede wszystkim zagadnienia:

- wytrzymałościowe (np. wytrzymałość zmęczeniowa);
- trwałościowe (m.in. twardość powierzchni, możliwość stosowania obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej);
- technologiczne, związane z wyborem rodzaju obróbki (np. obróbka skrawaniem z następnym utwardzaniem powierzchni albo odlewanie lub spawanie kół o znacznej wielkości).

Uzyskanie materiału o wysokiej jakości jest bardzo kosztowne, dlatego czynnik ekonomiczny odgrywa bardzo istotną rolę.

Ze względu na stawiane wymagania materiały stosowane na koła zębate podzielono wg ISO na trzy grupy jakościowe:

- ML: materiały bez wysokich wymagań jakościowych, o zakresie badań ograniczonym do podstawowych (kontrola twardości lub pęknięć powierzchniowych);
- MQ: materiały o średniej jakości, poddawane wyrywkowej kontroli istotnych cech materiałowych, o umiarkowanym koszcie badań;
- ME: materiały o najwyższej jakości, których wszystkie własności podlegają kontroli, a koszty wytworzenia i badań są wysokie.

Widać więc, że nawet po zastosowaniu podstawowego materiału do produkcji kół zębatach, którym jest **stal** (zwykłej jakości, wyższej jakości lub stopowa),

można spodziewać się znacznie zróżnicowanych kosztów, które najprawdopodobniej zdecydują o wyborze najodpowiedniejszego gatunku. Na koła zębate wykorzystuje się nie tylko różne gatunki stali, lecz także **żeliwo, staliwo i tworzywa sztuczne**.

Zębate koła stalowe najczęściej są odkuwane, a następnie podlegają obróbce skrawaniem. Natomiast koła staliwne lub żeliwne są odlewane i obrabiane za pomocą obróbki skrawaniem. Tworzywa sztuczne prasuje się lub odlewa pod ciśnieniem w specjalnych formach, uzyskując wykonaną „na gotowo” powierzchnię ich późniejszej współpracy.

### 3.9.4. Metody wytwarzania kół zębatach

Koła zębate stalowe wykonuje się dwoma podstawowymi metodami: obwiedniową i kształtową.

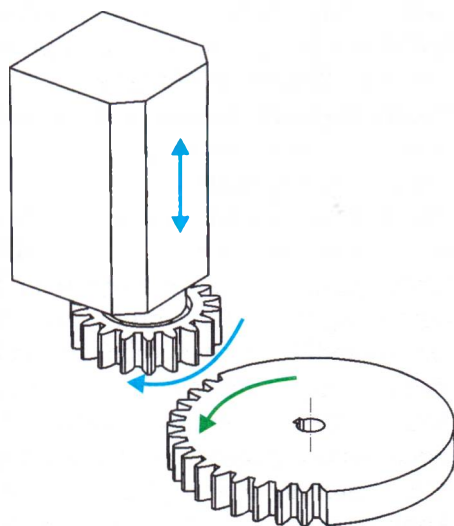
**Metody obróbki kształtowej** są mało dokładne i wymagają wielu narzędzi o kształtach uzależnionych nie tylko od modułu koła, lecz także od liczby zębów, ponieważ narzędzie ma kształt wrębu między sąsiednimi zębami. Do metod obróbki kształtowej należą: skrawanie modułowym frezem krążkowym, przeciąganie przeciągaczem, odlewanie w formie lub prasowanie z tworzyw sztucznych albo proszków metali w matrycach.

**Metody obróbki obwiedniowej** są częściej stosowane i polegają na nacinaniu zębów narzędziem wykonującym ruchy robocze skrawające tak, aby zespół obrabianego koła i narzędzia wykonywał ruchy przypominające obtaczanie się dwóch kół zębatach po sobie. Narzędziem może być frez ślimakowy, koło zębate lub zębátka. Możliwe jest również obwiedniowe walcowanie zębów. Szlifowanie, zarówno obwiedniowe, jak i kształtowe, jest obróbką wykańczającą dla zębów zgrubnie wykonanych wymiennymi wcześniej metodami.

Podstawowymi metodami obwiedniowej obróbki skrawaniem kół zębatach są:

- **dłutowanie** narzędziem o kształcie koła zębatach na dłutownicy Fellowsa,
- **struganie** narzędziem o kształcie zębátka na dłutownicy Maaga lub strugarce Sunderlanda,
- **frezowanie** frezem ślimakowym na frezarce obwiedniowej.

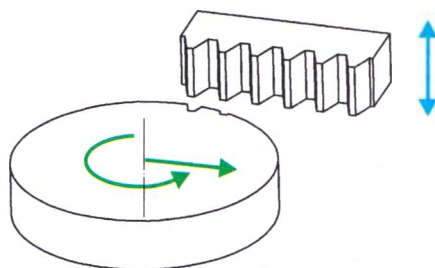
Do produkcji koła zębatach na dłutownicy Fellowsa jest niezbędne narzędzie o kształcie drugiego koła zębatach, które wykonuje ruch obrotowy oraz ruch dłutujący (roboczy) i jałowy, jak również ruch dosuwowy na odpowiednią głębokość



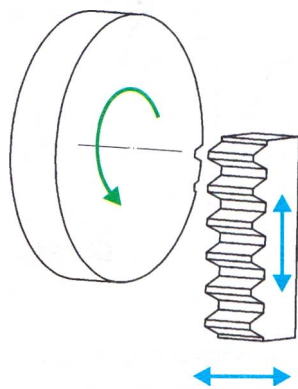
**Rys. 3.115.** Dłutowanie koła zębatach na dłutownicy Fellowsa

i odsuwający od przedmiotu podczas ruchu jałowego. Koło obrabiane wykonuje ruch obrotowy, który jest ściśle zsynchronizowany z obrotem narzędzia.

W metodzie Maaga narzędzie o kształcie zębatego wykonuje ruch roboczy dłutujący, a koło obrabiane wykonuje ruch obrotowy oraz posuwisty, dając efekt obtaczania się po narzędziu. Po obróbce jednej podziałki następuje przesunięcie koła wstecz o jedną podziałkę i jej skrawanie.



Rys. 3.116. Dłutowanie koła zębatego na dłutownicy Maaga

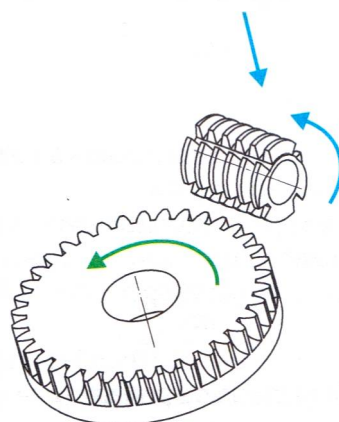


Rys. 3.117. Struganie koła zębatego na strugarce Sunderlanda

Metoda Sunderlanda jest podobna do metody Maaga, lecz ruch posuwowy wykonuje narzędzie, a nie koło, jak w poprzednio opisanej metodzie. Tak więc ruch powodujący obtaczanie koła po zębacie jest rozłożony na narzędzie i nacinane koło. Po wykonaniu jednego cyklu narzędzie odsuwa się od materiału i cofa się o wartość jednej podziałki.

Frezowanie obwiedniowe różni się od opisanych wcześniej metod. Tym razem narzędziem jest frez ślimakowy, obracający się na obwodzie koła obrabianego. Koło wykonuje tylko ruch obrotowy, zsynchronizowany z ruchem obracającego się freza.

Dodatkowo frez ślimakowy wgłębia się w materiał – aż do przejścia przez całą jego szerokość. Jeśli dobierze się odpowiednie pochylenie osi obrotu narzędzia, można nacinąć zęby skośne lub łukowe.



Rys. 3.118. Frezowanie obwiedniowe koła zębatego

### 3.9.5. Przekładnie walcowe o zębach prostych

#### Podstawowe parametry geometryczne

W przekładniach zębatych napęd jest przenoszony poprzez nacisk powierzchni bocznych zębów wykonanych na obwodzie kół współpracujących ze sobą. **Zęby** są ograniczone kołami podstaw o średnicy  $d_f$  i wierzchołków o średnicy  $d_a$  (rys. 3.119). Wolne przestrzenie między zębami, ograniczone kołami podstaw i wierzchołków, tworzą tzw. **wręby międzyzębne**. Zęby i wręby kół współpracujących uzupełniają się. Współpracujące zęby wzajemnie się po sobie obtaczają, umożliwiając przeniesienie napędu z jednego koła na drugie. Współpracę kół zębatych można przedstawić jako toczenie się bez poślizgu teoretycznie wy-

**Rys. 3.119.** Koło zębate walcowe z zaznaczonymi podstawowymi wymiarami

obrażalnych kół, tzw. podziałowych, o średnicach – odpowiednio –  $d_1$  oraz  $d_2$ . W przekładniach zębatych zwykle koła podziałowe pokrywają się z kołami tocznymi. Odległość między sąsiednimi zarysami zębów na jednym kole, mierzona na kole podziałowym, nazywa się **podziałką**  $p_t$ . Można ją opisać wzorem

$$p_t = \pi \frac{d}{z}$$

(3.144)

gdzie:

$d$  – średnica podziałowa koła,

$z$  – liczba zębów.

Aby uprościć obliczenia i pomiary zębów, przyjęto wielkość zwaną modułem koła zębatego

$$m = \frac{p_t}{\pi}$$

(3.145)

Stąd średnica podziałowa

$$d = m \cdot z$$

(3.146)

Można zatem powiedzieć, że **moduł** jest odcinkiem, który w średnicy podziałowej mieści się tyle razy, ile zębów ma koło. W celu ograniczenia liczby narzędzi do produkcji kół zębatych oraz uproszczenia procesu produkcji moduły są znormalizowane (wg PN-ISO 54:2001). Wartości modułów (w milimetrach) ujęto w normie w dwa szeregi.

Szereg 1. (zalecany): 1; 1,25; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 12 ...

Szereg 2. (dopuszczalny): 1,125; 1,375; 1,75; 2,25; 2,75; 3,5; 4,5; 5,5; 7 ...

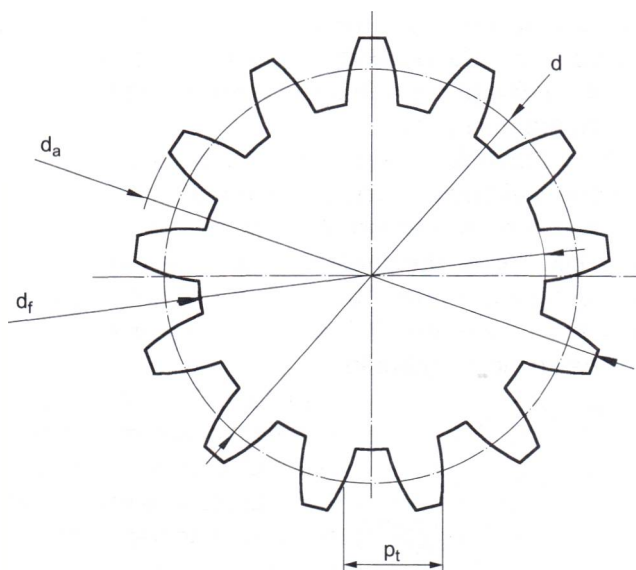
Wymiary uzębień zależą od modułów. Podstawowe wielkości charakterystyczne są opisane następującymi zależnościami.

- Średnica wierzchołków

$$d_a = m(z + 2)$$

(3.147)

- Średnica podstaw





$$d_f = m(z - 2,5) \quad (3.148)$$

- Wysokość głowy zęba

$$h_a = m \quad (3.149)$$

- Wysokość stopy zęba

$$h_f = 1,25m \quad (3.150)$$

- Wysokość zęba

$$h = h_a + h_f = 2,25m \quad (3.151)$$

- Luz wierzchołkowy

$$c = h_a - h_f = 0,25m \quad (3.152)$$

- Luz boczny normalny (międzyzębny), zależny m.in. od dokładności wykonania zębów oraz warunków pracy przekładni, przyjmowany jako

$$j = 0,04m \quad (3.153)$$

- Odległość osi kół współpracujących

$$a = 0,5(d_1 + d_2) = 0,5m(z_1 + z_2) \quad (3.154)$$

W podanych wzorach wyraźnie widać, że wprowadzenie modułu znacznie uprościło opis parametrów geometrycznych kół zębatych.

Obliczanie geometryczne kół zębatych polega na doborze liczby zębów z uwagi na przełożenie, założeniu wartości modułu, ustaleniu wymiarów kół i obliczeniu odległości osi kół współpracujących. Dobierając moduł, dąży się do osiągnięcia jak najmniejszych wymiarów przekładni.

Z geometrią kół wiążą się również zdefiniowane poniżej podstawowe pojęcia.

**Koła toczne** – teoretyczne wyobrażalne koła toczące się po sobie bez poślizgu podczas obrotu współpracujących kół zębatych. Dla normalnych kół zębatych bez korekcji koła toczne odpowiadają kołom podziałowym.

**Punkt przyporu** – miejsce chwilowego styku zębów, rozpatrywane w płaszczyźnie prostopadłej do osi koła.

**Linia przyporu** – linia utworzona przez połączenie kolejnych punktów przyporu podczas obrotu kół zębatych.

**Kąt przyporu** – kąt zawarty między linią przyporu i styczną do obu kół tocznych.

**Liczba przyporu (stopień pokrycia)** – stosunek długości łuku przyporu do podziałki na kole tocznym albo stosunek długości czynnej linii przyporu do podziałki koła zasadniczego.

W odniesieniu do pary kół zębatych często używa się określeń: koło i zębnik. W tym znaczeniu koło ma większą liczbę zębów (jest więc większym kołem zębatym), a zębnik mniejszą (jest mniejszym kołem zębatym).

Z uwagi na prawidłową współpracę zazębienia współpracujących ze sobą kół określa się minimalną liczbę zębów, przy której nie następuje podcięcie zęba

u podstawy i jego osłabienie. Dla najczęściej stosowanych kątów przyporu  $\alpha_o$  podaje się **teoretyczną graniczną liczbę zębów  $z_g$** , przy której nie występuje podcięcie zęba. **Praktyczna graniczna liczba zębów  $z'_g$**  dopuszcza niewielkie podcięcie, które nie zmniejszy wytrzymałości. Oblicza się je na podstawie następujących wzorów:

$$z_g = \frac{2}{\sin^2 \alpha_o} \quad (3.155)$$

$$z'_g = \frac{5}{6} z_g \quad (3.156)$$

Graniczne liczby zębów dla najczęściej stosowanych kątów przyporu mają następujące wartości:

- dla  $\alpha_o = 20^\circ$ :  $z_g = 17$  oraz  $z'_g = 14$ ,
- dla  $\alpha_o = 15^\circ$ :  $z_g = 30$  oraz  $z'_g = 25$ .

Często jest konieczne wykonanie koła zębatego o liczbie zębów mniejszej niż 14. Aby uniknąć podcięcia zęba, stosuje się **przesunięcie zarysu** zębów, polegające na odsunięciu narzędzia od koła nacinanego podczas jego produkcji o wartość  $X$ . Jest to tzw. **korekcja uzębienia**. Po podzieleniu wartości przesunięcia zarysu przez moduł otrzymuje się współczynnik przesunięcia zarysu

$$x = \frac{X}{m} \quad (3.157)$$

Wartość współczynnika przesunięcia zarysu ustala się na podstawie zależności

$$x = \frac{z'_g - z}{z'_g} \quad (3.158)$$

gdzie:

- $z$  – liczba zębów koła,
- $z'_g$  – praktyczna graniczna liczba zębów.

Oczywiście, zmieniają się wówczas wymiary koła, które są opisane poniższymi wzorami.

- Średnica wierzchołków

$$d_a = m(z + 2) \pm 2X \quad (3.159)$$

- Średnica podstaw

$$d_f = m(z - 2,5) \pm 2X \quad (3.160)$$

- Wysokość głowy zęba

$$h_a = m \pm X \quad (3.161)$$

- Wysokość stopy zęba

$$h_f = 1,25m \pm X \quad (3.162)$$

W podanych wzorach znak  $\pm$  należy traktować jako plus, jeżeli narzędzie jest odsuwane na zewnątrz materiału, lub minus, gdy narzędzie skrawające wchodzi w głąb materiału.

Podczas korekcji ulega zmianie także **średnica koła tocznego  $d_w$** , która nie pokrywa się już ze średnicą podziałową  $d$ . Korekcja uzębienia jednego z kół powoduje również zmianę odległości osi kół w przekładni.

Rozróżnia się dwa podstawowe przypadki stosowania kół z przesuniętymi zarysami:

- bez zmiany odległości osi kół w przekładni – korekcja X–X (dawniej P–0),
- ze zmianą odległości osi kół w przekładni – korekcja X+X (dawniej P–P).

### **Korekcja zazębienia X–X**

Korekcja X–X polega na zastosowaniu w kole o mniejszej liczbie zębów dodatniego przesunięcia narzędzia (*na zewnątrz*), a w kole o większej liczbie zębów – ujemnego przesunięcia narzędzia (*do środka*). Wartości obu tych przesunięć są jednakowe, czyli

$$X_1 = -X_2 \quad (3.163)$$

Przy ujemnym przesunięciu zarysu zęba można doprowadzić do podcięcia zębów. Dlatego możliwość zastosowania korekcji X–X wymaga spełnienia dwóch warunków dotyczących:

- praktycznej granicznej liczby zębów

$$z_1 + z_2 \geq 2z'_g \quad (3.164)$$

- teoretycznej granicznej liczby zębów

$$z_1 + z_2 \geq 2z_g \quad (3.165)$$

Jeśli podane warunki nie są spełnione, trzeba zastosować korekcję ze zmianą odległości osi (X+X).

### **Korekcja zazębienia X+X**

Istota korekcji X+X polega na zmianie odległości osi w stosunku do zerowej odległości osi. Korekcję tę stosuje się wówczas, gdy zmiana odległości jest wymagana ze względów konstrukcyjnych (np. w skrzynkach biegów pary kół zębatych muszą mieć jednakową odległość osi) lub nie można zastosować korekcji X–X (suma liczby zębów na obu współpracujących kołach jest mniejsza od podwójnej granicznej liczby zębów). W szczególnych przypadkach stosuje się przesunięcie X+0 (jeśli wystarczy przesunąć zarys zęba tylko w jednym kole).

**Pozorna odległość osi  $a_p$**  – odległość, na którą należy rozsunąć osie obrotu kół zębatych, wynikająca z korekcji obu kół. Jest ona opisana wzorem

$$a_p = a + X_1 + X_2 \quad (3.166)$$

**Rzeczywista odległość osi  $a_r$**  – odległość, którą uzyskuje się po usunięciu nadmiernego luzu obwodowego, powstałego w wyniku zastosowania pozornej od-

ległości osi. Usunięcie nadmiernego luzu polega na zbliżeniu osi o odległość  $K = k \cdot m$ . Zatem rzeczywistą odległość osi można przedstawić jako

$$a_r = a + X_1 + X_2 - K = a_p - k \cdot m \quad (3.167)$$

Wynika z tego, że wartość zbliżenia osi

$$K = a_p - a_r \quad (3.168)$$

W celu obliczenia zbliżenia osi  $K$  wprowadza się współczynnik pozornego rozstawienia osi  $B_p$  oraz współczynnik rzeczywistego rozstawienia osi  $B_r$ . Wówczas pozorną odległość osi można zapisać jako

$$a_p = a + B_p \cdot a = a(1 + B_p) \quad (3.169)$$

Natomiast rzeczywista odległość osi może być opisana wyrażeniem

$$a_r = a + B_r \cdot a = a(1 + B_r) \quad (3.170)$$

Zbliżenie osi o odległość  $K$  powoduje zmniejszenie luzu wierzchołkowego. Jego wartość normalnie jest równa  $0,25m$ , ale może być zawarta w zakresie  $(0,1 \dots 0,3)m$ . Jeżeli wartość luzu wierzchołkowego okaże się mniejsza niż  $0,1m$ , należy ściąć głowy zębów koła o wartość  $K$ . Luz wierzchołkowy jest niezbędny do prawidłowej współpracy kół zębatych. Wskutek skrócenia głowy zęba od strony wierzchołka o wartość  $K$  uzyskuje się tzw. zęby **korygowane dzikie**.

### Obliczenia wytrzymałościowe

Wytrzymałość kół zębatych sprawdza się na:

- zginanie zęba u podstawy,
- naciski powierzchniowe bocznych powierzchni zęba.

**Sprawdzając wytrzymałość zęba na zginanie u podstawy**, zakłada się najtrudniejsze warunki, którym ząb musi sprostać. Siła oddziaływania między zębami wywołuje największe naprężenia w zębie, gdy jest umieszczona przy jego wierzchołku.

Siła międzyzębna  $F_z$  (rys. 3.120) rozkłada się na dwie składowe:  $F$  i  $F_r$ , z uwagi na to, że kierunek jej działania pokrywa się z linią przyproru ustawioną pod kątem przyproru  $\alpha_o$ .

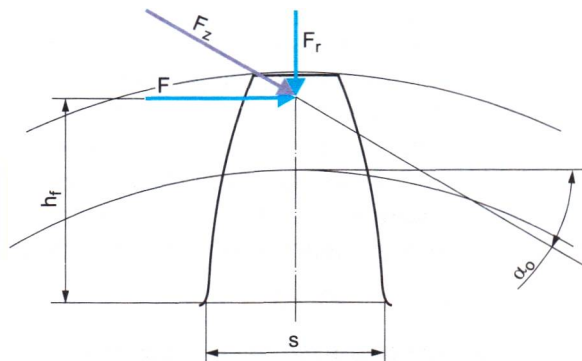
Wartość siły obwodowej  $F$  można obliczyć na podstawie momentu przenoszonego przez przekładnię

$$F = \frac{2M_o}{d} \quad (3.171)$$

gdzie:

$M_o$  – moment obrotowy,

$d$  – średnica podziałowa koła zębatego.



Rys. 3.120. Rozkład sił działających na ząb prosty

Do obliczeń są niezbędne wymiary  $h_f$  i  $s$  oraz szerokość uzębienia  $b$ . Dla uproszczenia obliczeń przyjmuje się współczynnik kształtu zęba

$$q = \frac{6m \cdot h_f}{s^2} \quad (3.172)$$

Wartości współczynnika  $q$  są podawane w tabelach dla koła, w zależności od jego liczby zębów oraz przesunięcia zarysu zęba.

Wzór na naprężenia zginające ma postać

$$\sigma_g = \frac{F \cdot q}{b \cdot m} \leq k_{gj} \quad (3.173)$$

gdzie:

$F$  – siła obwodowa,

$q$  – współczynnik kształtu zęba,

$b$  – szerokość uzębienia w mm,

$m$  – moduł koła.

Przyjmuje się zależność między szerokością uzębienia i modułem, którą wyraża się współczynnikiem

$$\lambda = \frac{b}{m}$$

Współczynnik  $\lambda = 5 \dots 20$ , przy czym większe wartości dotyczą większej dokładności wykonania uzębień.

Siła  $F$  stanowi obciążenie statyczne. Podczas pracy w przekładni występują jeszcze *nadwyżki dynamiczne*, wynikające z nieciągłej współpracy zębów podczas pracy przekładni. Należy uwzględnić również *przeciążenia*, czyli chwilowe wzrosty obciążenia przekładni, wynikające z charakteru pracy maszyny. Przeciążenia występują m.in. podczas uruchamiania i hamowania silnika. Po uwzględnieniu podanych czynników, obciążenie obliczeniowe można przedstawić jako

$$F_{obl} = \frac{F \cdot K_p \cdot K_v}{K_\varepsilon} \quad (3.174)$$

gdzie:

$K_p$  – współczynnik przeciążenia ( $K_p = 1 \dots 2$ ),

$K_v$  – współczynnik nadwyżek dynamicznych wyrażany w zależności od prędkości obwodowej ( $K_v = 1,25 \dots 2,3$ ),

$K_\varepsilon$  – współczynnik zależny od liczby przyporu.

Dla najczęściej występującego w kołach zębatych kąta przyporu  $\alpha_o = 20^\circ$ :

– gdy liczba przyporu  $\varepsilon < 2$ , przyjmuje się  $K_\varepsilon = 1$ ;

– gdy liczba przyporu  $\varepsilon \geq 2$ , przyjmuje się  $K_\varepsilon = 2$ .

Nadwyżki dynamiczne zależą od dokładności wykonania uzębienia oraz prędkości obwodowej kół. Ze wzrostem prędkości kół wszelkie błędy i niedokładności powodują nierównomierną pracę uzębienia oraz zmiany chwilowej prędkości. Wywołuje to powstawanie sił bezwładności, obciążających dodatkowo zęby.

Po przekształceniach otrzymuje się wzór na wartość modułu z warunku wytrzymałościowego na zginanie

$$m \geq \sqrt{\frac{F_{obl} \cdot q}{\lambda \cdot K_{gj}}} \quad (3.175)$$

Wielkością charakterystyczną dla przekładni jest przenoszony obliczeniowy moment obrotowy, który wyznacza się analogicznie do siły obliczeniowej

$$M_{obl} = \frac{M \cdot K_p \cdot K_v}{K_\varepsilon} \quad (3.176)$$

Zatem moduł

$$m \geq \sqrt[3]{\frac{2M_{obl} \cdot q}{\lambda \cdot z \cdot k_{gj}}} \quad (3.177)$$

Z doświadczenia wynika, że **obliczenie modułu z warunku na zginanie wystarczy wykonać dla zębniaka, czyli mniejszego koła**.

**Sprawdzanie nacisków powierzchniowych bocznych powierzchni zęba.** Z uwagi na specyfikę współpracy zębów nie można użyć ogólnych wzorów na naciski powierzchniowe. Powstające na powierzchni zęba naprężenia stykowe  $p_{max}$  oblicza się wg wzoru Herta

$$p_{max} = C \sqrt{\frac{F_{obl}}{b \cdot d_1} \left(1 \pm \frac{1}{i}\right)} \leq k_o \quad (3.178)$$

gdzie:

$k_o$  – dopuszczalne naciski powierzchniowe [MPa],

$F_{obl}$  – siła obliczeniowa [N],

$b$  – czynna szerokość uzębienia [mm],

$d_1$  – średnica podziałowa koła zębatego [mm],

$i$  – przełożenie,

$C$  – współczynnik zależny od rodzaju materiału kół i kąta przyporu; przy kącie przyporu  $\alpha_o = 20^\circ$ :

–  $C = 478,2$  dla kół stalowych ( $E = 210\,000$  MPa,  $\nu = 0,35$ ),

–  $C = 308,4$  dla kół żeliwnych ( $E = 90\,000$  MPa,  $\nu = 0,25$ ).

Wartość dopuszczalnych nacisków jednostkowych można obliczyć w sposób przybliżony na podstawie wzoru

$$k_o = \frac{5HB}{W} \quad (3.179)$$

gdzie:

$HB$  – twardość dla materiału koła wg skali Brinella,

$W$  – współczynnik zależny od prędkości obrotowej  $n$  i czasu pracy  $T$  przekładni, mający wartość 1,3 do 5, przy czym mniejsze wartości dotyczą mniejszych prędkości obrotowych i krótszego czasu pracy.

W przekładniach zębatych bardzo istotne znaczenie ma smarowanie kół. Dobór właściwego sposobu smarowania oraz właściwości oleju smarnego umożliwia uzyskanie podczas pracy zjawiska klina smarnego (warstwa smaru rozdzielająca powierzchnie współpracujących zębów), co przedłuża czas eksploatacji, a także umożliwia zmniejszenie modułu, a więc i zewnętrznych wymiarów kół w przekładni.

### 3.9.6. Przekładnie walcowe o zębach skośnych i daszkowych

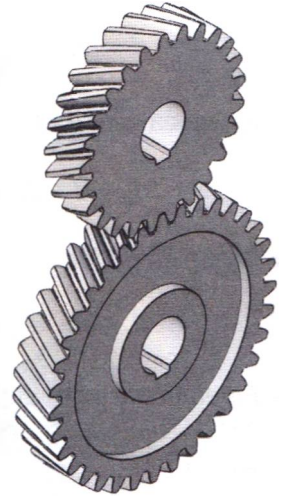
#### Podstawowe parametry geometryczne

Zęby proste są łatwe do wykonania. Niestety, koła o zębach prostych mają wiele wad, których nie wykazują koła o zębach skośnych, daszkowych lub łukowych. Zaletami tego rodzaju kół (rys. 3.121) są:

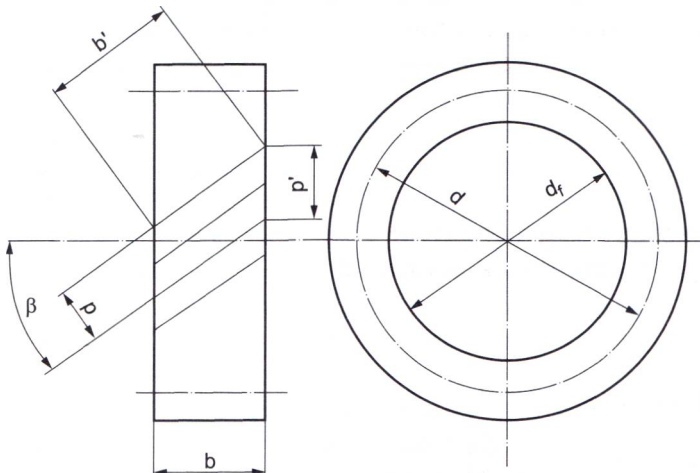
- płynna współpraca zębów,
- cichobieżność,
- zdolność przenoszenia dużych obciążeń,
- możliwość regulacji rozstawu osi przez zmianę kąta pochylenia linii zęba.

Sposób obliczeń kół walcowych o zębach skośnych i daszkowych jest podobny do obliczeń kół o zębach prostych. Dochodzi jednak bardzo istotny parametr – **kąt pochylenia linii zęba  $\beta$**  (rys. 3.122), który ma wpływ zarówno na geometrię, jak i wytrzymałość zębów.

Wymiary koła rozpatruje się w dwóch płaszczyznach: czołowej (prostopadłej do osi koła) oraz normalnej (prostopadłej do linii zęba). Stąd dwa moduły: normalny  $m$  i czołowy  $m_n$ , oraz dwie podziałki: normalna  $p$  i czołowa  $p_n$ . Zależności między nimi są następujące:



Rys. 3.121. Przekładnia zębata z kołami walcowymi o zębach skośnych



Rys. 3.122. Podstawowe wymiary geometryczne koła zębatego o zębach skośnych

$$\rho_t = \frac{p}{\cos \beta} \quad (3.180)$$

$$m_t = \frac{m}{\cos \beta} \quad (3.181)$$

Średnice kół skośnych mierzy się w płaszczyźnie czołowej i oblicza wg poniższych wzorów.

- Średnica podziałowa

$$d = m_t \cdot z = \frac{m}{\cos \beta} z \quad (3.182)$$

- Średnica wierzchołków

$$d_a = d + 2h_a = m \left( \frac{z}{\cos \beta} + 2 \right) \quad (3.183)$$

- Średnica podstaw

$$d_f = d - 2h_f = m \left( \frac{z}{\cos \beta} - 2,5 \right) \quad (3.184)$$

- Ewentualne korekcje przelicza się i wykonuje podobnie jak dla zębów prostych z tą różnicą, że graniczną liczbę zębów bez podcięcia oblicza się za pomocą wzoru

$$z_{g\beta} = z_g \cdot \cos^3 \beta \quad (3.185)$$

gdzie:

$z_{g\beta}$  – graniczna liczba zębów koła o zębach skośnych,

$z_g$  – graniczna liczba zębów koła o zębach prostych.

Ponieważ  $\cos \beta$  przybiera wartości mniejsze od jedności, można się spodziewać, że minimalna dopuszczalna liczba zębów będzie mniejsza niż przy zębach prostych, a całkowita liczba przyporu  $\varepsilon_c$  wzrośnie, gdyż zawiera dwie składowe

$$\varepsilon_c = \varepsilon + \varepsilon_s \quad (3.186)$$

gdzie:

$\varepsilon$  – liczba przyporu dla koła o zębach prostych,

$\varepsilon_s$  – skokowa liczba przyporu obliczana z zależności

$$\varepsilon_s = \frac{b \cdot \sin \beta}{m \cdot \pi} \quad (3.187)$$

- Odległość osi oblicza się wg wzoru

$$a = 0,5(d_1 + d_2) = 0,5m_t(z_1 + z_2) \quad (3.188)$$



### Obliczenia wytrzymałościowe

W obliczeniach wytrzymałościowych kół o zębach skośnych i daszkowych korzysta się z takich samych wzorów jak dla zębów prostych, lecz rozważa się **koło zastępcze**, czyli teoretyczne koło styczne do elipsy powstałej w przekroju koła prostopadłym do linii zęba.

Zastępcza liczba zębów

$$z_z = \frac{z}{\cos^2 \beta} \quad (3.189)$$

Pozostałe wzory nie ulegają zmianie.

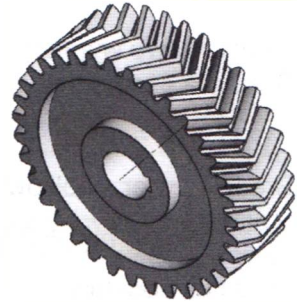
Wartość modułu obliczonego z warunku na zginanie zęba

$$m \geq \sqrt[3]{\frac{2M_{obl} \cdot q \cdot \cos \beta}{\lambda \cdot z \cdot k_{gf}}} \quad (3.190)$$

Warunek dla nacisków powierzchniowych

$$\rho_{max} = C \sqrt{\frac{F_{obl}}{b \cdot d} \left(1 \pm \frac{1}{i}\right)} \leq k_o \quad (3.191)$$

Zęby daszkowe (rys. 3.123) to nic innego jak złożone ze sobą dwa koła zębate o zębach skośnych, rysowane jak w lustrzanym odbiciu. Kąty pochylenia linii zębów są takie same, tylko jedno koło jest lewo-, a drugie prawoskrętne. Dzięki temu eliminuje się siły poosiowe w wałach, na których są osadzone koła. Upraszcza to łożyskowanie przekładni. Możliwe jest również zwiększenie kąta pochylenia linii zęba w stosunku do kół o zębach skośnych.



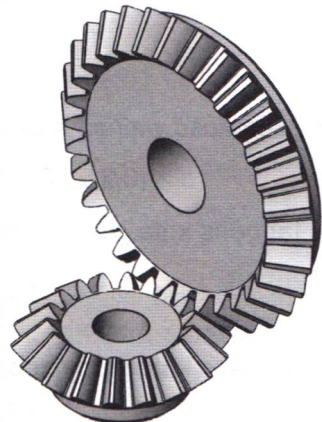
Rys. 3.123. Koło zębate walcowe z uzębieniem daszkowym

### 3.9.7. Przekładnie stożkowe

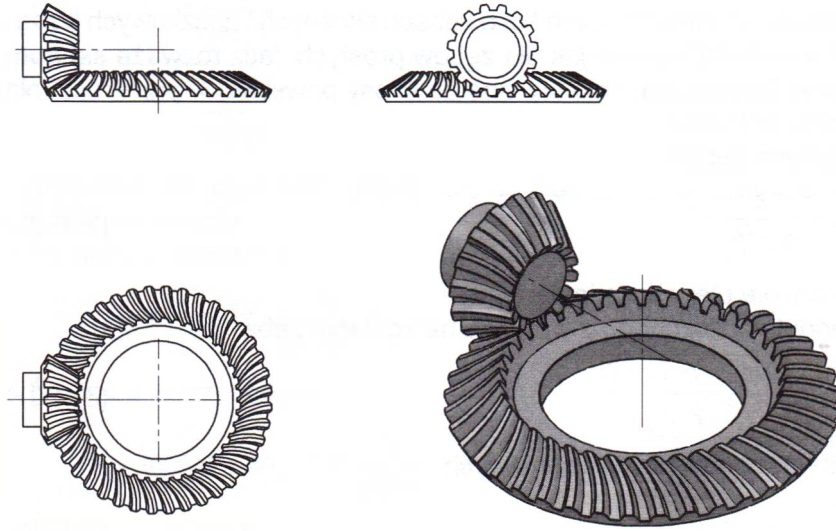
#### Podstawowe parametry geometryczne

Przekładnie kątowe (rys. 3.124, 3.125) to przekładnie, w których osie kół zębatych przecinają się pod pewnym kątem (najczęściej jest to kąt prosty), stanowiącym sumę kątów stożków podziałowych. Koła stożkowe wykonuje się w materiale o kształcie stożka ściętego. Zarys zębów jest ewolwentowy, jak przy kołach walcowych, lecz wymiary zębów zmieniają się wzdłuż stożka. Zęby mogą być proste, skośne lub łukowe.

Podstawowe wymiary geometryczne koła oblicza się w odniesieniu do średnicy zewnętrznej. Natomiast obliczenia wytrzymałościowe wymagają wprowadzenia średnicy średniej.



Rys. 3.124. Przekładnia z kołami stożkowymi o zębach prostych



Rys. 3.125. Rysunek poglądowy stożkowego koła zębatego o zębach lukowych

Podstawowe wymiary kół zębatych stożkowych pokazano na rysunku 3.126.

- Średnica podziałowa

$$d_e = m \cdot z \quad (3.192)$$

- Średnica wierzchołków

$$d_{ae} = m(z + 2 \cos \delta) \quad (3.193)$$

- Średnica podstaw

$$d_{fe} = m(z - 2,5 \cos \delta) \quad (3.194)$$

- Długość tworzącej stożka podziałowego

$$R_c = \frac{d_e}{2 \sin \delta} \quad (3.195)$$

- Szerokość wieńca  $b$  uzębienia; przyjmuje się

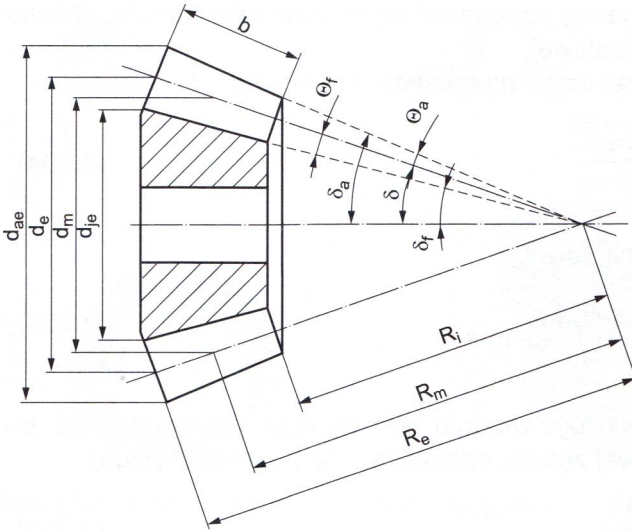
$$b = (0,25 \dots 0,33) R_e \quad (3.196)$$

- Tangens kąta głowy zęba

$$\operatorname{tg} \theta_a = \frac{h_{ae}}{R_e} = \frac{2 \sin \delta}{z} \quad (3.197)$$

- Tangens kąta stopy zęba

$$\operatorname{tg} \theta_r = \frac{h_{fe}}{R_e} = \frac{2,5 \sin \delta}{z} \quad (3.198)$$



**Rys. 3.126.** Podstawowe wymiary stożkowego koła zębatego o zębach prostych

- Kąt stożka wierzchołków zębów

$$\delta_a = \delta + \theta_a \quad (3.199)$$

- Kąt stożka podstaw zębów

$$\delta_f = \delta - \theta_f \quad (3.200)$$

### Obliczenia wytrzymałościowe

Obliczenia wytrzymałościowe oraz ewentualne korekty zębów wykonuje się tak, jak dla kół walcowych. Wprowadza się zastępcze koło walcowe, które zastępuje koło stożkowe. Podstawowe wymiary dla takiego koła oblicza się za pomocą następujących zależności:

- średnica podziałowa koła zastępczego

$$d_{ez} = \frac{d_e}{\cos \delta} \quad (3.201)$$

- zastępcza liczba zębów koła stożkowego

$$z_z = \frac{z}{\cos \delta} \quad (3.202)$$

- graniczna liczba zębów dla koła stożkowego

$$z_{gs} = z_g \cdot \cos \delta \quad (3.203)$$

gdzie  $z_g$  – graniczna liczba zębów dla koła walcowego o takim samym kącie przyporu.

W obliczeniach wytrzymałościowych stosuje się takie same wzory, jak przy obliczaniu kół zębatych walcowych o zębach skośnych. Ponieważ wartość modułu

jest zmienna, w obliczeniach należy posługiwać się modułem średnim  $m_m$  obliczanym na średniej średnicy podziałowej.

Średni moduł, obliczony z warunku na zginanie zęba

$$m_m \geq \sqrt[3]{\frac{2M_{obl} \cdot q \cdot \cos \delta}{\lambda \cdot z \cdot k_{gj}}} \quad (3.204)$$

Natomiast naciski powierzchniowe

$$p_{max} = C \sqrt{\frac{F_{obl} \cdot \cos \delta}{b \cdot d_m}} \left(1 + \frac{1}{i^2}\right) \leq k_o \quad (3.205)$$

Późniejsze przejście na wartość modułu normalnego, mierzonego na zewnętrznej powierzchni czołowej zębów, odbywa się na podstawie wzoru

$$m = m_m \frac{z + \lambda \cdot \sin \delta}{z} \quad (3.206)$$

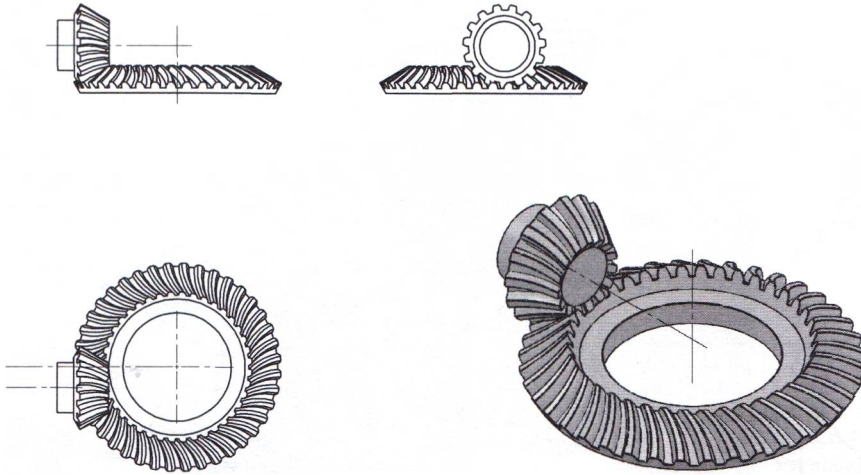
### 3.9.8. Przekładnie zębate śrubowe

W przekładniach zębatych śrubowych osie nie leżą w jednej płaszczyźnie (są wichrowate). W zależności od kształtu powierzchni toczyń rozróżnia się zębate przekładnie śrubowe:

- walcowe, mające walcowe powierzchnie toczone obu kół;
- stożkowe, zwane hipoidalnymi, które mają stożkowe powierzchnie toczone obu kół;
- ślimakowe zwykłe, w których występują ślimak i ślimacznica (o wklęsłej powierzchni zewnętrznej uzębionego wieńca);
- ślimakowe globoidalne, ze ślimakiem o wklęsłej powierzchni wieńca ślimaka i ślimacznicy.

**Przekładnie walcowe śrubowe** często są nazywane przekładniami śrubowymi. Współpracują w nich ze sobą dwa koła walcowe o zębach śrubowych. Niestety, z uwagi na punktową współpracę kół występują w nich bardzo duże naciski jednostkowe. Ogranicza to znacznie zastosowanie tych przekładni – ze względu na intensywne zużycie i małą sprawność. Najczęściej występują one w urządzeniach przenoszących małe momenty i siły, np. w urządzeniach pomiarowych, liczących, sterujących. Spośród nielicznych zalet przekładni śrubowych można wymienić możliwość przesuwania kół wzdłuż osi wałów (co ułatwia montaż) oraz dużą cichobieżność. Przekładnie te mają niewielkie przełożenia, najczęściej mniejsze niż 4. W pojazdach samochodowych stosuje się je w napędzie wałka aparatu zapłonowego i napędzie licznika kilometrów.

**Przekładnie hipoidalne** są znacznie częściej stosowane w pojazdach samochodowych. Są to stożkowe przekładnie śrubowe. Składają się z dwóch kół stożkowych o zębach krzywoliniowych, najczęściej łukowo-kołowych. Bardzo często



Rys. 3.127. Rysunek poglądowy przekładni hipoidalnej

wykorzystuje się je jako przekładnie główne w klasycznych układach przeniesienia napędu. Przesunięcie osi oraz zastosowanie łukowych linii zębów umożliwiają ułożyskowanie wału zębniaka po obu stronach zazębienia, dzięki czemu konstrukcja jest sztywniejsza. Przekładnie hipoidalne mają także inne zalety, m.in. są cichobieżne oraz ich zęby szybko się docierają.

Zastosowanie przekładni hipoidalnej w moście napędowym umożliwia obniżenie środka ciężkości pojazdu. Niestety, geometryczny charakter zazębienia oraz duże obciążenia wymagają specjalnych smarów hipoidalnych, które zapobiegają zacieraniu się zębów oraz są odporne na naciski powierzchniowe.

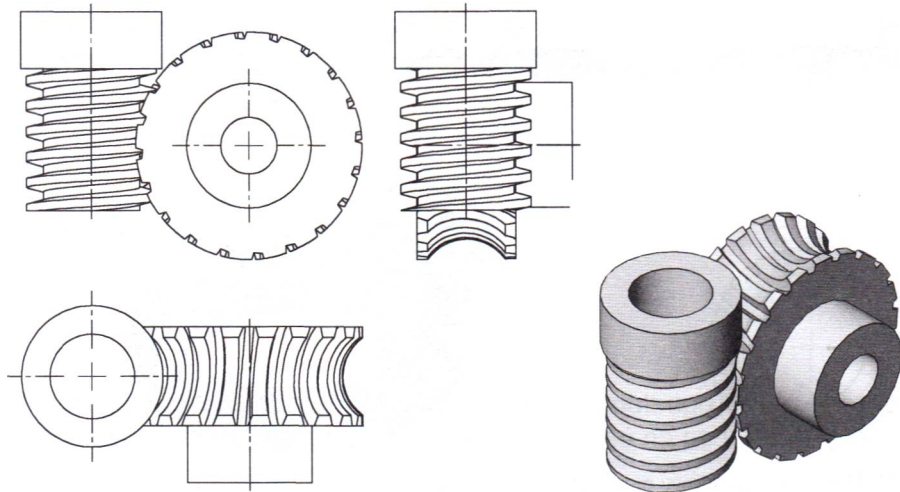
Obliczenia geometryczne i wytrzymałościowe przeprowadza się na podstawie instrukcji firm produkujących maszyny do ich obróbki (np. firmy Gleason).

### 3.9.9. Przekładnie ślimakowe

Przekładnia ślimakowa łączy w sobie cechy przekładni walcowej oraz połączenia śrubowego. Jest ona najpopularniejszym typem przekładni o osiach wchrowatych. Składa się ze ślimaka i ślimacznicy (koła ślimakowego), których osie tworzą kąt  $90^\circ$ . Ślimak jest kołem zębatym o małej liczbie zwojów, przypominającym wyglądem śrubę, natomiast ślimacznica to współpracujące ze ślimakiem koło zębate o wklęsłej zewnętrznej powierzchni uzębienia.

Rozróżnia się **przekładnie ślimakowe walcowe** (rys. 3.128, 3.129), w których ślimak przypomina wyglądem śrubę, oraz **globoidalne** (rys. 3.130), ze ślimakiem zwężonym w środkowej części, podobnym do ogryzka jabłka.

Podczas obracania się ślimaka jego zwoje pociągają za sobą zęby ślimacznicy. Ślimaki wykonuje się ze stali, natomiast ślimacznice z brązu, a przy małych prędkościach obrotowych i niewielkich obciążeniach – ze stopów aluminium lub cynku albo z żeliwa.



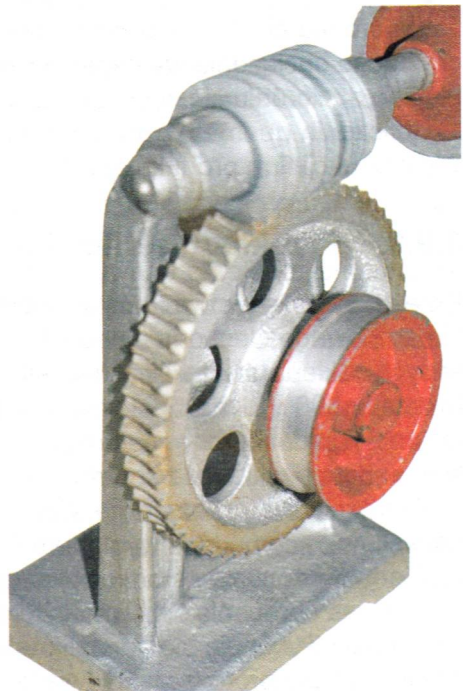
Rys. 3.128. Rysunek poglądowy przekładni ślimakowej walcowej

Porównując przekładnie ślimakowe ze zwykłymi zębatymi, można wymienić wiele ich zalet, jak:

- płynność zazębienia,
- duże przełożenie,
- cichobieżność,
- zwartość budowy,
- możliwość uzyskania przekładni samohamowej,
- możliwość przenoszenia znacznych obciążeń,
- liniowy styk współpracujących zębów zmniejszający ich zużycie.

Niestety, przekładnie ślimakowe mają wady, którymi są:

- mała sprawność,
- konieczność stosowania drogich materiałów, np. brązu,
- utrudnione wykonanie i pomiary (zwłaszcza ślimacznicy),
- konieczna duża dokładność wykonania oraz montażu.



Rys. 3.129. Przekładnia ślimakowa



**Rys. 3.130.**  
Przekładnia  
globoidalna

**Obliczenia** rozpoczyna się od określenia przełożenia przekładni ślimakowej

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1} \quad (3.207)$$

Przełożenia nie można podawać jako stosunku średnic ślimaka i ślimacznicy.

W zależności od kąta wzniosu linii zwoju ślimaka  $\gamma$  przekładnie ślimakowe mogą być samohamowne (wówczas można przekazywać napęd od ślimaka do ślimacznicy, a w przeciwną stronę przekładnia się blokuje) lub niesamohamowne. Jeżeli kąt wzniosu linii zwoju ślimaka jest mniejszy niż kąt tarcia  $\rho$ , przekładnia jest samohamowna.

Sprawność przekładni ślimakowej jest określona wzorem

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg}(\gamma + \rho)} \quad (3.208)$$

gdzie:

$\rho$  – kąt tarcia zależny od materiałów, z których wykonano ślimak i ślimacznice ( $\operatorname{tg} \rho = \mu$ )

$\gamma$  – kąt wzniosu linii zwoju (pochylenia linii zębów) ślimaka,

$\mu$  – współczynnik tarcia ślizgowego.

Obliczenia uzębienia ślimaka i ślimacznicy opierają się na dwóch podstawowych parametrach: module osiowym  $m_x$  oraz wskaźniku średnicowym  $q$ , które są związane zależnością

$$q = \frac{d_1}{m_x} \quad (3.209)$$

gdzie  $d_1$  – średnica podziałowa ślimaka.

Wprowadzenie wskaźnika średnicowego miało na celu zmniejszenie liczby narzędzi niezbędnych do obróbki ślimakowych kół zębatach.

**Wymiary ślimaka** określa się według poniższych wzorów.  
Kąt wzniosu linii zwoju ślimaka

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\rho_z}{\pi \cdot d_1} = \frac{\rho \cdot z_1}{\pi \cdot d_1} = \frac{z_1}{q} \quad (3.210)$$

gdzie:

$\rho_z$  – skok zwoju,

$\rho$  – podziałka osiowa ślimaka,

$z_1$  – liczba zębów ślimaka.

- Skok zwoju

$$\rho_z = \rho \cdot z_1 = \pi \cdot m_x \cdot z_1 \quad (3.211)$$

- Podziałka osiowa

$$\rho = \pi \cdot m_x \quad (3.212)$$

- Wysokość głowy zęba

$$h_{a1} = m_x \quad (3.213)$$

- Wysokość stopy zęba

$$h_{f1} = 1,25m_x \quad (3.214)$$

- Wysokość zęba

$$h_1 = h_{a1} + h_{f1} = 2,25m_x \quad (3.215)$$

- Średnica podziałowa

$$d_1 = q \cdot m_x \quad (3.216)$$

- Średnica wierzchołków

$$d_{a1} = d_1 + 2h_{a1} = m_x(q + 2) \quad (3.217)$$

- Średnica podstaw

$$d_{f1} = d_1 - 2h_{f1} = m_x(q - 2,5) \quad (3.218)$$

- Długość ślimaka

$$L = 4\rho \quad (3.219)$$

Wymiary ślimaka są obliczane w przekroju osiowym, a wymiary ślimacznicy – w przekroju czołowym.

**Wymiary ślimacznicy** oblicza się na podstawie poniższych zależności.

- Średnica podziałowa

$$d_2 = m_x \cdot z_2 \quad (3.220)$$

- Średnica wierzchołków

$$d_{a2} = m_x(z_2 + 2) \quad (3.221)$$



- Średnica podstaw

$$d_{r2} = m_x(z_2 - 2,5) \quad (3.222)$$

- Szerokość zębów ślimacznicy

$$b = 2m_x\sqrt{q+1} \quad (3.223)$$

Odległość między osiami przekładni ślimakowej wyznacza się ze wzoru

$$a = 0,5(d_1 + d_2) = 0,5m_x(q + z_2) \quad (3.224)$$

**Obliczenia wytrzymałościowe** przebiegają podobnie jak dla kół zębatych, z tym że wykonuje się je dla ślimacznicy, ponieważ ma ona mniejszą wytrzymałość. Jeżeli przekładnia ślimakowa pracuje z prędkościami mniejszymi niż 2 m/s, obliczenia przeprowadza się na podstawie warunków na zginanie i naciski powierzchniowe. Natomiast przekładnie pracujące z prędkościami przekraczającymi 2 m/s oblicza się z warunku na nagrzewanie.

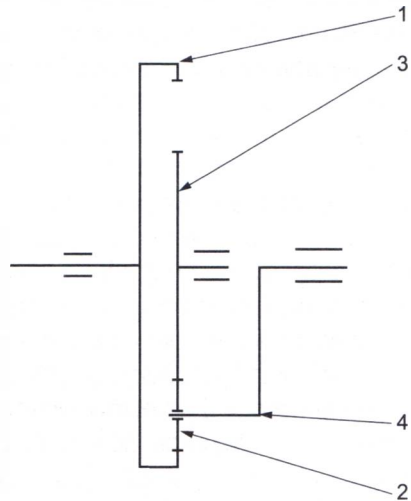
### 3.9.10. Przekładnie obiegowe i specjalne

**Przekładnie obiegowe** charakteryzują się ruchomą osią co najmniej jednego koła zębatego względem obudowy przekładni. Ogólnie dzieli się je na **planetarne** i **różnicowe**. W pojazdach samochodowych przekładnie planetarne stosuje się w zwolnicach oraz automatycznych skrzynkach biegów. Natomiast przykładem zastosowania przekładni różnicowych jest międzyosiowy mechanizm różnicowy.

Typowa **przekładnia planetarna** składa się:

- z koła centralnego (słonecznego) o uzębieniu zewnętrznym,
- z koła pierścieniowego (wieńcowego) o uzębieniu wewnętrznym,
- z jednego lub kilku satelitów o uzębieniu zewnętrznym, połączonych jarzmem.

Każdy z tych trzech elementów może być napędzający, napędzany lub unieruchomiony. Przy jednej zwartej konstrukcji istnieje więc możliwość wykorzystania trzech przełożeń, przełączanych dzięki zastosowaniu sprzęgieł i hamulców w sposób ciągły, bez przerywania przekazywania napędu. Dodatkowymi zaletami takiej przekładni są cichobieżność oraz – z uwagi na korzystny rozkład obciążeń – duża wytrzymałość. Niestety, produkcja skrzynek planetarnych jest trudna i kosztowna. Zasadę działania najprostszej przekładni pokazano na schemacie na rysunku 3.131.



**Rys. 3.131.** Schemat prostej przekładni planetarnej  
 1 – koło pierścieniowe (indeks w),  
 2 – satelita (indeks s), 3 – koło słoneczne (indeks c), 4 – jarzmo satelitów (indeks j)

W prostej przekładni planetarnej można uzyskać następujące przełożenia:  
 – przy nieruchomym kole pierścieniowym

$$i = 1 + \frac{z_w}{z_c} \quad (3.225)$$

– przy nieruchomym kole słonecznym

$$i = 1 + \frac{z_c}{z_w} \quad (3.226)$$

– przy nieruchomym jarzmie satelitów

$$i = \frac{z_v}{z_c} \quad (3.227)$$

gdzie:

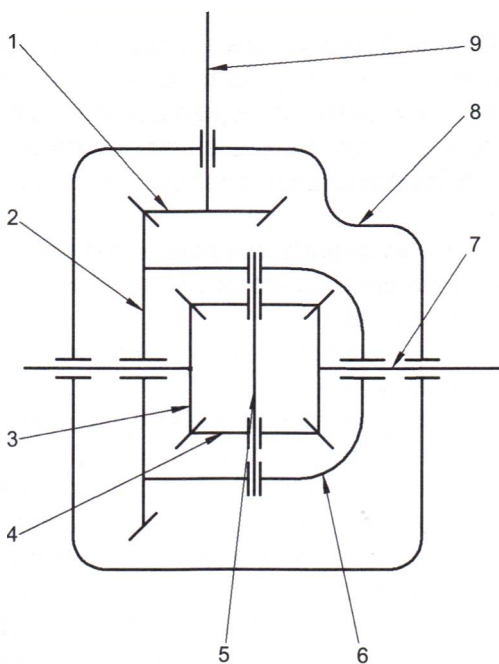
$i$  – przełożenie,

$z_w$  – liczba zębów koła pierścieniowego,

$z_c$  – liczba zębów koła słonecznego.

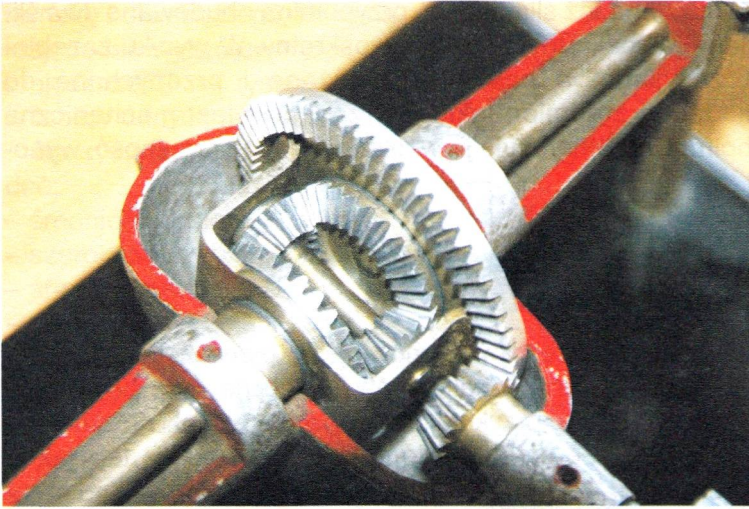
**Przekładnia różnicowa** umożliwia osobne napędzanie dwóch elementów, dzięki czemu trzeci element uzyskuje ruch wypadkowy. Takie rozwiązanie zostanie omówione na podstawie schematu mostu napędowego samochodu z klasycznym układem napędowym.

Napęd jest przenoszony na obudowę mechanizmu różnicowego przez zespół zębatej przekładni stożkowej. Następnie napęd na półosie napędowe rozdziela przekładnia różnicowa w taki sposób, że podczas jazdy samochodu po prostej koła napędowe mają jednakową prędkość obrotową, natomiast w czasie jazdy na zakręcie koła napędowe obracają się z różną prędkością. Różne prędkości mają bowiem koła koronowe połączone z kołami jezdными. Uzyskuje się to dzięki obrotowi satelitów wokół własnej osi. Średnia prędkość ruchu obrotowego kół koronowych jest równa wartości prędkości obrotowej koła tarczowego, połączonego trwale z obudową mechanizmu różnicowego. Schemat oraz model takiej przekładni przedstawiono na rysunkach 3.132 i 3.133.



**Rys. 3.132.** Schemat mostu napędowego z przekładnią różnicową

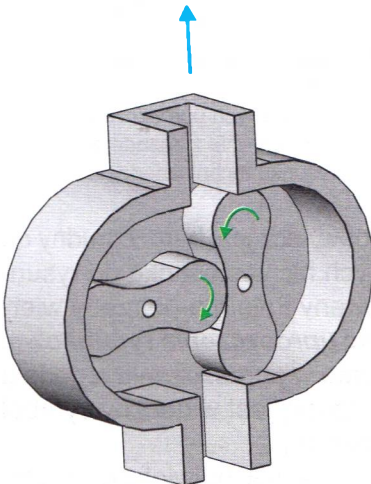
1 – zębnik przekładni głównej, 2 – koło tarczowe przekładni głównej, 3 – koło koronowe, 4 – satelita, 5 – sworzeń, 6 – obudowa mechanizmu różnicowego, 7 – półoś napędowa, 8 – obudowa mostu napędowego, 9 – wałek atakujący



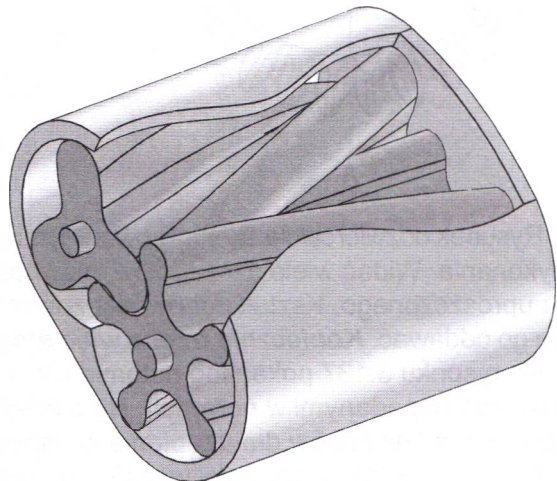
**Rys. 3.133.** Model przekładni różnicowej

**Przekładnie specjalne** mają koła zębate o specjalnych kształtach uzębień. Ich zastosowanie może nie wiązać się z przenoszeniem napędu. Spotykanymi w pojazdach samochodowych przykładami przekładni specjalnych są sprężarka typu Roots oraz dmuchawa śrubowa.

Sprężarka typu Roots (rys. 3.134) ma dwa wirniki o identycznych liczbach łopatek, które są sprzężone przez przekładnię zębatą. Najczęściej stosuje się wirniki dwułopatkowe, rzadziej trójłopatkowe. W przekroju wyglądają one jak koła zębate z dwoma lub trzema zębami. Wchodząc w zazębienie, łopatki przepompowują powietrze w przestrzeniach międzyłopatkowych z komory ssawnej do komory tłocznej. Prędkość obrotowa wirników dochodzi do 14 000 obr./min. Z uwagi na cykliczność pracy działaniu tej sprężarki towarzyszą wahania ciśnienia tłoczenia.



**Rys. 3.134.** Sprężarka typu Roots

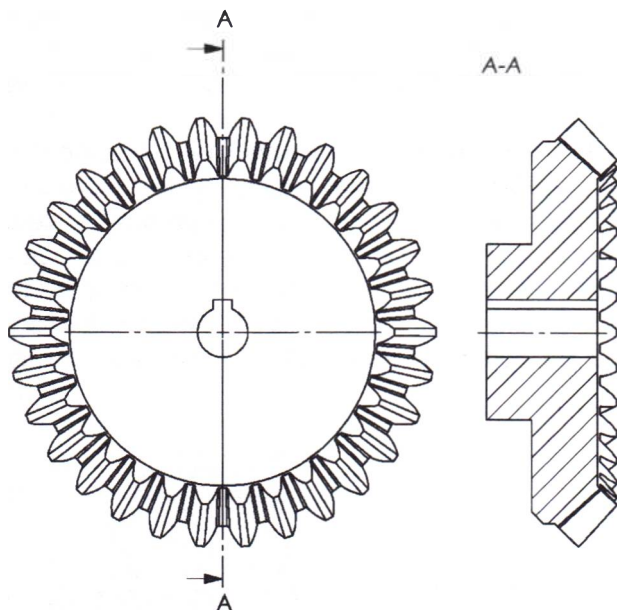


**Rys. 3.135.** Sprężarka śrubowa typu Lysholm

Dmuchawa śrubowa, zwana też ślimakową, przypomina obudowane dwa ślimaki walcowe – jeden prawoskrętny, a drugi lewoskrętny. W wyniku zazębienia powietrze jest zasysane, a następnie sprężane i przepychane do przestrzeni tłocznej. Jedną z odmian takiego urządzenia jest mechaniczna sprężarka typu Lysholm. Charakteryzuje ją względnie duża sprawność, wynosząca ok. 90%.

### 3.9.11. Oznaczanie przekładni zębatych na rysunkach technicznych

Rysowanie przekładni zębatych częściowo omówiono w pierwszej części podręcznika. Z uwagi na skomplikowany kształt zębów konieczne stało się uproszczenie rysunków kół zębatych. Jako przykład niech posłużą rysunki stożkowego koła zębatego. Na rysunku 3.136 przedstawiono koło narysowane tak, jak je widać, a więc bez uproszczeń.



**Rys. 3.136.** Koło zębate stożkowe narysowane bez koniecznych uproszczeń – niezgodnie z zasadami rysunku technicznego

Rysunek odzwierciedla skomplikowany kształt zębów, lecz jest bardzo trudny do wykonania. Widać wiele szczegółów, niewnoszących nic w stosunku do rysunku uproszczonego. Kształt zębów jest znormalizowany i nie ma potrzeby wiernie go oddawać. **Konieczne trzeba więc stosować uproszczenia rysunkowe.**

Na rysunku 3.137 pokazano natomiast koło zębate w uproszczeniu, zgodnie z zasadami podanymi w normach. Na pierwszym rzucie jest widoczny symbol pochylenia linii zębów dla uzębienia skośnego lewego.

Dla technologii wykonania ważniejsze jest podanie jak największej liczby szczegółów konstrukcyjnych. Według normy PN-ISO 1340 charakterystyczne pa-

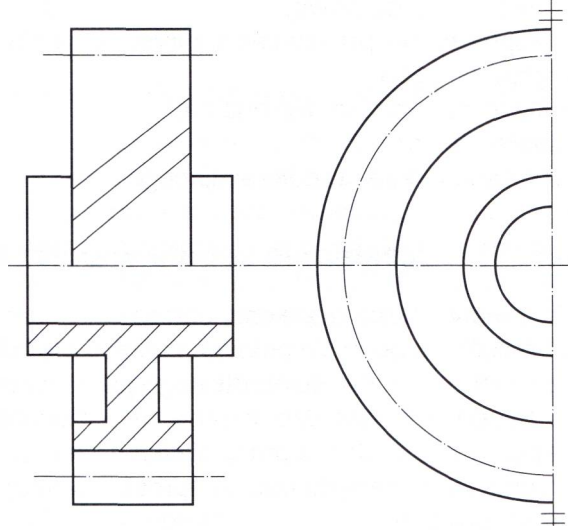
rametry koła zębatego, które należy podać wytwórcy, mogą być umieszczone na rysunku oraz w tablicy danych technicznych.

Na rysunku koła należy podać:

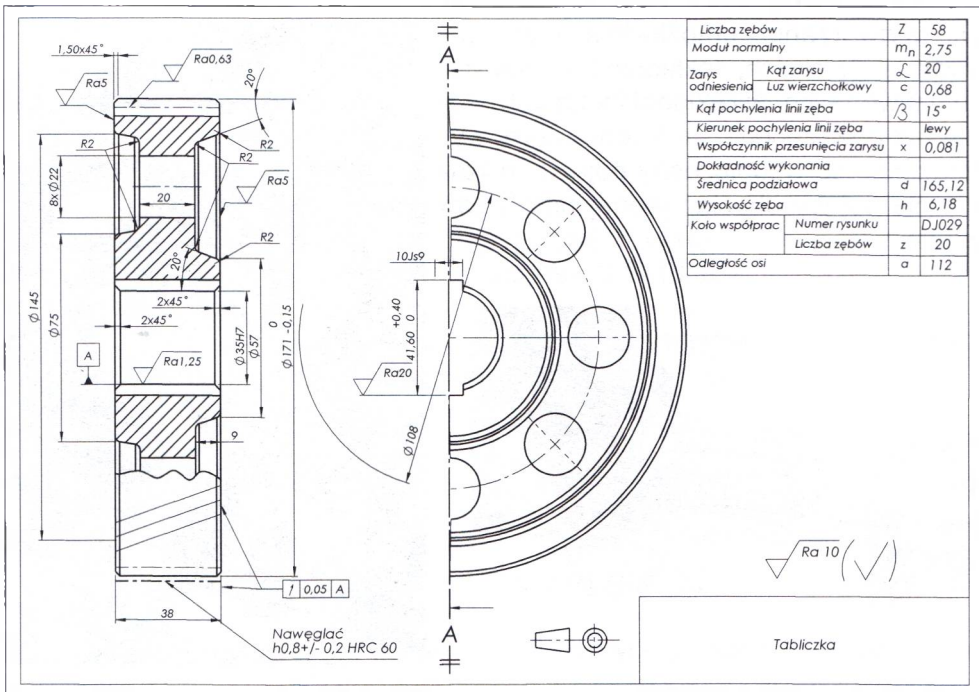
- średnicę wierzchołków koła,
- szerokość uzębienia,
- średnicę otworu piasty,
- powierzchnię ustalającą,
- geometryczną strukturę powierzchni bocznych zęba i innych powierzchni współpracy.

Tablica danych technicznych, którą należy umieszczać w prawym górnym rogu rysunku, powinna zawierać:

- wartość modułu,
- liczbę zębów,
- zarys odniesienia,
- kąt pochylenia linii zęba,
- kierunek pochylenia linii zęba,



Rys. 3.137. Koło zębate walcowe o zębach skośnych pokazane zgodnie z zasadami rysunku technicznego



Rys. 3.138. Rysunek wykonawczy koła zębatego

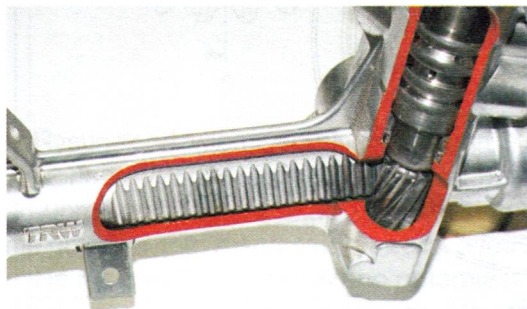
- średnicę podziałową,
- współczynnik przesunięcia zarysu odniesienia,
- grubość zęba,
- klasę dokładności wykonania,
- odległość osi,
- parametry koła współpracującego.

### 3.9.12. Przekładnie zębate w pojazdach samochodowych

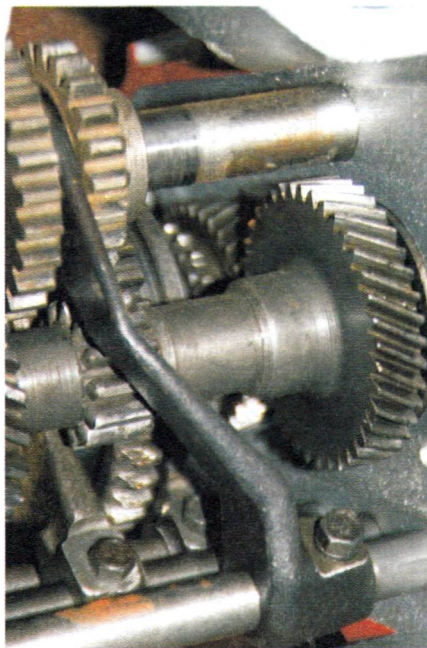
Zbyt mały zakres prędkości obrotowych samochodowego silnika spalinowego uniemożliwia pokrycie pełnego zakresu prędkości jazdy pojazdu. To samo dotyczy wartości momentu obrotowego przenoszonego z silnika spalinowego na koła napędzane. Bardzo istotna jest również możliwość odłączenia układu napędowego podczas pracy silnika. Dzięki zastosowaniu przełożeń w układzie przeniesienia napędu można sprostać wymaganiom dotyczącym pojazdów samochodowych.

Przekładnie zębate w pojazdach samochodowych najczęściej występują w skrzynkach biegów (rys. 3.139) lub skrzynkach przekładniowych, reduktorach, przekładniach głównych, mechanizmach różnicowych i skrzynkach rozdzielczych.

Przekładnie zębate w pojazdach samochodowych można znaleźć także poza układem napędowym. Typowymi przykładami są: przekładnia kierownicza (rys. 3.140), pompa oleju, napęd rozrządu, mechanizm napędowy wycieraczki szyby przedniej. Coraz doskonalsze techniki wytwarzania umożliwiają wyprodukowanie niedrogich, dokładnie wykonanych i niezawodnych przekładni zębatych. Są one tak powszechne, że trudno nawet wyobrazić sobie współczesny pojazd, w którym nie byłoby chociaż jednej przekładni zębatej.



**Rys. 3.140.** Zębatkowa przekładnia kierownicza samochodu



**Rys. 3.139.** Przykład zastosowania przekładni zębatych w skrzynce biegów

## 3.10. Przekładnie cierne

### 3.10.1. Klasyfikacja i charakterystyka przekładni ciernych

Przekładnie cierne umożliwiają przekazywanie momentu obrotowego za pośrednictwem sił tarcia, uzyskiwanych w wyniku docisku ich elementów. Materiał elementów ciernych powinien charakteryzować się jak największym współczynnikiem tarcia. Nieuniknione jest powstawanie poślizgu w przekładni ciernej.

Koła przekładni ciernych mogą mieć kształt walca, stożka lub tarczy. Osie kół mogą być do siebie równoległe (jak w walcowych przekładniach zębatych) lub prostopadłe (jak w stożkowych przekładniach zębatych). Z uwagi na zbyt duże poślizgi unika się przekładni ciernych o osiach wchrowatych.

Zaletami przekładni ciernych są:

- prosta budowa,
- płynna praca,
- łatwość zmiany przełożenia oraz kierunku obrotów,
- cichobieżność.

Wady przekładni ciernych to:

- duże naciski na wały i łożyska z uwagi na konieczny silny docisk elementów przekładni,
- trudności z uzyskaniem stałego przełożenia z powodu poślizgu,
- możliwość przenoszenia niedużych sił (maksymalna moc przenoszona wynosi kilkanaście kilowatów),
- duże zużycie kół ciernych,
- duży ciężar i znaczne wymiary zewnętrzne,
- zmienna sprawność (w zależności od poślizgu 70 do 98%).

Rozróżniamy przekładnie cierne:

- o stałym przełożeniu (rys. 3.141a, b),
- o zmiennym przełożeniu, które mogą być:
  - zwykłe bez elementu pośredniczącego (rys. 3.141c),
  - zwykłe z elementem pośredniczącym (rys. 3.141d, e, f),
  - planetarne.

Przełożenie najprostszej przekładni ciernej o stałym przełożeniu i kołach walcowych gładkich oblicza się na podstawie wzoru

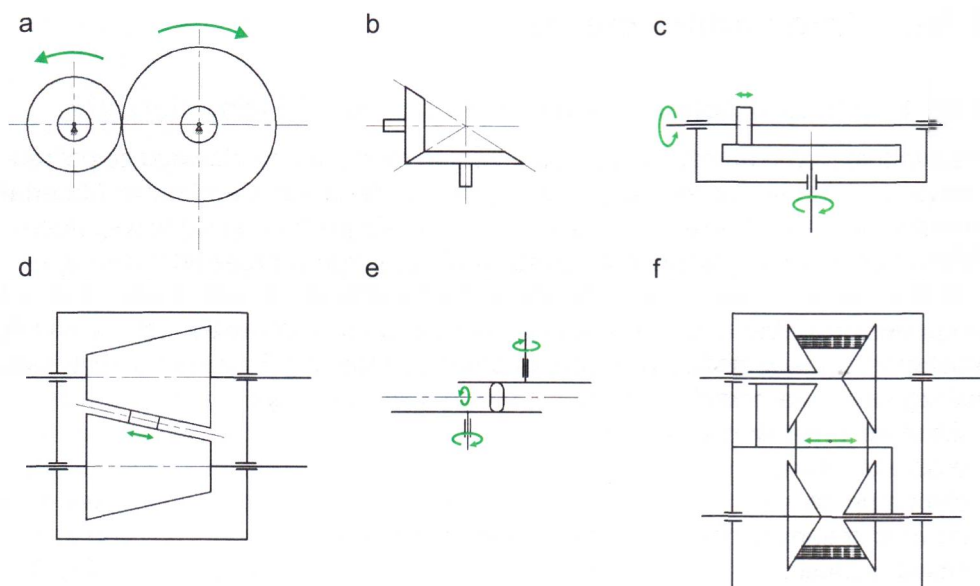
$$i = \frac{D_2}{D_1 \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (3.228)$$

gdzie:

$D_1, D_2$  – średnice kół ciernych,

$\varepsilon$  – wartość poślizgu, wynosząca przeciętnie 0,2...3% – w zależności od zastosowanych materiałów.

Obliczenia wytrzymałościowe przekładni ciernych przeprowadza się na podstawie warunku na naciski powierzchniowe. Kolejne etapy obliczeń zależą od indywidualnych cech projektowanej przekładni ciernej.



**Rys. 3.141.** Schematy wybranych przekładni ciernych  
 a – walcowa o stałym przełożeniu, b – stożkowa o stałym przełożeniu, c – zwykła o zmiennym przełożeniu, d, e, f – zwykle o zmiennym przełożeniu z elementem pośredniczącym

### 3.10.2. Zastosowanie przekładni ciernych

Przekładnie cierne wykorzystuje się najczęściej jako **przekładnie o zmiennym przełożeniu – wariatory**. Występuje wiele różnych rozwiązań tych przekładni. Zasada zmiany przełożenia polega na przesuwaniu elementów względem siebie w taki sposób, aby promienie ich współpracy ulegały zmianie.

Przykładem **przekładni ciernej o stałym przełożeniu** jest napęd prądnicy w rowerze od obracającego się koła ogumionego (tzw. dynamo). Jasność świecenia lampki zależy od prędkości obrotowej koła (prędkości jazdy roweru). W przypadku zatrzymania roweru dynamo nie wytwarza prądu, a lampka rowerowa gaśnie. W złych warunkach atmosferycznych w napędzie tym występuje skłonność do zwiększania poślizgu z powodu zmniejszenia współczynnika tarcia o moką oponę roweru.

### 3.10.3. Oznaczanie przekładni ciernych na rysunkach technicznych

Zasady rysowania przekładni ciernych są podobne jak innych elementów maszyn i urządzeń. Najczęściej występującą częścią jest koło, w którym wyróżnia się piastę, tarczę i wieniec. Elementy te przedstawia się według ogólnych zasad rysunku technicznego.



## 3.11. Przekładnie cięgnowe

### 3.11.1. Klasyfikacja i charakterystyka przekładni cięgowych

**Przekładnie cięgnowe** umożliwiają przeniesienie napędu na znaczne odległości dzięki występowaniu między kołami czynnym i biernym pośredniego cięgna o małej podatności na rozciąganie i dużej podatności na zginanie.

W zależności od rodzaju cięgna rozróżnia się przekładnie cięgnowe:

- pasowe (sprzęgnięcie cierne lub kształtowe),
- łańcuchowe (sprzęgnięcie kształtowe).

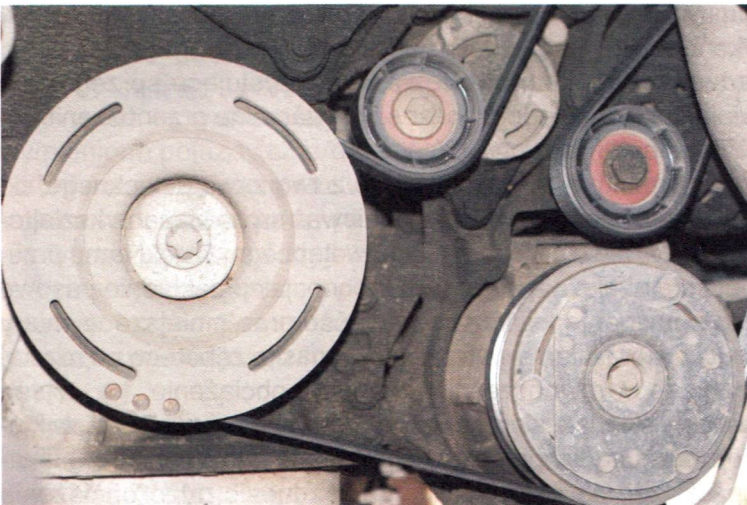
Z uwagi na rodzaj paska występują przekładnie pasowe:

- płaskie,
- klinowe (zwykłe i wieloklinowe),
- okrągłe,
- zębate.

Ze względu na rodzaj łańcucha spotyka się przekładnie z łańcuchem:

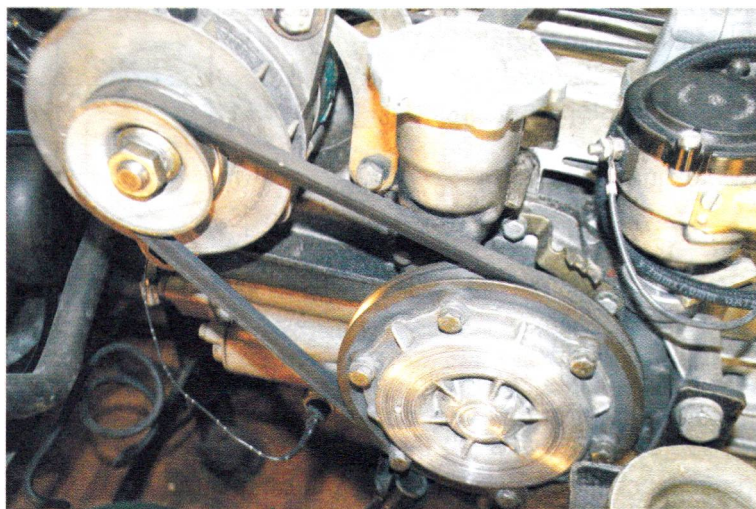
- płytkowym (np. w rowerze),
- zębatym (np. w pile łańcuchowej).

Przekładnie cięgnowe mają wiele zalet i dlatego są często stosowane w budowie maszyn. Umożliwiają przenoszenie dużych momentów obrotowych na znaczną odległość. Pasy stosowane w motoryzacji wykonuje się jako bezkońcowe, niewymagające łączników. Konieczna jest natomiast regulacja naciągu takiego pasa, ponieważ podczas pracy ulega on wydłużeniu. Naciąg pasów realizuje się przez przesuwanie jednego z kół (zwykle wraz z silnikiem lub napędzaną prądnicą) albo za pomocą dodatkowych rolek – napinaczy, które naprężają pas (rys. 3.142).



Rys. 3.142. Przykład rozwiązania naciągu pasa za pomocą napinacza

**Przekładnie pasowe klinowe.** Pasy klinowe (rys. 3.143) zwykle mają przekrój trapezowy. Wykonuje się je przez połączenie kilku warstw tkaniny gumą. Często są dodatkowo zbrojone w warstwie obojętnej linkami kordowymi, poliamidowymi lub stalowymi. Zarówno pasy klinowe, jak i wieńce kół rowkowych są znormalizowane. Przekładnie pasowe klinowe działają na zasadzie sprężenia ciernego i dlatego wymagają naciągu wstępnego. Z uwagi na możliwość występowania poślizgu przekładnie pasowe klinowe nie nadają się do precyzyjnego przenoszenia ruchu.



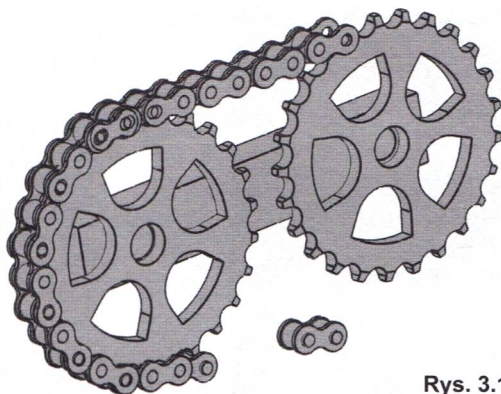
Rys. 3.143. Napęd alternatora paskiem klinowym (regulacja naciągu przez odsuwanie alternatora)

Przenoszenie większych obciążeń umożliwiają paski wieloklinowe, które współpracują z kołami wielorowkowymi (patrz rys. 3.142). Konstrukcje takie bardzo się upowszechniły i w większości przypadków zastąpiły paski klinowe, np. w napędach osprzętu silników samochodowych. Przekładnie z paskami wieloklinowymi również wykorzystują sprężenie ciernie.

**Przekładnie pasowe zębate i łańcuchowe,** wykorzystujące sprężenie kształtowe, umożliwiają dokładne, jednoznaczne i powtarzalne przeniesienie ruchu, nawet przy dużych momentach obciążających.

Paski zębate są zbrojone linkami stalowymi lub z tworzywa sztucznego, co zapewnia im małą odkształcalność wzdłużną. Ponieważ są powiązane kształtowo z kołami, wymagają tylko niewielkiego naciągu wstępnego. Dzięki temu przekładnie pasowe zębate nie obciążają łożysk tak mocno, jak przekładnie pasowe klinowe. Brak poślizgu powoduje większą sprawność oraz mniejsze wymiary przekładni. Do pełnego wykorzystania wytrzymałości paska zębatego na rozciąganie wystarczy, aby 6 zębów równocześnie przenosiło obciążenie.

Przekładnie łańcuchowe składają się z kół łańcuchowych oraz łańcucha, w którym można wyróżnić szereg ogniw połączonych przegubowo (rys. 3.144). Pracują podobnie jak paski zębate i również mogą przenosić duże obciążenia na znaczne odległości.



Rys. 3.144. Budowa przekładni łańcuchowej

Niestety, mają wiele wad ograniczających ich powszechne zastosowanie, gdyż:

- są hałaśliwe,
- muszą być smarowane,
- są kosztowne,
- wymagają regulacji naciągu,
- mogą ulec zerwaniu przy nagłym przeciążeniu,
- nie zabezpieczają przed przeciążeniem innych elementów przenoszących napęd.

### 3.11.2. Zastosowanie przekładni cięgowych

Przekładnie cięgnowe wykorzystuje się przede wszystkim w razie konieczności przeniesienia napędu na znaczne odległości. Cierne przekładnie cięgnowe o zmiennym przełożeniu stosuje się w układach napędowych pojazdów o niewielkiej masie. Najczęściej spotyka się je w skuterach, czterokołowcach i gokartach. Dzięki zmiennemu przełożeniu sterowanemu w sposób ciągły wariatory pełnią w nich funkcję automatycznej skrzynki biegów. Dzięki nim wymienione pojazdy są proste w obsłudze i eksploatacji. Schemat takiej przekładni pokazano na rysunku 3.141f, a przykład – na rysunku 3.145. Dwa koła pasowe są połączone paskiem klinowym. Dociskanie do siebie połówek pierwszego koła powoduje odsuwanie się od siebie połówek koła drugiego, a tym samym zwiększanie prędkości obrotowej. Najczęściej docisk koła odbierającego napęd jest realizowany za pomocą sprężyny. Daje to możliwość korekcji ewentualnego luzu, związanego ze zużywaniem się i wyciąganiem paska.

Przekładnie łańcuchowe stosuje się powszechnie w rowerach, motorowerach i motocyklach do przeniesienia napędu ze skrzynki biegów na tylne koło napędowe (rys. 3.146). Często wykorzystuje się je także w silnikach samochodowych i motocyklowych (rys. 3.147).



**Rys. 3.145.** Zastosowanie wariatora do przeniesienia napędu w samochodzie osobowym. Sterowanie przełożeniem odbywa się pneumatycznie. Rowki widoczne po wewnętrznej stronie paska ułatwiają dopasowanie go do średnicy koła pasowego



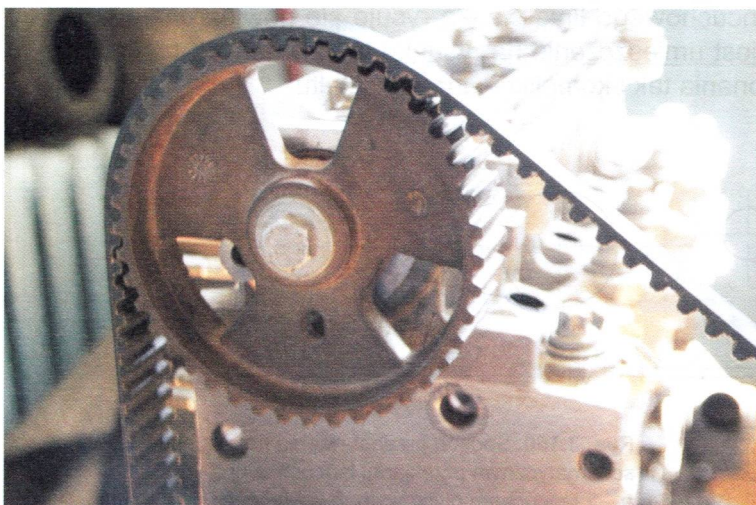
**Rys. 3.146.** Przeniesienie napędu w motocyklu za pomocą przekładni łańcuchowej

Typowym przykładem zastosowania pasków zębatych w samochodach jest napęd mechanizmu rozrzędu (rys. 3.148), lecz można je znaleźć także np. w układach przeniesienia napędu motocykli.

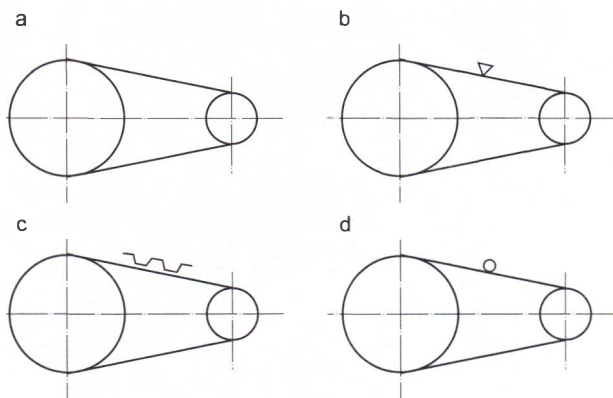
W napędzie rozrzędu niektórych wielozaworowych silników o dwóch wałach rozrzędu umieszczonych w głowicy spotyka się jednocześnie dwie przekładnie proste – łańcuchową i pasową zębatą. Jedna z przekładni służy do przeniesienia napędu z wału korbowego na jeden z wałów rozrzędu, a za pośrednictwem drugiej przekładni jest napędzany drugi wał rozrzędu.



Rys. 3.147. Przykład zastosowania przekładni łańcuchowych w silniku motocykla żużlowego



Rys. 3.148. Pasek zębaty napędu wału rozrządu umieszczonego w głowicy silnika



**Rys. 3.149.** Sposób przedstawienia na rysunku schematycznym przekładni pasowej

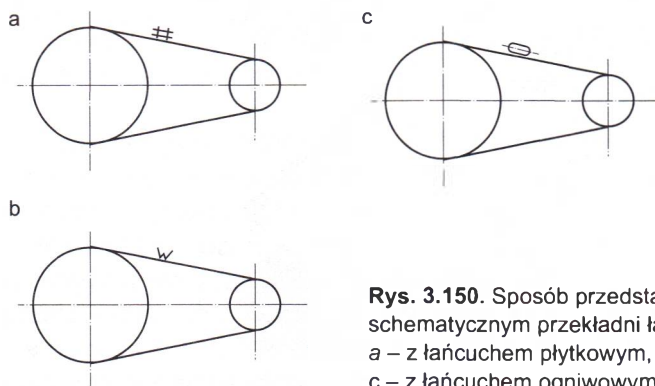
a – z pasem płaskim,  
b – z pasem klinowym,  
c – z pasem zębatym,  
d – z pasem okrągłym

### 3.11.3. Oznaczanie przekładni cięgnowych na rysunkach technicznych

Przekładnie cięgnowe na rysunku technicznym należy przedstawiać w sposób uproszczony. Najczęściej rysunek całej przekładni odzwierciedlają dwa koła połączone cięgnem, pokazanym za pomocą linii z symbolem oddającym kształt nałożonego pasa, łańcucha lub liny (rys. 3.149). Podobnie jak przekładnie z pasem płaskim, rysuje się przekładnie łańcuchowe (rys. 3.150).

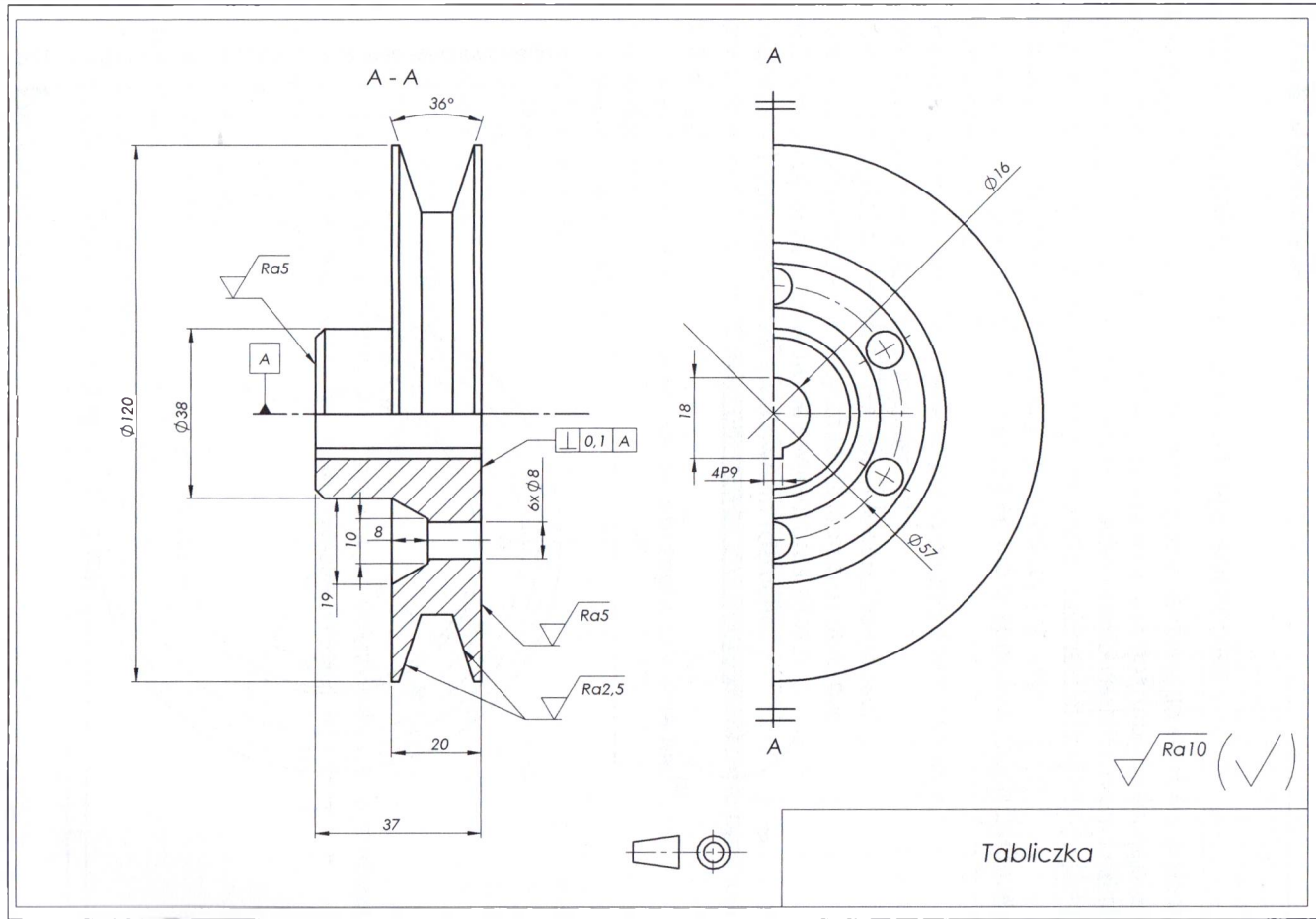
Wszystkie rodzaje cięgien są znormalizowane. Dobiera się je na podstawie katalogów producentów. Rysunki wykonawcze stosuje się do elementów klasy koła. Przykład rysunku wykonawczego koła przekładni pasowej z paskiem klinowym podano na rysunku 3.151.

Przykładowy rysunek wykonawczy koła łańcuchowego przedstawiono na rysunku 3.152. Konstrukcja koła zależy od rodzaju łańcucha. Rysunek koła łańcuchowego przypomina rysunek koła zębatego. W odróżnieniu jednak od niego, na rysunku koła łańcuchowego linią cienką rysuje się powierzchnię podstaw zębów. Konieczne jest umieszczenie na rysunku tablicy danych technicznych, niezbędnej do wykonania tak skomplikowanego kształtu.

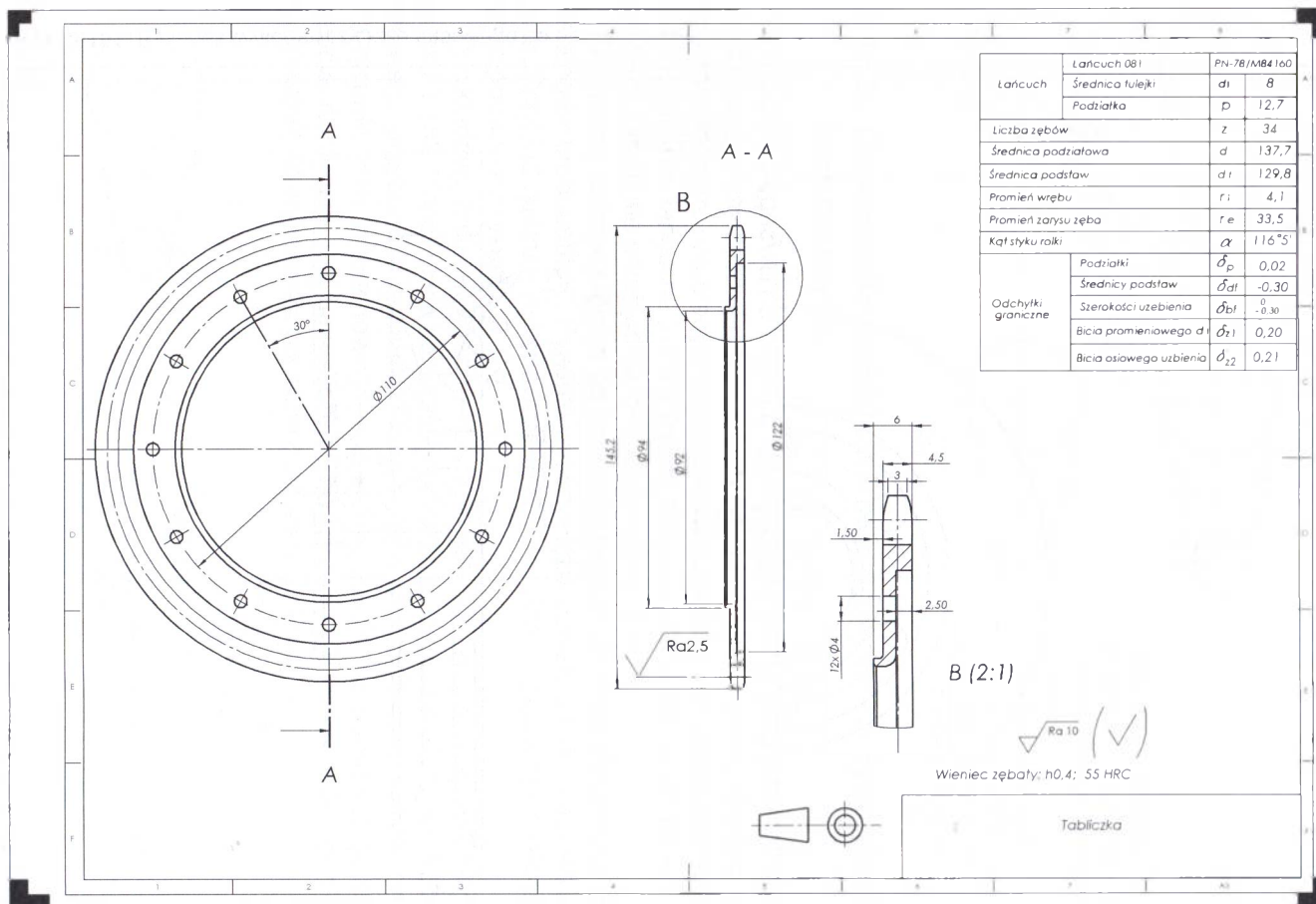


**Rys. 3.150.** Sposób przedstawienia na rysunku schematycznym przekładni łańcuchowej

a – z łańcuchem płytkowym, b – z łańcuchem zębatym,  
c – z łańcuchem ogniowym



Rys. 3.151. Rysunek wykonawczy koła pasowego do paska klinowego



Rys. 3.152. Rysunek wykonawczy koła łańcuchowego



## 3.12. Sprzęgła

### 3.12.1. Charakterystyka i rodzaje sprzęgieł

**Sprzęgło** to zespół układu napędowego, przeznaczony do łączenia wałów oraz przekazywania momentu obrotowego z wału czynnego (napędzającego) na wał bierny (napędzany) bez zmiany kierunku ruchu obrotowego. Sprzęgło składa się z członu czynnego, członu biernego i łącznika. Łącznikiem może być jedna lub kilka części maszynowych albo czynnik roboczy (np. olej).

Istnieje bardzo dużo rodzajów sprzęgieł, które spełniają różne zadania. Najważniejsze z nich to:

- łączenie elementów w celu przeniesienia momentu obrotowego,
- zabezpieczenie przed przeciążeniem,
- eliminacja błędów montażowych (np. niewspółosiowości),
- samoczynne rozłączanie przy zmianie kierunku obrotów,
- możliwość odłączenia wałów bez wyłączenia silnika,
- łagodzenie uderzenia przy gwałtownym rozruchu,
- zwiększenie zakresu prędkości obrotowej, zwłaszcza w zakresie prędkości minimalnych.

Z uwagi na sposób połączenia wałów **sprzęgła** dzieli się na:

– **nierozłączne**:

– **niepodatne skrętnie**:

- sztywne proste:
  - łukowe,
  - tulejowe,
  - kołnierzowe;
- luźne (samonastawne):
  - proste: kłowe, zębate, Oldhama,
  - przegubowe: krzyżakowe (Cardana), dwukrzyżakowe, membranowe, sprężynowe, Rzeppa, Bierfielda, Weissa, Tracta;

– **podatne skrętnie**:

- oponowe (kabłakowe),
- sprężynowe,
- wkładkowe tulejowe;

– **rozłączne**:

– **sterowane z zewnątrz**:

- włączane przy różnej prędkości obrotowej:
  - tarczowe,
  - wielopłytkowe cierne,
  - promieniowe,
  - osiowe,
  - obwodowe,
  - stożkowe cierne;
- włączane przy jednakowej prędkości obrotowej:

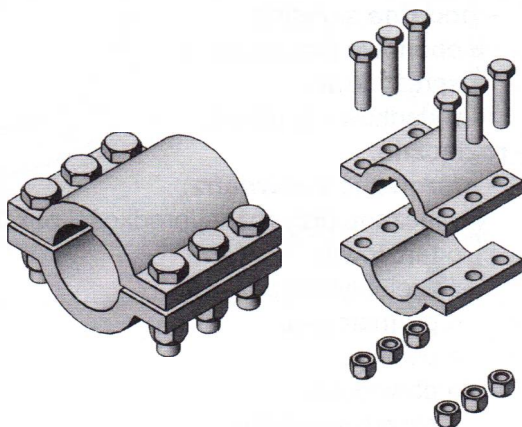
- kłowe,
- zębate;
- **samoczynne:**
  - sterowane siłą bezwładności:
    - rozruchowe,
    - proskowe;
  - sterowane kierunkiem napędu:
    - kłowe,
    - zapadkowe cierne;
- **bezpieczeństwa:**
  - **kółkowe,**
  - **cierne;**
- **samonastawne;**
- **sterowane;**
- **elektromagnetyczne;**
- **hydrokinetyczne;**
- **odśrodkowe;**
- **półodśrodkowe.**

Ze względu na to, czy człon napędzany porusza się z tą samą prędkością obrotową, co napędzający, występują sprzęgła:

- przymusowe;
- poślizgowe:
  - indukcyjne,
  - hydrokinetyczne,
  - rozruchowo-przeciążeniowe,
  - przeciążeniowe (bezpieczeństwa),
  - rozruchowe,
  - wyprzedzeniowe,
  - posiłkowe.

**Sprzęgła nierozłączne** łączą człony czynny i bierny na stałe, tzn. nie można ich rozłączyć podczas pracy (jest to możliwe wyłącznie podczas demontażu). Zadaniem sprzęgieł sztywnych prostych jest uniemożliwienie przesunięcia względnego łączonych elementów w czasie pracy. Nazwy tych sprzęgieł są związane z ich kształtem.

**Sprzęgło łukowe** (rys. 3.153) składa się z dwóch łuków (nazwa i zasada działania podobna do wykorzystywanej przy unieruchamianiu złamanych kości kończyn)



Rys. 3.153. Budowa sprzęgła łukowego

w kształcie tulei przeciętej wzdłużnie, którymi łączy się dwa wały. Moment obrotowy jest przenoszony przez siły tarcia powstałe w wyniku zaciśnięcia tulei na obu wałach. Wały te mogą być dodatkowo połączone ze sprzęgłem za pomocą wpustów.

*Sprzęgło tulejowe* ma postać tulei łączącej wały. Moment obrotowy jest przenoszony za pośrednictwem łączników, którymi mogą być kołki, kliny lub wpusty (rys. 3.154).

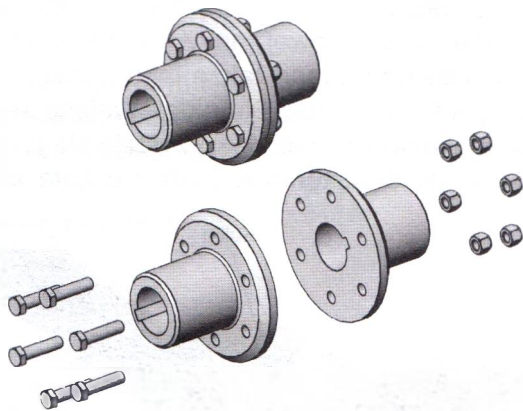
*Sprzęgło kołnierzowe* stanowią dwa kołnierze połączone ze sobą śrubami rozmieszczonymi na obwodzie (rys. 3.175). Kołnierze są założone na wały i połączone z nimi za pomocą wpustów albo mogą stanowić całość z wałem.

Zaletą *sprzęgieł samonastawnych* jest możliwość połączenia wałów o niepokrywających się osiach. Dzięki nim można skompensować błędy montażowe oraz odkształcanie się wałów podczas pracy. Umożliwiają one niewielkie ruchy wałów względem siebie. Przykłady tego rodzaju sprzęgieł pokazano na rysunku 3.156.

Sprzęgło kłowe jest środkowane za pomocą tulei. Większe kąty ugięcia wałów przenoszą sprzęgła samonastawne przegubowe. Klasycznym przykładem jest sprzęgło krzyżakowe (Cardana), przedstawione na rysunku 3.157. Można nim łączyć np. wały napędowe oraz ele-



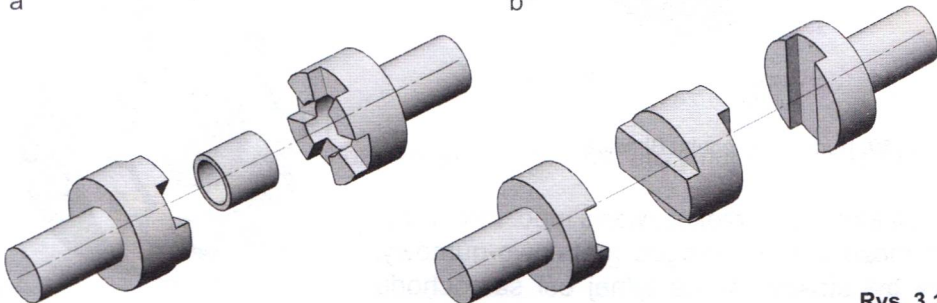
Rys. 3.154. Sprzęgło tulejowe wpustowe



Rys. 3.155. Sprzęgło kołnierzowe

a

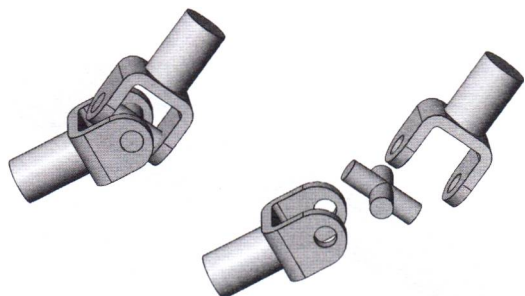
b



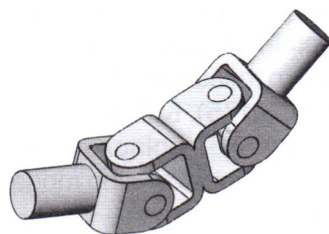
Rys. 3.156.

Przykłady sprzęgieł nierozłącznych luźnych  
a – sprzęgło kłowe, b – sprzęgło Oldhama

menty wału kierownicy. Kąt między osiami wałów może dochodzić do  $40^\circ$ . Niestety, sprzęgło krzyżakowe, zwane przegubem Cardana, zmienia chwilową prędkość obrotową wału biernego w stosunku do wału czynnego – w ciągu jednego obrotu sinusoidalnie przyspiesza i zwalnia. Aby temu zapobiec, stosuje się drugi przegub Cardana, zamontowany w sposób eliminujący zmiany prędkości. Tak powstały sprzęgła dwukrzyżakowe (rys. 3.158).

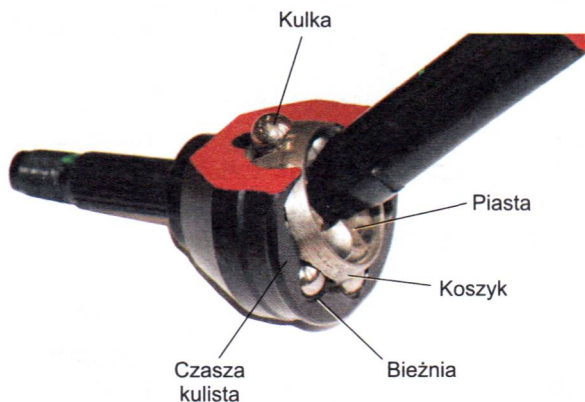


**Rys. 3.157.** Budowa sprzęgła krzyżakowego (Cardana)



**Rys. 3.158.** Sprzęgło dwukrzyżakowe

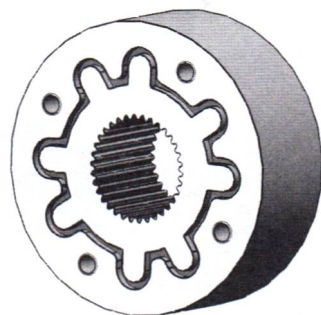
Sprzęgła łączące wały niewspółosiowe, które nie zmieniają chwilowej prędkości obrotowej, nazywamy równobieżnymi (w pojazdach samochodowych są one znane także jako przeguby homokinetyczne). Należą do nich przeguby Rzeppa, Birfielda, Weissa oraz Tracta. Spośród nich w samochodach najczęściej wykorzystuje się przegub Birfielda (rys. 3.159), który służy do przenoszenia napędu na koła kierowane w pojazdach z przednim zespołem napędowym.



**Rys. 3.159.** Budowa przegubu Birfielda

tów, na które jest przekazywana moc. Jako przykład może służyć przegub metalowo-gumowy, który był stosowany na tylnej osi samochodu FIAT 126P (rys. 3.160). W przegubie metalowo-gumowym pierścienie zewnętrzny z wewnętrznym

*Sprzęgła podatne skrętnie umożliwiają chwilowy względny obrót wałów, co zmniejsza wpływ chwilowego wzrostu obciążeń dynamicznych na uszkodzenie łącznika i elemen-*



**Rys. 3.160.** Przegub metalowo-gumowy

nym są połączone zawulkanizowaną gumą, która podczas przekazywania napędu przez przegub ulega odkształceniu.

*Sprzęgła samoczynne* umożliwiają połączenie lub rozłączenie wałów przy zmianie kierunku prędkości obrotowej, wartości prędkości lub wzroście momentu obrotowego.

*Sprzęgła bezpieczeństwa* rozłączają wały w przypadku nagłego wzrostu obciążenia.

Przekazywanie napędu może się odbywać nie tylko w sposób mechaniczny, lecz także z wykorzystaniem innych zjawisk fizycznych, takich jak: wymuszenie ruchu strumieniem przepływającej cieczy – w przypadku sprzęgła hydrokinetycznego (wykorzystywane np. w automatycznych skrzyniach biegów), przyciąganie się elementów metalowych w wyniku działania elektromagnesów – w przypadku sprzęgła elektromagnetycznego.

Zasada działania sprzęgła hydrokinetycznego przypomina wymuszenie obrotu łopatek wirnika jednego wentylatora przez napędzany, stojący naprzeciwko niego, drugi wentylator. Oczywiście, cały układ jest zamknięty w szczelnym zbiorniku i wypełniony olejem w 70...80%. Występujące w sprzęgle hydrokinetycznym dwa wirniki nazywa się pompą (wymusza przepływ cieczy) i turbiną (odbiera energię od poruszającej się cieczy).

Zarówno liczba kryteriów podziału, jak i różnorodność rozwiązań konstrukcyjnych uniemożliwiają szczegółowe omówienie wszystkich sprzęgieł. Trzeba brać też pod uwagę, że wiele sprzęgieł spełnia jednocześnie kilka zadań i stąd trudności z jednoznacznym sklasyfikowaniem każdego z nich. Jeżeli podejmuje się decyzję o doborze sprzęgła, należy korzystać z katalogów wytwórni, a wybór uzależnić od szczegółowej analizy żądanych cech.

### 3.12.2. Dobór i obliczanie sprzęgieł

Sprzęgła służą do przekazywania momentu obrotowego z silnika rozwijającego określoną moc. Znając moc silnika, moment obrotowy można przedstawić za pomocą wzoru

$$M = \frac{P}{\omega} \quad (3.229)$$

gdzie:

$P$  – moc,

$\omega$  – prędkość kątowna.

Korzystając z najczęściej używanych jednostek, otrzymuje się zależność

$$M = 9550 \frac{P}{n} \text{ [N} \cdot \text{m]} \quad (3.230)$$

gdzie:

$P$  – moc [kW],

$n$  – prędkość obrotowa [obr/min].

Bardzo często sprzęgła w nieustalonych stanach pracy ulegają przeciążeniom. Fakt ten uwzględnia się, stosując w obliczeniach współczynnik zwiększający wartość momentu obrotowego, tzw. współczynnik przeciążenia. Maksymalny moment obrotowy przenoszony przez sprzęgło można przedstawić jako

$$M_{\max} = \beta \cdot M \quad (3.231)$$

gdzie:

$\beta$  – współczynnik przeciążenia (w zależności od zastosowania przyjmuje się  $\beta = 1 \dots 6$ ),

$M$  – moment obrotowy obliczony ze wzoru (3.230).

Dla ciernych sprzęgieł głównych, które są najczęściej stosowane w układach napędowych pojazdów samochodowych, przyjmuje się następujące wartości współczynnika przeciążenia (tzw. zapasu sprzęgła):

- w samochodach osobowych  $\beta = 1,4 \dots 1,8$ ,
- w samochodach ciężarowych  $\beta = 1,5 \dots 2,5$ ,
- w autobusach  $\beta = 1,3 \dots 1,7$ .

Najczęściej sprzęgła dobiera się z katalogów ich producentów na podstawie wartości momentu obrotowego oraz średnicy czopa wału.

Podstawowe obliczenia sprzęgła ciernego (najczęściej używanego jako sprzęgło główne w samochodzie) to obliczenie jego wymiarów z warunku na naciski powierzchniowe oraz rozgrzewanie.

Aby sprzęgło pracowało poprawnie, moment tarcia  $M_r$  wytworzony w wyniku wzajemnego docisku tarcz, powinien być nie mniejszy niż moment maksymalny  $M_{\max}$ . Moment tarcia w sprzęgle można przedstawić za pomocą wzoru

$$M_r = i \cdot T \cdot \frac{D_m}{2} = i \cdot T \cdot r_m \quad (3.232)$$

gdzie:

$i$  – liczba par powierzchni trących (dla sprzęgła jednotarczowego  $i = 2$ , ponieważ powierzchnie trące występują z obu stron tarczy),

$T$  – siła tarcia, powstała w wyniku docisku tarcz do siebie, zależna od siły docisku  $F_w$  oraz współczynnika tarcia  $\mu$  materiału tarcz ciernych,

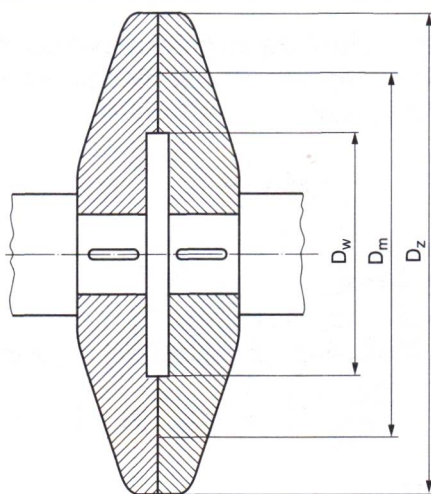
$D_m$  – średnia średnica tarcia (rys. 3.161),

$r_m$  – średni promień, czyli promień działania umownej wypadkowej siły tarcia, wytwarzającej moment tarcia.

Siłę tarcia oblicza się na podstawie równania

$$T = F_w \cdot \mu$$

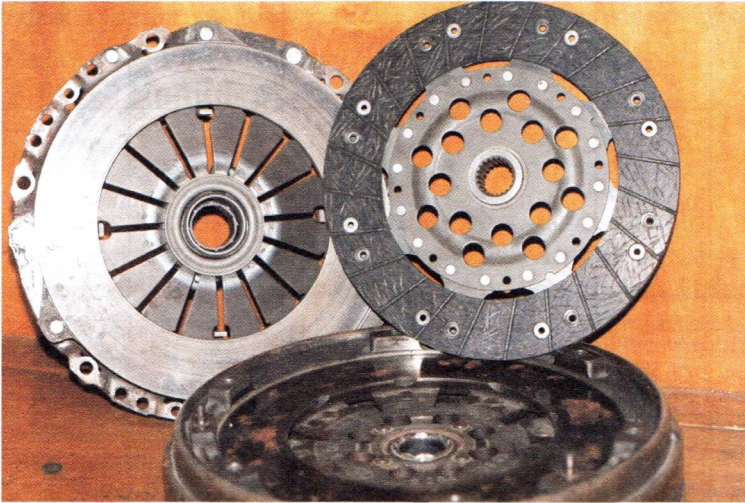
(3.233)



Rys. 3.161. Sprzęgło ciernie tarczowe płaskie (bez tarczy sprzęgłowej)

Ponieważ powierzchnia styku sprzęgła ma kształt płaskiego pierścienia kołowego (rys. 3.162) o promieniu zewnętrznym  $r_z$  i wewnętrznym  $r_w$ , średni promień dla takiej figury można obliczyć jako

$$r_m = \frac{2 r_z^3 - r_w^3}{3 r_z^2 - r_w^2} \quad (3.234)$$



Rys. 3.162. Główne podzespoły jednotarczowego sprzęgła ciernego

Upraszczając zagadnienie, średnicę  $D_m$  można obliczyć z zależności

$$D_m = \frac{D_z + D_w}{2} \quad (3.235)$$

gdzie:

$D_z$  – średnica zewnętrzna tarczy,

$D_w$  – średnica wewnętrzna tarczy.

Warunek wytrzymałości sprzęgła na naciski powierzchniowe można przedstawić za pomocą nierówności

$$p = \frac{F_w}{S} = \frac{F_w}{\frac{\pi}{4}(D_z^2 - D_w^2)} \leq k_o \quad (3.236)$$

Wartość  $k_o$  dobiera się w zależności od rodzaju materiałów pary cierniej (orientacyjne wartości podano w tabelicy 3-12).

Podczas pracy sprzęgła ciernego duże ilości energii zamieniają się w ciepło, co powoduje ich nagrzewanie. W związku z tym istnieje konieczność sprawdzenia sprzęgła na rozgrzewanie. Powinien być spełniony warunek

$$(p \cdot v)_{rzecz} \leq (p \cdot v)_{dop} \quad (3.237)$$

Tablica 3-12

## Orientacyjne wartości podstawowych parametrów materiałów ciernych sprzęgieł

Materiały pary ciernej		Współczynnik tarcia $\mu$		Temperatura dopuszczalna $t_{dop}$		Nacisk dopuszczalny $k_o$ [MPa]	$(p \cdot v)_{dop}$ [MN/(m $\cdot$ s)]
		na sucho	z olejem	trwale [°C]	krótko [°C]		
Żeliwo, staliwo lub stal	Żywica fenolowa	0,25	0,1+0,15	100	150	0,05÷0,7	0,3÷0,5
	Tkanina bawełniana nasyciona sztuczną żywicą	0,4÷0,65	0,1+0,2	100	150	0,05+1,2	0,5+2
	Tekstolit, wełna metalowa sprasowana z syntetyczną gumą	0,4+0,65	0,1+0,2	250	300	0,05+8,0	0,3+0,5
	Azbest ze sztuczną żywicą prasowany	0,2+0,35	0,1+0,15	250	500	0,05÷8,0	0,5+1,0
Stal	Węgiel grafityzowany	0,25	0,05+0,1	300	500	0,05÷2	1,0+2,0
Żeliwo, staliwo lub stal	Drewno skóra korek	0,2+0,35	0,1+0,15	100	160	0,05÷0,5	0,4÷2,0
		0,3+0,6	0,12÷0,15	100		0,05+0,3	0,3+1,0
		0,3+0,5	0,15÷0,25	100		0,05÷0,1	0,6+0,8
Stal hartowana	Stal hartowana lub spiek metalowy						
a) zwilżone olejem b) z przepływem oleju			0,12+0,17 0,08+0,12	100 100		0,5÷3,0 0,5+4,0	2÷4 4+6
Żeliwo	Stal	0,15+0,2	0,03+0,06	200	300	0,8+1,4	2+4
Żeliwo	Żeliwo	0,15+0,25	0,02+0,1	200	300	1,0+1,8	1,3+3



gdzie iloczyn  $p \cdot v$ , będący umowną miarą wydzielanego ciepła, jest wyrażony w MN/(m · s) (tabl. 3-12).

Wartość prędkości obwodowej  $v$  oblicza się na średniej tarcia  $D_m$ .

Na zamieszczonym zdjęciu (patrz rys. 3.162) widać różnice w budowie rzeczywistej tarczy czarnej sprzęgła i obliczeniowej tarczy teoretycznej. Nacięte rowki i skomplikowany kształt służą zwiększeniu współczynnika tarcia, zmniejszeniu masy, ułatwieniu oddawania ciepła oraz zwiększeniu wytrzymałości. Zasady obliczeń dla uproszczonego modelu oraz rzeczywistego sprzęgła są podobne.

### 3.13. Hamulce

#### 3.13.1. Charakterystyka i rodzaje hamulców

**Hamulce** to części maszyn służące do zwalniania, zatrzymywania lub regulacji prędkości ruchu maszyn. Działają na zasadzie zamiany energii kinetycznej na inny rodzaj energii, np. energię cieplną powstającą w wyniku tarcia.

Ze względu na rodzaj sprzężenia rozróżnia się hamulce:

- cierne,
- elektryczne,
- hydrauliczne,
- pneumatyczne.

W zależności od rodzaju mechanizmu uruchamiającego **hamulce cierne** dzielą się na:

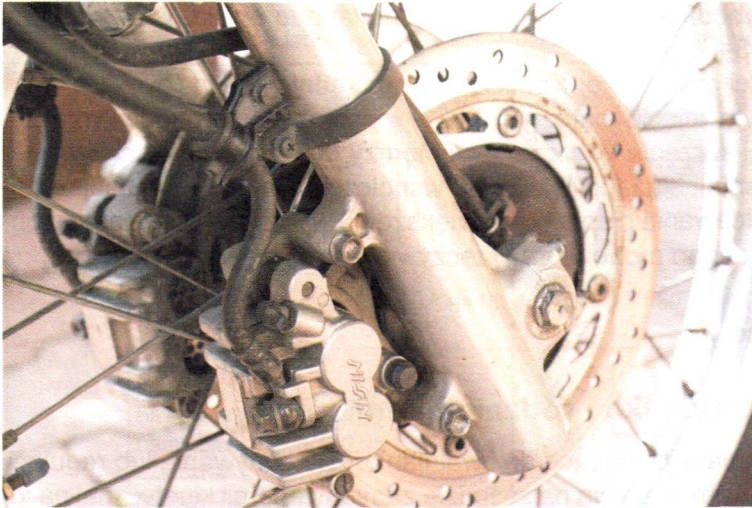
- mechaniczne,
- elektryczne,
- hydrauliczne,
- pneumatyczne,
- elektrohydrauliczne,
- elektropneumatyczne.

Z uwagi na budowę i zasadę działania **hamulce cierne** mogą być:

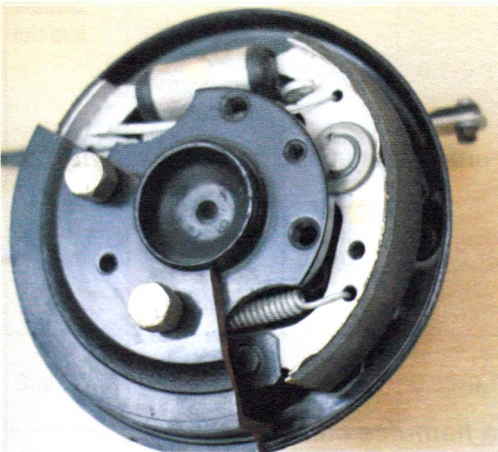
- tarczowe,
- szczękowo-bębnowe,
- taśmowe.

W hamulcu tarczowym (rys. 3.163) siła tarcia powstaje na skutek docisku klocków hamulcowych do tarczy obracającej się wraz z kołem. Zacisk hamulca jest zamocowany do nieruchomych elementów nośnych pojazdu. Z uwagi na wiele zalet w porównaniu z innymi hamulcami, a zwłaszcza możliwość wytwarzania dużej siły hamowania przy niewielkiej masie mechanizmu, hamulce tarczowe są bardzo często wykorzystywane w samochodach osobowych i motocyklach oraz pojazdach dostawczych.

W hamulcu bębnowym (rys. 3.164) moment hamujący powstaje w wyniku tarcia obracającego się bębna o nieruchome szczęki, najczęściej znajdujące się wewnątrz bębna. Szczęki są wyposażone w okładziny cierne o dużym współczynniku tarcia i małej ścieralności. Najczęściej stosowany rozpieracz hydrauliczny powoduje dociskanie szczęk do bębna.



Rys. 3.163. Hamulec tarczowy zastosowany w motocyklu

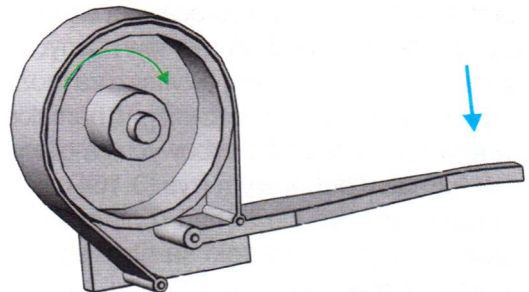


Rys. 3.164. Przykład hamulca szczękowo-bębnowego (wycięty fragment bębna odsłania szczęki i mechanizm rozpieracza hydraulicznego) w układzie Simplex

Hamulec taśmowy stanowi opasująca bęben taśma stalowa z przynitowaną okładziną cierną. Hamulce taśmowe wykorzystywano kiedyś jako hamulce awaryjne i postojowe, umieszczane na wale napędowym samochodów. Natomiast we współczesnych konstrukcjach stosuje się je często w układach sterowania automatycznych skrzynek biegów.

Z uwagi na charakter pracy hamulce można podzielić na:

- zaciskowe (współpracują ze sobą tylko w czasie hamowania – np. hamulec zasadniczy w samochodzie),



Rys. 3.165. Model hamulca taśmowego

– luzowe (na stałe są zaciśnięte, a luzują się przy włączaniu urządzenia – np. w przyczepach z hamulcami pneumatycznymi).

### 3.13.2. Dobór i obliczanie hamulców

Przy doborze oraz obliczaniu hamulców zakłada się, że moment tarcia  $M_T$ , wytworzony przez hamulec, musi pokonać zarówno maksymalny moment obrotowy  $M_o$ , jak i moment bezwładności hamowanego układu. Do obliczeń przybliżonych przyjmuje się wartość momentu tarcia, którą można opisać wzorem

$$M_T = (1,75 \dots 2,5) M_o \quad (3.238)$$

Większe wartości wybiera się przy większych prędkościach obrotowych oraz przy skracaniu czasu hamowania. Znając wartość momentu tarcia niezbędnego do zahamowania obracających się elementów, oblicza się siłę docisku szczęki do bębna lub klocka do tarczy, korzystając z zależności

$$M_T = T \cdot \frac{D}{2} = F_n \cdot \mu \cdot \frac{D}{2} \quad (3.239)$$

gdzie:

$T$  – siła tarcia klocka o bęben,

$D$  – średnica, na której działa klocek,

$\mu$  – współczynnik tarcia zależny od rodzaju materiału (patrz tabl. 3-12),

$F_n$  – siła docisku klocka do bębna.

Wymiary powierzchni ciernej klocka lub szczęki oblicza się z warunku na naciski powierzchniowe

$$p = \frac{F_n}{l \cdot b} \leq k_o \quad (3.240)$$

gdzie:

$l$  – długość klocka lub okładziny szczęki,

$b$  – szerokość klocka lub okładziny,

$k_o$  – dopuszczalne naciski jednostkowe (patrz tabl. 3-12).

Hamulce cierne sprawdza się na rozgrzewanie na takich samych zasadach, jak sprzęgła na podstawie nierówności

$$(p \cdot v)_{rzecz} \leq (p \cdot v)_{dop} \quad (3.241)$$

Podczas konstruowania hamulców szczękowo-bębnowych należy zwrócić uwagę na ułożenie szczęki względem obracającego się bębna. Jeżeli dociska na szczęką obraca się wokół punktu podparcia w tę samą stronę co bęben, nazywa się ją współbieżną, a jeżeli w przeciwną stronę – przeciwbieżną. Ponieważ rozkład sił jest zróżnicowany, szczęką przeciwbieżną jest „odpychana” od bębna i zużywa się wolniej, a szczęką współbieżną jest „wciągana” przez bęben i zużywa się szybciej.

Obliczając hamulce taśmowe (rys. 3.166), należy uwzględnić siłę tarcia zależną od sił naciągu cięgna  $F_1$ ,  $F_2$ , którą można opisać wzorem

$$T = F_1 - F_2 \quad (3.242)$$

Między siłami  $F_1$  i  $F_2$  występuje zależność

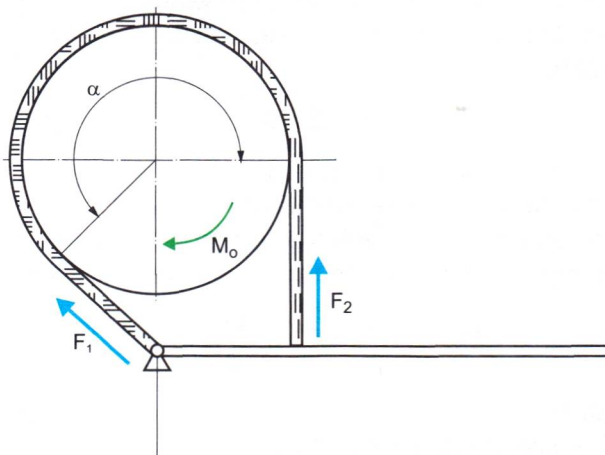
$$F_1 = F_2 \cdot e^{\mu \cdot \alpha} \quad (3.243)$$

gdzie:

$e$  – podstawa logarytmu naturalnego ( $e = 2,71$ ),

$\alpha$  – kąt opasania bębna hamulca, podawany w radianach,

$\mu$  – współczynnik tarcia taśmy o bęben.



Rys. 3.166. Schemat do obliczeń hamulca taśmowego

### 3.14. Zastosowanie programów wspomagających projektowanie do obliczania i konstruowania części maszyn

Obecnie konstruktorzy coraz chętniej korzystają z komputerowych programów wspomagających proces konstruowania, modelowania i wytwarzania nowych części. **Komputerowo wspomagane projektowanie CAD** (ang. *Computer Aided Design*) umożliwia opracowanie konstrukcji projektowanego elementu lub całego urządzenia w formie cyfrowego modelu ze zdefiniowanymi wymiarami, geometryczną strukturą powierzchni oraz własnościami wytrzymałościowymi, a bardzo często również materiałowymi. Współczesny proces konstrukcyjny najczęściej dzieli się na następujące etapy:

- uzgodnienie ogólnej koncepcji produktu (ze względu na późniejszy marketing bardzo często bierze się pod uwagę m.in. projekt artystyczny);
- wykonanie cyfrowego modelu;
- wykonanie cyfrowej makiety wyrobu z wykorzystaniem gotowych znormalizowanych części;

- dobór materiałów i przeprowadzenie obliczeń wytrzymałościowych oraz analiza pod kątem ewentualnej kolizji (czy w czasie ruchu części nie zaczepiają o siebie);
- wykonanie prototypu;
- wykonanie rysunków poszczególnych części;
- wykonanie instrukcji montażu;
- wykonanie instrukcji użytkownika;
- wykonanie ostatecznej prezentacji multimedialnej w celach marketingowych.

Wykorzystując oprogramowanie CAD, konstruktorzy mają łatwiejszy dostęp do różnych zasobów wiedzy, norm, przepisów oraz dyrektyw. Mogą równocześnie pracować nad jednym projektem, znajdując się nawet w dużym oddaleniu. Jest możliwe przesyłanie informacji na duże odległości przez sieć komputerową. Bardzo łatwo można powiązać projekt z gotowym wyrobem przez oprogramowanie CAD-CAM. Możliwe jest szybkie zaprogramowanie maszyny sterowanej numerycznie do wytworzenia nowego elementu. Dzięki temu częsta zmiana profilu produkcji nie stwarza trudności. Łatwe jest wykonanie skomplikowanych kształtów i szybka ich modyfikacja. Firmy oferujące nowe oprogramowanie lub nowsze wersje oprogramowania starają się, aby były bardziej przyjazne i łatwe do nauczenia dla obsługującego. Posługując się programami wspomagającymi, można szybko wprowadzać zmiany, usuwać usterki i wykonywać projekty na bazie istniejących gotowych wyrobów. Już na etapie projektowania możliwe jest uzyskanie odpowiedzi, czy dany podzespół lub część spełni wymagania wytrzymałościowe. Możliwa jest już wtedy optymalizacja konstrukcji oraz obniżenie kosztów produkcji. Często programy wspomagające obliczenia wytrzymałościowe instaluje się jako moduły dodatkowe do podstawowych programów typu CAD. Wówczas wprowadzanie przykładowych wymiarów w modelu detalu skutkuje automatycznym obliczeniem wytrzymałościowym tej części. Stanowi to znaczne przyspieszenie procesu projektowania.

**Metoda elementów skończonych (MES)** rozwija się od 1956 r. dzięki pracom wybitnych naukowców i matematyków oraz bardzo intensywnemu rozwojowi techniki obliczeniowej. Współczesny etap rozwoju MES polega na integracji opracowanych systemów obliczeniowych z systemami do modelowania geometrycznego CAD w jedną zamkniętą całość. MES jest metodą konsekwentnego poszukiwania przybliżonych rozwiązań wytrzymałościowych. Cechą zasadniczą metod przybliżonych jest zastępowanie układu o nieskończonej liczbie stopni swobody układem o skończonej ich liczbie. W MES mamy do czynienia z elementami o skończonych wymiarach, a nie z „nieskończone małymi elementami”. Podział konstrukcji na elementy skończone zależy od konstruktora. Zwiększenie liczby elementów, czyli zmniejszenie ich wymiarów, prowadzi jedynie do zagęszczenia miejsc – przekrojów, dla których otrzymujemy z obliczeń wartości pręemieszczeń i sił przekrojowych.

W metodzie elementów skończonych tworzy się model dyskretny konstrukcji, dzieląc ją na części zwane elementami skończonymi. Części te łączą się ze sobą w punktach, które nazywamy węzłami. Jeżeli określimy rodzaj i wymiary ele-

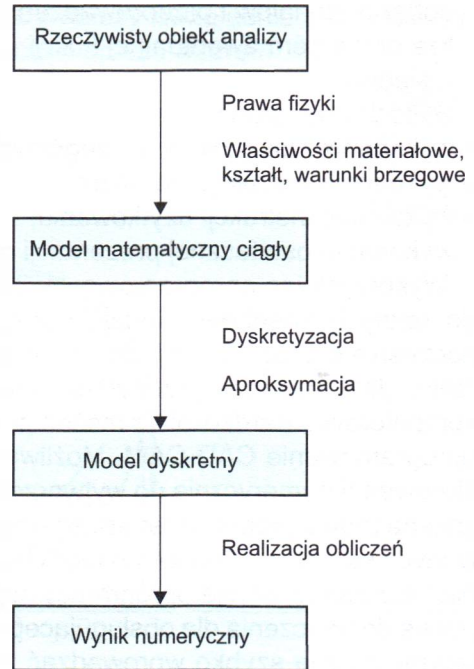
mentów, ich właściwości mechaniczne oraz sposób połączenia w węzłach, to na podstawie odpowiednich zależności teoretycznych i obliczeń numerycznych możemy uzyskać szczegółowe rozwiązanie postawionego zagadnienia.

Analiza konstrukcji metodą elementów skończonych polega więc na sformułowaniu odpowiedniego opisu matematycznego, a następnie rozwiązaniu postawionego problemu. Schemat postępowania przedstawiono na rysunku 3.167. Należy pamiętać, że warunkiem wiarygodności i praktycznej przydatności obliczeń metodą MES jest znajomość odpowiedniego modelu matematycznego. Może on być jednowymiarowy, dwuwymiarowy lub trójwymiarowy. W różny sposób odwzorowane mogą być: kształt, właściwości materiałowe, warunki podparcia i obciążenia konstrukcji.

Na przykład konstrukcja ramowa podwozia przyczepy samochodowej może być reprezentowana przez prosty model ramy trójwymiarowej, w którym kształt przekrojów prętów jest ukryty w podanych parametrach geometrycznych (pole przekroju, momenty bezwładności, położenie głównych osi bezwładności). Można jednak model ramy zbudować, wykorzystując powłokowe elementy skończone lub elementy trójwymiarowe. Model geometryczny w postaci linii, powierzchni oraz brył stanowi część całego modelu matematycznego i nie musi być wiernym odzwierciedleniem rzeczywistego kształtu badanego obiektu (im więcej uproszczeń, tym dokładniejsze wyniki). W odniesieniu do modelu geometrycznego zadajemy tak zwane warunki brzegowe, to znaczy sposób zamocowania (podparcia) i obciążenia konstrukcji. Na tak sformułowane zagadnienie nakładamy siatkę elementów skończonych, które są geometrycznymi figurami połączonymi ze sobą węzłami. Rozwiązanie układu równań metodą elementów skończonych prowadzi do wyznaczenia wszystkich przemieszczeń węzłowych. Następnie są obliczane odkształcenia i naprężenia wewnątrz kolejnych elementów skończonych. Korzystając z MES, zawsze należy pamiętać, że mamy do czynienia z metodą przybliżoną. Uzyskane wyniki mogą być obarczone błędem, którego wartość zależy od wielu czynników.

Pakiet metody elementów skończonych umożliwia:

- budowę modeli geometrycznych lub odtworzenie istniejących modeli, pochodzących z popularnych programów CAD,



**Rys. 3.167.** Schemat postępowania przy rozwiązywaniu zagadnień metodą elementów skończonych

- wprowadzenie obciążeń eksploatacyjnych lub innych warunków związanych z pracą analizowanego układu,
- analizę stanów naprężeń, rozkładu temperatur i in.,
- optymalizację projektowanego układu na etapie wstępnych obliczeń,
- dokonanie symulacji pracy układu niemożliwych do wykonania w inny sposób.

Metoda elementów skończonych jest wykorzystywana do analizy wytrzymałościowej statków powietrznych, pojazdów mechanicznych i konstrukcji lądowych. Stosowana jest również w elektronice, energetyce, technikach wytwarzania, przemyśle naftowym i stalowym.

### 3.15. Pytania i ćwiczenia kontrolne

1. Co to są części maszyn i jakie znasz ich rodzaje?
2. Podaj znaczenie normalizacji, typizacji i unifikacji w budowie maszyn.
3. Jakie zasady obowiązują przy projektowaniu części maszyn?
4. Na czym polega różnica między naprężeniami rzeczywistymi a dopuszczalnymi?
5. Scharakteryzuj połączenia nierozłączne i wymień ich rodzaje.
6. Jak powstaje połączenie nitowe?
7. Wymień rodzaje połączeń nitowych.
8. Jakie warunki decydują o wytrzymałości połączeń nitowych?
9. Podaj przykłady zastosowania połączeń nitowych w budowie maszyn.
10. W jaki sposób uzyskuje się połączenie spawane?
11. Scharakteryzuj różne rodzaje połączeń spawanych.
12. Jakie warunki decydują o wytrzymałości połączeń spawanych?
13. Gdzie wykorzystuje się połączenia spawane?
14. Scharakteryzuj połączenie zgrzewane.
15. Opisz różne rodzaje połączeń zgrzewanych.
16. Jakie warunki decydują o wytrzymałości połączeń zgrzewanych?
17. Podaj przykłady zastosowania połączeń zgrzewanych w budowie maszyn.
18. Jak uzyskuje się połączenie lutowane?
19. Jakie warunki decydują o wytrzymałości połączeń lutowanych?
20. Scharakteryzuj połączenie klejone.
21. Jakie warunki decydują o wytrzymałości połączeń klejonych?
22. W jaki sposób uzyskuje się połączenia wciskowe?
23. Jakie warunki decydują o wytrzymałości połączeń wciskowych?
24. Wymień przykłady wykorzystania połączeń wciskowych.
25. Co to są połączenia rozłączne i jakie znasz ich rodzaje?
26. Scharakteryzuj połączenie wpustowe.
27. Jakie warunki decydują o wytrzymałości połączeń wpustowych?
28. Gdzie stosuje się połączenia wpustowe?
29. W jaki sposób powstaje połączenie wielowpustowe?

30. Jakie warunki decydują o wytrzymałości połączeń wielowypustowych?
31. Podaj przykłady połączeń wielowypustowych w budowie maszyn.
32. Scharakteryzuj połączenie wielokarbowe.
33. Jakie różnice występują między połączeniami wielokarbowymi i wielowypustowymi?
34. Jaka rolę w budowie maszyn odgrywają połączenia kołkowe?
35. Jakie warunki decydują o wytrzymałości połączeń kołkowych?
36. Podaj znaczenie połączeń klinowych w budowie maszyn.
37. Określ warunki decydujące o wytrzymałości połączeń klinowych.
38. Jak powstają połączenia gwintowe?
39. Opisz budowę i rodzaje gwintów.
40. Podaj budowę i rodzaje połączeń gwintowych.
41. Omów budowę i rodzaje łączników gwintowych.
42. Co decyduje o wytrzymałości gwintu?
43. Jakie warunki decydują o wytrzymałości połączeń gwintowych?
44. Scharakteryzuj połączenia podatne.
45. Wymień rodzaje elementów podatnych.
46. Jakie warunki decydują o wytrzymałości połączeń podatnych ze sprężynami?
47. Co to są osie i wały?
48. Podaj rodzaje obciążeń osi i wałów.
49. Jakie czynniki decydują o wytrzymałości osi?
50. Jakie warunki decydują o wytrzymałości wałów?
51. Gdzie spotyka się osie w budowie maszyn?
52. Podaj zastosowanie wałów w budowie maszyn.
53. Podaj znane ci rodzaje łożysk.
54. Jakie zalety mają łożyska toczne?
55. Omów budowę oraz sposób montażu łożyska kulkowego.
56. Jakie materiały stosuje się na łożyska ślizgowe?
57. W jaki sposób oblicza się łożyska ślizgowe?
58. Omów sposób doboru łożysk tocznych.
59. Jak należy przedstawiać łożyska toczne na rysunkach technicznych?
60. Co to jest przełożenie i jak się je oblicza w różnych rodzajach przekładni?
61. Czym różni się reduktor od multiplikatora?
62. Jakie znasz rodzaje zazębień?
63. Podaj znane ci rodzaje kół zębatach.
64. Scharakteryzuj różne sposoby produkcji kół zębatach.
65. Opisz geometrię koła zębatego walcowego.
66. Co to jest korekcja zarysu zęba i do czego służy?
67. Przedstaw sposób obliczenia wytrzymałościowego koła zębatego.
68. Jaka jest minimalna liczba zębów koła zębatego i od czego ona zależy?
69. Podaj zalety przekładni stożkowych, hipoidalnych oraz ślimakowych.
70. Ile przełożeń można uzyskać w prostej przekładni planetarnej?
71. W jaki sposób przedstawia się koła zębata na rysunkach technicznych?
72. Sklasyfikuj przekładnie cierne.



73. Omów zalety i wady przekładni ciernych.
74. Co to są wariatory i gdzie się je spotyka?
75. Jakie znasz rodzaje przekładni cięgnowych?
76. Podaj zastosowanie przekładni cięgnowych w motoryzacji.
77. Opisz sposób oznaczania przekładni cięgnowych na rysunkach technicznych.
78. Jakie rodzaje sprzęgieł występują w budowie maszyn?
79. Co to jest sprzęgło Cardana? Wymień jego zalety i wady.
80. Scharakteryzuj budowę tarczowego sprzęgła ciernego.
81. Jakie rodzaje hamulców spotyka się w pojazdach samochodowych?
82. Przedstaw sposób obliczenia hamulców.
83. Dlaczego szczęki w hamulcach szczękowo-bębnowych najczęściej nie zużywają się równomiernie?
84. Co to jest metoda MES?

## 4. Podstawy maszynoznawstwa

### 4.1. Klasyfikacja i ogólna charakterystyka maszyn

Maszyny są urządzeniami służącymi do przetwarzania jednej postaci energii w inną lub wykonywania pracy użytecznej w celu ułatwienia człowiekowi pracy fizycznej i umysłowej oraz zwiększenia jej wydajności.

Maszyny dzieli się na:

– energetyczne, do których należą:

- silniki,
- przetworniki energii mechanicznej lub innej;

– robocze, w tym:

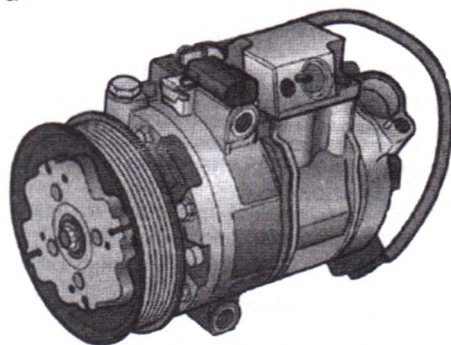
- transportowe,
- technologiczne.

**Maszyny energetyczne** służą do przetwarzania jednego rodzaju energii w inną, np. energii wodnej czy energii chemicznej paliw na energię mechaniczną.

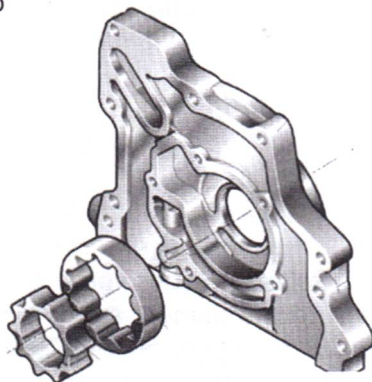
**Silniki** są to maszyny służące do zamiany dowolnego rodzaju energii na energię mechaniczną. W zależności od rodzaju energii wykorzystywanej do zasilania rozróżnia się **silniki elektryczne**, **cieplne** (np. spalinowe, parowe), **wodne**, **hydrauliczne**, **pneumatyczne**, **wiatrowe**.

**Przetworniki energii mechanicznej lub innej** są to maszyny przeznaczone do przetwarzania energii. Są nimi np. sprężarki i pompy (rys. 4.1). Często spo-

a



b



Rys. 4.1. Sprężarka klimatyzacji (a) oraz pompa oleju (b)

tyka się także maszyny energetyczne przetwarzające różne rodzaje energii na energię niemechaniczną, np. prądnice elektryczne.

**Maszyny robocze** wykorzystują energię mechaniczną do wykonania pracy użytecznej.

**Maszyny transportowe** służą do zmiany położenia ciał stałych, cieczy i gazów. Zalicza się do nich np. dźwignice, przenośniki, samochody, samoloty, pociągi, statki, wentylatory, pompy.

**Maszyny technologiczne** stosuje się w celu przetwarzania surowców lub półwyrobów, polegającego na zmianie ich kształtu, wymiarów, własności fizycznych lub chemicznych albo stanów obrabianych materiałów i przedmiotów. Przykładami takich maszyn są np.: obrabiarki do metali, walcarki, młoty, maszyny rolnicze, maszyny budowlane, maszyny górnicze.

**Przenoszenie energii** od silnika do zespołu wykonawczego maszyny roboczej może się odbywać bezpośrednio lub za pośrednictwem układu przeniesienia napędu zawierającego np. sprzęgła i przekładnie. Silnik wraz z układem przeniesienia napędu tworzy **układ napędowy**, nazywany także napędem.

Maszyny robocze mogą mieć **napęd zewnętrzny**, nazywany również obcym (od silnika umieszczonego poza maszyną), **lub wewnętrzny** (gdy silnik jest wbudowany w kadłub maszyny).

Maszyny mogą stanowić **indywidualne układy silnik – maszyna robocza** lub tworzyć **zespoły maszyn roboczych**, napędzanych indywidualnie bądź grupowo oraz sterowanych bezpośrednio albo zdalnie.

Maszyny – oprócz posiadania zasadniczych zespołów realizujących podstawowe zadania robocze – są wyposażone w wiele urządzeń pomocniczych, które umożliwiają realizację sterowania i kontroli prawidłowości ich działania oraz rozszerzenie zakresu ich pracy lub funkcji. Zespół elementów konstrukcyjnych, przyrządów i narzędzi, który tworzy wyposażenie maszyny, stanowi jej **osprzęt**.

## 4.2. Energia, jej rodzaje i źródła

### 4.2.1. Rodzaje, znaczenie i zasoby energii

Podstawą działania wszystkich maszyn są zachodzące w nich przemiany energii jednego rodzaju w energię innego rodzaju. Rozwój budowy maszyn i urządzeń technicznych stał się możliwy dzięki opanowaniu przez człowieka umiejętności wykorzystania zasobów energii istniejących w przyrodzie oraz dzięki wykryciu praw rządzących przemianami energii.

**Energia** jest jedną z podstawowych wielkości charakteryzujących stan układu fizycznego, tzn. ciała lub układu ciał. Energią nazywa się zdolność danego ciała do wykonania pracy albo zasób nagromadzonej w nim pracy. Źródłami energii są m.in.: siła wiatru, ruch wody w rzece, paliwa (np. bryła węgla), akumulator elektryczny, napięta sprężyna, rozpędzone koło zamachowe, zbiornik ze sprężonym powietrzem.

Energia jest wielkością związaną z ruchem, położeniem i wzajemnym oddziaływaniem układów fizycznych. Różnym formom ruchu materii odpowiadają różne rodzaje energii, np. energia mechaniczna, cieplna, promienista, elektryczna, chemiczna, jądrowa.

Spośród wymienionych rodzajów energii w działaniu maszyn najczęściej wykorzystuje się energię mechaniczną, ciepłą i elektryczną.

**Energia mechaniczna** umożliwia maszynom wykonywanie pracy.

**Energia cieplna** warunkuje przebieg wielu procesów przemysłowych.

**Energia elektryczna** jest powszechnie wykorzystywana w życiu codziennym oraz we wszystkich gałęziach przemysłu. Służy do napędu maszyn i urządzeń oraz do celów oświetleniowych. Powszechne zastosowanie energii elektrycznej umożliwia łatwość przesyłania jej na duże odległości.

**Główne rodzaje energii** wykorzystywane współcześnie to energia chemiczna zawarta w paliwach i energia spadku wód. Nieco mniejszą rolę odgrywa energia jądrowa. Rozwój energetyki jądrowej wydaje się jednak nieunikniony, gdyż zasoby paliw naturalnych są ograniczone – niektórych wystarczy na kilkadziesiąt lat, a innych zaledwie na kilkadziesiąt lat.

**Inne rodzaje energii** – np. energię słoneczną, ciepło zmagazynowane wewnątrz Ziemi i w wodach mórz, energię wiatru – wykorzystuje się w bardzo małym stopniu. W miarę wyczerpywania się zasobów paliw konieczne będzie sięgnięcie i do tych źródeł energii, co z kolei przyczyni się do rozwoju technik ich wykorzystania.

## 4.2.2. Odnawialne źródła energii

**Odnawialne źródła energii** są takimi źródłami, których używanie nie wiąże się z długotrwałym ich deficytem, to znaczy, że ich zasób odnawia się w krótkim czasie. Przykładami są m.in. energia wiatru, promieniowanie słoneczne, energia geotermalna, energia fal, prądów i pływów morskich, energia spadku rzek oraz energia pozyskiwana z biomasy lub biogazu. Przeciwnieństwem odnawialnych źródeł energii są nieodnawialne źródła energii, czyli źródła, których wykorzystanie postępuje znacznie szybciej niż naturalne odtwarzanie.

Odnawialnymi źródłami energii są opisane dalej ich rodzaje.

- **Energia wodna** jest wykorzystywana gospodarczo jako energia mechaniczna płynącej wody. Współcześnie energię wodną zazwyczaj przetwarza się na energię elektryczną. Można ją także wykorzystywać bezpośrednio do napędu maszyn – istnieje wiele rozwiązań, w których płynąca woda napędza turbinę lub koło wodne.

Źródło energii wodnej ocenia się według dostępnej mocy, to jest energii uzyskiwanej w jednostce czasu. W przypadku wykorzystania wody spadającej z pewnej wysokości dostępna moc wiąże się ze spadkiem hydraulicznym (wysokością, z której spływa woda), przepływem (ilością wody spływającej w jednostce czasu) i zazwyczaj również z prędkością przepływu. Gdy woda spływa ze zbiornika (jezioro, spiętrzenie), spadkiem hydraulicznym jest różnica poziomów między

lustrem wody w zbiorniku górnym i wylotem turbiny, ponieważ ciśnienie hydrostatyczne u podstawy wynika wprost z wysokości słupa wody.

Energia potencjalna  $E$ , uwalniana podczas spadku ciała w polu grawitacyjnym, może być opisana za pomocą wzoru

$$E = m \cdot g \cdot h \text{ [J]} \quad (4.1)$$

gdzie:

$m$  – masa ciała [kg],

$g$  – przyspieszenie ziemskie [ $\text{m/s}^2$ ],

$h$  – wysokość [m].

Elektrownia wodna wykorzystuje energię uwalnianą podczas sterowanego spadku wody z ustalonej wysokości. Energia wyzwolona w ustalonym czasie  $t$  wynika więc z ilości spuszczonej w tym czasie wody

$$\frac{E}{t} = \frac{m}{t} \cdot g \cdot h \quad (4.2)$$

W podanym wzorze iloraz oznacza moc. Zastępując go symbolem  $P$  oraz wyrażając stosunek  $\frac{m}{t}$  przez natężenie przepływu i gęstość wody, dochodzimy do następującej postaci wyrażenia na moc elektrowni wodnej

$$P = \rho \cdot S \cdot g \cdot h \quad (4.3)$$

gdzie  $S$  oznacza natężenie przepływu, liczone jako objętość wody wypuszczanej w jednostce czasu, natomiast  $\rho$  jest gęstością wody.

W układzie jednostek miar SI gęstość  $\rho$  wyraża się w  $\text{kg/m}^3$ , przepływ  $S$  w  $\text{m}^3/\text{s}$ , przyspieszenie ziemskie  $g$  w  $\text{m/s}^2$ , wysokość  $h$  w m, a moc  $P$  w W.

• **Energia geotermalna** (energia geotermiczna, geotermia) polega na wykorzystywaniu ciepłej energii wnętrza Ziemi, zwłaszcza w obszarach działalności wulkanicznej i sejsmicznej. Woda opadowa wnika w głąb Ziemi, gdzie styka się z młodymi intruzjami lub aktywnymi ogniskami magmy o wysokiej temperaturze. W wyniku tego procesu woda podgrzewa się i uzyskuje znaczną temperaturę. Przemieszcza się ona następnie w kierunku powierzchni Ziemi jako gorąca woda lub para wodna. Źródłem energii geotermalnej jest więc wnętrze Ziemi, o temperaturze około  $5400^\circ\text{C}$ , generujące przepływ ciepła w kierunku powierzchni. Energia geotermiczna to energia wydobytych na powierzchnię ziemi wód geotermalnych. Zalicza się ją do energii odnawialnej, bo jej źródło – gorące wnętrze kuli ziemskiej – jest praktycznie niewyczerpalne. W celu wydobycia wód geotermalnych na powierzchnię wykonuje się odwierty do głębokości zalegania tych wód.

W pewnej odległości od otworu czerpalnego wykonuje się drugi otwór, którym wodę geotermalną, po odebraniu od niej ciepła, wtłacza się z powrotem do złoża. Wody geotermiczne z reguły są mocno zasolone, co jest główną przyczyną szczególnie trudnych warunków pracy wymienników ciepła i innych elementów armatury instalacji geotermicznych. Energię geotermiczną wykorzystuje się

w układach centralnego ogrzewania jako podstawowe źródło energii cieplnej. Drugim sposobem wykorzystania energii geotermicznej jest produkcja energii elektrycznej. Jest ona jednak opłacalna jedynie w przypadkach szczególnie gorących źródeł.

● **Energia kinetyczna prądów morskich.** Moc prądów morskich ocenia się na 7 TW (terawatów), czyli  $10^{12}$  W. Przekracza ona prawie dwa razy moc możliwą do uzyskania z wykorzystania spadku wszystkich wód śródlądowych. Jednak jej wykorzystanie jest bliskie zera z powodu problemów technicznych i obawy przed zaburzeniem naturalnej równowagi. Prądy morskie mają fundamentalne znaczenie dla klimatu i uszczuplenie ich energii, choćby niewielkie, mogłoby doprowadzić do nieobliczalnych zmian klimatycznych.

● **Energia pływów.** Pływy są źródłem energii o mniejszym potencjale niż prądy morskie, ale za to bezpieczniejszym i lepiej poznanym. Na razie jednak nie są wykorzystywane na szerszą skalę.

● **Energia fal morskich.** Moc fal mórz i oceanów ocenia się na 3 TW (terawaty), jednak wykorzystanie tej energii sprawia pewne trudności. Największym problemem jest zmienność wysokości fal i wytrzymałość elektrowni. Rozróżnia się następujące rodzaje elektrowni wykorzystujących energię fal morskich:

- pneumatyczne, w których fale wymuszają ruch powietrza napędzającego turbinę;
- mechaniczne, wykorzystujące siłę wyporu do poruszania się prostopadle do dna, co powoduje obracanie się wirnika połączonego z prądnicą;
- indukcyjne, wykorzystujące ruch pływaków do wytwarzania energii elektrycznej dzięki zastosowaniu cewek poruszających się wraz z pływakami w polu magnetycznym;
- hydrauliczne, w których przez ścianki nieruchomego zbiornika przelewają się jedynie szczyty fal, a woda wypływająca ze zbiornika napędza turbinę.

● **Energia słoneczna.** Do Ziemi dociera promieniowanie słoneczne zbliżone widmowo do promieniowania ciała doskonale czarnego o temperaturze ok. 5700K. Przed wejściem do atmosfery moc promieniowania jest równa  $1367 \text{ W/m}^2$  powierzchni prostopadłej do promieniowania słonecznego. Część tej energii jest odbijana i pochłaniana przez atmosferę, a do powierzchni Ziemi w słoneczny dzień dociera moc ok.  $1000 \text{ W/m}^2$ . Ilość energii słonecznej docierającej do danego miejsca zależy od szerokości geograficznej oraz od czynników pogodowych. Poniżej przedstawiono podstawowe metody wykorzystywania promieniowania słonecznego.

- **Ogniwa słoneczne**, inaczej zwane fotowoltaicznymi lub fotoogniwami, mogą być tanim źródłem energii dla przenośnych urządzeń małej mocy – kalkulatorów, zegarków i lamp (wyposażonych w akumulatory magazynujące energię zgromadzoną w ciągu dnia). Są również niezastąpione w przestrzeni kosmicznej, gdyż każdy inny sposób wytwarzania energii wymagałby transportu paliw, a energia słoneczna jest stale dostępna. W niektórych miejscach na świecie ogniwa fotowoltaiczne wykorzystuje się do zasilania automatów telefonicznych oraz kamer aktywowanych ruchem (na przykład monitorujących zwierzęta) lub

urządzeń pomiarowych (np. w meteorologii). O możliwości zasilania z niewielkich fotoogniw decyduje w tych przypadkach krótki czas zapotrzebowania na energię w porównaniu z długimi okresami czuwania, kiedy pobór energii jest znikomy. Wzrost sprawności i spadek ceny fotoogniw może pozwolić na zastosowanie ich w transporcie lądowym (wiele eksperymentalnych konstrukcji samochodów słonecznych różnych firm), a nawet lotniczym. W 1981 r. słoneczny samolot Solar Challenger przeleciał nad kanałem La Manche, wykorzystując jako źródło zasilania tylko energię słoneczną. Skrzydła tego samolotu były pokryte bateriami słonecznymi, które zasilają silnik elektryczny.

- o **Konwersja fototermiczna** to bezpośrednia zamiana energii promieniowania słonecznego na energię cieplną. W zależności od tego, czy do dalszej dystrybucji pozyskanej energii cieplnej używa się dodatkowych źródeł energii (np. do napędu pomp), czy też nie, rozróżnia się konwersję fototermiczną pasywną oraz aktywną. W przypadku **konwersji pasywnej** ewentualny przepływ nośnika ciepła (np. powietrza lub ogrzanej wody) odbywa się jedynie w drodze konwekcji. W przypadku **konwersji aktywnej** używa się pomp zasilanych z dodatkowych źródeł energii. Konwersję fototermiczną pasywną wykorzystuje się głównie w małych instalacjach, m.in. do pasywnego ogrzewania budynków. Szczególnie efektywną metodą takiego ogrzewania jest ściana Trombe'a. Wykorzystanie różnicy gęstości między powietrzem ogrzanym a chłodnym umożliwia wymuszenie takiego przepływu ciepła, że do budynku jest zasysane chłodne powietrze z zewnątrz. Urządzeniem wykorzystującym to zjawisko do chłodzenia i wentylacji budynków jest komin słoneczny. Konwersję pasywną wykorzystuje się również w termosyfonowych podgrzewaczach wody oraz do suszenia płodów rolnych.

Konwersję fototermiczną aktywną wykorzystuje się natomiast głównie do podgrzewania wody. Popularne są zarówno zastosowania w domkach jednorodzinnych, o powierzchni kolektorów słonecznych 2 do 6 m<sup>2</sup> (rys. 4.2), jak i duże instalacje (ciepłownie), o powierzchni kolektorów słonecznych powyżej 500 m<sup>2</sup>, dostarczające ciepłą wodę do budynków wielorodzinnych, dzielnic lub małych miast.



Rys. 4.2. Umieszczone na dachu kolektory słoneczne, wykorzystywane do ogrzewania wody w budynku

• **Energia wiatru.** Współczesne turbiny wiatrowe przekształcają energię wiatru na energię mechaniczną, którą następnie zamienia się na energię elektryczną. Przez ponad 2500 lat wiatraki miały pionową oś obrotu. Dopiero w 1105 roku powstał pierwszy opis wiatraka o poziomej osi obrotu, podobnego do obecnie stosowanych. Powierzchniową gęstość mocy (czyli energię wiatru w jednostce czasu przypadającą na jednostkę powierzchni) określa się wzorem

$$P_A = \frac{1}{2} \rho \cdot v^3 \quad [\text{W} / \text{m}^2] \quad (4.4)$$

gdzie:

$\rho$  – gęstość powietrza [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$v$  – prędkość powietrza [ $\text{m}/\text{s}$ ].

Energia wiatru zależy od jego prędkości  $v$  w trzeciej potęgze, dlatego lokalizację siłowni wiatrowych dobiera się bardzo starannie pod kątem częstości występowania silnych wiatrów (o prędkości 7 do 20  $\text{m}/\text{s}$ ).

Najczęściej spotykane obecnie w energetyce wiatraki (rys. 4.3) mogą pracować przy prędkościach wiatru od 3 do 30  $\text{m}/\text{s}$ . Przyjmuje się, że granicą opłacalności jest średnioroczna prędkość wiatru 5  $\text{m}/\text{s}$ , lecz do określenia opłacalności takiej inwestycji trzeba dysponować znacznie dokładniejszymi informacjami na temat lokalnych wiatrów i wieloma innymi danymi ekonomicznymi.



Rys. 4.3. Elektrownia wiatrowa

### 4.2.3. Ogniwa paliwowe

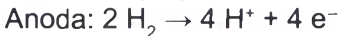
**Ogniwo paliwowe** to urządzenie wytwarzające energię elektryczną za pomocą reakcji utleniania stale dostarczanego do niego z zewnątrz paliwa. W odróżnieniu od ogniw galwanicznych (akumulatory, baterie), w których energia wytwa-



zanego prądu musi zostać wcześniej zgromadzona wewnątrz tych urządzeń (co znacznie ogranicza czas ich pracy), ogniwa paliwowe nie muszą być wcześniej ładowane. Wystarczy tylko doprowadzić do nich paliwo. W przypadku ogniwa galwanicznego ładowanie może być procesem trwającym wiele godzin, a ogniwa paliwowe są gotowe do pracy po niewielkim czasie wymaganym do ich naładowania.

Większość ogniwa paliwowych do produkcji energii elektrycznej wykorzystuje wodór na anodzie oraz tlen na katodzie. Są to ogniwa wodorowe. Proces produkcji energii nie zmienia chemicznej natury elektrod oraz wykorzystywanych elektrolitów. W ogniwach galwanicznych wytwarzanie prądu opiera się na szeregu reakcji chemicznych, które doprowadzają do zmiany składu elektrolitów lub elektrod. Aby odwrócić ten proces, konieczne jest długotrwałe ładowanie.

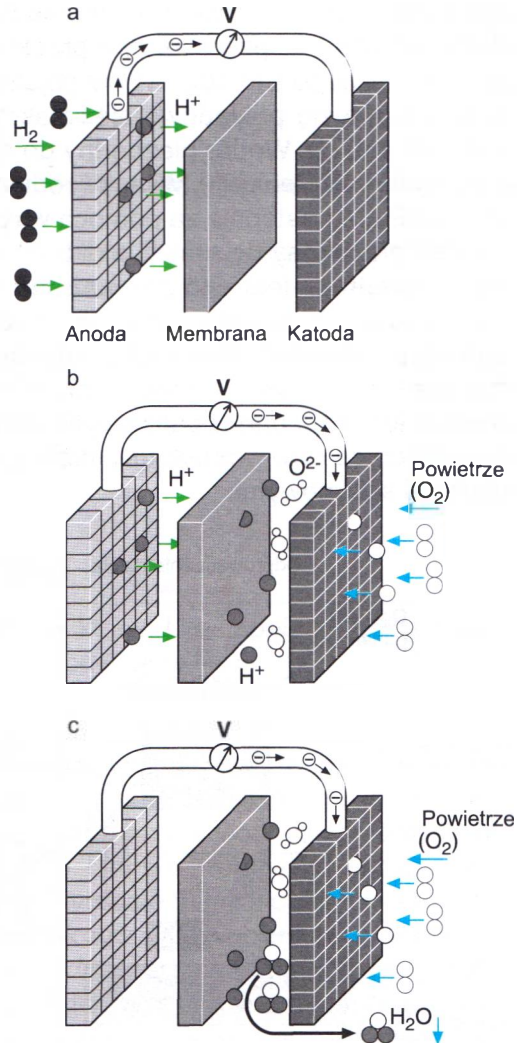
Zasadę działania wodorowego ogniwa paliwowego polimerowo-elektrolitycznego-membranowego, tzw. ogniwa PEM, przedstawiono na rysunku 4.4. W ogniwie tym wodór jest doprowadzany do anody, na której podlega utlenianiu – powstają jony  $H^+$  oraz elektrony (rys. 4.4a):



W ogniwach polimerowych elektrolit tworzy polimerowa membrana przepuszczalna dla protonów (jonów  $H^+$ ), a nieprzepuszczalna dla elektronów. Powstające na anodzie jony  $H^+$  przenikają przez membranę i osiągają katodę. Do katody jest doprowadzany tlen, który ulega redukcji (rys. 4.4b) za pomocą elektronów przekazywanych z anody do katody przez obwód zewnętrzny.



Sumaryczna reakcja zachodząca w ogniwie paliwowym powoduje zamianę wodoru oraz tlenu na wodę (rys. 4.4c). W przeciwieństwie do wybuchowej reakcji gazowej, w postaci eksplozji zachodzącej między wodorem i tlenem, wynaleziono tę przebiegającą łagodnie przemianę, nazywaną zimnym spalaniem, w którym poszczególne etapy reakcji rozłożono przestrzennie między anodę i katodę.



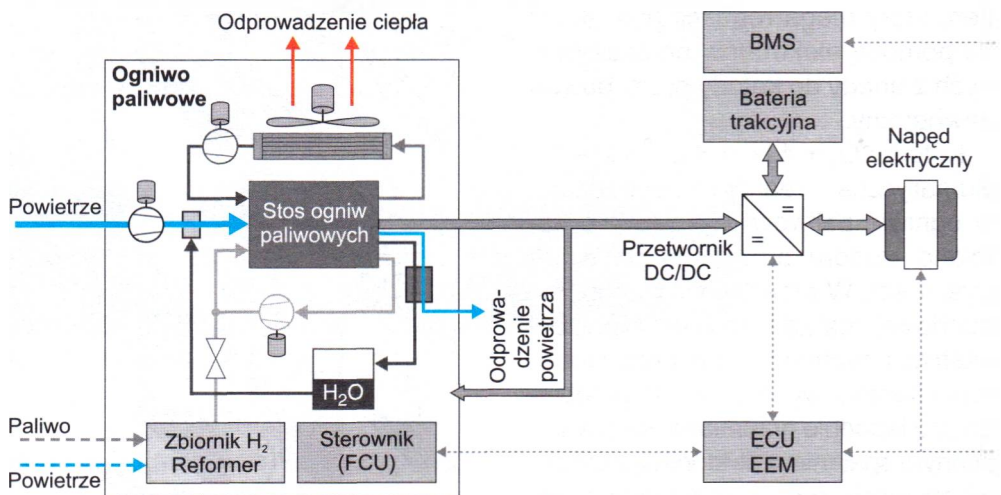
Rys. 4.4. Zasada działania ogniwa paliwowego PEM

Reakcja sumaryczna:  $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$

Napięcie pojedynczego wodorowo-tlenowego ogniwa paliwowego teoretycznie wynosi 1,25 V w temperaturze 25°C. W rzeczywistych warunkach w ogniwach paliwowych osiąga się napięcie ok. 0,5 do 1 V. Straty napięcia wynikają m.in. z hamowania reakcji, zakłócającej dyfuzji gazowej i zmian temperatury. W celu uzyskania wyższego napięcia, niezbędnego w zastosowaniach technicznych, pojedyncze ogniwa łączy się ze sobą w stosy.

Na przykład w układzie napędowym samochodu ogniwa paliwowe zestawia się w stosy o zakresie mocy 60 do 100 kW. Tego rodzaju stos zawiera od ok. 300 do 450 ogniw, co umożliwia uzyskanie napięcia wynoszącego od 300 do 450 V oraz gęstości energii o wartości od 1500 do 2000 W/dm<sup>3</sup> objętości stosu ogniw.

Ogniwa paliwowe wykorzystuje się w pojazdach eksperymentalnych o napędzie elektrycznym (rys. 4.5). Napęd pojazdu odbywa się za pomocą silnika elektrycznego bez pośrednictwa przekładni. Ze względu na dużą moc napędu elektrycznego (do 100 kW) w pojazdach napędzanych ogniwami paliwowymi stosuje się pokładową sieć trakcyjną, pracującą pod wysokim napięciem (do 450 V). Wodór niezbędny do działania ogniwa jest przechowywany w butlach o ciśnieniu 70 MPa. W reduktorze jest on odprężany do ciśnienia ok. 10 MPa, a następnie za pomocą wtryskiwacza jest doprowadzany do anody. Tlen niezbędny do reakcji elektrochemicznych jest pobierany z otaczającego powietrza. Jest ono zasysane przez sprężarkę, oczyszczane w filtrze powietrza, sprężane do ciśnienia ok. 0,2 MPa i doprowadzane na katodę. Ogniwa paliwowe PEM pracują w temperaturze ok. 85°C, czyli znacznie niższej niż temperatura normalnej pracy silnika spalinowego. Z tego względu układ chłodzenia ogniw paliwowych musi być wyposażony w znacznie większe chłodnice oraz wentylatory niż występujące w pojazdach napędzanych silnikami spalinowymi.



Rys. 4.5. Przykład napędu elektrycznego z ogniwami paliwowymi

Ogromną zaletą ogniw wodorowych jest niezanieczyszczanie powietrza podczas ich działania. Powstające w nich spaliny składają się wyłącznie z obojętnej dla środowiska pary wodnej. Silniki spalinowe oprócz pary wodnej wytwarzają też dwutlenek węgla, czad, ozon, tlenki azotu oraz wiele innych szkodliwych substancji. Zastosowanie ogniw paliwowych w samochodach może uchronić miasta przed smogiem.

#### 4.2.4. Biopaliwa

**Biopaliwo** jest to paliwo powstałe z przetwórstwa produktów organizmów żywych, np. roślinnych, zwierzęcych lub mikroorganizmów.

Rozróżnia się biopaliwa:

- **stałe**, którymi mogą być: słoma w postaci bel lub kostek albo brykietów, granulat trocinowy lub słomiany, drewno, siano i inne przetworzone odpady roślinne;
- **ciekłe**, otrzymywane w drodze fermentacji alkoholowej węglowodanów do etanolu, fermentacji butylowej biomasy do butanolu lub z olejów roślinnych (np. oleju rzepakowego), estryfikowanych w biodiesel;
- **gazowe**, którymi są:
  - biogaz, powstający w wyniku fermentacji beztlenowej ciekłych i stałych odpadów rolniczej produkcji zwierzęcej;
  - gaz generatorowy (gaz drzewny), powstały w procesie zgazowania biomasy.

Produkcja biopaliw z glonów jest najbardziej wydajna. Znane są metody wykorzystania do tych celów terenów pustynnych. Wzbogaćona w dwutlenek węgla woda przepływa w foliowych zbiornikach, które eliminują jej parowanie. Półproduktem glonowej hodowli jest białko i tlen. Efektywność glonów jest 30-krotnie większa niż innych źródeł pozyskiwania paliwa. Używanie biopaliw służy zmniejszeniu uzależnienia od ropy naftowej.

### 4.3. Maszyny hydrauliczne

Maszyny hydrauliczne są urządzeniami, w których następuje zamiana energii mechanicznej na energię hydrauliczną lub odwrotnie.

#### 4.3.1. Podstawy hydromechaniki

Prawa i zależności z zakresu hydromechaniki szeroko wykorzystuje się w różnych dziedzinach techniki, zwłaszcza w budownictwie wodnym, przemyśle budowy maszyn hydraulicznych (np. pomp i turbin wodnych), urządzeniach melioracyjnych, wodociągowych i innych. Hydromechanika obejmuje kinematykę cieczy (przedstawiającą prawa ruchu cieczy z pominięciem sił wywołujących ten ruch) oraz dynamikę cieczy (uwzględniającą wszelkie siły wpływające na ruch cieczy lub z niego wynikające). Z kolei hydrodynamika obejmuje hydrostatykę (określającą stany równowagi cieczy) oraz hydrokinetykę (rozpatrującą ruch cieczy pod wpływem sił na nią działających).

## Podstawowe parametry cieczy

- Gęstość cieczy

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (4.5)$$

gdzie:

$m$  – masa cieczy [kg],

$V$  – objętość cieczy [ $\text{m}^3$ ].

Gęstość cieczy zależy od ciśnienia i temperatury.

- Ciężar właściwy cieczy

$$\gamma = \frac{G}{V} = \rho \cdot g \quad (4.6)$$

gdzie:

$G$  – ciężar cieczy [N],

$V$  – objętość cieczy [ $\text{m}^3$ ],

$g$  – przyspieszenie ziemskie [ $\text{m/s}^2$ ].

Przyspieszenie  $g$ , a więc i ciężar właściwy cieczy  $\gamma$  zależą od natężenia pola ciężkości.

- Objętość właściwa cieczy

$$\nu = \frac{1}{\rho} \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (4.7)$$

- Lepkość cieczy występuje podczas ruchu względnego jej cząsteczek i wpływa bezpośrednio na wartość oporów przepływu. Określa się ją za pomocą dwóch parametrów:
  - współczynnika lepkości dynamicznej  $\eta$ , który jest współczynnikiem tarcia wewnętrznego w cieczy;
  - współczynnika lepkości kinematycznej  $\nu$ , będącego stosunkiem lepkości dynamicznej do gęstości w tej samej temperaturze

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (4.8)$$

- Ściśliwość cieczy występuje pod wpływem zmian temperatury i ciśnienia; w zagadnieniach technicznych jest niewielka i praktycznie pomijalna.
- Rozszerzalność cieplna objętościowa cieczy występuje pod wpływem zmian temperatury. Określa się ją wzorem

$$\beta_m = \frac{1}{V_1} \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1} \quad [1/^\circ\text{C}] \quad (4.9)$$

gdzie:

$V_1$  – objętość cieczy w temperaturze  $t_1$ ,

$V_2$  – objętość cieczy w temperaturze  $t_2$ .

W zagadnieniach technicznych rozszerzalność cieczy uwzględnia się w bardzo wysokich temperaturach.

### 4.3.2. Klasyfikacja maszyn hydraulicznych

Do maszyn hydraulicznych należą:

- silniki hydrauliczne,
- przenośniki cieczy,
- turbiny,
- sprzęgła hydrokinetyczne,
- przekładnie hydrokinetyczne.

**Silnik hydrauliczny** zamienia energię potencjalną lub kinetyczną cieczy na energię mechaniczną. Rozróżnia się dwa rodzaje silników hydraulicznych:

- silniki hydrostatyczne, zamieniające energię potencjalną (ciśnienia) cieczy na energię mechaniczną,
- silniki hydrokinetyczne, przetwarzające energię kinetyczną (przepływu) cieczy na energię mechaniczną.

**Przenośnik cieczy** jest maszyną służącą do przenoszenia cieczy i zawiesin z poziomu niższego do poziomu wyższego lub z obszaru o niższym ciśnieniu do obszaru o wyższym ciśnieniu. Przenośniki cieczy dzieli się na:

- pompy, które stanowią największą i najbardziej rozpowszechnioną grupę;
- czerpadła;
- elektromagnetyczne przenośniki cieczy;
- pneumatyczne przenośniki cieczy;
- tarany hydrauliczne (proste urządzenia do przepompowywania wody, niewymagające zasilania z zewnętrznych źródeł energii; czerpią one energię bezpośrednio ze strumienia płynącej wody, którego niewielka część jest dzięki temu pompowana do zbiornika znajdującego się powyżej tarana),
- strumienice (urządzenia do przenoszenia cieczy zasilane przez pompę, sprężarkę lub parą z kotła; strumienice cieczowe wykorzystuje się do współpracy z pompami odśrodkowymi w studniach głębinowych; używa się ich również do hydromechanicznego transportu cieczy z piaskiem i żwirem (są mało wrażliwe na zanieczyszczenia).

**Turbina** jest silnikiem przepływowym wykorzystującym bezpośrednio energię kinetyczną lub potencjalną przepływającego płynu do nadania ruchu obrotowego wirnikowi. Elementem wirnika oddziałującym z płynem są specjalnie ukształtowane łopatki.

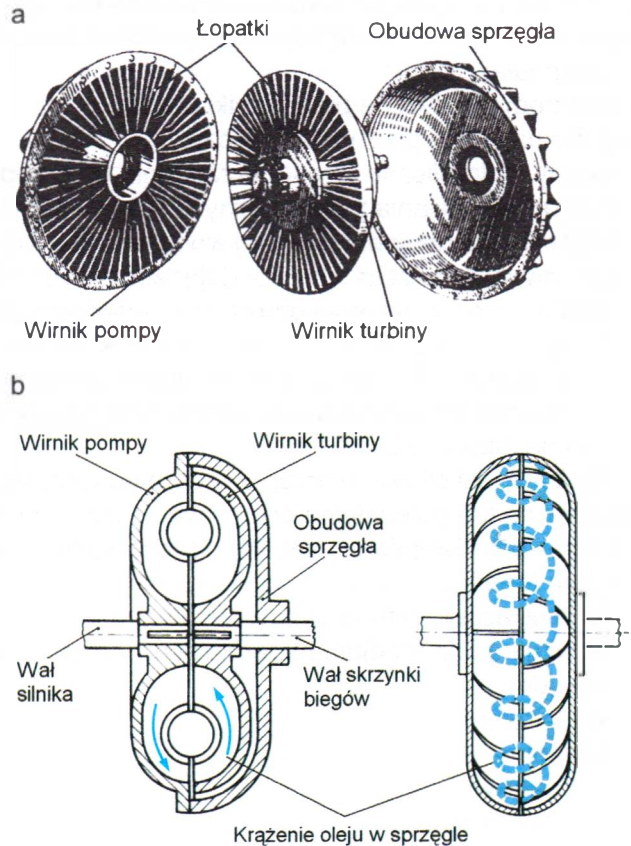
Klasyfikacja turbin:

- ze względu na medium napędzające:
  - wodne,
  - wiatrowe,
  - cieplne:
    - parowe,
    - gazowe;
- z uwagi na kształt wirnika:
  - promieniowe,
  - osiowe:

- komorowe,
- bębnowe;
- według reakcyjności:
  - akcyjne,
  - reakcyjne;
- ze względu na zastosowanie:
  - przemysłowe,
  - energetyczne,
  - lotnicze,
  - okrętowe,
  - trakcyjne,
  - pomocnicze.

**Sprzęgło hydrokinetyczne** (rys. 4.6) jest maszyną hydrauliczną, w której ruch obrotowy z elementu czynnego (pompy) do biernego (turbiny) jest przenoszony za pośrednictwem cieczy (zwykle oleju lub wody) wypełniającej szczelną obudowę sprzęgła. W typowym sprzęgłe hydrokinetycznym pompa i turbina

tworzą pierścienie o przekroju zbliżonym do półkolistego lub półeliptycznego. Łopatkami pompy i turbiny są umieszczone promieniowo względem osi obrotu tych wirników. Podczas pracy sprzęgła hydrokinetycznego odpowiednio ukształtowane łopatkami pompy wprawiają w ruch ciecz roboczą. Pod wpływem siły odśrodkowej ciecz robocza oddala się od osi obrotu wirnika i wypływając z pompy, wywiera silny napór na łopatkami turbiny, zmuszając ją do obracania się w ślad za pompą. W chwilach styku cieczy z łopatkami turbiny następuje przemiana energii kinetycznej przepływającej cieczy w energię mechaniczną. Łopatkami obracającej się turbiny kierują ciecz ponownie do środkowej części pompy. Obieg cieczy powtarza



**Rys. 4.6.** Budowa i działanie sprzęgła hydrokinetycznego  
 a – elementy sprzęgła hydrokinetycznego, b – schemat krążenia cieczy

się, a dzięki dużej liczbie przestrzeni międzyłopatkowych jest utrzymana ciągłość przenoszenia energii.

Podczas ustalonej pracy sprzęgła hydrokinetycznego moment obrotowy na wale pompy  $M_p$  jest równoważony momentem obrotowym na wale turbiny  $M_T$  oraz momentem obrotowym oporów wentylacyjnych  $M_z$ , reprezentującym straty występujące przy przekazywaniu mocy, czyli

$$M_p = M_T + M_z$$

Warunkiem koniecznym do uzyskania niezerowego momentu obrotowego na wale turbiny jest występowanie różnicy prędkości obrotowych pompy  $n_p$  i turbiny  $n_T$ .

Poślizg s sprzęgła hydrokinetycznego można wyznaczyć za pomocą wzoru

$$s_p = \frac{n_p - n_T}{n_p} 100 \text{ [%]}$$

gdzie:

$n_p$  – prędkość obrotowa pompy,

$n_T$  – prędkość obrotowa turbiny.

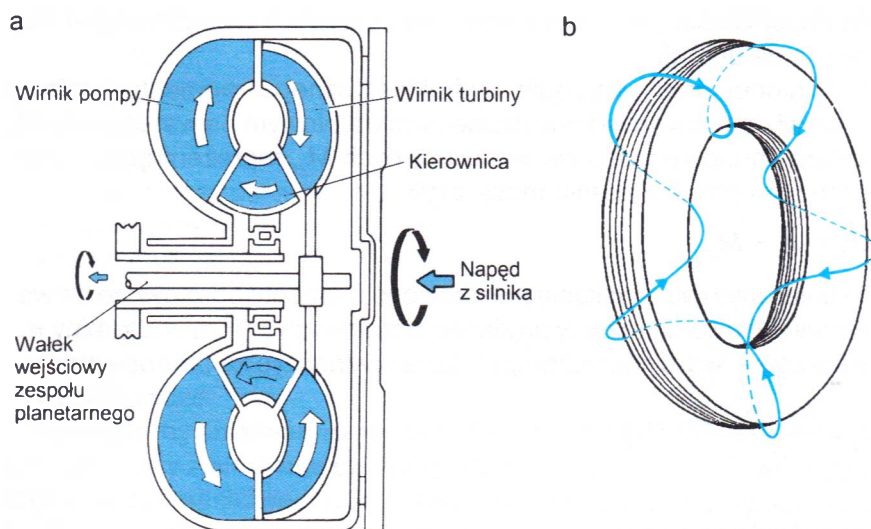
Największy moment obrotowy sprzęgło hydrokinetyczne przenosi przy poślizgu stuprocentowym, czyli przy zerowej prędkości obrotowej turbiny.

Sprzęgło hydrokinetyczne zazwyczaj stosuje się w celu regulacji prędkości obrotowej elementu biernego poprzez zmianę ilości cieczy pośredniczącej lub odległości elementu biernego od czynnego. Jest ono najpowszechniejszym rodzajem przekładni hydraulicznej, stosowanym np. do przenoszenia napędu w pojazdach silnikowych lub do regulacji prędkości obrotowej dużych pomp wirowych.

**Przekładnia hydrokinetyczna** (rys. 4.7) jest maszyną hydrauliczną, która przypomina sprzęgło hydrokinetyczne, lecz różni się od niego istotnie zastosowaniem:

- trzeciego (w zasadzie nieruchomego) wirnika, tzw. kierownicy,
- łopatek kształtowych, biegnących po linii śrubowej (o zmiennym skoku), nawiniętej dookoła pierścienia wewnętrznego.

Zadaniem kierownicy jest odpowiednie ukierunkowanie przepływu oleju powracającego z wirnika turbiny do wirnika pompy. Podczas wirowania pompy, na skutek działania sił odśrodkowych, ciecz wydostaje się z kanałów międzyłopatkowych pompy i ze znaczną prędkością napływa na łopatki turbiny. Wskutek silnego naporu cieczy turbina obraca się, zmuszając jednocześnie ciecz do napływania na łopatki kierownicy. Ciecz przepływa z kolei między łopatkami kierownicy, na które wywiera silny napór ze względu na zmianę kierunku przepływu. Ponieważ kierownica jest nieruchoma, występuje wówczas reakcyjne oddziaływanie cieczy na łopatki turbiny, polegające na wywieraniu na nie dodatkowego nacisku. O intensywności tego oddziaływania decyduje stopień odchylenia kierunku przepływu cieczy na kierownicy. Łopatki są tak ukształtowane, że ciecz, wypływając spomiędzy nich, natrafia znów na łopatki pompy. Ten dodatkowy impuls wywierany na wirnik pompy zwiększa moment obrotowy wirnika pompy.



Rys. 4.7. Główne elementy przekładni hydrokinetycznej (a) i schemat przepływu w niej cieczy (b)

Ciecz w przekładni hydrokinetycznej przepływa zawsze między łopatkami wszystkich trzech wirników. Wirując dookoła osi obrotu pompy i turbiny, krąży jednocześnie wokół wewnętrznego pierścienia (rys. 4.7b). Dzięki reakcyjnemu oddziaływaniu kierownicy na ciecz krążącą w kanałach międzyłopatkowych pompy i turbiny jest możliwe zwiększenie przenoszonego momentu obrotowego.

Moment na wale wyjściowym turbiny  $M_T$  w przekładni hydrokinetycznej jest sumą momentu obrotowego na wale pompy  $M_p$  oraz momentu reakcyjnego  $M_K$  wytworzonego na nieruchomym wirniku kierownicy, czyli

$$M_T = M_p + M_K$$

Cechą charakterystyczną przekładni hydrokinetycznej jest brak sztywnego połączenia, co pozwala na nawet znaczne przeciążanie przekładni bez niebezpieczeństwa przeciążenia układu napędowego. Wadą tej przekładni jest względnie mała sprawność.

Przekładnia hydrokinetyczna jest podstawowym elementem większości automatycznych hydromechanicznych skrzynek biegów. W początkowym okresie parowego napędu turbinowego statków była stosowana jako reduktor. Wymagała intensywnego chłodzenia wypełniająca ją wodą zaburtową. Ze względu na małą sprawność zastąpiono ją przekładnią zębatą.

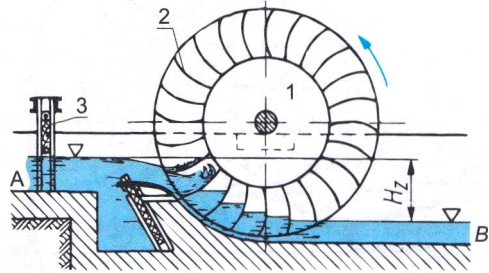
### 4.3.3. Silniki wodne i ich zastosowanie

**Silniki wodne** są to maszyny przetwarzające energię płynących wód na pracę mechaniczną. Silniki wodne dzieli się na koła wodne, turbiny wodne oraz silniki wodne wyporowe.



**Koła wodne** mają na obwodzie łopatki lub przegrody i są poruszane siłą naporu wody. W zależności od sposobu zasilania rozróżnia się koła wodne nasiębieierne, śródsiębieierne i podsębieierne.

Jako przykład na rysunku 4.8 pokazano koło wodne podsębieierne. Dopływająca górnym kanałem *A* woda, wpływając między łopatki *2*, obciąża swoim ciężarem zasilaną część wodnego koła *1*. Woda opadająca z wysokości  $H_z$  oddaje swoją energię położenia obracającemu się kołu *1*, po czym odpływa dolnym kanałem *B*. Natężenie przepływu dopływającej wody reguluje się za pomocą wodnej zastawki *3*.



**Rys. 4.8.** Schemat koła wodnego podsębieiernego  
*A* – kanał górny, *B* – kanał dolny,  $H_z$  – wysokość spadku wody, *1* – koło wodne, *2* – łopatka, *3* – zastawka wodna

Koła wodne są poprzednikami turbin wodnych. Najczęściej stosuje się je do napędu młynów wodnych i narzędzi wykorzystywanych np. w tartakach lub kuźniach.

**Turbiny wodne** (turbiny hydrauliczne) są silnikami wodnymi wirnikowymi, przetwarzającymi energię mechaniczną płynącej wody na ruch obrotowy za pomocą wirnika z łopatkami. Zalicza się je do silników hydrokinetycznych (silników przepływowych). Stosuje się je głównie w elektrowniach wodnych do napędu prądnic.

Klasyfikacja turbin wodnych:

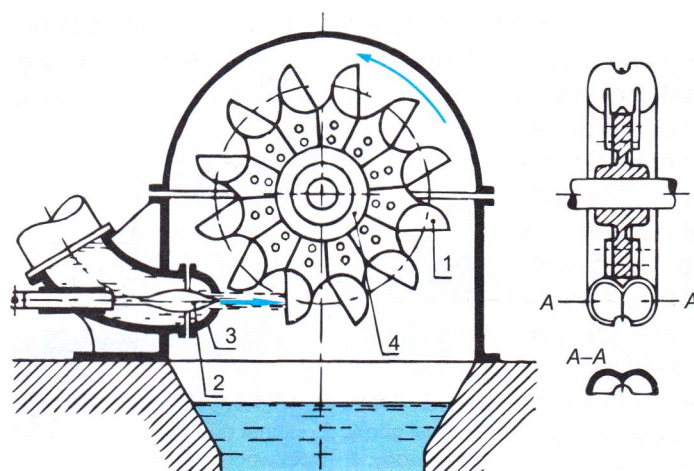
– z uwagi na kształt wirnika:

- promieniowe,
- osiowe:
  - komorowe,
  - bębnowe;

– ze względu na reakcyjność:

- akcyjne, w tym:
  - turbina Peltona, stosowana przy dużych spadkach,
- reakcyjne:
  - turbina Francisa – dla średnich spadków,
  - turbina Kaplana, tzw. śmigłowa – dla małych spadków,
  - turbina Tesli, tzw. talerzowa – szczególny przypadek turbiny hydraulicznej.

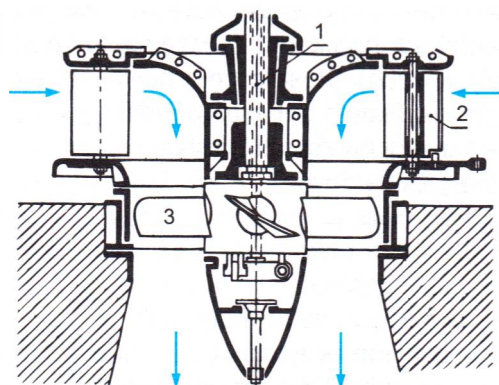
W turbinach akcyjnych, nazywanych także natryskowymi, energia położenia wody zamienia się całkowicie w energię ruchu przed wejściem wody na wirnik. Ciśnienie wody wpływającej na łopatkę wirnika turbiny akcyjnej jest równe ciśnieniu atmosferycznemu. Turbiny te są zasilane wodą w jednym lub kilku punktach obwodu. Na rysunku 4.9 pokazano akcyjną turbinę Peltona. Ma ona wirnik o wielu wklęsłych łopatkach, tzw. czarkach *1*, zasilany stycznie strumieniem wody z dyszy *3*. Czarki rozdzielają strumień zasilający na dwie symetryczne gałęzie, odchylone prawie o  $180^\circ$ . Kierownica strumienia składa się z dyszy *3* i współosiowej z nią iglicy *2*, której przesuw wzdłuż osi umożliwia zmianę wiel-



**Rys. 4.9.** Schemat turbiny akcyjnej Peltona  
1 – czarka,  
2 – iglica,  
3 – dysza,  
4 – tarcza

kości otworu wylotowego dyszy, czyli regulację natężenia wypływu wody zależnie od obciążenia turbiny.

W turbinach reakcyjnych, nazywanych inaczej odporowymi, energia wody na wlocie do wirnika jest sumą energii kinetycznej i energii ciśnienia, podlegającej przemianie w energię ruchu podczas przepływu przez wirnik. Ciśnienie wody wpływającej na łopatkę wirnika turbiny reakcyjnej jest wyższe od ciśnienia atmosferycznego i maleje podczas przepływu przez przestrzeń międzyłopatkowe wirnika. Turbiny te są zasilane wodą na całym obwodzie. Jako przykład na rysunku 4.10 przedstawiono reakcyjną turbinę śmigłową (Kaplana) o nastawnych łopatkach wirnika. Wirnik 3 tej turbiny ma kilka łopatek otwartych (bez zewnętrznego wieńca) i jest zasilany za pomocą kierownicy 2 o nastawnych łopatkach. Po przejściu przez kierownicę woda zmienia kierunek przepływu z promieniowego na osiowy. Podstawową zaletą turbin śmigłowych o łopatkach wirnika nastawianych podczas ruchu maszyny jest osiągnięcie dużej sprawności nawet częściowo obciążonej turbiny.



**Rys. 4.10.** Schemat reakcyjnej turbiny Kaplana o nastawnych łopatkach wirnika  
1 – drążek regulacyjny, 2 – kierownica, 3 – wirnik

#### 4.3.4. Klasyfikacja pomp

**Pompy** należą do przenośników cieczy. Są one maszynami służącymi do wytwarzania różnicy ciśnienia występującego po dwóch stronach ich ruchomego organu roboczego (np. tłoka lub wirnika) dzięki zamianie energii mechanicznej na energię przepływającej cieczy.

Pompy wykorzystuje się do podnoszenia cieczy (lub mieszania cieczy z ciałami stałymi) z poziomu niższego na wyższy albo też do przetłaczania cieczy ze zbiornika ssawnego o ciśnieniu niższym do zbiornika tłocznego o ciśnieniu wyższym. Podczas przetłaczania pompa otrzymuje energię mechaniczną od silnika napędowego i przenosi ją na przepływającą przez nią ciecz. Zwiększa więc ona energię przetłaczanej cieczy.

W przeciwieństwie do silników wodnych, które przetwarzają energię cieczy na pracę mechaniczną, pompy są biernymi maszynami hydraulicznymi, ponieważ pobierają energię z zewnątrz.

Istnieje oddzielna grupa maszyn wodnych, które mogą pracować okresowo jako pompy lub silniki (turbiny) wodne. Nazywa się je maszynami wodnymi odwracalnymi lub pompoturbinami.

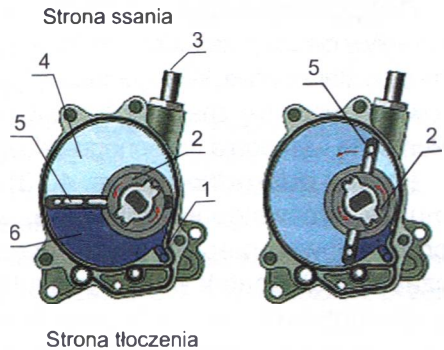
Zasada działania pompy polega na wytwarzaniu różnicy ciśnienia między stroną ssawną (wlotem do pompy) a tłoczną (wylotem z pompy). Na rysunku 4.11 pokazano schemat pompy podciśnienia.

Według rodzaju napędu rozróżnia się pompy o napędzie:

- ręcznym, zwane ręcznymi,
- mechanicznym.

W zależności od sposobu wytwarzania różnicy ciśnienia na wlocie i wylocie pompy dzieli się na dwa podstawowe rodzaje:

- wirowe,
- wyporowe.



**Rys. 4.11.** Pompa podciśnienia  
 1 – wylot powietrza do głowicy (zawór wydmuchowy), 2 – wirnik, 3 – wlot powietrza z obwodu podciśnienia,  
 4 – zassane powietrze, 5 – łopatkę,  
 6 – sprężone powietrze

### 4.3.5. Pompy wirowe i wyporowe

**Pompy wirowe** są maszynami przepływowymi, w których elementem roboczym jest obracający się z dużą prędkością wirnik wyposażony w łopatki. W pompie takiej energia pobierana z silnika jest przekazywana na ciecz za pomocą łopatek.

Działanie pompy wirowej polega na tym, że organ roboczy pompy wirowej (wirnik), osadzony na obracającym się wale, powoduje zwiększenie krętu (momentu pędu) lub krążenia cieczy przepływającej przez jego wnętrze. Jest to istotna cecha odróżniająca pompy wirowe od wyporowych pomp rotacyjnych. W przypadku bowiem unieruchomienia organu roboczego następuje w nich przepływ wsteczny.

Podział pomp wirowych:

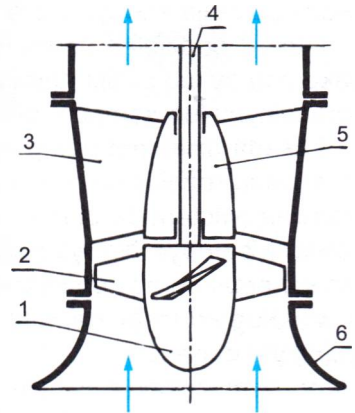
- ze względu na kierunek przepływu cieczy:
  - śmigłowe – o przepływie osiowym,
  - odśrodkowe – o przepływie promieniowym,
  - helikoidalne (osiowo-promieniowe) – o przepływie ukośnym,
  - diagonalne (osiowo-promieniowo-osiowe) – o przepływie ukośnym;

- według liczby wirników:
  - jednostopniowe,
  - wielostopniowe;
- z uwagi na układ osi wirników:
  - poziome,
  - pionowe.

**Pompy wirowe krążeniowe**, inaczej zwane samozasysającymi, charakteryzują się wyjątkową cechą, polegającą na tym, że nie muszą być zalane wodą przed rozpoczęciem pracy (tzw. samozasysanie). Tego typu pompy stosuje się często w straży pożarnej oraz w igłofiltrach (np. samozasysająca pompa odśrodkowa).

**Pompy śmigłowe** (rys. 4.12) charakteryzuje osiowy przepływ cieczy przez wirnik, który może mieć nastawne albo stałe łopatki. Występująca w tych pompach kierownica może się znajdować za lub przed wirnikiem. Pompy te wymagają wstępnego zalewania.

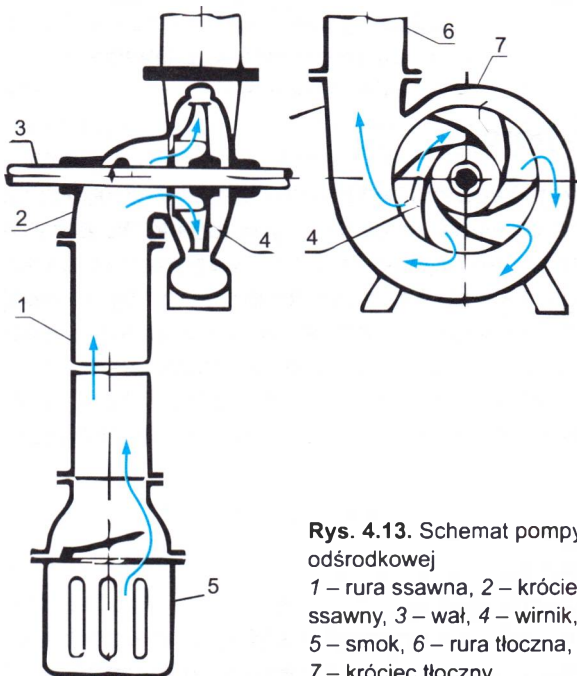
**Pompy odśrodkowe** (rys. 4.13), które również muszą być wstępnie zalewane, charakteryzuje promieniowy przepływ cieczy przez wirnik. Podczas obrotu łopatek wirnika, wskutek działania siły odśrodkowej, ciecz jest odrzucana na zewnątrz i wytwarza się różnica ciśnienia – mniejsze ciśnienie występuje w osi wirnika, większe zaś na jego



**Rys. 4.12.** Schemat pompy śmigłowej  
1 – wirnik, 2 – łopatki wirnika, 3 – łopatki kierownicy, 4 – wał, 5 – kierownica, 6 – lej wlotowy

obwodzie. Pompy tego rodzaju buduje się jako jedno- lub wielostopniowe o szeregowym bądź równoległym połączeniu. Jeśli połączenie jest szeregowe, dodają się wysokości podnoszenia, natomiast jeśli jest równoległe – sumują się wydajności poszczególnych pomp.

**Pompy helikoidalne** charakteryzują się osiowo-promieniowym kierunkiem przepływu przez wirnik i także muszą być wstępnie zalewane. Stosuje się je w chłodniach i pompowniach melioracyjnych. Pompy te buduje się jako jednostopniowe.



**Rys. 4.13.** Schemat pompy odśrodkowej  
1 – rura ssawna, 2 – króciec ssawny, 3 – wał, 4 – wirnik, 5 – smok, 6 – rura tłoczna, 7 – króciec tłoczny

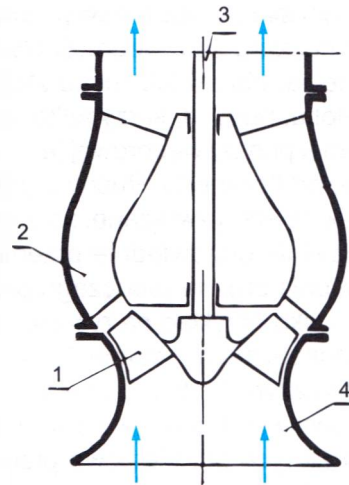
**Pompy diagonalne** (rys. 4.14) charakteryzuje ukośny (przekątny) przepływ cieczy przez wirnik (osiowo-promieniowo-osiowy). Za wirnikiem znajduje się w nich kierownica wyposażona w łopatki, w których energia prędkości zamienia się na energię ciśnienia i zmienia się kierunek ruchu na osiowy. Pompy tego rodzaju mogą pracować poziomo lub pionowo, lecz muszą być wstępnie zalewane. Mają dużą wydajność i sprawność. Wykorzystuje się je np. w ujęciach wodnych i pompowniach melioracyjnych.

**Pompy wyporowe**, inaczej zwane objętościowymi, są maszynami działającymi na zasadzie zmiany objętości przestrzeni roboczej na skutek obrotu lub przesunięcia organu roboczego. Przemiana energii mechanicznej w hydrauliczną w pompach wyporowych odbywa się za pośrednictwem ruchomego organu roboczego szczelnie dopasowanego do kadłuba. Charakterystyczną cechą pomp wyporowych jest przetłaczanie określonych dawek cieczy, w związku z czym wymuszony przez pompę ruch cieczy jest nieciągły.

Ze względu na konstrukcję rozróżnia się pompy wyporowe:

- o postępowo-zwrotnym ruchu organu roboczego, które mogą być:
  - tłokowe,
  - wielotłoczkowe (promieniowe i osiowe),
  - przeponowe, zwane także membranowymi;
- o obrotowym ruchu organu roboczego, występujące jako:
  - zębate,
  - śrubowe,
  - łopatkowe,
  - krzywkowe;
- o wahadłowym (obrotowo-zwrotnym) ruchu organu roboczego, w tym:
  - skrzydełkowe;
- o specjalnej konstrukcji:
  - przewodowe,
  - puszkowe.

Ze względu na to, że pompa wyporowa ma tzw. sztywną charakterystykę (ciśnienie może rosnąć w nieskończoność, gdy płyn nie jest odbierany), w wielu zastosowaniach musi być zabezpieczona przed przeciążeniem, grożącym awarią lub zniszczeniem pompy, silnika ją napędzającego lub rurociągu tłocznego. Pompę wyporową chroni się najczęściej za pomocą zaworu bezpieczeństwa, zwanego także przelewowym. Zawór przelewowy otwiera się, gdy ciśnienie w rurociągu tłocznym przekracza maksymalne dopuszczalne ciśnienie pracy.

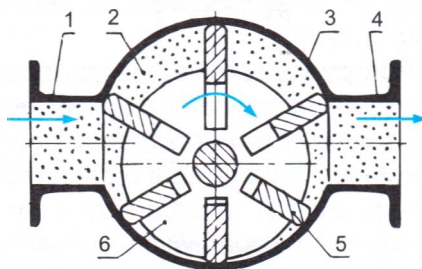


Rys. 4.14. Schemat pompy diagonalnej

1 – wirnik, 2 – kierownica, 3 – wał, 4 – lej wlotowy

Działanie pompy wyporowej polega na wypieraniu określonej dawki cieczy z obszaru ssawnego (dopływowego) w wyniku odpowiedniego ruchu (przesunięcia, obrotu lub ruchu złożonego z przesunięcia i obrotu) organu roboczego (tłoka, nurnika, skrzydełka, wirnika itp.) do obszaru tłocznego. Warunkiem działania pompy wyporowej jest odpowiednio szczelne oddzielenie obszaru ssawnego od tłocznego. Ruchy organu roboczego i przetłaczanej przez niego cieczy są tak ze sobą związane, że zmiana położenia organu roboczego powoduje jednocześnie odpowiednie przemieszczenie ciekłej masy. W przypadku unieruchomienia organu roboczego przepływ cieczy przez pompę jest niemożliwy.

Jako przykład na rysunku 4.15 przedstawiono schemat pompy łopatkowej. W cylindrycznym kadłubie znajduje się mimośrodowy wirnik 6 o kilku rowkach wzdłużnych, w których promieniowo przesuwają się łopatki 5, stanowiące prostokątne płytki o szerokości równej szerokości wirnika. Podczas obrotu wirnika, pod wpływem siły odśrodkowej, łopatki są dociskane do wewnętrznej powierzchni kadłuba 3 pompy (w wielu pompach w rowkach znajdują się także sprężyny dociskające łopatki). Od ssawnego króćca 1 pompy objętość roboczej przestrzeni 2 początkowo się zwiększa, dzięki czemu następuje zasysanie cieczy, a następnie zmniejsza i ciecz jest wypierana na zewnątrz przez tłoczny króciec 4.



**Rys. 4.15.** Schemat pompy łopatkowej  
1 – króciec ssawny, 2 – przestrzeń sierpowa,  
3 – kadłub pompy, 4 – króciec tłoczny,  
5 – łopatka wirnika, 6 – wirnik

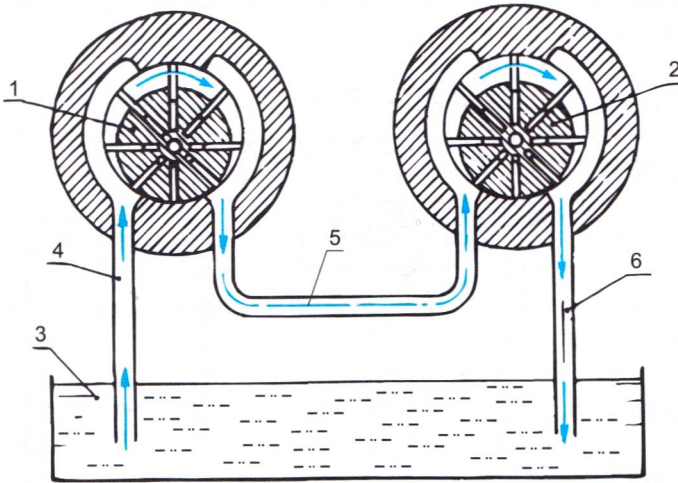
#### 4.3.6. Charakterystyka napędów hydrostatycznych i hydrokinetycznych

**Napędy hydrauliczne** służą do przekazywania energii z miejsca wytworzenia do urządzenia napędzanego. W napędach tych czynnikiem przenoszącym energię jest ciecz. Zasada działania napędu hydraulicznego jest oparta na prawie Pascala, mówiącym o równomiernym rozchodzeniu się ciśnienia w cieczy. Źródłami energii w układach hydraulicznych są zwykle różnego rodzaju pompy. Zadanie takiej pompy polega na zasilaniu układu hydraulicznego dostatecznie dużymi ilościami cieczy roboczej pod odpowiednim ciśnieniem. Podstawowe parametry charakterystyczne pomp to wydajność i ciśnienie przy ustalonej prędkości obrotowej elementu pędnego.

Pracująca pompa wytwarza ciśnienie panujące w przestrzeni, do której tłoczy ciecz. Moc oddawana przez pompę jest równa iloczynowi jej wydajności i ciśnienia tłoczenia. Moc pobierana przez pompę z zewnątrz jest większa niż moc oddawana, ze względu na nieuniknione straty mocy w pracującej pompie. Stosunek mocy oddawanej do mocy pobieranej jest określany jako współczynnik sprawności mechanicznej.

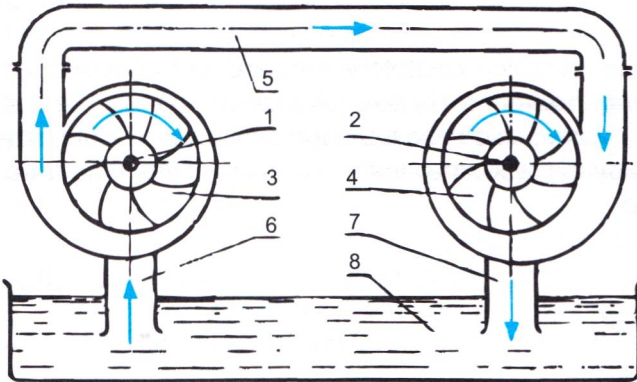
W zależności od sposobu przenoszenia ruchu rozróżnia się napędy:

– **hydrostatyczne**, których działanie polega na wykorzystaniu energii ciśnienia cieczy (rys. 4.16);



**Rys. 4.16.** Schemat najprostszego napędu hydrostatycznego  
1 – pompa wporowa łopatkowa, 2 – silnik wporowy łopatkowy, 3 – zbiornik cieczy roboczej,  
4 – przewód ssawny, 5 – przewód łączący pompę z silnikiem, 6 – przewód odpływowi silnika

– **hydrokinetyczne**, które działają dzięki wykorzystaniu energii kinetycznej cieczy (rys. 4.17).

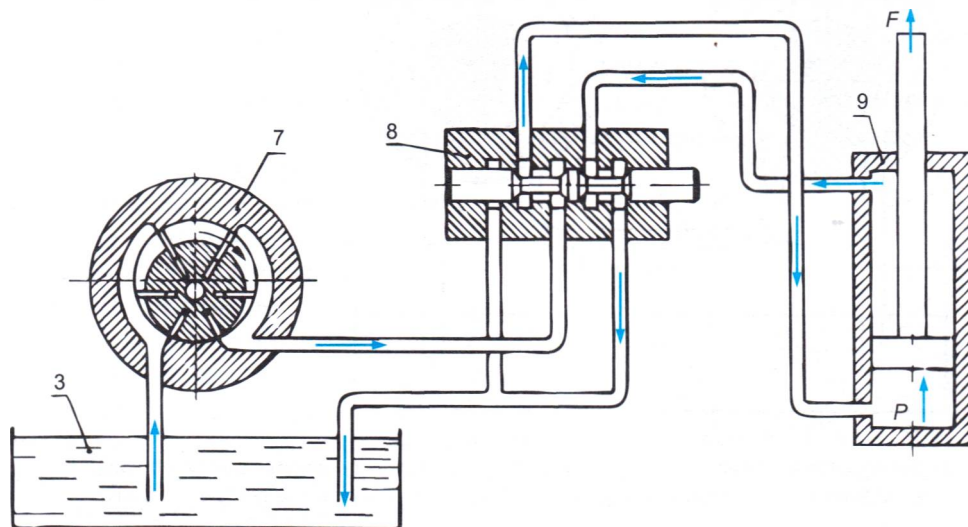


**Rys. 4.17.** Schemat prostego napędu hydrokinetycznego  
1 – wał wejściowy, 2 – wał wyjściowy, 3 – pompa wirowa, 4 – turbina, 5 – przewód łączący pompę z turbiną, 6 – przewód ssawny pompy, 7 – przewód odpływowi turbiny, 8 – zbiornik cieczy roboczej

Zależnie od rodzaju przenoszonego ruchu rozróżnia się **napędy o ruchu obrotowym i postępowym**. W napędach hydraulicznych może też następować zmiana ruchu obrotowego na postępowy.

W skład napędu hydraulicznego wchodzi następujące podstawowe zespoły:  
– **pompy**, zamieniające dostarczoną przez silnik energię mechaniczną na energię hydrauliczną (w napędach hydrostatycznych stosuje się pompy wporowe, a w hydrokinetycznych pompy wirowe);

- **silniki hydrauliczne lub siłowniki**, które zamieniają dostarczoną przez pompy energię hydrauliczną z powrotem na energię mechaniczną;
- **zawory sterujące** przepływem czynnika roboczego w układzie napędu hydraulicznego (rys. 4.18).



**Rys. 4.18.** Schemat napędu hydrostatycznego z zaworem sterującym  
 1 – zbiornik cieczy roboczej, 2 – pompa wyporowa, 3 – zawór sterujący, 4 – siłownik hydrauliczny,  
 p – ciśnienie

Oprócz wymienionych podstawowych zespołów w napędzie hydraulicznym niezbędne są również **elementy pomocnicze**, takie jak przewody łączące, zbiorniki, filtry, akumulatory hydrauliczne, chłodnice lub podgrzewacze oraz przyrządy do pomiaru ciśnienia. Układy hydrauliczne stosuje się jako układy napędowe, a także jako układy sterujące.

Do zalet napędów hydraulicznych należą:

- możliwość uzyskania bardzo dużych sił przy małych rozmiarach urządzeń,
- możliwość uzyskania bezstopniowej zmiany prędkości ruchu,
- użycie względnie małych sił do sterowania pracą ciężkich maszyn,
- możliwość zdalnego sterowania,
- możliwość zastosowania mechanizacji i automatyzacji ruchów,
- duża trwałość elementów układów hydraulicznych oraz łatwość ich wymiany.

Wady napędów hydraulicznych stanowią:

- trudności związane z uszczelnieniem elementów ruchomych,
- duże straty energii na pokonywanie oporów przepływu.

W ogólnym bilansie zalety napędu i sterowania hydraulicznego znacznie przewyższają jego wady, dlatego często są one spotykane w przemyśle. Obecnie nie ma takiego rodzaju przemysłu ani dziedziny gospodarki narodowej, w których nie wykorzystuje się napędów i sterowania hydraulicznego. Stosuje się je w lotnictwie, okrętownictwie, motoryzacji, kolejnictwie, maszynach budowlanych i dro-



gowych, hutnictwie, górnictwie, wiertnictwie, rolnictwie, łączności, gospodarce komunalnej, budownictwie lądowym i wodnym, a także w pojazdach i raketach kosmicznych.

Nośnikami energii w napędach hydrostatycznych są ciecze robocze (czynniki robocze lub obiegowy). Często wykorzystywanymi cieczami roboczymi są oleje mineralne, skomponowane z produktów destylacji ropy naftowej. Jednak ich stosowanie jest ograniczone ze względu na groźbę zanieczyszczenia środowiska naturalnego. Najczęściej występują w postaci emulsji oleju w wodzie lub wody w oleju oraz roztworów glikoli w wodzie, a także bezwodnych cieczy syntetycznych.






W napędach hydrostatycznych stosuje się sterowanie prędkością. Sterowanie prędkością obrotową polega na zmianie wydajności pompy, zmianie oporów przepływu cieczy w instalacjach i zmianie jednostkowej chłonności silnika lub zmianie powierzchni czynnej tłoka siłownika.

W napędach hydrokinetycznych pompa i turbina są usytuowane we wspólnej obudowie. Pompa napędzana silnikiem zasysa ciecz roboczą ze zbiornika i przetłacza ją do dyfuzora, nadając jej energię kinetyczną. W dyfuzorze pompy energia kinetyczna cieczy zostaje zamieniona na ciśnienie, po czym przepływa rurą tłoczną do turbiny. W dyfuzorze turbiny energia ciśnienia cieczy zostaje ponownie zamieniona na energię kinetyczną, zmuszając wirnik turbiny do obrotu. Ciecz traci energię, której kosztem wirnik wykonuje pracę mechaniczną, napędzając za pomocą wału urządzenia robocze. Po opuszczeniu turbiny ciecz wraca do zbiornika rurą odpływową. Dobierając odpowiednie wymiary wirnika pompy i turbiny, można uzyskać odpowiednie przełożenie momentu i prędkości obrotowej. Napęd hydrokinetyczny będzie wówczas pracował jako przekładnia hydrokinetyczna. Jeżeli wymiary obu wirników są takie same, to układ pracuje jako sprzęgło hydrokinetyczne, nie zmieniając momentu obrotowego.






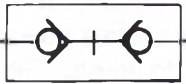
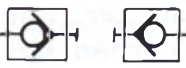



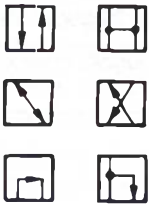

W tablicy 4-1 zestawiono najważniejsze oznaczenia uproszczonych symboli elementów hydraulicznych.

Tablica 4-1



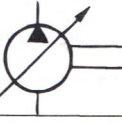
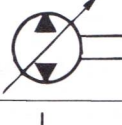
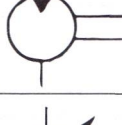
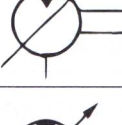

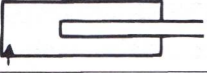
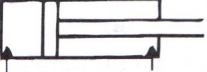


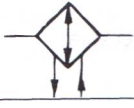
**Zestawienie najważniejszych oznaczeń uproszczonych symboli elementów hydraulicznych**

Symbol	Opis
	Przewód obwodu roboczego
	Przewód obwodu sterowania (długość kresek nie mniejsza niż 20 grubości linii)
	Przewód odprowadzania przecieków i odpowietrzania (długość kresek nie większa niż 5 grubości linii)
	Skrzyżowanie mijających się przewodów
	Skrzyżowanie mijających się przewodów, gdy nie budzi to wątpliwości













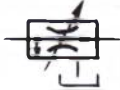
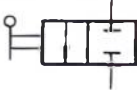
Tablica 1-4 (cd.)

Symbol	Opis
	Połączenia przewodów stałe
	Przewód giętki
	Przewód zamknięty
	Zbiornik zamknięty, bez połączenia z atmosferą, z przewodami poniżej poziomu płynu
	Odpowietrznik ciągły (np. na zbiorniku)
	Szybkozłaczka z mechanicznie otwieranymi zaworami zwrotnymi (połączona)
	Szybkozłaczka z mechanicznie otwieranymi zaworami zwrotnymi
	Rozdzielacz dwupołożeniowy
	Rozdzielacz wielopołożeniowy (liczba klatek jest równa liczbie położeń)
	Doprowadzenie przewodów do rozdzielacza (rysowane tylko do jednego, najlepiej środkowego, położenia)
	Oznaczenie przepływu w rozdzielaczu (linie w klatce oznaczają połączenia przewodów w danym położeniu rozdzielacza)
	Przepływ zamknięty w rozdzielaczu




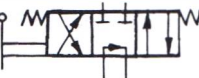

Tablica 1-4 (cd.)

Symbol	Opis
	Zawór dławiący o oporze lepkościowym, nastawialny
	Pompa o stałej objętości roboczej, o stałym kierunku przepływu
	Pompa o zmiennej objętości roboczej, o jednym kierunku przepływu
	Pompa o zmiennej objętości roboczej, o dwóch kierunkach przepływu
	Silnik hydrauliczny o stałej objętości roboczej, o jednym kierunku przepływu
	Silnik hydrauliczny o zmiennej objętości roboczej, o jednym kierunku przepływu
	Silnik hydrauliczny o zmiennej objętości roboczej, o dwóch kierunkach przepływu
	Siłownik nurnikowy
	Siłownik tłokowy dwustronnego działania z tłoczyskiem jednostronnym
	Akumulator hydrauliczny
	Filtr
	Chłodnica z zaznaczeniem przewodów cieczy chłodzącej

Tablica 1-4 (cd.)

Symbol	Opis
	Sterowanie przyciskiem
	Sterowanie rolką
	Sterowanie elektryczne elektromagnesem dwucewkowym
	Sterowanie elektryczne elektromagnesem i ciśnieniem hydraulicznym
	Sterowanie bezpośrednie ciśnieniem
	Sterowanie ciśnieniem własnym – drogi sterowania znajdują się wewnątrz urządzenia
	Manometr
	Termometr
	Przeptywomierz
	Zawór odcinający
	Zawór bezpieczeństwa (przelewowy)
	Regulator przepływu trójdrogowy nienastawialny
	Regulator przepływu trójdrogowy nastawialny
	Rozdzielacz dwudrogowy, dwupołożeniowy, sterowany ręcznie

Tablica 1-4 (cd.)

Symbol	Opis
	Rozdzielacz dwudrogowy, dwupołożeniowy, sterowany ciśnieniem obustronnie
	Regulator przepływu dwudrogowy, nastawialny
	Regulator przepływu dwudrogowy, nienastawialny (tzw. ogranicznik przepływu dwudrogowy)
	Rozdzielacz trójpołożeniowy czterodrogowy sterowany ręcznie, powracający samoczynnie do położenia środkowego pod działaniem sprężyn
	Zawór dławiąco-zwrotny jednokierunkowy nienastawialny

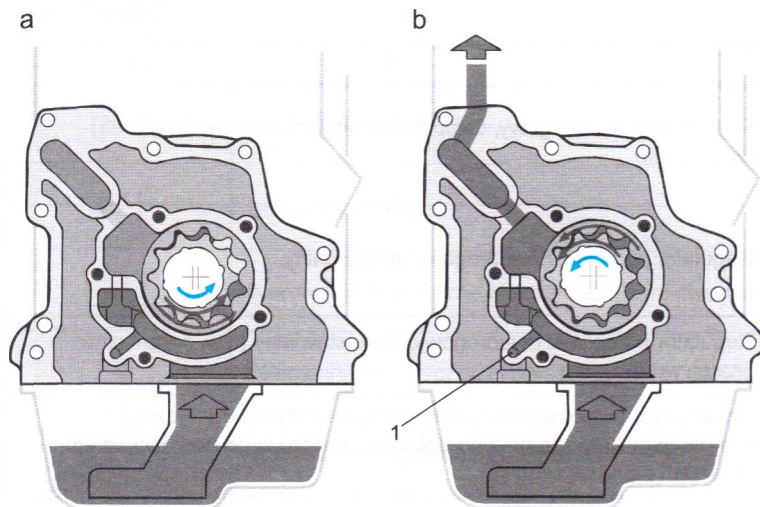
### 4.3.7. Pompy i napędy hydrauliczne w pojazdach samochodowych

Pompy i napędy hydrauliczne są szeroko wykorzystywane w pojazdach samochodowych. Poniżej przedstawiono wybrane przykłady ich zastosowania.

**Pompa oleju silnikowego.** W układach smarowania silników pojazdów samochodowych stosuje się zębate pompy oleju, które charakteryzuje prosta budowa, niezawodność działania oraz wydatek zależny od prędkości obrotowej. Spotyka się dwa rodzaje pomp zębatych – o zazębieniu zewnętrznym i wewnętrznym.

Zębata pompa oleju o zazębieniu wewnętrznym składa się z dwóch kół zębatych o różnych średnicach. Koło mniejsze ma uzębienie zewnętrzne, a większe – uzębienie wewnętrzne. Względem siebie koła zębate są osadzone mimośrodowo. Koło wewnętrzne pompy (o zazębieniu zewnętrznym) jest napędzane od wału korbowego silnika, a jej koło zewnętrzne obraca się w obudowie pompy. Schemat działania takiej pompy przedstawiono na rysunku 4.19. Ruch obrotowy koła wewnętrznego wymusza obrót koła zewnętrznego. Podczas obrotu kół zmienia się odstęp między ich zębami. Dzięki temu olej może być zasysany z miski olejowej i tłoczony do układu smarowania silnika.

**Hamulec hydrauliczny.** Powszechnie stosowany we współczesnych pojazdach samochodowych hydrauliczny hamulec roboczy jest hamulcem ciemnym, uruchamianym hydraulicznie. Jego układ hydrauliczny składa się z pompy hamulcowej, przewodów ciśnieniowych oraz cylinderków roboczych przy każdym

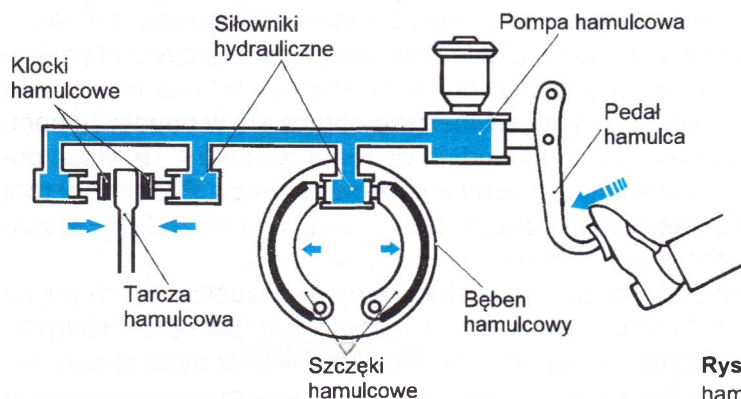


**Rys. 4.19.** Schemat działania pompy oleju o zazębieniu wewnętrznym  
a – zasysanie oleju z miski olejowej, b – tłoczenie oleju do układu smarowania, 1 – zawór przelewowy

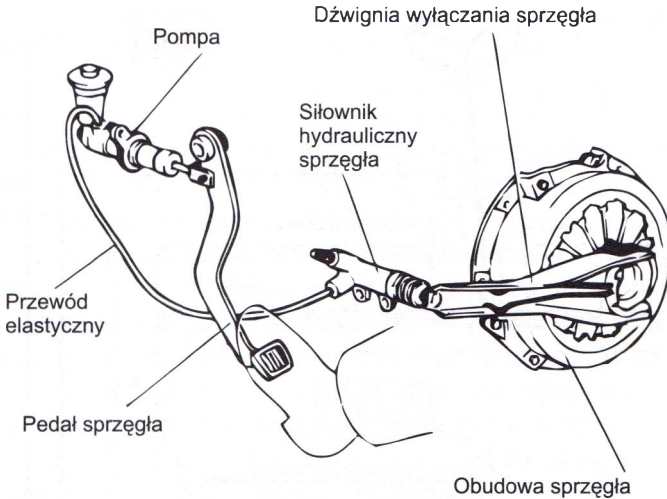
z kół. W celu zahamowania pojazdu kierujący naciska pedał hamulca połączony z pompą hamulcową.

Najprostszy hamulec hydrauliczny to dwa cylindry połączone przewodem (rys. 4.20). Wciskanie tłoka w jednym z nich (pompa hamulcowa) powoduje przetłaczanie płynu do drugiego cylindra (zacisk hamulcowy) i wypychanie tłoczków roboczych, które dociskają klocki hamulcowe do tarczy lub szczęki hamulcowe do bębna. Hydrauliczny układ uruchamiania hamulców zapewnia równy rozkład siły hamowania między kołami lewej i prawej strony pojazdu, dzięki czemu nie wymaga kłopotliwej regulacji.

**Hydrauliczne sterowanie sprzęgła ciernego.** Podobnie jak najprostszy hamulec hydrauliczny działa hydrauliczne sterowanie sprzęgła ciernego samochodu. Hydrauliczny układ sterowania (rys. 4.21) zawiera pompę sprzęgła



**Rys. 4.20.** Zasada działania hamulców hydraulicznych



**Rys. 4.21.** Sprzęgło sterowane hydraulicznie

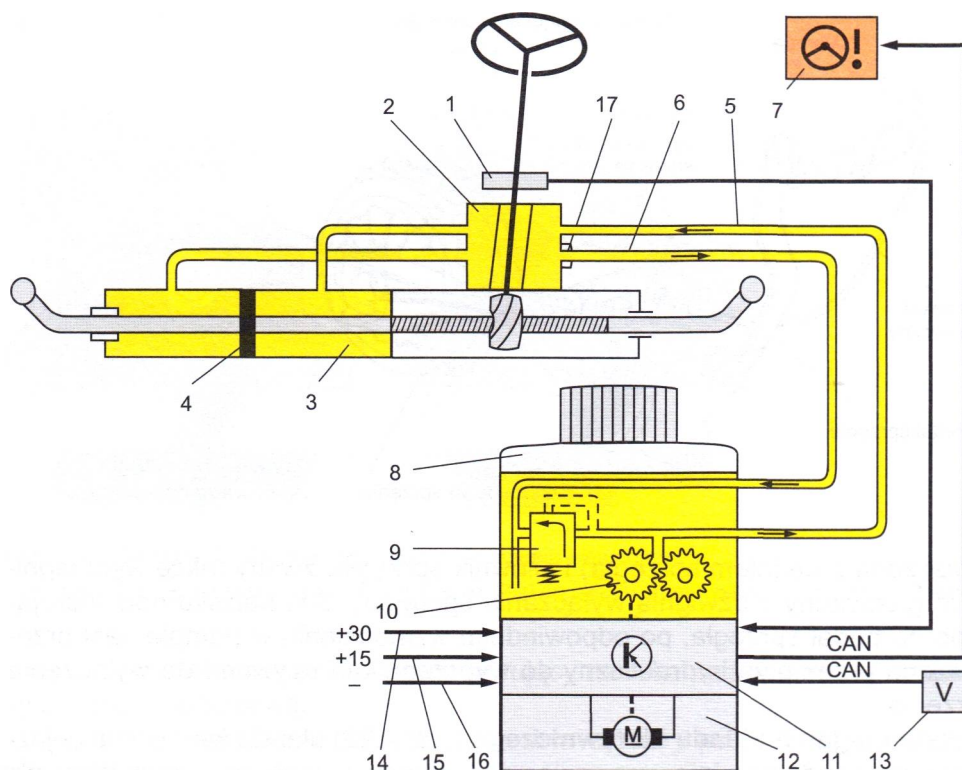
(połączoną z pedałem sprzęgła) i siłownik sprzęgła, zwany także wyprężnikiem (połączony z dźwignią wyłączenia sprzęgła). Siła nacisku nogi kierującego na pedał sprzęgła, po odpowiednim wzmocnieniu w pompie, jest przenoszona przez płyn hydrauliczny do wyprężnika i używana do wyłączenia sprzęgła.

**Wspomaganie układu kierowniczego** (rys. 4.22) ułatwia kierowanie pojazdem samochodowym, nie wymagając od kierującego używania nadmiernej siły niezbędnej do obrotu kierownicy. Siła przykładana przez kierowcę do koła kierownicy w samochodzie ze wspomaganie układu kierowniczego nie jest wykorzystywana do pokonania oporów skrętu kół. Służy ona jedynie do uruchomienia (pneumatycznego lub hydraulicznego) zaworu sterującego siłownikiem, który działa na odpowiedni element wykonawczy przekładni kierowniczej. Urządzenie wspomagające powinno:

- zapewnić samopowracalność układu kierowniczego do jazdy na wprost;
- tłumić wstrząsy wywołane nierównościami drogi w taki sposób, aby nie pozbawić kierowcy informacji o jakości nawierzchni i kącie skrętu kół kierowanych;
- być tak zbudowane, aby jego awaria nie powodowała utraty możliwości kierowania samochodem.

**Przekładnia hydrokinetyczna** (patrz rys. 4.7 w podrozdz. 4.3.2) jest kolejnym przykładem zespołu będącego podstawowym elementem większości automatycznych hydromechanicznych skrzynek biegów.

**Podnośnik hydrauliczny** to urządzenie umożliwiające podnoszenie ciężkich przedmiotów. Działa on, wykorzystując ciecz, której wypychanie powoduje uniesienie się jednej z części podnośnika, co pozwala na podniesienie przedmiotu. Podnośniki hydrauliczne wykorzystuje się w wielu dziedzinach, m.in. jako wyposażenie dodatkowe samochodów ciężarowych i maszyn roboczych oraz do obsługi i naprawy pojazdów samochodowych.



**Rys. 4.22.** Schemat układu kierowniczego ze wspomaganiem elektrohydraulicznym  
 1 – czujnik obrotów kierownicy, 2 – zawór sterujący urządzenia wspomagającego, 3 – cylinder, 4 – tłok połączony z listwą zębatą, 5 – przewód zasilający, 6 – przewód powrotny, 7 – lampka kontrolna w zestawie wskaźników, 8 – zbiornik cieczy roboczej, 9 – zawór zabezpieczający, 10 – pompa zębata, 11 – sterownik układu kierowniczego, 12 – silnik elektryczny, 13 – sygnał z prędkościomierza, 14 i 15 – prąd z zacisków, 16 – połączenie z masą, 17 – śruba przelotowa z zaworem zwrotnym

## 4.4. Maszyny ciepłe

### 4.4.1. Podstawowe właściwości gazów

**Gazem** nazywamy stan skupienia materii, w którym ciało fizyczne łatwo zmienia kształt i zajmuje całą dostępną mu przestrzeń. Właściwości te wynikają z własności cząsteczek, które w fazie gazowej mają pełną swobodę ruchu. Wszystkie one cały czas przemieszczają się w przestrzeni zajmowanej przez gaz i nigdy nie zatrzymują się w jednym miejscu. Między cząsteczkami nie występują oddziaływania dalekozasięgowe albo są one bardzo słabe. Jedyne sposoby, w jaki cząsteczki na siebie oddziałują, to zderzenia. Oprócz tego, jeśli gaz jest zamknięty w naczyniu, to jego cząsteczki stale zderzają się ze ściankami tego naczynia, wywierając na nie określone i stałe ciśnienie.



Cząsteczki gazu przemieszczają się z różną prędkością, a rozkład ich prędkości ma charakter całkowicie przypadkowy. Średnia prędkość poruszania się cząsteczek w gazie zależy wyłącznie od ich masy molowej i temperatury. Podczas obniżania temperatury gazu maleje średnia prędkość ruchu cząsteczek, a zwiększanie ciśnienia powoduje zmniejszenie średniej odległości między cząsteczkami. Obniżanie temperatury lub zwiększanie ciśnienia prowadzi w końcu do skroplenia lub resublimacji gazu.

**Skraplanie** jest przemianą fazową, polegającą na przechodzeniu ze stanu gazowego w stan ciekły. Procesem odwrotnym do skraplania jest parowanie.

**Resublimacja** (desublimacja) to przemiana fazowa, polegająca na bezpośrednim przechodzeniu substancji ze stanu gazowego (pary) w stan stały (z pominięciem stanu ciekłego). Resublimacja jest procesem odwrotnym do sublimacji. W wyniku resublimacji wody (pary wodnej) powstaje szron.

Przemiana gazu w ciecz lub ciało stałe wynika z faktu, że w pewnej chwili energia oddziaływań międzycząsteczkowych (sił van der Waalsa, wiązań wodorowych itp.) staje się większa niż energia kinetyczna cieplnego ruchu cząsteczek.

W fizyce przyjmuje się często prosty model gazu doskonałego, w którym cząsteczki gazu nie przyciągają się i nie mają objętości własnej. Teorie i zależności termodynamiczne wywiedzione z założeń gazu doskonałego sprawdzają się dość dobrze w przypadku niezbyt dużych ciśnień oraz niezbyt niskich temperatur. W innych przypadkach prawa te jednak zawodzą i wtedy stosuje się bardziej złożone modele gazów oraz tworzy się dokładniejsze teorie i zależności.

Interesującą cechą gazu (ściślej gazu doskonałego) jest to, że objętość przez niego zajmowana (w danej temperaturze i ciśnieniu) jest stała, niezależnie od rodzaju cząsteczek zawartych w gazie, i zależy wyłącznie od liczby tych cząsteczek. Innymi słowy, jeśli weźmiemy np. 1 litr wodoru i 1 litr tlenu (oba przy takim samym ciśnieniu i w takiej samej temperaturze), to w obu objętościach będzie dokładnie taka sama liczba cząsteczek. Jest to tzw. prawo Avogadra.

Aby jednoznacznie określić stan gazu, poza składem chemicznym (ułamki wagowe lub molowe) i temperaturą należy podać gęstość gazu lub jego ciśnienie. Zamiast gęstości można podać równoważnie objętość molową lub stężenie gazu.

Dla dowolnego gazu:

– objętość jednego mola w warunkach normalnych

$$V = 22,4 \text{ dm}^3$$

– licznosc (liczba moli)

$$n = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M} \quad (4.10)$$

– stężenie molowe

$$C_m = \frac{n}{V} \quad (4.11)$$

– objętość molowa

$$V_m = \frac{V}{n} \quad (4.12)$$

gdzie:

$m$  – masa gazu,

$V$  – objętość gazu,

$N$  – liczba cząsteczek,

$N_A$  – liczba Avogadra,

$M$  – masa molowa.

Ciśnienie gazu doskonałego zależy od temperatury i może być określone za pomocą wzoru

$$p = C_m \cdot R \cdot T \quad (4.13)$$

gdzie:

$R$  – uniwersalna stała gazowa,

$T$  – temperatura.

#### 4.4.2. Pierwsza zasada termodynamiki

**Pierwsza zasada termodynamiki** jest jednym z podstawowych praw termodynamiki, będącym odpowiednikiem zasady zachowania energii dla układów termodynamicznych. Zasada ta stanowi podsumowanie równoważności ciepła i pracy oraz stałości energii układu izolowanego.

##### **Pierwsza zasada termodynamiki dla układów zamkniętych**

Oddziaływanie energetyczne między zamkniętym układem termodynamicznym a jego otoczeniem może przyjmować dwie formy, tzn. energia może być wymieniana w postaci ciepła i pracy. W rezultacie tych oddziaływań ulega zmianie energia układu.

Weźmy pod uwagę układ zamknięty, który w czasie przemiany nie zmienia swojej energii kinetycznej ani potencjalnej. W takiej sytuacji zmiana energii całkowitej układu jest równa zmianie jego energii wewnętrznej.

Zasada zachowania energii dla takiego układu ma postać

$$\Delta U = Q - L \quad (4.14)$$

gdzie:

$\Delta U$  – zmiana energii wewnętrznej układu,

$Q$  – ciepło doprowadzone do układu,

$L$  – praca wykonana przez układ.

Równanie to jest matematycznym zapisem pierwszej zasady termodynamiki, która jest słuszna dla dowolnej przemiany termodynamicznej zachodzącej w układzie zamkniętym.

Pierwsza zasada termodynamiki brzmi następująco: **w zamkniętym układzie termodynamicznym, który nie zmienia swej energii kinetycznej i potencjal-**

**nej, zmiana energii wewnętrznej jest równa sumie algebraicznej pracy oraz ciepła wymienianego z otoczeniem.**

Przegrupowując wyrazy w równaniu (4.14), można otrzymać następującą jego postać

$$L = Q - \Delta U \quad (4.15)$$

Z równania w tej postaci wynika, że wykonanie pracy wymaga dostarczenia do układu ciepła z otoczenia albo zmniejszenia energii wewnętrznej układu. Oznacza to, że praca nie może być wykonana z niczego.

Setki lat podejmowano próby skonstruowania urządzenia, które wykonywałoby pracę, nie będąc zasilane energią dostarczaną z zewnątrz. Urządzenie takie nazwano *perpetuum mobile* pierwszego rodzaju. Zgodnie z pierwszą zasadą termodynamiki nie można go zrealizować.

### Pierwsza zasada termodynamiki dla układów otwartych

W praktycznych zastosowaniach najczęściej korzysta się z następujących przypadków szczególnych pierwszej zasady termodynamiki dla układów otwartych:

- układ znajduje się w stanie ustalonym, a więc parametry stanu układu nie zmieniają się w czasie – wtedy  $\Delta U = 0$ ;
- dopływ czynnika do układu i jego odpływ z układu są ustalone, tzn. ilość masy dopływającej i odpływającej jest jednakowa i stała w czasie oraz parametry czynnika na wlocie i wylocie są stałe w czasie.

### 4.4.3. Przemiany gazów doskonałych

W przemianach energetycznych zachodzących w silnikach i urządzeniach cieplnych biorą udział czynniki termodynamiczne, nazywane często czynnikami roboczymi. Najczęściej są nimi gazy lub pary. Badania własności gazów i par doprowadziły do wniosku, że dogodnie jest przyjęcie pojęcia gazu doskonałego jako pewnego uproszczonego wzorca gazów rzeczywistych. Stwierdzono, że w pewnym zakresie zmienności parametrów termodynamicznych wszystkie gazy rzeczywiste zachowują się w sposób zbliżony do gazu doskonałego, którego własności dają się opisać prostymi zależnościami.

**Gazem doskonałym** nazywamy gaz:

- mający stałe ciepło właściwe,
- stosujący się do prawa Avogadra (patrz p. 4.4.1),
- spełniający równanie stanu Clapeyrona (patrz dalej).

Gazy rzeczywiste zbliżają się swoim zachowaniem do gazu doskonałego pod niskim ciśnieniem i w niezbyt wysokiej temperaturze.

Prawo Avogadra mówi, że różne gazy doskonałe znajdujące się w tej samej temperaturze i pod tym samym ciśnieniem w takiej samej objętości zawierają jednakową liczbę cząsteczek.

Dla dowolnej masy  $m$  gazu równanie stanu gazu doskonałego ma postać

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad (4.16)$$

$$V = v \cdot m$$

(4.17)

Zatem

$$\frac{p \cdot v}{T} = R \quad \text{lub} \quad p \cdot v = R \cdot T$$

gdzie:

$p$  – ciśnienie [MPa],

$v$  – objętość właściwa [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ],

$T$  – temperatura [K],

$m$  – masa gazu [kg],

$V$  – objętość [ $\text{m}^3$ ],

$R$  – stała gazowa.

Równanie

$$R = \frac{p \cdot v}{T}$$

nazywa się równaniem stanu gazu doskonałego lub także równaniem Clapeyrona dla jednostkowej masy gazu.

### Przemiany charakterystyczne gazów doskonałych

**Przemianą gazu doskonałego** nazywamy proces zachodzący dla stałej masy gazu, w wyniku którego zmieniają pewne parametry stanu gazu, przy czym jeden z parametrów pozostaje stały.

Przemianę odwracalną nazywamy taką przemianę termodynamiczną, która przebiega bez strat, tzn. przebiegając w obu kierunkach – zarówno od punktu początkowego do końcowego, jak i przeciwnie – zawsze ma te same stany pośrednie i tak samo oddziałuje na otoczenie. Przemiana nieodwracalna nie spełnia podanych warunków.

Jeszcze inaczej można powiedzieć, że dwie przemiany są odwracalne, jeżeli po ich zrealizowaniu całkowita energia, wymieniona w postaci ciepła i pracy między otoczeniem a czynnikiem, jest równa zero, a wszystkie parametry otoczenia i czynnika wróciły do początkowych wartości, czyli cały układ cieplny i otoczenie powróciły do stanu wyjściowego. Aby więc przemiana była odwracalna, w każdej chwili musi być jednakowa temperatura całej objętości czynnika i każdorazowo taka sama temperatura źródła, z którego ciepło jest pobierane lub do którego jest odprowadzane.

Jeżeli podczas przemiany wystąpi różnica temperatury między czynnikiem a źródłem ciepła, to proces stanie się nieodwracalny, gdyż ciepło przejdzie z obszaru o wyższej temperaturze do obszaru o niższej temperaturze, a odwrócenie takiego procesu jest niemożliwe, gdyż niemożliwy jest przepływ ciepła z obszaru o temperaturze niższej do obszaru o temperaturze wyższej. Przemiana staje się nieodwracalna również wówczas, gdy występuje różnica ciśnienia. Konsekwencją bowiem każdego wzrostu ciśnienia jest przyspieszenie cząsteczek czynnika, powstawanie wirów i związane z tym zjawisko tarcia.

Przemiany zachodzące w rzeczywistych urządzeniach technicznych są nieodwracalne. Spośród nich największe znaczenie praktyczne mają przemiany połączone z tarcie lub dławieniem.

**Przemiana izotermiczna** ( $T = \text{const}$ )

W przemianie izotermicznej temperatura czynnika nie ulega zmianie ( $T = \text{const}$ ). Wykresem tej przemiany w układzie  $p-v$  jest hiperbola równoosiowa (rys. 4.23). Parametry stanu czynnika zmieniają się zgodnie z zależnością

$$p_1 \cdot v_1 = p_2 \cdot v_2 = R \cdot T \tag{4.18}$$

Oznacza to, że dla danej stałej masy gazu iloczyn jego ciśnienia i objętości jest wielkością stałą.

Przykładem przemiany izotermicznej jest bardzo powolne sprężanie gazu w naczyniu o ściankach dobrze przewodzących ciepło (temperatura gazu jest wówczas równa temperaturze otoczenia).

**Przemiana izobaryczna**

( $p = \text{const}$ )

Równanie przemiany izobarycznej jest następujące

$$\frac{v}{T} = \text{const}$$

Zależność ta oznacza, że dla danej stałej masy gazu iloraz jego objętości i temperatury bezwzględnej jest wielkością stałą (rys. 4.24).

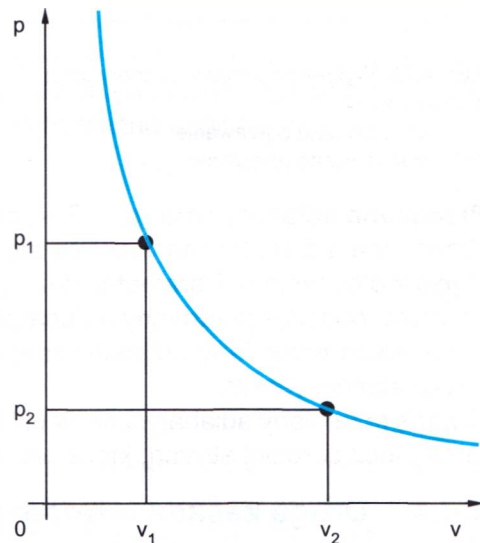
**Przemiana izochoryczna** ( $v = \text{const}$ )

Równanie przemiany izochorycznej ma postać

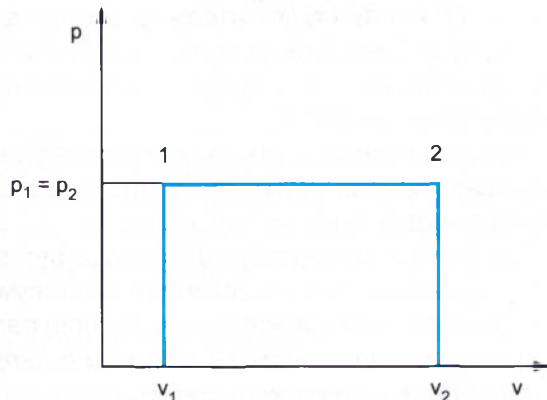
$$\frac{p}{T} = \text{const}$$

Zależność ta oznacza, że dla danej stałej masy gazu iloraz jego ciśnienia i temperatury bezwzględnej jest wielkością stałą (rys. 4.25).

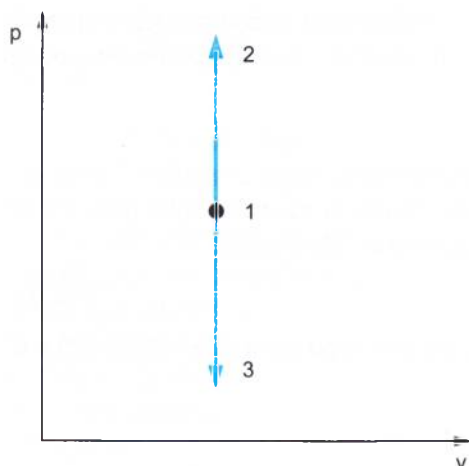
Przykładem takiej przemiany jest ogrzewanie gazu w szczelnie zamkniętym naczyniu, wykonanym z materiału o bardzo małej rozszerzalności cieplnej.



Rys. 4.23. Wykres przemiany izotermicznej w układzie  $p-v$

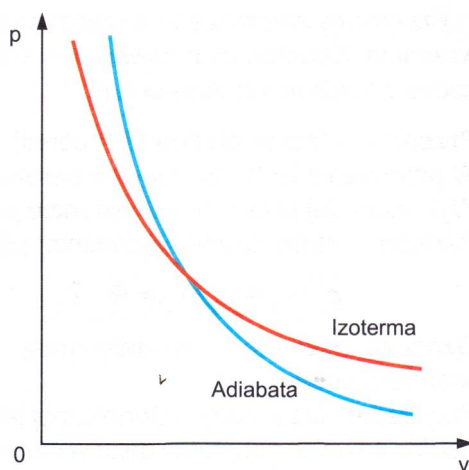


Rys. 4.24. Wykres przemiany izobarycznej w układzie  $p-v$



**Rys. 4.25.** Wykres przemiany izochorycznej w układzie  $p-v$

1-2 – izochoryczne ogrzewanie,  
1-3 – izochoryczne oziębianie



**Rys. 4.26.** Wykres przemiany adiabatycznej w układzie  $p-v$

**Przemiana adiabatyczna** ( $p$ ,  $v$ ,  $T$  – zmienne, lecz  $Q = 0$ )

Przemianą adiabatyczną nazywa się przemianę, w której nie ma wymiany ciepła z otoczeniem. Parametry stanu gazu, czyli jego ciśnienie, objętość i temperatura, podczas przemiany adiabatycznej są zmienne.

Przykładem przemiany adiabatycznej jest sprężanie powietrza w silniku o zapłonie samoczynnym.

Wykres przemiany adiabatycznej w układzie  $p-v$  jest krzywą przypominającą izotermę, lecz bardziej stromą, która nazywa się adiabatą (rys. 4.26).

#### 4.4.4. Druga zasada termodynamiki

**Druga zasada termodynamiki brzmi: w układzie termodynamicznie izolowanym istnieje funkcja stanu zwana entropią  $S$ , której zmiana  $\Delta S$  w procesie adiabatycznym spełnia nierówność  $\Delta S \geq 0$ , przy czym równość zachodzi wtedy i tylko wtedy, gdy proces jest odwracalny.**

Entropia  $S$  jest funkcją stanu będącą miarą liczby sposobów  $W$ , na które może być zrealizowany określony stan termodynamiczny danego układu w określonej temperaturze  $T$ .

W uproszczeniu drugą zasadę termodynamiki można wyrazić również w następujący sposób: *w układzie termodynamicznie izolowanym w dowolnym procesie entropia nigdy się nie zmniejsza.*

Druga zasada termodynamiki może być sformułowana na wiele równoważnych sposobów. Najszerzej znane alternatywne sformułowania pochodzą od:

– Clausiusa: „*Nie istnieje proces termodynamiczny, którego jedynym wynikiem byłoby pobranie ciepła ze zbiornika o temperaturze niższej i przekazanie go do zbiornika o temperaturze wyższej*”

oraz

– Kelvina: „Nie jest możliwy proces, którego jedynym skutkiem byłoby pobranie pewnej ilości ciepła ze zbiornika i zamiana go w równoważną ilość pracy”.

Można udowodnić równoważność tych stwierdzeń z podanym poprzednio sformułowaniem.

Wprowadzając pojęcie *perpetuum mobile* drugiego rodzaju, jako silnika cieplnego pobierającego energię cieplną z układu i w całości przekształcającego ją na pracę, drugą zasadę termodynamiki można sformułować także w następujący sposób: „Nie istnieje *perpetuum mobile* drugiego rodzaju”.

### Wnioski wynikające z drugiej zasady termodynamiki

Silnik cieplny nie może działać bez różnicy temperatury.

Inne, równoważne, sformułowanie drugiej zasady termodynamiki wiąże się z silnikiem cieplnym, czyli urządzeniem zamieniającym ciepło na pracę. Zgodnie z tym sformułowaniem spontaniczny przekaz ciepła może się dokonywać tylko od ciała cieplejszego do zimniejszego. Idealny silnik, pracujący w cyklu przemian odwracalnych, ma sprawność  $\eta$  ograniczoną różnicą temperatury ciał, między którymi jest przekazywane ciepło. Zatem można napisać, że

$$\eta = \frac{W}{Q} \quad (4.19)$$

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad (4.20)$$

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (4.21)$$

gdzie ciepło jest przekazywane od ciała o wyższej temperaturze ( $T_1$ ) do ciała o niższej temperaturze ( $T_2$ ). Silnik spełniający tę regułę nazywa się silnikiem Carnota.

Z zastosowanej do silników cieplnych drugiej zasady termodynamiki wynika, że ciepła nie można zamieniać na pracę bez ograniczeń, choć jest to zgodne z pierwszą zasadą termodynamiki. Bez wkładu pracy nie można przesyłać energii cieplnej między ciałami mającymi tę samą temperaturę. Oznacza to, że *perpetuum mobile* drugiego rodzaju nie istnieje.

Prowadzi to do dalszego wniosku o następującej treści: nie da się w pełni kontrolować procesów statystycznych, np. nie można czerpać energii z przypadkowych ruchów cząstek, takich jak ruchy Browna. Z drugiej zasady termodynamiki wynika, że przyrządy do czerpania tego rodzaju energii po pewnym czasie też zaczną się zachowywać przypadkowo, a więc staną się bezużyteczne. Miarą tej przypadkowości jest właśnie temperatura. Aby czerpać energię termiczną z układu, trzeba dysponować czymś zimniejszym niż ten układ.

### 4.4.5. Przemiany energetyczne w maszynach

**Maszynoznawstwo ogólne** jest dziedziną wiedzy o maszynach i urządzeniach technicznych powszechnego użytku. Obejmuje ono teorię maszyn i mechani-

zmów stosowanych w różnych dziedzinach techniki oraz hydromechanikę, aeromechanikę, teorię maszyn cieplnych, a także podstawy innych dziedzin wiedzy, umożliwiających dalszy rozwój maszyn.

W odróżnieniu od maszynoznawstwa ogólnego, maszynoznawstwo specjalistyczne (np. chemiczne, górnicze, elektryczne, rolnicze) stanowi zasób wiedzy dotyczącej maszyn stosowanych w określonych gałęziach przemysłu.

Podstawą działania wszystkich maszyn są zachodzące w nich przemiany energii jednego rodzaju w energię innego rodzaju. Rozwój budowy maszyn i urządzeń technicznych stał się możliwy dzięki opanowaniu przez człowieka umiejętności wykorzystania zasobów energii występujących w przyrodzie oraz wykryciu praw rządzących przemianami energii.

**Maszyny energetyczne** to m.in. silniki, prądnice elektryczne, pompy i sprężarki. **Silniki** są to maszyny pobierające energię z zewnętrznego źródła (energię chemiczną paliw, elektryczną i in.) w celu jej przetworzenia na energię mechaniczną, niezbędną do napędu innych maszyn (maszyn roboczych). Zależnie od postaci dostarczanej energii silniki dzieli się na wodne, wiatrowe, ciepłe, elektryczne i in.

W silnikach wodnych (np. w turbinach wodnych) energia płynącej wody jest przetwarzana na pracę mechaniczną. Silniki wiatrowe (np. wiatraki) wykorzystują w tym celu energię ruchu powietrza.

**Silniki ciepłe** dzieli się na **silniki o spalaniu zewnętrznym** (np. tłokowe silniki parowe i turbiny parowe) oraz **silniki o spalaniu wewnętrznym** (np. silniki spalinowe). Silniki ciepłe wykorzystują energię cieplną otrzymywaną w procesie spalania paliw konwencjonalnych lub wyzwoloną wskutek reakcji jądrowej. Bywają też silniki ciepłe wykorzystujące energię słoneczną, energię cieplną czerpaną z głębi Ziemi i in.

**Silniki elektryczne** przetwarzają energię elektryczną na energię mechaniczną.

**Pozostałe maszyny energetyczne** zamieniają energię mechaniczną na inne rodzaje energii: prądnice – na energię elektryczną, pompy i sprężarki – na energię ciśnienia.

**Maszyny robocze** pobierają od silników energię mechaniczną i przetwarzają ją na pracę użyteczną, niezbędną do pokonania oporu użytecznego. Opór ten może być związany ze zmianą kształtu i wymiarów ciała lub jego położenia.

#### 4.4.6. Zasady wymiany ciepła

**Wymiana ciepła** (nazywana także transportem ciepła lub przekazywaniem ciepła) jest to jeden ze sposobów (obok pracy) przepływu energii między układami termodynamicznymi.

Zgodnie z drugą zasadą termodynamiki wymiana ciepła zachodzi zawsze od ciała o wyższej temperaturze do ciała o niższej temperaturze. Jeżeli rozpatrywany obiekt ma inną temperaturę niż jego otoczenie lub znajdujące się w pobliżu inne ciała, wymiana ciepła przebiega do chwili osiągnięcia stanu równowagi cieplnej. Procesu przekazywania ciepła między sąsiadującymi obiektami o różnej temperaturze nie można powstrzymać – można go jedynie spowolnić.



Jednostką ciepła w układzie SI jest dżul [J] (dawniej używaną jednostką była kaloria [cal]).

### Sposoby przekazywania ciepła

Rozróżnia się następujące sposoby przekazywania ciepła:

- **przewodzenie**, polegające na przekazywaniu energii wskutek bezładnego ruchu cząstek i ich zderzeń;
- **konwekcja (unoszenie)**, odbywająca się na skutek przemieszczania się masy płynu (cieczy lub gazu), która może być:
  - **naturalna (swobodna)**, stanowiąca samoczynny ruch płynu wskutek różnicy gęstości wynikającej z różnicy temperatury,
  - **wymuszona**, w której ruch płynu jest wywołany działaniem czynników zewnętrznych (np. pompy lub wentylatora);
- **promieniowanie**, które może zachodzić nawet w próżni, polegające na przenoszeniu energii przez fale elektromagnetyczne, emitowane w wyniku ciepłego ruchu cząstek.

### Typowe przypadki wymiany ciepła

Jeżeli dwa sąsiadujące ze sobą ciała mają różną temperaturę, to między nimi zawsze zachodzi zjawisko wymiany ciepła. Wymiana ciepła trwa tak długo, aż nastąpi wyrównanie temperatury obu tych ciał. Rozróżnia się trzy charakterystyczne przypadki wymiany ciepła:

- w obszarze ciała jednorodnego – stałego, ciekłego lub gazowego,
- między dwoma ciałami stykającymi się bezpośrednio ze sobą – oba ciała mogą być ciałami stałymi lub jedno z nich jest ciałem stałym, a drugie cieczą lub gazem,
- między dwoma ciałami oddalonymi od siebie – mogą to być dwa ciała stałe, między którymi znajduje się próżnia, albo dwa płyny (ciecz lub gaz), między którymi znajduje się ściana z ciała stałego.

Wymiana ciepła w obszarze jednorodnego ciała stałego odbywa się na zasadzie przewodzenia. Wymiana ciepła w jednorodnych ciałach gazowych lub ciekłych ma charakter bardziej złożony i należy ją rozpatrywać jako dwa odrębne zjawiska: przewodzenia i unoszenia (konwekcji). W płynach przewodzenie ciepła odbywa się z mniejszą intensywnością niż w ciałach stałych. Przyczyną jest większe oddalenie od siebie cząstek – dotyczy to zwłaszcza ciał gazowych. Zjawisko unoszenia ciepła zależy od charakteru płynu, tzn. od tego, czy jest to ruch naturalny (wywołany jedynie różnicą temperatury), czy też wymuszony (np. za pomocą pompy lub wentylatora).

Wymianę ciepła między ciałami stałymi ściśle przylegającymi do siebie można rozpatrywać jako proces polegający wyłącznie na przewodzeniu.

Wymiana ciepła między płynem i ciałem stałym nosi nazwę **przejmowania ciepła**.

Wymiana ciepła między dwoma płynami przegrodzonymi ciałem stałym ma charakter złożony, składa się bowiem z kilku podanych poprzednio procesów i nazywa się **przenikaniem ciepła**.

Wymiana ciepła między dwoma ciałami oddalonymi od siebie, między którymi znajduje się bardzo rozrzedzony czynnik gazowy (np. powietrze), potocznie zwany próżnią, odbywa się wyłącznie w drodze promieniowania.

Wymiana ciepła może być procesem ustalonym lub nieustalonym. **Ustalona wymiana ciepła** występuje, gdy ilość przenoszonego ciepła jest stała, a temperatura układów, między którymi ta wymiana zachodzi, nie ulega zmianie w czasie. **Nieustalona wymiana ciepła** charakteryzuje się zmiennością podanych wielkości w czasie.

Ilość ciepła, która podlega wymianie, określa się za pomocą natężenia strumienia cieplnego. **Natężenie strumienia cieplnego** jest to ilość ciepła przepływająca przez jednostkę powierzchni w jednostce czasu

$$q = \frac{Q}{A} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (4.22)$$

gdzie:

$Q$  – strumień ciepła (zwany też mocą cieplną), czyli ilość ciepła przepływająca w jednostce czasu [W],

$A$  – pole powierzchni wymiany ciepła [ $m^2$ ].

#### 4.4.7. Turbiny parowe

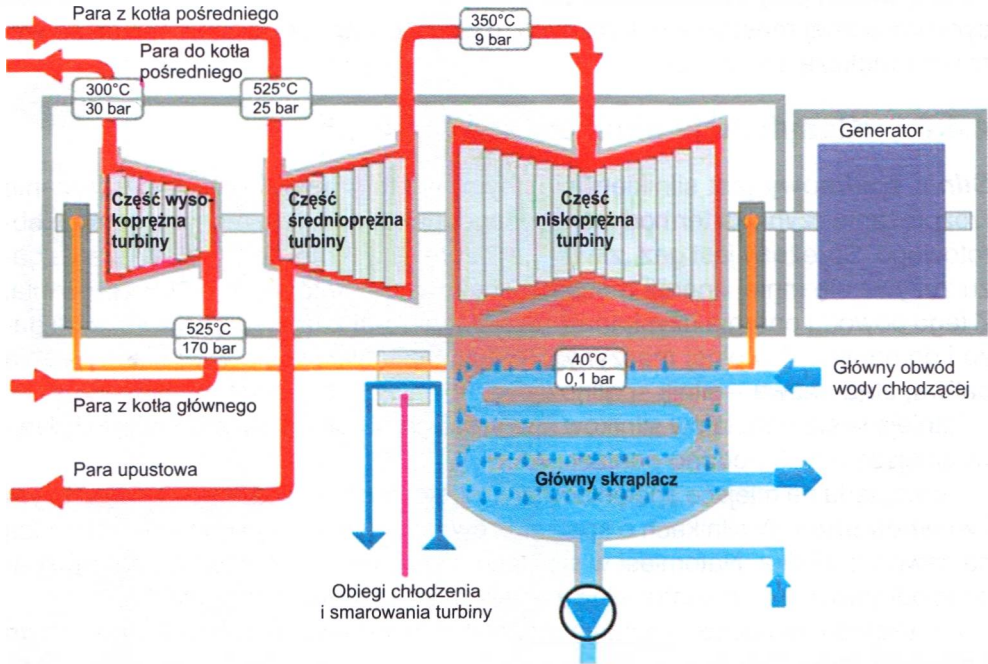
**Turbina parowa** jest silnikiem cieplnym, wykorzystującym energię cieplną pary wodnej (powstającej zwykle w kotle parowym lub w wytwornicy pary) do wytworzenia energii mechanicznej, odprowadzanej wałem do innej maszyny, np. do generatora elektrycznego.

##### Zasada działania turbiny parowej

Przepływ gazu przez turbinę wiąże się ze spadkiem jego entalpii (odpowiednika energii potencjalnej). Entalpia, zwana także zawartością cieplną, jest sumą energii wewnętrznej gazu oraz iloczynu ciśnienia i objętości tego gazu. W myśl zasady zachowania energii entalpia gazu jest zamieniana w inną formę energii – energię mechaniczną, odprowadzaną wałem do maszyny napędzanej. Z drugiej zasady termodynamiki wynika, że nie można skonstruować silnika cieplnego w całości zamieniającego dostarczone ciepło na pracę. W praktyce oznacza to, że turbiny parowe, oprócz użytecznej pracy, zawsze oddają do otoczenia ciepło, które jeśli nie jest wykorzystane, staje się ciepłem odpadowym. Stanowi to podstawę skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w elektrociepłowniach.

Ponieważ turbina cieplna składa się z kolejno po sobie następujących stopni, więc obliczenia energetyczne turbiny sprowadzają się do obliczeń poszczególnych stopni. Moc całkowita turbiny jest sumą mocy poszczególnych stopni. Stopień turbiny składa się z nieruchomego wieńca kierowniczego, związanego na stałe z korpusem, i wieńca wirnikowego, związanego z obracającym się wałem.

Schemat działania turbiny parowej przedstawiono na rysunku 4.27. Ciepło gorącej pary wodnej w turbinie zostaje zamienione na energię mechaniczną. W zależności od ciśnienia pary w poszczególnych częściach turbiny rozróżnia się część wysokoprężną, średnioprężną i niskoprężną. Po rozprężeniu się w części wysokoprężnej turbiny para jest podgrzewana w kotle pośrednim i doprowadzana do części średnioprężnej, a następnie niskoprężnej. Rozmiary łopatek w po-



Rys. 4.27. Schemat działania turbiny parowej

szczególnych częściach turbiny są coraz większe, aby zapewnić optymalne przekazywanie energii rozprężającej się pary o coraz niższej temperaturze. Opuszczająca część niskoprężną turbiny para wodna jest kierowana do głównego skraplacza, w którym zamienia się w wodę. Parę upustową z części średnioprężnej i niskoprężnej turbiny wykorzystuje się do podgrzewania wody zasilającej.

Turbina parowa jest podstawową maszyną wytwarzającą moc mechaniczną wykorzystywaną do napędu generatorów elektrycznych w elektrowniach parowych (przede wszystkim węglowych i jądrowych), elektrociepłowniach i układach gazowo-parowych. Fakt ten stawia ją na pierwszym miejscu wśród maszyn „nagręcających” rozwój gospodarczy (wiek XIX – maszyna parowa, wiek XX i XXI – turbina parowa). Bez istnienia turbiny parowej wystąpiłby prawdopodobnie deficyt energii elektrycznej na świecie. Turbiny parowe wykorzystuje się na statkach i okrętach do napędu pędników (śruby okrętowej, koła łopatkowego) lub innych urządzeń.

Para wylotowa z turbiny może być wykorzystywana w elektrociepłowniach do podgrzewania wody użytkowej lub w innych zakładach do celów przemysłowych. Ze względu na wykorzystanie pary wylotowej turbiny parowe dzieli się na przeciwprężne i kondensacyjne. W turbinach kondensacyjnych para odlotowa nie jest wykorzystywana, a ciepło jej skraplania, odprowadzane do otoczenia, stanowi stratę energii.

We współczesnych elektrowniach turbiny stosuje się także do napędu pompy zasilającej. Są one bowiem najlepszym źródłem mocy mechanicznej, odprowa-

dzanej wałem przy prędkościach obrotowych znacznie większych od prędkości synchronicznej maszyn elektrycznych, dzięki czemu pompy mają mniejsze wymiary i większą sprawność.

#### 4.4.8. Klasyfikacja silników spalinowych

**Silnik spalinowy** jest silnikiem cieplnym, w którym wykorzystano sprężanie i rozprężanie czynnika termodynamicznego (gazu) do wytworzenia momentu obrotowego. Sprężany jest gaz „zimny”, a rozprężany – „gorący”. Na sprężanie gazu zużywa się mniej energii mechanicznej niż uzyskuje się z jego rozprężania. Z tego powodu energia uzyskana z rozprężania jest zużywana do sprężania gazu i do napędu dowolnej maszyny. Gorący gaz uzyskuje się w wyniku spalania paliwa, stąd nazwa – silnik spalinowy.

Istnieje wiele podziałów silników spalinowych, według różnych kryteriów. Najważniejsze z nich podano poniżej.

Ze względu na miejsce spalania rozróżnia się **silniki o spalaniu zewnętrznym i wewnętrznym**. W silnikach o spalaniu zewnętrznym reakcje spalania zachodzą na zewnątrz silnika. Natomiast w silnikach o spalaniu wewnętrznym reakcje spalania odbywają się wewnątrz silnika – w komorze (komorach) spalania.

Ze względu na sposób spalania można rozróżnić **silniki spalania otwartego i zamkniętego**. Silniki spalania otwartego nie mają uszczelnionej przestrzeni, w której następuje reakcja spalania. Natomiast w silnikach spalania zamkniętego reakcje spalania przebiegają w szczelnych komorach.

Ze względu na ciśnienie w kolektorze dolotowym silniki dzieli się na:

- **wolnosące** (niedoładowane),
- **doładowane**, które w zależności od rodzaju doładowania można podzielić na:
  - turbodoładowane,
  - doładowane mechanicznie,
  - turbodoładowane i doładowane mechanicznie,
  - doładowane dynamicznie (bezsprężarkowo).

Ze względu na rodzaj organu roboczego można rozróżnić **silniki spalinowe tłokowe, turbinowe** oraz **reakcyjne**.

#### Przykłady silników spalinowych

- **Silnik spalinowy o posuwisto-zwrotnym ruchu tłoka** występuje zarówno w zastosowaniach trakcyjnych, jak i stacjonarnych. W trakcji jest najczęściej spotykaną jednostką napędową pojazdów samochodowych (rys. 4.28). Służy również do napędu maszyn roboczych. Występuje także jako napęd główny i pomocniczy siłowni okrętowych. W zastosowaniach stacjonarnych służy m.in. do napędu awaryjnych generatorów prądu. Jest wykorzystywany również nawet jako napęd generatorów awaryjnych w elektrowniach atomowych. Największe spalinowe silniki okrętowe mają moc sięgającą 80 MW, a średnice ich cylindrów dochodzą do 1050 mm. Jest to silnik o spalaniu wewnętrznym.
- **Silnik spalinowy o tłoku obrotowym**, zwany też silnikiem Wankla, obecnie jest rzadko spotykany w motoryzacji. Jest to silnik o spalaniu wewnętrznym.



**Rys. 4.28.** Częściowy przekrój tłokowego silnika spalinowego do napędu samochodu osobowego (Renault)

- **Silnik odrzutowy** jest to silnik reakcyjny, spalania otwartego, używany głównie w lotnictwie, który przetwarza energię wytworzoną podczas spalania paliwa na energię kinetyczną gazów wylotowych, powodującą ciąg.

#### Podstawowe wielkości charakteryzujące silniki spalinowe

- **Objętość (pojemność) skokowa silnika** (dla silników tłokowych) – zsumowana różnica między maksymalną i minimalną objętością każdego cylindra silnika spalinowego, wyrażana najczęściej w centymetrach sześciennych ( $\text{cm}^3$ ).
- **Stopień sprężania** (dla silników tłokowych) – stosunek początkowej objętości sprężania do końcowej objętości sprężania. Stopień sprężania obliczamy wg wzoru

$$E = \frac{V_c}{V_k}$$

(4.23)

gdzie:

$V_c$  – objętość całkowita cylindra,

$V_k$  – objętość komory sprężania, czyli objętość przestrzeni roboczej nad tłokiem w górnym martwym położeniu (GMP) tłoka.

- Prędkość obrotowa – wielkość określająca liczbę obrotów  $n$  wału korbowego silnika w jednostce czasu  $t$

$$\omega = \frac{n}{t} \left[ \frac{\text{obr}}{\text{min}} \right] \quad (4.24)$$

- Maksymalny moment obrotowy silnika – największy moment obrotowy przekazywany z wału korbowego silnika.
- Moc silnika – stosunek wykonywanej pracy do czasu jej wykonania. Jednostką mocy w układzie SI jest wat (W). W praktyce moc silników podaje się w kilowatach (kW). Tradycyjną, często spotykaną w praktyce, jednostką mocy silnika jest koń mechaniczny (KM). Zależności między obu jednostkami są następujące:  
1 KM = 0,736 kW,  
1 kW = 1,36 KM.
- Objętościowy wskaźnik mocy (dla silników tłokowych) – stosunek mocy maksymalnej do objętości skokowej silnika.
- Jednostkowa moc wewnętrzna (dla silników turbinowych) – stosunek mocy wewnętrznej silnika turbowalowego do strumienia masy czynnika na wlocie do silnika

$$N_w = \frac{N_i}{G_0} \quad (4.25)$$

gdzie:

$N_i$  – moc wewnętrzna turbiny [W],

$G_0$  – strumień masy czynnika na wlocie do silnika.

### Budowa tłokowego silnika spalinowego

Każdy tłokowy silnik spalinowy (rys. 4.29) jest zbudowany z układów i zespołów niezbędnych do jego prawidłowego działania. Głównymi zespołami i układami silnika tłokowego są:

- głowica,
- kadłub,
- układ korbowy,
- układ rozrządu,
- układ zasilania,
- układ smarowania,
- układ chłodzenia,
- układ dolotowy,
- układ wylotowy,
- osprzęt elektryczny, w tym m.in. układy zapłonowy i rozruchowy.

**Głowica** zamyka przestrzeń roboczą silnika i zawiera niektóre elementy innych jego układów (np. rozrządu, zasilania, smarowania, chłodzenia).

**Kadłub** stanowi główną obudowę silnika, zamkniętą z jednej strony głowicą, a z drugiej miską olejową. W kadłubie mieszczą się ruchome elementy układów korbowego i rozrządu oraz znajdują się kanały przepływu oleju silnikowego i cie-



**Rys. 4.29.** Częściowy przekrój turbodoładowanego silnika o zapłonie iskrowym z wtryskiem bezpośrednim (Renault)

czy chłodzącej lub przestrzenie przepływu powietrza chłodzącego. Zewnętrzne ścianki kadłuba wykorzystuje się do mocowania osprzętu silnika, a odpowiednio ukształtowane miejsca kadłuba służą do zamocowania silnika w pojeździe.

**Układ korbowy** służy do zamiany postępowo-zwrotnego ruchu tłoka na ruch obrotowy wału korbowego silnika. Przesuwające się w cylindrach tłoki przejmują energię zawartą w powstałych ze spalania paliwa gazach o wysokim ciśnieniu, co wywołuje ich ruch. Za pośrednictwem korbowodów ruch tłoków jest przenoszony na wał korbowy, a następnie przekazywany do dalszych zespołów układu napędowego pojazdu.

**Układ rozrządu** steruje elementami, które mają na celu doprowadzenie świeżego ładunku do cylindrów silnika i usunięcie z nich spalin. W silnikach czterosuwowych stosuje się rozrząd zaworowy, w którym występują zawory dolotowe

i wylotowe, otwierane i zamykane w odpowiednich chwilach. Układ rozrządu może być napędzany od wału korbowego silnika paskiem zębatym, łańcuchem lub kołami zębatymi. W ostatnich latach zauważa się powrót do łańcuchów napędu rozrządu, charakteryzujących się polepszoną wytrzymałością oraz zmniejszoną hałaśliwością. Prawidłowy czas otwierania i zamykania zaworów jest niezbędny do prawidłowej i bezpiecznej pracy silnika. W tzw. silnikach kolizyjnych zerwanie się paska rozrządu może spowodować uderzenie tłoka w zawory i w konsekwencji ich wykrzywienie. Uszkodzeniu często ulegają również same tłoki, prowadnice zaworów, a nawet korbowody.

**Układ zasilania** odpowiada za dostarczenie do cylindrów silnika w odpowiednich ilościach paliwa niezbędnego do wytworzenia mieszanki palnej. Budowa tego układu zależy od rodzaju silnika oraz paliwa, którym jest zasilany. We współczesnych silnikach o zapłonie iskrowym (ZI) i o zapłonie samoczynnym (ZS) stosuje się zasilanie wtryskowe, czyli ciśnieniowy wtrysk paliwa do powietrza. W silniku ZI wtrysk paliwa ma zapewnić powstanie mieszanki palnej, która zostanie zapalona od iskry umieszczonej w głowicy świecy zapłonowej. Natomiast w silniku ZS wtrysk paliwa umożliwia uzyskanie mieszanki ulegającej samozapłonowi. W obu rodzajach silników może być stosowany bezpośredni lub pośredni wtrysk paliwa, z tym że we współczesnych silnikach ZS stosuje się wyłącznie wtrysk bezpośredni. W silnikach ZI wtrysk pośredni odbywa się do kolektora dolotowego, a wtrysk bezpośredni – do poszczególnych cylindrów. W tym drugim przypadku stosuje się jednak znacznie wyższe ciśnienia wtrysku.

**Układ chłodzenia** utrzymuje odpowiednią temperaturę wszystkich elementów silnika, które wymagają odprowadzania ciepła. Silniki mogą być chłodzone powietrzem (chłodzenie bezpośrednie) lub cieczą (chłodzenie pośrednie). Chłodzenie powietrzem często spotyka się w silnikach motocykli oraz niektórych samochodów, w których jednak ruch powietrza jest wymuszony przez dmuchawę. Do zalet takiego rozwiązania należy zaliczyć bezobsługowość układu chłodzenia oraz dużą niezawodność. Jego wadą jest jednak głośna praca, zwłaszcza w układach wyposażonych w dmuchawę. W silnikach chłodzonych cieczą optymalna temperatura cieczy chłodzącej podczas pracy wynosi 90...100°C. W razie awarii układu chłodzenia temperatura niektórych elementów silnika może nawet przekroczyć 150°C, co grozi ich uszkodzeniem. Ciecz chłodząca krąży w obiegu wymuszonym w układzie zamkniętym, przepływając kanałami w kadłubie oraz głowicy silnika. Przepływ cieczy chłodzącej wymusza pompa. Po opuszczeniu przestrzeni wewnątrz silnika ciecz chłodząca jest doprowadzana do komory zaworu termostaticznego, który w zależności od jej temperatury umożliwia długi lub krótki obieg. W krótkim obiegu ciecz chłodząca wraca do pompy i ponownie jest tłoczona do przestrzeni silnika. Natomiast w długim obiegu ciecz najpierw przepływa przez chłodnicę, w której jej temperatura ulega obniżeniu. Po schłodzeniu ciecz jest kierowana do pompy, która przetacza ją ponownie do przestrzeni silnika. Z chłodnicą współpracuje wentylator, który w przypadku nadmiernego wzrostu temperatury cieczy chłodzącej zostaje włączony w celu zwiększenia intensywności chłodzenia cieczy w chłodnicy.



**Układ dolotowy** zapewnia odpowiednie napełnienie cylindrów silnika świeżym ładunkiem. W układzie dolotowym znajduje się filtr powietrza, a w silnikach doładowanych także sprężarka (lub sprężarki).

**Układ wylotowy** odprowadza spaliny z silnika z jak najmniejszymi oporami przepływu. W układzie wylotowym znajdują się tłumiki wylotu spalin oraz urządzenia zmniejszające zawartość szkodliwych składników w spalinach.

**Osprzęt elektryczny** jest odpowiedzialny za rozruch silnika spalinowego, zapłon silnika ZI, wstępne podgrzewanie silnika ZS oraz sterowanie różnymi funkcjami silnika.

**Układ rozruchowy** służy do umożliwienia rozruchu silnika. Podstawowym zespołem układu rozruchowego jest rozrusznik elektryczny. Źródłem energii dla rozrusznika jest akumulator samochodu. W przypadku większych silników do rozruchu wykorzystuje się rozruszniki wyposażone w reduktor, wytwarzające większy moment obrotowy.

**Układ zapłonowy.** Elementami układu zapłonowego silnika ZI są świece zapłonowe, cewka zapłonowa, aparat zapłonowy (w starszych silnikach) oraz przewody wysokiego napięcia. We współczesnych silnikach ZI stosuje się zapłon bezpośredni sterowany elektronicznie, w którym nie występuje aparat zapłonowy, a często nie ma także przewodów wysokiego napięcia, gdyż pojedyncze cewki zapłonowe są umieszczone bezpośrednio na świecach zapłonowych.

Zadaniem układu zapłonowego jest wytworzenie iskry między elektrodami świecy zapłonowej w celu zapalenia mieszanki paliwowo-powietrznej. Optymalna chwila zapłonu zależy od wielu parametrów pracy silnika spalinowego, dlatego dodatkowym zadaniem układu zapłonowego jest sterowanie chwilą wystąpienia iskry na konkretnej świecy zapłonowej.

Klasyczny układ zapłonowy najczęściej jest zasilany napięciem 12 V, pochodzącym z akumulatora. Cewka wysokiego napięcia zwiększa napięcie do kilku (kilkunastu) tysięcy woltów. Wysokie napięcie jest przekazywane do konkretnej świecy dzięki rozdzielaczowi, którego wałek jest napędzany od wału korbowego silnika.

Od dłuższego czasu w samochodach zamiast klasycznego układu zapłonowego stosuje się układ elektroniczny, który jest bardziej precyzyjny i niezawodny od poprzednika. Elektroniczny zapłon umożliwia precyzyjne określenie kąta wyprzedzenia zapłonu, co zmniejsza zużycie paliwa oraz zwiększa czystość spalin.

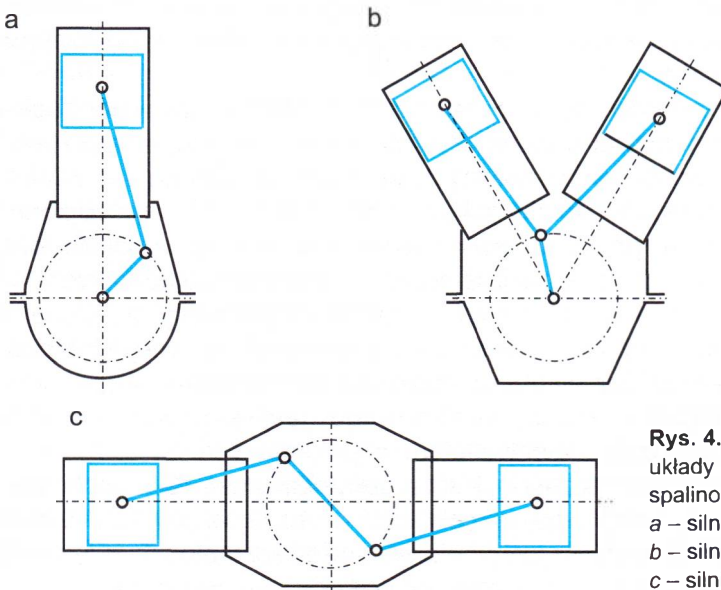
## Podstawowa klasyfikacja tłokowych silników spalinowych

Ze względu na sposób zapłonu, który decyduje także o rodzaju użytego paliwa, rozróżnia się silniki:

- **o zapłonie iskrowym (ZI)**, nazywane także silnikami benzynowymi,
  - **o zapłonie samoczynnym (ZS)**, nazywane również silnikami wysokoprężnymi lub silnikami Diesla,
  - **o zapłonie żarowym**, których nie stosuje się od kilkadziesiąt lat.
- Pod względem liczby suwów w cyklu roboczym rozróżnia się silniki:
- **dwusuwowe** (obecnie prawie niestosowane),
  - **czterosuwowe**.

Według rodzaju ruchu organu roboczego występują silniki:

- o **posuwisto-zwrotnym ruchu tłoka**,
  - o **obrotowym ruchu tłoka** (np. silnik Wankla).
- Z uwagi na układ cylindrów (rys. 4.30) spotyka się silniki:
- **rzędowe**,
  - o **cylindrach przeciwległych** (typu bokser),
  - **wielorzędowe**, w tym:
    - widlaste (w układzie V lub dwurzędowym),
    - widlasto-rzędowe,
    - w układzie W (lub trzyczędowym),
  - **gwiazdowe**.



**Rys. 4.30.** Najczęściej spotykane układy wielocylindrowych silników spalinowych  
 a – silnik rzędowy,  
 b – silnik widlasty,  
 c – silnik typu bokser

#### 4.4.9. Odrzutowe silniki przepływowe

**Silnik odrzutowy** to silnik wykorzystujący zjawisko odrzutu. Wyrzucane z dużą prędkością gazy, będące produktem spalania, wywołują powstanie siły ciągu skierowanej w przeciwną stronę. Silnik odrzutowy często jest utożsamiany z silnikiem turboodrzutowym, dwuprzepływowym lub turbowentylatorowym. Do silników odrzutowych zalicza się też silnik raketowy, silnik strumieniowy i silnik pulsacyjny.

Pierwszy odrzutowy silnik lotniczy, tzw. motorjet, powstał w 1910 roku. Bazował na zainstalowanym w przedniej jego części silniku tłokowym, który sprężał powietrze i tłoczył je do komory spalania. W komorze tej pod ciśnieniem mieszało się ono z olejem napędowym i spalało. Wyrzucane z dużą prędkością gazy spalinywe, wydostając się z silnika, wywoływały powstanie siły ciągu skierowanej w przeciwną stronę i napędzały samolot na zasadzie odrzutu. Silniki tego typu były znacznie mniej wydajne od skonstruowanych później silników turboodrzutowych.

**Silniki odrzutowe** można podzielić na dwa zasadnicze rodzaje:

- **przelotowe**, w których niezbędnym do procesu spalania utleniaczem jest zasysane z otoczenia powietrze;
- **rakietowe**, w których utleniacz jest przewożony wraz z paliwem.

Przelotowe silniki odrzutowe mogą być:

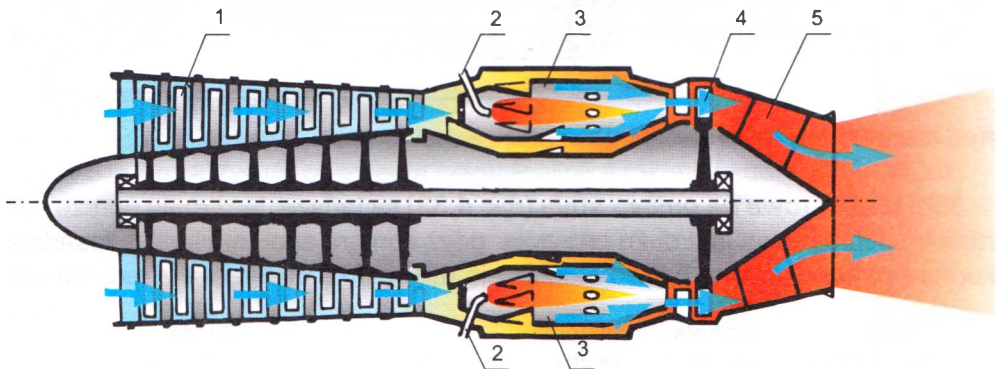
– **bezsprężarkowe**:

- pulsacyjne,
- strumieniowe;

– **sprężarkowe**:

- ze sprężarką odśrodkową,
- ze sprężarką osiową,
- kombinowane,
- jednoprzepływowe,
- wieloprzepływowe.

Przykładowy schemat silnika odrzutowego przedstawiono na rysunku 4.31.



**Rys. 4.31.** Schemat odrzutowego silnika przelotowego ze sprężarką osiową  
1 – sprężarka, 2 – wtryskiwacze paliwa, 3 – komora spalania, 4 – turbina, 5 – dysza odrzutowa

#### 4.4.10. Silniki rakietowe

**Silnik rakietowy** jest to rodzaj silnika odrzutowego, czyli wykorzystującego zjawisko odrzutu czynnika roboczego, który nie pobiera w trakcie pracy żadnej substancji z otoczenia. Czynnikami roboczym mogą być m.in.:

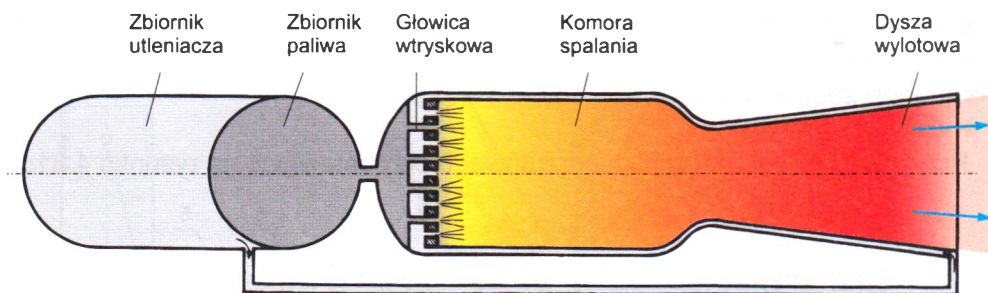
- produkty spalania (gazy spalinowe) powstałe przy utlenianiu paliwa (**silnik rakietowy chemiczny**), przy czym zarówno paliwo rakietowe, jak i utleniacz znajdują się w zbiornikach napędzanego urządzenia (tlen nie jest pobierany z atmosfery), dzięki czemu silnik może pracować w dowolnych warunkach, np. w przestrzeni kosmicznej i pod wodą;
- jony rozpędzane elektromagnetycznie (**silnik rakietowy jonowy**);
- plazma, także rozpędzana elektromagnetycznie (**silnik rakietowy plazmowy**);
- strumień fotonów gamma (hipotetyczny **silnik rakietowy fotonowy**).

Silniki rakietowe stosuje się najczęściej w rakietach i promach kosmicznych oraz pociskach rakietowych.

## Rodzaje chemicznych silników raketowych

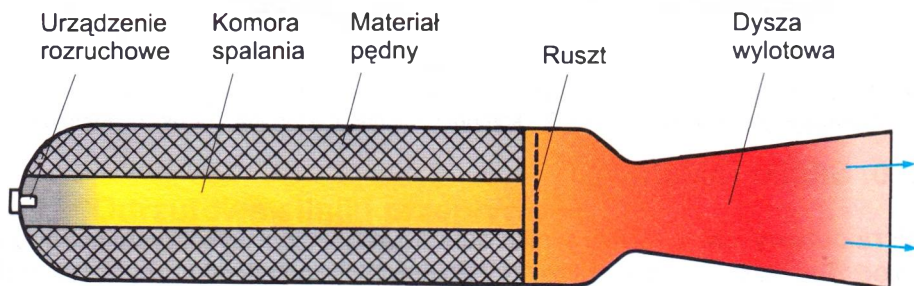
Występują trzy rodzaje chemicznych silników raketowych: na paliwo stałe, na paliwo ciekłe oraz silniki hybrydowe.

**Silniki raketowe na paliwo ciekłe** (rys. 4.32) są najpopularniejsze i najwydajniejsze. W ich zbiornikach znajdują się utleniacz (np. ciekły tlen) oraz płynne paliwo (reduktor). Do napędu raket kosmicznych wykorzystuje się mieszanki tlenu i wodoru. Tego rodzaju silniki mają skomplikowaną budowę, a przez to są najdroższe. Do ich podstawowych zalet należy możliwość regulacji ciągu przez odpowiednie wtryskiwanie paliwa do komory spalania.



Rys. 4.32. Schemat silnika raketowego na paliwo ciekłe

**Silniki raketowe na paliwo stałe** (rys. 4.33) są tańsze, lecz mają gorsze parametry. Ich budowa jest dużo prostsza, gdyż komora spalania jest w zasadzie komorą paliwową. Jako paliwo stosuje się mieszkankę utleniacza z reduktorem



Rys. 4.33. Schemat silnika raketowego na paliwo stałe

w postaci stałej, która tworzy tzw. ziarna paliwa. W celu ograniczenia wypadania materiału pędnygo przez dyszę jest on oddzielony od niej specjalnym rusztem. Początek reakcji spalania jest inicjowany przeważnie za pomocą układu elektrycznego. Tego rodzaju silniki wykorzystuje się np. do wynoszenia wahadłowców na dużą wysokość. Wadą takiego silnika jest brak możliwości regulacji ciągu, a nawet wyłączenia go przed wypaleniem całości paliwa.

**Silniki raketowe hybrydowe** najczęściej mają stały reduktor i ciekły utleniacz (np. podtlenek azotu). Taki silnik wykorzystano m.in. w samolocie kosmicznym (który jako pierwsza prywatna konstrukcja znalazł się w kosmosie).

## Podstawowe parametry silników raketowych

Silnik raketowy charakteryzują trzy podstawowe parametry: ciąg, czas pracy i impuls całkowity.

**Ciąg**, oznaczany  $P$ , jest siłą powstającą w wyniku wyrzucania przez dyszę substancji roboczej, np. gazów będących produktem spalania paliwa. Aby rakieta mogła się wznieść, ciąg musi być większy od jej ciężaru startowego (jej masy pomnożonej przez przyspieszenie ziemskie).

**Czas pracy** silnika raketowego oznacza się literą  $t$ . Ze względu na ten parametr silniki raketowe dzieli się na startowe i marszowe.

**Impuls całkowity** oznacza popęd (zmianę pędu), który może wykonać dany silnik. Jest on oznaczany jako  $I_c$ , a jego jednostką jest N·s (niutonosekunda). Aby go obliczyć, trzeba znać ciąg silnika i czas jego pracy. Impuls całkowity jest określony wzorem

$$I_c = P \cdot t$$

Na przykład silnik o ciągu 200 N, pracujący przez 3 s, ma impuls całkowity o wartości 600 N·s; silnik o ciągu 100 N, pracujący w ciągu 6 s, również ma impuls całkowity 600 N·s.

**Impuls właściwy paliwa** jest dodatkowym parametrem o istotnym znaczeniu w silnikach raketowych. Jest to impuls przypadający na jednostkę ciężaru paliwa. Może on służyć do obliczenia ciągu  $P$  silnika raketowego według wzoru

$$P = \frac{I_w \cdot Q}{t}$$

(4.26)

gdzie:

- $I_w$  – impuls właściwy,
- $Q$  – ciężar paliwa,
- $t$  – czas pracy silnika.

W raketach i promach kosmicznych wykorzystuje się dwa zasadnicze rodzaje silników raketowych: marszowe i startowe.

**Silnik marszowy** nadaje rakiecie względnie niewielkie przyspieszenie, gdyż ma mniejszy ciąg. Działa jednak długo. Jego zadanie polega na stopniowym nadawaniu prędkości rakiecie lub utrzymywaniu jej na stałym poziomie. Wartość ciągu takiego silnika jest niewiele większa od ciężaru rakiety.

**Silnik startowy** pracuje tylko przez krótki czas, lecz nadaje rakiecie bardzo duże przyspieszenie. Rakieta rozpędzona za jego pomocą może przelecieć dużą odległość nawet po zakończeniu lotu silnikowego.

W raketach kosmicznych zwykle stosuje się oba typy silników. Najczęściej silniki startowe po skończeniu pracy zostają odrzucone od statku kosmicznego, który kontynuuje lot za pomocą silnika marszowego. Takie rozwiązanie wykorzystuje się także do wynoszenia na orbitę wahadłowców, używając raket na paliwo stałe jako silnika startowego.

## 4.5. Elektrownie jądrowe

Elektrownia jądrowa należy do grupy elektrowni ciepłych, w których klasyczne źródło ciepła, czyli kocioł parowy, zastąpiono reaktorem jądrowym. W odróżnieniu od rozwiązań klasycznych, w których energię pozyskuje się w wyniku spalania paliw kopalnych, w elektrowni jądrowej energię uzyskuje się, wykorzystując rozszczepianie jąder atomowych. Ciepło powstałe w reaktorze jądrowym jest następnie zamieniane na energię mechaniczną, niezbędną do wytworzenia prądu elektrycznego.

Wytwarzanie energii jądrowej jest jednym z etapów **cyklu paliwowego**, który stanowi obieg paliwa jądrowego obejmujący kolejne fazy jego przetwarzania. Obieg ten rozpoczyna się od wydobycia paliwa w kopalni rudy, poprzez produkcję koncentratu, jego przerób chemiczny, wzbogacenie izotopowe, wytwarzanie paliwa reaktorowego, a następnie spalanie go w reaktorze oraz przerób i ostateczne składowanie odpadów promieniotwórczych.

### Budowa i zasada działania reaktora jądrowego

Podstawowym elementem elektrowni jądrowej jest **reaktor jądrowy**, w którym następuje proces inicjacji, kontroli oraz podtrzymywania łańcuchowych reakcji rozpadu jądrowego. W wyniku reakcji rozszczepienia w rdzeniu reaktora jądrowego wytwarza się **promieniowanie jądrowe** (głównie neutrony i promieniowanie gamma) oraz ciepło. Podczas tej reakcji zostaje utworzonych także wiele nuklidów, czyli jąder atomowych o określonej wartości liczb atomowej i masowej.

Gdy liczba neutronów powstających w reaktorze w jednostce czasu jest równa liczbie neutronów traconych w tym samym czasie w wyniku ich pochłaniania i ucieczki, stan pracy reaktora określa się jako tzw. stan krytyczny. Jest to normalny stan pracy reaktora – stan pracy ustalonej, którego osiągnięcie zależy od poziomu wytwarzania oraz strat neutronów. Sterowanie reaktorem polega na regulacji poziomu neutronów w reaktorze tak, aby znajdował się on w stanie krytycznym. Do tego wykorzystuje się materiały silnie pochłaniające neutrony, czyli charakteryzujące się dużym przekrojem czynnym na pochłanianie neutronów (np. bor, kadm). Za pomocą wykonanych z takich materiałów prętów regulacyjnych utrzymuje się pożądaną poziom neutronów przez odpowiednie zakłócenie ich bilansu, prowadzące do osłabienia lub wygaszenia reakcji łańcuchowej, a w konsekwencji do zmniejszenia produkcji ciepła. Analogiczne jest działanie prętów bezpieczeństwa, których używa się tylko do awaryjnego wyłączenia reaktora.

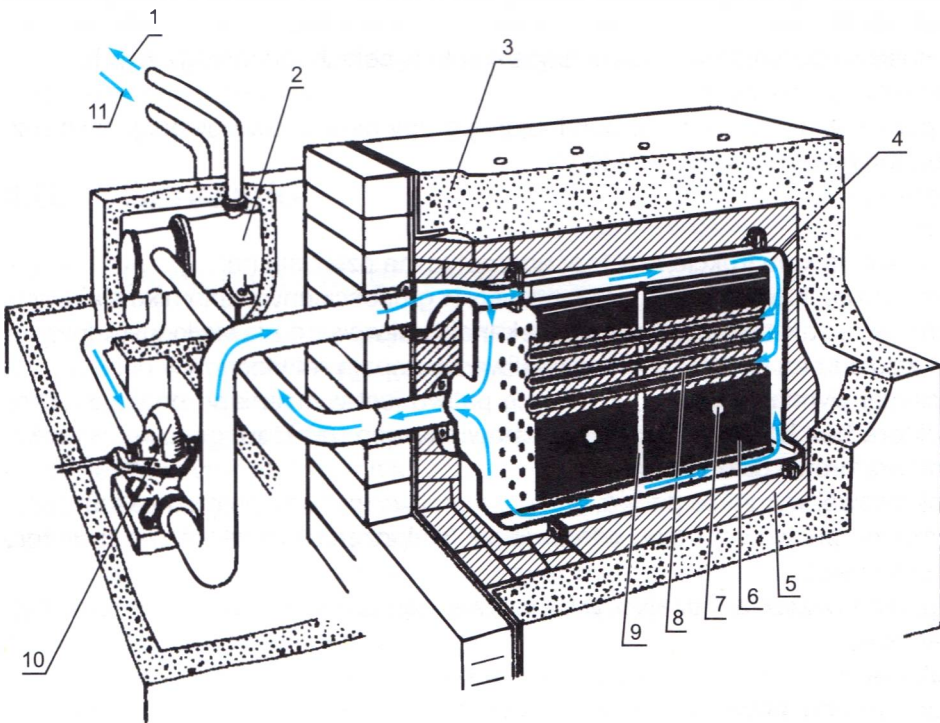
Odpowiednio sterując prętami regulacyjnymi, można uzyskać stan krytyczny reaktora przy różnym poziomie mocy, ograniczonym jedynie wydajnością odprowadzania ciepła. Uzyskana moc zależy od wielkości strumienia neutronów w rdzeniu. Jeśli pręty zostaną podniesione i pozwoli się na zaistnienie przez pewien czas stanu nadkrytycznego, wartość strumienia neutronów ulegnie zwiększeniu. Po opuszczeniu prętów do początkowego poziomu wartość strumienia neutronów ustali się na wyższym poziomie, dając odpowiednio większą moc ustaloną. Sytuacja ta dotyczy przypadku, gdy reaktor ma tzw. zapas paliwa, tj.

jego masa jest większa od masy krytycznej. Strumień neutronów i moc reaktora nie zależą zatem od położenia prętów regulacyjnych, prętami reguluje się tylko prędkość zmian mocy.

Schemat reaktora jądrowego z moderatorem stałym pokazano na rysunku 4.34.

Jako paliwo jądrowe stosuje się substancje zawierające izotopy rozszczepialne, tj. izotopy ciężkie, których jądra łatwo ulegają rozszczepieniu w wyniku bombardowania neutronami o małej energii. Aby nie dopuścić do wydostania się na zewnątrz reaktora produktów rozszczepienia, paliwo jądrowe jest zamknięte wewnątrz elementów paliwowych, mających najczęściej postać walcowych, kulistych lub płytkowych prętów. Walcowy element paliwowy składa się ze szczelnej, cienkościennej rurki – tzw. koszulki (stopy cyrkonu, stal nierdzewna) – oraz umieszczonych w jej wnętrzu pastylek paliwowych. Zestawy (kilkudziesięciu lub więcej) elementów paliwowych tworzą zespoły, tzw. kasety paliwowe, stanowiące zasadniczą część rdzenia reaktora.

Podczas reakcji rozszczepienia powstają nowe jądra, tzw. fragmenty rozszczepienia, które zapoczątkowują łańcuchy rozpadów promieniotwórczych. Elementy tych łańcuchów stanowią produkty rozszczepienia (większość z nich to izotopy promieniotwórcze).



**Rys. 4.34.** Schemat reaktora jądrowego niejednorodnego z moderatorem stałym  
 1 – para do silnika, 2 – wymiennik ciepła, 3 – osłona betonowa, 4 – woda chłodząca, 5 – reaktor,  
 6 – moderator, 7 – kanały do wytwarzania izotopów promieniotwórczych, 8 – pręty paliwa  
 jądrowego, 9 – pręt sterujący, 10 – pompa, 11 – woda do wymiennika ciepła

Energia wydzielona w procesie rozszczepienia jest głównie energią kinetyczną fragmentów rozszczepienia. W oddziaływaniu z atomami paliwa zamienia się ona w energię cieplną. W celu odprowadzenia wydzielonego ciepła między prętami przepływa chłodziwo – substancja mająca mały przekrój czynny na chwytanie neutronów. Jako chłodziwa używa się np. wody zwykłej lub ciężkiej, ciekłego sodu, helu lub dwutlenku węgla. Przepływ chłodziwa przez reaktor jest wymuszany za pomocą pomp przystosowanych do tego celu.

### Rodzaje reaktorów jądrowych

Ze względu na przeznaczenie rozróżnia się reaktory:

- energetyczne, produkujące energię elektryczną w elektrowniach komercyjnych;
- badawcze, służące do prowadzenia prac naukowych;
- szkoleniowe, przeznaczone do celów dydaktycznych (tzw. reaktory uniwersyteckie);
- wytwórcze, produkujące pluton (z reguły są to reaktory wojskowe pracujące na potrzeby przemysłu zbrojeniowego);
- ciepłownicze, wytwarzające ciepło do celów ogrzewczych w ciepłowniach jądrowych;
- napędowe, wykorzystywane do napędu statków, lodołamaczy, łodzi podwodnych itp.;
- wysokotemperaturowe, produkujące ciepło w celach technologicznych;
- do celów specjalnych.

Z punktu widzenia rodzaju dominującej grupy neutronów powodujących rozszczepienie rozróżnia się reaktory:

- prężkie,
- termiczne.

Z uwagi na konstrukcję reaktory energetyczne dzieli się na:

- zbiornikowe, których rdzeń jest zamknięty w grubościennym zbiorniku stalowym;
- kanałowe, zawierające ciśnieniowe kanały paliwowe o niewielkiej średnicy.

Ze względu na sposób wymiany paliwa występują reaktory:

- o ciągłej wymianie paliwa, w których paliwo jest wymieniane podczas pracy reaktora bez konieczności jego odstawiania (np. reaktory gazowe, wysokotemperaturowe oraz kanałowe);
- o okresowej wymianie paliwa, w których paliwo wymienia się po zakończeniu kampanii paliwowej i tzw. odstawieniu (wyłączeniu) reaktora (np. reaktory zbiornikowe).

Z punktu widzenia rodzaju wykorzystywanego paliwa rozróżnia się reaktory:

- uranowe,
- plutonowe,
- uranowo-plutonowe,
- torowe.

Z uwagi na rodzaj moderatora i chłodziwa także występują różne odmiany reaktorów. Moderatorem może być ciężka woda, lekka woda, grafit, beryl. Jako chłodziwa najczęściej używa się lekkiej lub ciężkiej wody, dwutlenku węgla,



helu, gazów dysocjujących, ciekłego sodu oraz substancji organicznych. Stąd wywodzą się często spotykane określenia reaktorów:

- wodne (lekkowodne),
- ciężkowodne,
- gazowe,
- sodowe,
- helowe,
- grafitowe.

W lekkowodnych reaktorach energetycznych woda spełnia jednocześnie dwie funkcje: moderatora i chłodziwa. W innych typach reaktorów funkcje te są rozdzielone. Jeśli ciekłe chłodziwo (lekka woda, ciężka woda) jest doprowadzane w rdzeniu do wrzenia, to są to tzw. reaktory wrzące.

Ze względu na sposób odprowadzania ciepła rozróżnia się trzy systemy pracy reaktorów energetycznych:

- jednobiegowy: para wytworzona w zbiorniku reaktora jest doprowadzana bezpośrednio do turbiny parowej, a po skropleniu za turbiną wraca do reaktora;
- dwubiegowy: obieg wody chłodzącej rdzeń reaktora jest zamknięty, a ciepło z niego jest przekazywane w wytwornicy pary do drugiego obiegu, w którym znajduje się turbina parowa;
- trzybiegowy: między pierwszy obieg (sodowy), chłodzący rdzeń reaktora, i trzeci obieg (wodno-parowy), doprowadzający parę do turbiny, wstawiony jest pośredni obieg sodowy.

## 4.6. Sprężarki

### 4.6.1. Ogólna charakterystyka sprężarek

**Sprężarka** to maszyna energetyczna, której zadaniem jest podwyższenie ciśnienia gazu lub wymuszenie jego przepływu (nadanie energii kinetycznej).

Sprężarki stosuje się w celu:

- zwiększenia gęstości czynnika gazowego,
- podniesienia ciśnienia czynnika roboczego,
- wymuszenia przepływu czynnika roboczego,
- podwyższenia temperatury czynnika gazowego.

W sprężarce ciśnienie ssawne jest nieznacznie niższe od ciśnienia atmosferycznego (na tyle tylko, aby zachować zdolność ssania), a ciśnienie tłoczne – znacznie wyższe od atmosferycznego.

Sprężarki, w których ciśnienie ssawne jest znacznie niższe, a ciśnienie tłoczne tylko nieznacznie wyższe od ciśnienia otoczenia, nazywa się pompami próżniowymi.

Podczas pracy w sprężarce wydzielana się duża ilość ciepła, które musi być odprowadzone. Układy chłodzenia sprężarek są podobne do układów chłodzenia silników spalinowych. W mniejszych sprężarkach stosuje się chłodzenie

bezpośrednie, w większych – pośrednie z chłodnicą. Sam sprężany gaz w wielu przypadkach jest również poddawany chłodzeniu międzystopniowemu.

Sprężarki są powszechnie spotykane w przemyśle. Służą do napędu różnego rodzaju narzędzi, np. kluczy pneumatycznych, szlifierek, wiertarek, młotów. Są wykorzystywane także m.in. do piaskowania, malowania natryskowego, dystrybucji gazów technicznych, pompowania opon samochodowych, przetłaczania gazu ziemnego, podnoszenia ciśnienia w układach turbin gazowych, transportu materiałów sypkich. Równie powszechnie stosuje się sprężarki w gospodarstwie domowym – typowymi przykładami są: chłodziarka, wentylator, odkurzacz, suszarka do włosów.

W technice często jest konieczne uzyskiwanie względnie wysokich ciśnień sprężanego gazu. Ponieważ gaz jest ściśliwy, do jego sprężenia jest niezbędna znaczna ilość energii. Zapotrzebowanie energetyczne procesu sprężania można zmniejszyć dzięki zastosowaniu chłodzenia międzystopniowego. Sprężanie przebiega wtedy w dwóch etapach: wstępnie sprężony gaz przepływa przez chłodnicę międzystopniową (będącą wymiennikiem ciepła), po czym jest dalej sprężany w następnej części sprężarki. Liczba chłodziń może być większa niż jeden. Gdyby była nieskończenie wielka, chłodzenie byłoby izotermiczne. Zwykle w technice stosuje się jedną chłodnicę międzystopniową. Korzyści energetyczne wynikają z mniejszej pracy sprężania gazu o niższej temperaturze. Wstępnie sprężony gaz (po sprężaniu adiabatycznym) ma temperaturę odpowiednio wyższą od temperatury otoczenia, więc względnie łatwo można go schłodzić. Po schłodzeniu praca sprężania (praca pobrana przez sprężarkę do uzyskania odpowiedniego ciśnienia) jest mniejsza.

Charakterystycznym parametrem sprężarki jest stosunek sprężania, zwany także sprężem, który można opisać za pomocą wzoru

$$\pi = \frac{p_{wy}}{p_{we}}$$

gdzie:

$p_{wy}$  – ciśnienie tłoczenia panujące w króćcu tłocznym (na wyjściu) sprężarki,

$p_{we}$  – ciśnienie ssania panujące w króćcu ssawnym (na wejściu) sprężarki.

#### 4.6.2. Klasyfikacja sprężarek

Ze względu na spręż ( $\pi$ ) różni się:

- wentylatory dla  $\pi < 1,13$  (przyrost ciśnienia nieprzekraczający 10 kPa),
- dmuchawy dla  $1,13 < \pi < 3$ ,
- sprężarki dla  $\pi > 3$ .

Z punktu widzenia budowy i zasady działania występują sprężarki:

- wyporowe, dzielone na:
  - tłokowe,
  - rotacyjne, którymi są:
    - łopatkowe,

- śrubowe,
  - spiralne,
  - typu Roots,
  - przeponowe (membranowe);
- przepływowe, które mogą być:
- promieniowe,
  - osiowe;
- inne, w tym:
- chemiczne (termiczne).

Według rodzaju sprężanego czynnika rozróżnia się sprężarki:

- powietrzne,
  - gazowe.
- Z uwagi na liczbę stopni spotyka się sprężarki:
- jednostopniowe,
  - wielostopniowe.

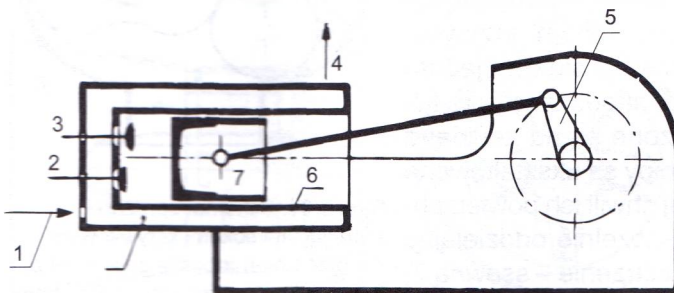
Pod względem mobilności występują sprężarki:

- stacjonarne,
- przewożne (trakcyjne).

### 4.6.3. Sprężarki wyporowe i przepływowe

**Sprężarki wyporowe** to maszyny zwiększające ciśnienie wskutek zmniejszania objętości gazu. Dawka zassanego gazu jest sprężana w zamkniętej przestrzeni, a następnie wypierana na zewnątrz. Przykładem wyporowego sposobu sprężania jest przemieszczanie tłoka w zamkniętym cylindrze. Zmniejszająca się objętość powietrza nad tłokiem powoduje wzrost ciśnienia powietrza w cylindrze.

**Sprężarka tłokowa** (rys. 4.35) składa się z korpusu z umieszczonym wewnątrz cylindrem, głowicy z zaworami i układu korbowego (zawierającego tłok połączony sworzniem z korbowodem i wałem korbowym). Tłok wykonuje ruch postępowo-zwrotny. Gdy tłok porusza się w dół, w cylindrze powstaje podciśnienie. Pod wpływem różnicy ciśnień między ciśnieniem atmosferycznym a ciśnieniem w cylindrze otwiera się zawór ssący i powietrze napływa do cylindra. Jest



Rys. 4.35. Schemat sprężarki tłokowej

1 – dopływ cieczy chłodzącej, 2 – zawór tłoczny, 3 – zawór ssący, 4 – odpływ cieczy chłodzącej, 5 – korba, 6 – cylinder, 7 – tłok, 8 – płaszcz cieczy chłodzącej

to suw ssania. Gdy tłok osiągnie skrajne dolne położenie i rozpoczyna ruch w górę, zawór ssący zamyka się oraz następuje sprężanie powietrza znajdującego się w cylindrze. W miarę przemieszczania się tłoka ciśnienie w cylindrze wzrasta. Gdy uzyska ono wartość wyższą od ciśnienia tłoczenia, zawór tłoczny otwiera się i powietrze zostaje wytłoczone z cylindra. Trwa to aż do osiągnięcia przez tłok skrajnego górnego położenia. Następnie cykl pracy się powtarza.

Ze względu na przebieg pracy sprężania, sprężarki tłokowe dzieli się na:

- jednostopniowe,
- wielostopniowe.

Pod względem budowy sprężarki tłokowe dzieli się na:

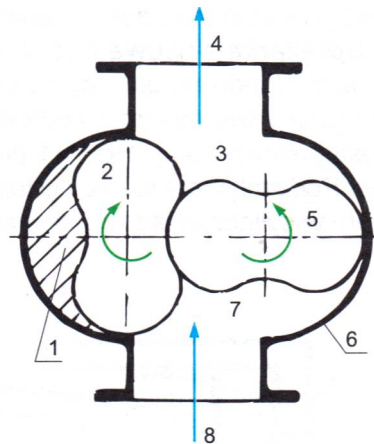
- jednocylindrowe i wielocylindrowe,
- stojące i leżące,
- o jednostronnym lub dwustronnym działaniu tłoka.

Sprężarki tłokowe są powszechnie stosowane do różnych celów w przemyśle i innych działach gospodarki, np. jako maszyny przewoźne i stałe do sprężania powietrza przeznaczonego do zasilania narzędzi pneumatycznych (budownictwo, górnictwo), do sprężania powietrza służącego do rozruchu wysokoprężnych silników spalinowych, do sprężania gazów w przemyśle chemicznym, do zasilania, włączania i wyłączania hamulców pneumatycznych, do ładowania butli gazem technicznym.

Zaletą sprężarek tłokowych jest zdolność wytwarzania bardzo wysokich ciśnień. Wadami są duże wymiary i masa, konieczność stosowania zbiorników wyrównawczych (tłoczenie czynnika odbywa się dawkami) oraz zanieczyszczenie tłoczonego czynnika olejem używanym do smarowania cylindra. Sprawność ogólna sprężarek tłokowych wynosi 50...75%.

**Sprężarka rotacyjna.** Działanie sprężarek rotacyjnych polega na zasysaniu i sprężaniu gazu dawkami przez organ roboczy wykonujący ruch obrotowy. Sprężarki tego rodzaju wykorzystuje się do sprężania gazów, gdy ciśnienie nie przekracza 1 MPa, lecz wymaga się dużej wydajności. Przykładami sprężarek rotacyjnych są sprężarki łopatkowe, śrubowe i sprężarki z wirującymi tłokami.

Na rysunku 4.36 przedstawiono schematycznie sprężarkę z wirującymi tłokami krzywkowymi. W jej kadłubie 6 obracają się dwa jednakowe tłoki krzywkowe 2 i 5, napędzane parą kół zębatych, które umieszczone są na zewnątrz kadłuba. Tłoki i kadłub pompy są ukształtowane w taki sposób, że w każdej chwili ich powierzchnie stykają się ze sobą, szczelnie oddzielając od siebie trzy robocze przestrzenie – ssawną 7, tłoczną 3 i zasklepioną 1. W położeniu tłoków przedstawionym na rysunku gaz jest zasysany do przestrzeni ssawnej 7. Poprzednio zassany



**Rys. 4.36.** Schemat sprężarki z wirującymi tłokami krzywkowymi  
1 – przestrzeń robocza zasklepiona,  
2, 5 – tłoki, 3 – przestrzeń robocza tłoczna, 4 – króciec tłoczny,  
6 – kadłub, 7 – przestrzeń robocza ssawna, 8 – króciec ssawny

gaz jest natomiast zamknięty w przestrzeni zasklepionej 1. Po dalszym obrocie tłoków następuje połączenie przestrzeni zasklepionej 1 z przestrzenią tłoczną 3 i wskutek tego raptowne sprężenie gazu do ciśnienia panującego w rurze tłocznej oraz wyparcie go na zewnątrz. W tym czasie odbywa się także zasysanie gazu do chwili, gdy tłok 2 zajmie położenie pionowe, a tłok 5 – poziome, po czym cykl pracy się powtarza.

Oryginalną metodą regulacji w sprężarkach wyporowych jest zawór nadmiarowy ciśnienia, który umożliwia ujście ciśnienia do atmosfery. W najprostszej wersji zawór ten może zawierać sprężynę, której siła napięcia określa wartość ciśnienia końcowego. Często zamiast zaworu sprężynowego stosuje się tzw. serwozawór, który jest sterowany za pomocą regulatora. Umożliwia to łatwą kontrolę ciśnienia, a zawór może również działać jako zawór odciążeniowy podczas uruchamiania sprężarki pod ciśnieniem. Upust ciśnienia wymaga dużej ilości energii, ponieważ sprężarka musi stale pokonywać pełne przeciwcisnienie. Wariant, który jest stosowany w mniejszych sprężarkach, opiera się na odciążaniu sprężarki przez całkowite otwarcie zaworu, tak aby sprężarka musiała pokonać ciśnienie atmosferyczne. Zużycie energii jest wtedy znacznie mniejsze.

**Sprężarki przepływowe** mają szybko obracający się wirnik, który wywołuje wzrost ciśnienia oraz prędkości gazu.

Ze względu na wartość wytwarzanego ciśnienia sprężarki przepływowe dzieli się na:

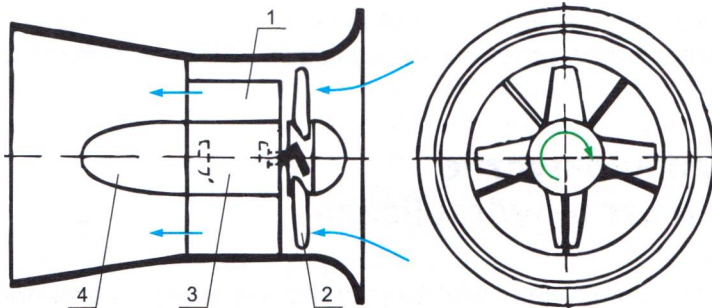
- wentylatory,
- dmuchawy,
- turbosprężarki.

W zależności od kierunku przepływu czynnika przez wirnik rozróżnia się dwie odmiany sprężarek przepływowych:

- promieniowe,
- osiowe.

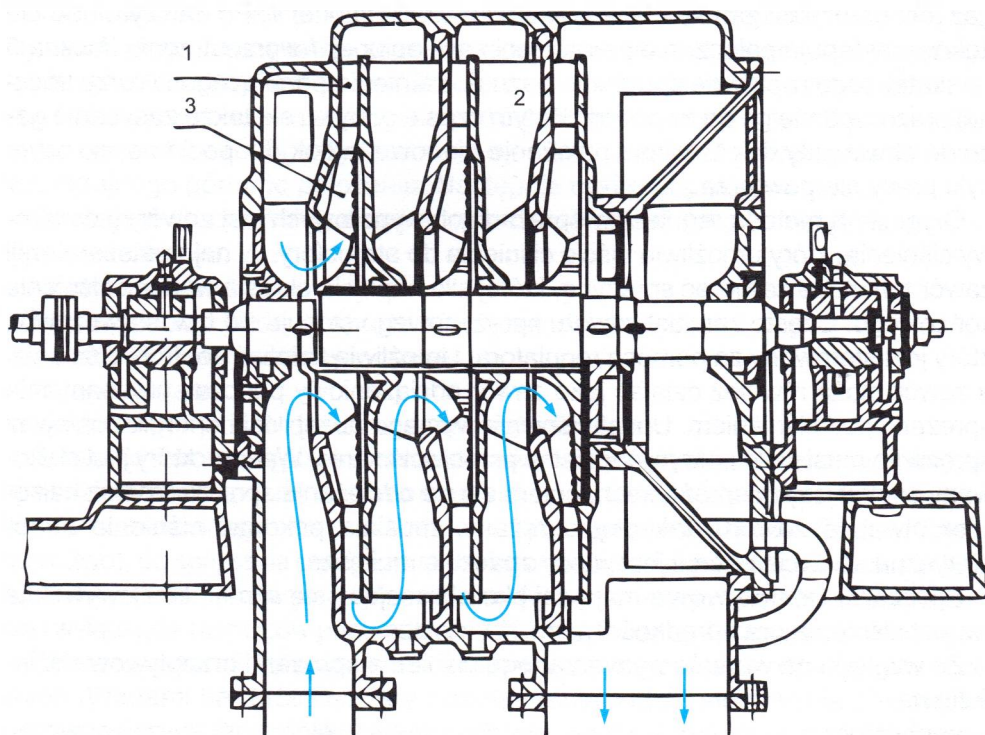
W sprężarce przepływowej każdemu wirnikowi odpowiada jeden stopień sprężania. Spotyka się sprężarki:

- jednostopniowe,
- wielostopniowe.



Rys. 4.37. Schemat wentylatora osiowego

1 – kierownica łopatkowa, 2 – wirnik, 3 – silnik elektryczny, 4 – piasta kierownicy



**Rys. 4.38.** Schemat trzystopniowej dmuchawy promieniowej  
1 – kierownica odśrodkowa, 2 – kierownica dośrodkowa, 3 – wirnik

Przykład wentylatora osiowego przedstawiono na rysunku 4.37, a dmuchawy promieniowej – na rysunku 4.38.

Sprężarki przepływowe powszechnie wykorzystuje się w różnych dziedzinach techniki do sprężania dużych objętości powietrza, np.:

- w lotnictwie do silników tłokowych i odrzutowych;
- w górnictwie do wytwarzania ciśnienia służącego do napędu różnych narzędzi pneumatycznych;
- w hutnictwie jako dmuchawy niezbędne do wytopu stali.

Sprawność ogólna sprężarek przepływowych wynosi 50...70%.

## 4.7. Napędy pneumatyczne i pneumatyczno-hydrauliczne

Silnik pneumatyczny i pomysł użycia powietrza jako nośnika energii nie są nowe. Silniki na sprężone powietrze były wykorzystywane do zasilania lokomotyw w kopalniach oraz do napędu tramwajów. Silniki pneumatyczne były i wciąż są

używane do rozruchu silników spalinowych w samochodach wyścigowych. Małe silniki pneumatyczne są powszechnie stosowane do napędu narzędzi ręcznych, takich jak: wiertarki, młoty udarowe, szlifierki, klucze, zwłaszcza do pracy w środowisku, w którym iskra pochodząca od napędu elektrycznego lub spalinowego mogłaby spowodować pożar.

Termin „napęd” w technice ma dwa znaczenia. Pierwsze z nich określa rodzaj energii wyjściowej zamienianej na energię mechaniczną. Drugie natomiast dotyczy zespołu elementów służących do przekazywania ruchu od silnika dowolnego typu do maszyny roboczej lub mechanizmu.

W ramach pierwszego znaczenia można mówić np. o napędzie elektrycznym, spalinowym oraz pneumatycznym. Ich istotą jest zamiana energii określonego rodzaju (elektrycznej, cieplnej, pneumatycznej) w silniku o odpowiedniej konstrukcji na energię ruchu obrotowego lub posuwistego.

Drugie znaczenie napędu odnosi się do zespołu elementów i części maszynowych pośredniczących między silnikiem dowolnego typu a napędzanym mechanizmem. W takim znaczeniu można mówić np. o napędzie zębatym, śrubowym, cięgnowym, ciernym.

Istotą napędu pneumatycznego jest czynnik roboczy w postaci sprężonego powietrza, pełniącego rolę nośnika energii pneumatycznej między źródłem tej energii a jej odbiornikiem, w którym jest zamieniana ponownie na energię mechaniczną. Jest to więc tzw. napęd substancjonalny, podobnie jak napęd hydrauliczny. Oba wymienione rodzaje należą do napędów płynowych. Najprościej można powiedzieć, że **napęd pneumatyczny** to układ wprawiający w ruch mechanizmy maszyn i urządzeń za pomocą energii sprężonego powietrza lub innego gazu.

**Silnik pneumatyczny** jest maszyną pneumatyczną przetwarzającą energię sprężonego powietrza lub innego gazu na ruch obrotowy lub postępowy. Silniki pneumatyczne przypominają silniki parowe, gdyż pracę wykonuje w nich sprężony gaz dostarczony z zewnątrz. Silnik pneumatyczny nie emituje wprawdzie szkodliwych zanieczyszczeń do atmosfery, lecz wykorzystuje sprężone powietrze, którego wytworzenie wymaga energii uzyskiwanej metodami emitującymi takie zanieczyszczenia. Silniki pneumatyczne wykorzystuje się zamiast silników elektrycznych w razie zagrożenia pożarowego albo wymagania dużej elastyczności napędu (dostosowania się do bardzo zmiennych obciążeń) lub dużych prędkości obrotowych.

Źródłem energii w układach pneumatycznych jest sprężone powietrze, które wytwarza się w sprężarkach stacjonarnych lub ruchomych. Sprężarki te mogą być napędzane silnikiem elektrycznym albo spalinowym.

W układach pneumatycznych można łatwo regulować siłę, sterując ciśnieniem, natomiast prędkość – dławiąc strumień sprężonego powietrza doprowadzanego do odbiornika lub z niego odprowadzanego. Pewną uciążliwością jest hałas towarzyszący wypływowi powietrza do otoczenia, który można jednak w znacznym stopniu wyeliminować dzięki zastosowaniu odpowiednich tłumików.

**W pneumatycznym układzie napędu i sterowania** można wyróżnić następujące grupy:

- **elementy wykonawcze (napędowe)**, w których następuje zmiana doprowadzonej energii sprężonego powietrza na energię mechaniczną; nazywa się je również odbiornikami pneumatycznymi; obejmują siłowniki i silniki pneumatyczne;
- **elementy sterujące przepływem energii sprężonego powietrza (zawory)**; ze względu na przeznaczenie i konstrukcję stanowią one bardzo rozbudowaną grupę, do której należą np. zawory rozdzielające i przetworniki;
- **elementy przygotowania, magazynowania i przesyłania sprężonego powietrza**;
- **elementy pomocnicze**, do których zalicza się np. różnego rodzaju złącza pneumatyczne, płyty montażowe, mierniki ciśnienia i temperatury.

### Podział silników pneumatycznych

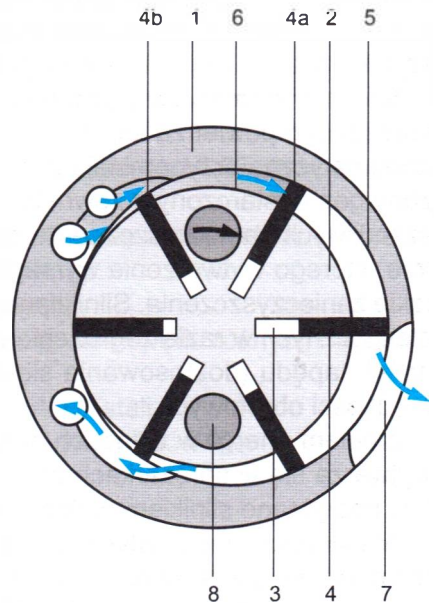
Rozróżnia się następujące rodzaje silników pneumatycznych:

- wahadłowe,
- krokowe,
- o ruchu obrotowym, które mogą być:
  - łopatkowe,
  - turbinowe (przepływowe),
  - zębate,
  - tłokowe, w tym:
    - promieniowe,
    - osiowe.

**Silniki wahadłowe** mogą realizować jeden niepełny obrót. Gdy kąt obrotu nie przekracza  $120^\circ$ , można zastosować silniki dwułopatkowe. W przeciwnym razie stosuje się silniki jednołopatkowe. Silniki wahadłowe mają małe wymiary i dlatego są wykorzystywane do napędu niezbyt obciążonych mechanizmów o zwartej budowie, np. manipulatorów przemysłowych.

W przemyśle najszerze zastosowanie znalazły silniki pneumatyczne łopatkowe, turbinowe i zębate.

**Silniki łopatkowe** (rys. 4.39) mają cylindryczną tuleję 1, wewnątrz której znajduje się wirnik 2 z łopatkami 4, oraz dwie pokrywy (przednią i tylną), gdzie znajdują się łożyska wirnika. Wirnik, zamontowany w tulei mimośrodkowo, ma szczeliny 3, w których swobodnie mogą się przesuwać łopatki 4, przylegające do wewnętrznej ścianki 5 cylindrycznej tulei. Dwie sąsiednie łopatki tworzą komorę 6. Wpływające sprężone powietrze



**Rys. 4.39.** Schemat pneumatycznego silnika łopatkowego. Strzałkami na rysunku oznaczono kierunek obrotu wirnika i przepływ sprężonego powietrza (opis w tekście)



wywiera większą siłę na większą powierzchnię przedniej łopatki 4a niż na mniejszą powierzchnię tylnej łopatki 4b. Różnica tych sił wytwarza moment obracający wirnik. Rozprężone powietrze wydostaje się na zewnątrz otworem wylotowym 7. Między szczelinami łopatek znajdują się komory smarne 8, służące do ciągłego smarowania silnika.

Mimośrodowe umieszczenie wirnika względem osi cylindra powoduje, że między wewnętrzną ścianką cylindra, łopatkami oraz wirnikiem powstają komory robocze o zmiennej wielkości. Podczas pracy silnika łopatki są dociskane do wewnętrznej powierzchni cylindra siłą odśrodkową, co zapewnia efektywne uszczelnienie poszczególnych komór roboczych.

Liczba łopatek w silniku, która wynosi od 3 do 10, jest ważnym parametrem konstrukcyjnym. Ogólnie można powiedzieć, że im mniej łopatek, tym mniejsze są straty tarcia, lecz gorszy rozruch silnika. Większa liczba łopatek łagodzi wprowadzie moment rozruchu i zmniejsza „przecieki wewnętrzne”, powoduje jednak zwiększone tarcie.

**Silniki turbinowe zawierają** umieszczone w korpusie koło łopatkowe napędzające wałek. Gdy ich otwór zasilający zostanie połączony ze źródłem zasilania o dużym natężeniu przepływu, a drugi otwór z atmosferą, wałek silnika zacznie się obracać. Silniki turbinowe stosuje się przy małych obciążeniach, mogą natomiast uzyskiwać bardzo dużą prędkość obrotową, osiągającą 500 000 obr/min (np. w wiertarkach dentystycznych).

**Silniki zębate.** W silnikach tych moment obrotowy powstaje w wyniku naporu sprężonego powietrza na powierzchnię zębów dwóch zazębionych kół zębatych. Silniki tego rodzaju stosuje się w napędach dużej mocy, przekraczającej 40 kW.

**Silniki tłokowe.** W tych silnikach organem roboczym jest tłok, którego ruch postępowo-zwrotny jest zamieniany na ruch obrotowy za pośrednictwem wału korbowego. Równomierną pracę uzyskuje się dzięki zastosowaniu kilku tłoków współpracujących z wałem. Tłoki silnika porusza siła naporu sprężonego powietrza. Źródłem sprężonego powietrza pod ciśnieniem 20 MPa jest kompozytowy zbiornik z włókna węglowego. Do cylindrów powietrze jest dostarczane wtryskowym układem zasilania. Unikatowa konstrukcja wału korbowego wydłuża czas, kiedy ładunek powietrza jest ogrzewany ciepłem z otoczenia. Sprawność urządzenia jest zwiększona dzięki wykorzystaniu ciepła z otoczenia o normalnej temperaturze do ogrzania rozprężającego się powietrza, które jest zimne (temp.  $-15^{\circ}\text{C}$ ).

Napędy pneumatyczne są bardzo szeroko wykorzystywane w różnych dziedzinach. Najbardziej typowymi przykładami ich zastosowania są:

- prasy wulkanizacyjne,
- układy zawieszenia pojazdów, wagonów i maszyn roboczych,
- układy sterowania drzwi w autobusach i tramwajach,
- maszyny do profilowania i łączenia przewodów samochodowych,
- układy hamulcowe maszyn wyciągowych w górnictwie,
- palety i płyty transportowe do przemieszczania ciężkich przedmiotów w halach fabrycznych,
- urządzenia mocujące,

- urządzenia sortujące,
- maszyny pakujące,
- maszyny obuwnicze,
- maszyny do produkcji butelek z tworzyw sztucznych,
- wtryskarki,
- zgrzewarki,
- rozlewarki,
- manipulatory montażowe obwodów scalonych na płytkach obwodów drukowanych.

### Zalety i wady napędów pneumatycznych

Szerokie wykorzystanie napędów pneumatycznych wynika z zalet czynnika roboczego, którym najczęściej jest sprężone powietrze. Najważniejsze **zalety** sprężonego powietrza są następujące:

- jest łatwo dostępne;
- łatwy jest transport przewodowy na znaczne odległości;
- po wykorzystaniu nie wymaga zwracania do sieci ani wymiany;
- jest bezpieczne i czyste w eksploatacji (nie grozi porażeniem i nie zanieczyszcza otoczenia w razie uszkodzenia instalacji);
- jest odporne na wahania temperatury, dlatego gwarantuje niezawodną pracę również w skrajnych temperaturach otoczenia;
- pod ciśnieniem 0,4 do 0,7 MPa jest bardzo dobrym źródłem energii do wytwarzania sił o wartości do kilkunastu kiloniutonów.

W wielu współczesnych maszynach występują urządzenia pneumatyczne lub pneumatyczno-hydrauliczne, a w niektórych z nich urządzenia te stanowią najważniejszą ich część.

Mimo licznych zalet, napędy pneumatyczne mają także **wady**, którymi są:

- utrudnione ścisłe powiązanie oraz uzyskiwanie powolnych i płynnych ruchów poszczególnych mechanizmów i zespołów maszyn (przeszkodą jest ściśliwość czynnika roboczego i jego straty w wyniku przecieków),
- zmiany wartości sił zewnętrznych mają wpływ na prędkość przesuwania się napędzanych elementów,
- ograniczona długość przemieszczeń prostoliniowych.

### Elementy i zespoły pneumatyczno-hydrauliczne

Do napędu mechanizmów hydraulicznych wykorzystuje się czasami energię sprężonego powietrza. Do tego celu opracowano konstrukcję zespołów pneumatyczno-hydraulicznych spełniających dwie funkcje:

- przekazujących energię sprężonego powietrza do cieczy roboczej w celu wykorzystywania jej jako nośnika energii w dalszej części układu (przetworniki, wzmacniacze i pompy pneumatyczno-hydrauliczne);
- wykonujących określoną pracę przez współdziałające ze sobą oba czynniki, tzn. sprężone powietrze i ciecz roboczą (siłowniki i silniki pneumatyczno-hydrauliczne).

**Wzmacniacze i pompy pneumatyczno-hydrauliczne** przekazują energię sprężonego powietrza do cieczy hydraulicznej z jednoczesnym zwiększeniem jego ciśnienia. Natomiast **przetworniki pneumatyczno-hydrauliczne** nie zwiększają ciśnienia oleju.

Zadaniem przetworników i wzmacniaczy pneumatyczno-hydraulicznych jest przekazanie olejowi energii sprężonego powietrza bez zwiększenia ciśnienia oleju w stosunku do ciśnienia sprężonego powietrza (przetworniki pneumatyczno-hydrauliczne) lub ze zwiększeniem jego ciśnienia (wzmacniacze pneumatyczno-hydrauliczne).

W czasie eksploatacji tego typu przetworników należy zwracać uwagę na to, żeby były one ustawiane w pozycji pionowej i najniższy poziom oleju znajdującego się w tych przetwornikach był położony wyżej niż odbiorniki hydrauliczne. Poza tym odbiorniki hydrauliczne oraz cała instalacja hydrauliczna muszą mieć sprawny i szybki w obsłudze układ odpowietrzający, gdyż przetworniki tego rodzaju mogą często wywoływać zapowietrzenie układu hydraulicznego. Aby temu zapobiec, stosuje się przetworniki ze ścianką działową, które mogą pracować w dowolnym położeniu. Aby ścianka działowa spełniała swoje zadanie, musi być elastyczna albo przesuwna. Elastyczne ścianki działowe wykonuje się w postaci przepon, mieszków lub worków, które pod wpływem sprężonego powietrza odkształcają się, wypierając przy tym na zewnątrz olej z przetwornika. Ścianki działowe przesuwne wykonuje się w postaci tłoków. Między częściami pneumatyczną i hydrauliczną przetwornika znajduje się komora wyrównawcza połączona z atmosferą. Stosując komorę wyrównawczą, można oddzielić część pneumatyczną od hydraulicznej i w ten sposób zapobiec zapowietrzaniu się oleju. Ponieważ w układzie hydraulicznym zawsze występują przecieki oleju, w przetworniku pneumatyczno-hydraulicznym celowe jest umieszczanie wskaźnika poziomu oleju.

W układach napędowych uchwytów oprócz przetworników pneumatyczno-hydraulicznych stosuje się wzmacniacze pneumatyczno-hydrauliczne jedno- i dwustopniowego działania. We wzmacniaczach jednostopniowego działania wprowadzenie sprężonego powietrza do komory przed tłokiem powoduje przesuwanie się tłoka w górę i tłok siłownika hydraulicznego wytlacza z przestrzeni roboczej olej do odbiorników (np. siłowników hydraulicznych). Ciśnienie oleju w instalacji hydraulicznej pozostaje niskie, dopóki elementy mocujące nie zetkną się z przedmiotem. Wówczas wzrasta ono gwałtownie i przedmiot zostaje zamocowany. Odmocowanie przedmiotu następuje po przełączeniu pneumatycznego zaworu rozdzielającego. Sprężone powietrze dopływa wtedy do komory za tłokiem i tłok przesuwa się w dół. Zamiast doprowadzania sprężonego powietrza do tej komory można w niej zamontować sprężynę.

Wzmacniacze mogą być zaopatrzone w dodatkowy zbiornik oleju, służący do uzupełnienia ubytku (przecieków) oleju w układzie. W takim wzmacniaczu ciśnienie oleju w komorze wzrasta dopiero wtedy, kiedy nurnik zasłoni odpowiedni otwór. Wadą wzmacniaczy jednostopniowych jest względnie mała objętość komory, która ogranicza liczbę odbiorników napędzanych przez ten wzmacniacz (zbyt mały wydatek oleju).

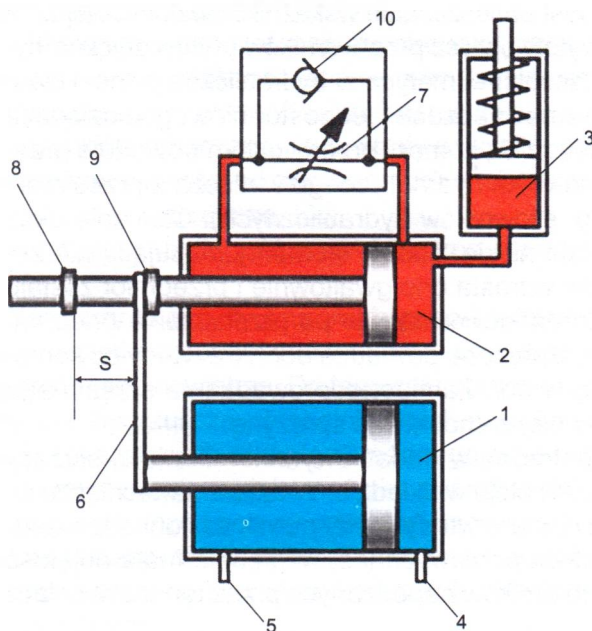
Wzmacniacze pneumatyczno-hydrauliczne dwustopniowego działania stosuje się wówczas, gdy jest niezbędny większy wydatek oleju.

Jeśli działanie określonego uchwyty lub przyrządu wymaga znacznych ilości oleju (duży uchwyt lub cała grupa uchwytów), zamiast przetwornika i wzmacniaczy pneumatyczno-hydraulicznych stosuje się pompę pneumatyczno-hydrauliczną. Składa się ona ze wzmacniacza pneumatyczno-hydraulicznego, układu sterującego, zbiornika oleju i zaworu zwrotnego.

Pompa pneumatyczno-hydrauliczna jest sterowanym wzmacniaczem pojedynczego działania z automatycznie powtarzającym się cyklem pompowania. Wzmacniacz jest sterowany przez układ pneumatyczny, w którym zawory są cyklicznie przełączane przez zderzak (związany z tłokiem wzmacniacza). Pneumatyczny zawór redukcyjny umożliwi nastawianie potrzebnego ciśnienia oleju, a w zbiorniku jest zmagazynowany zapas oleju. Zawory zwrotne uniemożliwiają cofanie się oleju. Powrót tłoka i nurnika wzmacniacza do górnego położenia zapewnia „sprężyna pneumatyczna” zasilana przewodem.

Do napędu szybkich i zwolnionych ruchów mechanizmów wykorzystuje się czasami pneumatyczno-hydrauliczne zespoły napędowe. Zespół z rysunku 4.40 składa się z siłownika pneumatycznego 1, siłownika hydraulicznego 2 oraz zbiornika kompensacyjnego 3. Na tłoczysku siłownika hydraulicznego 2 znajduje się nastawny zderzak 8, ustalający długość  $S$  ruchu szybkiego.

Działanie zespołu jest następujące. Sprężone powietrze, doprowadzane przewodem 4 do siłownika 1, powoduje szybki ruch tłoka w lewo. Gdy połączone z tłoczyskiem siłownika 1 jarzmo 6 oprze się o nastawny zderzak 8, przesuw tłoka w siłowniku pneumatycznym wywołuje równoczesny przesuw tłoka w hydra-



**Rys. 4.40.** Pneumatyczny układ napędowy z hamowaniem hydraulicznym  
 1 – siłownik pneumatyczny z jednostronnym tłoczyskiem,  
 2 – siłownik hydrauliczny,  
 3 – zbiornik kompensacyjny,  
 4, 5 – przewód, 6 – jarzmo,  
 7 – zawór dławiący, 8, 9 – zderzak nastawny, 10 – zawór zwrotny,  
 S – długość ruchu szybkiego

ulicznym siłowniku hamującym 2. Prędkość ruchu obu tłoków nastawia się zaworem dławiącym 7. Po doprowadzeniu sprężonego powietrza do przewodu i połączeniu z atmosferą przewodu 4 tłok w siłowniku 1 przemieszcza się w prawo. Tłok, wycofujący się w siłowniku pneumatycznym, za pomocą jarzma 6 – opierającego się o zderzak 9 – wycofuje również tłok siłownika hydraulicznego 2. Wycofanie jest szybkie, gdyż przy tym kierunku ruchu olej przepływa z prawej komory siłownika hydraulicznego do lewej przez zawór zwrotny 10. Jeśli jarzmo 6 zostanie zaciśnięte między zderzakami 8 i 9, wtedy zostanie skasowany ruch szybki, realizowany tylko przez siłownik pneumatyczny 1.

## 4.8. Urządzenia chłodnicze

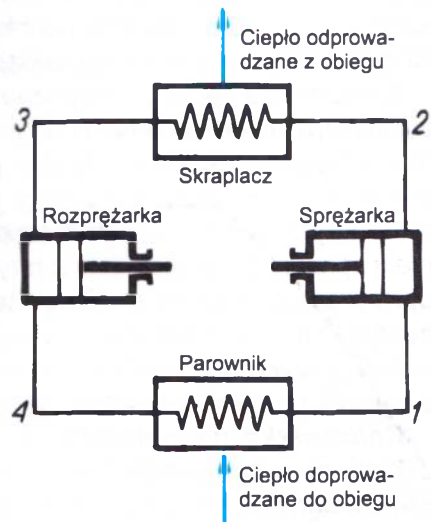
**Urządzenia chłodnicze (chłodziarki)** są maszynami cieplnymi, których zadaniem jest obniżenie temperatury środowiska chłodzonego kosztem doprowadzonej energii. W chłodziarkach absorpcyjnych energia jest dostarczana w postaci ciepła, natomiast w pozostałych (sprężarkowych, strumienicowych, termoelektrycznych) – w postaci pracy. Czynnikiem chłodzącym może być powietrze, woda lub inny czynnik pośredniczący (chłodziwo).

Zdecydowaną większość współczesnych chłodziarek stanowią urządzenia elektryczne, najczęściej sprężarkowe, realizujące *lewobieżny* obieg Lindego. W przeciwieństwie do obiegów *prawobieżnych*, realizowanych w silnikach cieplnych (obieg Otta, Diesla, Seilingera, Braytona), do układu chłodniczego doprowadza się pracę, a odbiera ciepło.

**Chłodziarka sprężarkowa.** Schemat działania chłodziarki sprężarkowej pokazano na rysunku 4.41. Najprostszy układ chłodniczy składa się z następujących elementów:

- skraplacza,
- elementu dławiącego (w urządzeniach domowych rolę tę pełni rurka kapilarna),
- parownika,
- sprężarki.

W parowniku, który jest umieszczony w środowisku chłodzonym, panują niskie ciśnienie i niska temperatura. Znajdujący się tam czynnik chłodniczy wrze, intensywnie odbierając ciepło. Następnie jest zasysany i sprężany przez sprężarkę, po czym trafia do skraplacza, w którym pod wysokim ciśnieniem ulega skropleniu. Ciekły czynnik o temperaturze wyższej od temperatury otoczenia trafia do elementu dławiącego, ponieważ jego ciśnienie musi zostać obniżone do ciśnienia panującego w parowniku. Pod-



Rys. 4.41. Schemat działania chłodziarki sprężarkowej

czas dławienia część czynnika odparowuje, powodując spadek temperatury pozostałej cieczy. Zimna mieszanina cieczoowo-parowa trafia do parownika i cykl się powtarza.

**Chłodziarka absorpcyjna.** Tego rodzaju chłodziarka działa na zasadzie krążenia czynnika chłodniczego między absorberem (tutaj jest pochłaniany) a desorberem (w chłodziarce tę funkcję spełnia wariak). W desorberze czynnik chłodniczy wydziela się z roztworu. Układ absorbera i desorbera stanowi sprężarkę chemiczną, pozostała część obiegu jest identyczna jak w chłodziarce sprężarkowej.

Chłodziarki absorpcyjne były pierwszymi chłodziarkami elektrycznymi. Po wynalezieniu chłodziarek sprężarkowych, które są bardziej wydajne, systematycznie przechodzono na nowe rozwiązanie. Czasami stosuje się je jednak do dzisiaj. Przykładem mogą być chłodziarki małe, stacjonarne (poniżej 1 m wysokości). W tego typu chłodziarkach nie montuje się sprężarek, gdyż układ sprężarkowy, mimo że bardziej wydajny, zajmuje więcej miejsca.

Charakterystyczną odmianą chłodziarek absorpcyjnych jest chłodziarka gazowa. W typowej chłodziarce wariakiem jest grzałka elektryczna, a w gazowej – palnik gazowy. To rozwiązanie jest często stosowane w miejscach, gdzie nie ma prądu lub częste są braki w jego dostawie, a urządzenie łatwo może być podłączone do butli gazowej, np. w przyczepach kempingowych. W takich chłodziarkach często występuje także grzałka, więc urządzenie można zasilac zarówno prądem, jak i gazem.

**Chłodziarka adsorpcyjna.** Urządzenie to realizuje obieg chłodniczy podobny do obiegu realizowanego w chłodziarce absorpcyjnej, z tą jednak różnicą, że wykorzystuje proces adsorpcji. Powoduje to, że jest ono zbudowane zupełnie inaczej. Adsorpcja zachodzi na powierzchni ciała stałego (np. węgla aktywnego), więc nie ma możliwości przepływu ani roztworu bogatego, ani uboższego, jak to się dzieje w przypadku chłodziarki absorpcyjnej. Pochłanianie następuje tylko w warstwie zewnętrznej substancji pochłaniającej, która jest porowatym ciałem stałym. Chłodziarki te mają niewielką wydajność chłodzenia i działają w sposób nieciągły.

**Chłodziarka termoelektryczna.** Jej działanie opiera się na zjawisku termoelektrycznym. Jeśli przepuści się prąd elektryczny przez obwód złożony z dwóch różnych ciał przewodzących, to w jednym ze styków obu przewodników wystąpi wzrost temperatury, a w drugim jej zmniejszenie. Do budowy chłodziarek termoelektrycznych wykorzystuje się półprzewodniki. Chłodziarki tego rodzaju mają małą sprawność, jednak charakteryzuje je minimalny udział elementów chłodzących w samej chłodziarce. Dzięki temu urządzenie o niewielkich gabarytach ma dużą pojemność. Chłodziarki te wykorzystuje się głównie jako urządzenia przenośne, zazwyczaj zasilane niskim napięciem, z zewnętrznego zasilacza lub z gniazdka zapalniczki samochodowej.

**Chłodziarka magnetyczna.** W ostatnich latach zaczęły się również pojawiać chłodziarki wykorzystujące efekt magnetokaloryczny do obniżania temperatury. Efekt magnetokaloryczny, zwany także rozmagnesowaniem adiabatycznym, to zjawisko termodynamiczne, w którym zmiany temperatury odpowiednio dobrego materiału (paramagnetyka) są wywoływane oddziaływaniem na ten mate-

riał cyklicznie zmieniającego się pola magnetycznego. Jak wykazały badania, zaletą takich chłodziarek jest sprawność zwiększona o ok. 40% w stosunku do tradycyjnych konstrukcji.

**Chłodziarka termoakustyczna.** W chłodzience tego rodzaju do obniżania temperatury wykorzystuje się efekt termoakustyczny. Zasada jej działania polega na cyklicznym sprężaniu i rozprężaniu cząstek gazu za pomocą fal dźwiękowych i odbieraniu ciepła od ścianek wymiennika przez zimniejsze cząstki gazu. Tego rodzaju urządzenia są najczęściej wykorzystywane do skraplania gazów w urządzeniach laboratoryjnych.

## 4.9. Maszyny i środki transportowe

**Transport** jest działalnością polegającą na przemieszczaniu ludzi i towarów na różne odległości. Zmechanizowany transport towarów jest ważnym ogniwem wielu procesów wytwórczych (np. w górnictwie, budownictwie i zakładach przemysłowych).

Z punktu widzenia środowiska, w którym się odbywa, rozróżnia się transport:

- lądowy, w tym:
  - naziemny (np. samochodowy),
  - nadziemny (np. koleją nadziemną),
  - podziemny (np. metrem),
  - szynowy (np. kolejowy, tramwajowy),
- miejski (np. autobusowy),
- wodny (np. statkami),
- powietrzny (np. samolotami),
- przesyłowy (np. rurociągami),
- wewnątrzzakładowy (np. taśmociągami).

Ze względu na zasięg i rodzaj rozróżnia się następujące środki transportu:

- dalekiego (zewnętrznego) zasięgu, którymi są:
  - środki transportu lądowego, czyli pojazdy:
    - szynowe,
    - samochodowe wielośladowe,
    - samochodowe jednośladowe (motocykle, rowery),
  - środki transportu wodnego:
    - śródlądowego,
    - morskiego,
  - środki transportu lotniczego,
  - środki transportu specjalnego (poduszkowce, amfibie, pojazdy gaśnicowe),
- bliskiego (wewnętrznego) zasięgu, do których należą:
  - urządzenia dźwigowe (dźwignice),
  - urządzenia transportowe (wózki i przenośniki).

Ze względu na pokonywane odległości rozróżnia się dwa zasadnicze rodzaje transportu: bliski oraz daleki.

**Transport bliski**, zwany także wewnętrznym, jest związany z przemieszczaniem na małe odległości.

**Transport daleki**, zwany także zewnętrznym, wiąże się z koniecznością przemieszczania na duże odległości.

**Transport kolejowy** odgrywa szczególnie ważną rolę w przewozie ładunków masowych na duże odległości. Jednak traci na znaczeniu wobec przewozu pasażerów i ładunków drobnicowych w krajach wysoko rozwiniętych, gdzie skutecznie konkuruje z nim transport samochodowy.

**Transport samochodowy**. W zależności od pełnionej funkcji drogi dzieli się na lokalne, krajowe i międzynarodowe. Najważniejszą rolę spełniają autostrady, które dominują na szlakach tranzytowych i między aglomeracjami miejsko-przemysłowymi.

**Transport lotniczy** jest najnowocześniejszym i najszybciej rozwijającym się rodzajem transportu. Wymaga jednak dużych nakładów kapitałowych i wysoko wykwalifikowanej kadry. Transport lotniczy umożliwia przewóz ludzi i towarów z dużą prędkością w najbezpieczniejszy sposób, powodując przy tym niewielkie zanieczyszczenie środowiska. Transport lotniczy jest szczególnie przydatny w szybkim dostarczaniu, nawet na odległe rynki, świeżych owoców, warzyw, kwiatów i ekspresowej poczty. Bezpieczeństwo lotów, które jest głównym warunkiem dalszego rozwoju lotnictwa cywilnego, wymaga stałej rozbudowy systemów nawigacyjnych, urządzeń kontroli lotów, radiolokacji i lotnisk.

**Poduszkowce**. Poduszkowiec działa na zasadzie wtłaczania powietrza przez zewnętrzny wentylator do środka komory powstałej między dnem tego pojazdu, jego elastycznym fartuchem i gruntem. Pojazd – uniesiony na odpowiednią wysokość – porusza się za pomocą silników napędzających śmigła. Mimo że jest to transport najczęściej wykorzystywany przez wojsko, przydaje się w transporcie różnego rodzaju produktów (np. żywności) na wyspy czy też bezpośrednio przy brzegu.

**Pojazdy gąsienicowe** są jednymi z najbardziej rozpowszechnionych środków transportu specjalistycznego, stosowanego w budownictwie i wojsku. Działanie maszyn gąsienicowych opiera się „taśmowym” układzie jezdny. Służy on m.in. poprawie przyczepności pojazdu. Jednak główną zaletą pojazdów gąsienicowych jest rozłożenie ich ciężaru na maksymalnie dużą powierzchnię. Dzięki temu pojazdy gąsienicowe są w stanie przewozić nawet najcięższe towary, a koparki gąsienicowe – podnosić za jednym razem nawet wiele ton ziemi.

## 4.10. Automatyzacja transportu wewnętrznego

Środkami transportu wewnętrznego są urządzenia dźwigowo-transportowe, służące do poziomego lub pionowego przemieszczania towarów bądź osób w obrębie placu składowego, magazynu, hali fabrycznej, fabryki albo innego obiektu. Zasadniczo dzieli się je na dźwignice, zwane także dźwigami, oraz przenośniki.

**Przenośniki** są maszynami o pracy ciągłej, w których elementy przenoszące materiał są w ciągłym ruchu. Typowymi przykładami takich urządzeń są przeno-

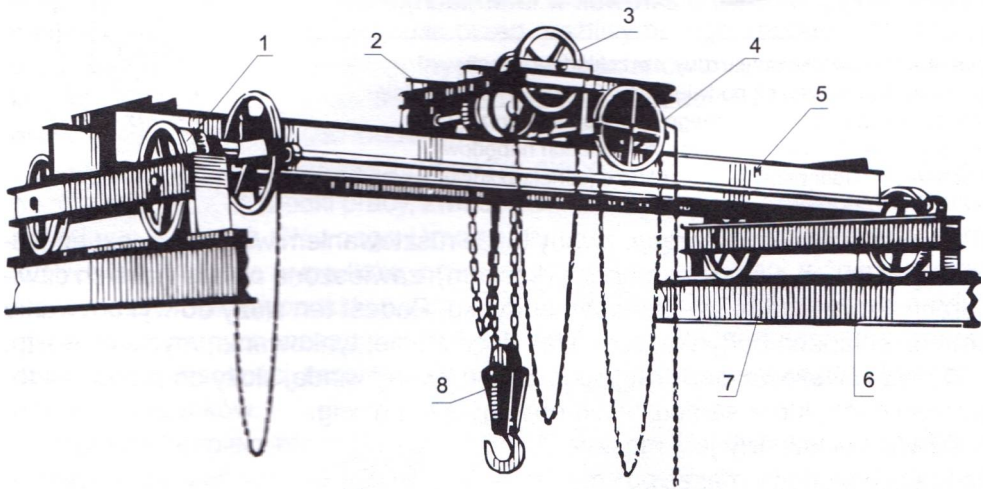


śniki taśmowe do przemieszczania towarów oraz schody ruchome do przemieszczania osób.

**Dźwignice** są grupą urządzeń służących do pionowego i poziomego przemieszczania ładunku lub osób na niewielką odległość w ruchu przerywanym. Przemieszczanie ładunku za pomocą dźwignic odbywa się z przerwami niezbędnymi do wykonywania czynności manipulacyjnych, polegających na zamocowaniu, przeniesieniu i odczepieniu ładunku. Dźwignice są maszynami roboczymi stanowiącymi środki transportu zakładowego o ograniczonym zasięgu.

Wśród dźwignic rozróżnia się: suwnice, wciągniki, żurawie, podesty ruchome, dźwigi towarowo-osobowe, dźwigi budowlane, wyciągi budowlane i wózki jezdniowe podnośnikowe.

**Suwnica** (rys. 4.42) ma ustrój nośny poruszający się po dwóch torach. Służy ona do przewożenia ładunków w obszarze ograniczonym długością tych torów oraz odległością między nimi.



Rys. 4.42. Suwnica pomostowa ręczna dwubelkowa

1 – mechanizm jazdy, 2 – wózek suwnicowy poruszający się po moście, 3 – mechanizm podnoszenia, 4 – mechanizm jazdy wózka, 5 – dwubelkowy most suwnicy, 6 – podpora suwnicy, 7 – tor podsuwnicowy, 8 – zblozce

**Wciągnik (ciągłnik)** jest przystosowany do pionowego podnoszenia ładunku za pomocą liny lub łańcucha z wykorzystaniem odpowiedniego elementu chwytneho, zazwyczaj haka. Wciągnik (rys. 4.43) może wykonywać ruch podnoszenia do góry lub opuszczania w dół. Konstrukcyjnie wciągniki zazwyczaj są przystosowane do jazdy po nieruchomym torze jezdnym. Pozwala to na podniesienie ładunku, przejechanie wzdłuż toru i złożenie ładunku w innym miejscu.

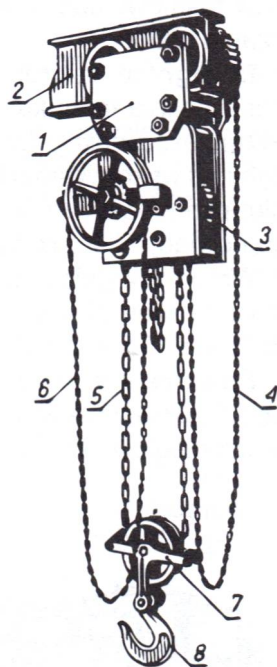
**Żuraw stacyjny** składa się z zamontowanego na stałe do podłoża słupa, na którym osadzono wysięgnik wykonujący ruch obrotowy. Po obrotowym wysięgniku przemieszcza się wciągnik, będący podzespołem podnoszącym ładunek.

**Żuraw samojezdny**, potocznie zwany dźwigiem samochodowym, służy do przemieszczania ładunku, jest zamontowany na podwoziu samojezdnym oraz ma wysięgnik, który może wykonywać ruch obrotowy i ruch opuszczania oraz podnoszenia.

**Żuraw przenośny** (zwany potocznie HDS-em) jest zamontowany na samochodzie ciężarowym między kabiną kierowcy a skrzynią ładunkową albo z tyłu pojazdu. Służy on do załadunku towaru na samochód oraz jego wyładunku.

**Podest ruchomy**, potocznie zwany zwyżką, jest maszyną służącą do podnoszenia ludzi w specjalnie skonstruowanym koszu, umieszczonym na końcu wysięgnika lub elementu składanego, w celu wykonania prac na wysokości (np. wymiany żarówek w latarniach).

**Rys. 4.43.** Wciągnik przejezdny z przekładnią zębatą 1 – czterokołowy wózek podwieszony, 2 – tor, 3 – przekładnia zębata, 4 – łańcuch do ręcznego napędu mechanizmu podnoszenia, 5 – łańcuch nośny, 6 – łańcuch napędowy mechanizmu podnoszenia, 7 – zblozce jednokrążkowe, 8 – hak



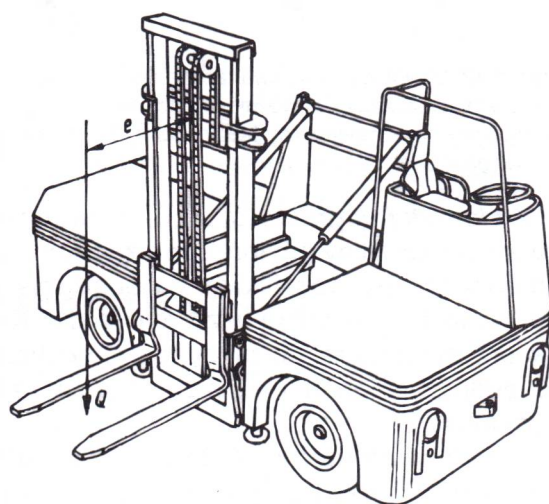
**Podest ruchomy wiszący**, zwany także rusztowaniem wiszącym, jest opuszczaną na linach platformą roboczą (koszem), zawieszoną na specjalnych dźwigarach, które układa się na dachu budynku. Podest ten służy do wykonywania prac na ścianach budynku, takich jak docieplanie, tynkowanie, mycie okien itp.

**Dźwig towarowo-osobowy**, popularnie zwany windą, służy do przewozu towarów i osób, które samodzielnie obsługują ten dźwig.

**Dźwig budowlany** jest maszyną mającą pionowy maszt, po którym przemieszcza się platforma służąca do transportu materiałów budowlanych na wyższe kondygnacje budowanego obiektu.

**Wyciąg budowlany** to platforma przesuwana po maszcie o konstrukcji przypominającej drabinę, mocowanym do przewoźnego podwozia i opuszczanym w sposób pochyły na dach (strop) budynku. Na platformie tej transportuje się materiały budowlane (np. cegłę, dachówkę) na wyższe poziomy.

**Wózek jezdniowy podnośnikowy** (rys. 4.44), zwyczajowo na-



**Rys. 4.44.** Wózek jezdniowy podnośnikowy (widłowy) boczny

zywany **wózkiem widłowym**, to kołowy pojazd mechaniczny o napędzie silnikowym, przystosowany do przewozu materiałów o znacznej (do kilkudziesięciu ton, zależnie od typu) masie, stosowany w transporcie bliskim i magazynowaniu. Używany jest głównie do prac rozładunkowych w magazynach, portach i fabrykach. Materiały przeznaczone do transportu za pomocą wózka widłowego najczęściej umieszcza się na drewnianych paletach.

## 4.11. Przepisy bhp podczas obsługi maszyn

Współczesna technika dostarcza człowiekowi coraz bardziej skomplikowanych i doskonalszych narzędzi, wymagających od niego coraz wyższych umiejętności. W ramach postępu technicznego wprowadza się w przemyśle nowe rodzaje maszyn i urządzeń, które zmieniają warunki pracy człowieka. Na tym tle wyłania się zagadnienie zharmonizowania człowieka z pracą w zakresie racjonalnej ochrony jego życia i zdrowia przed możliwymi zagrożeniami. Pojawia się więc konieczność poznania ogólnych zasad kształtowania właściwych warunków pracy. Zasady te omawia się podczas nauki przedmiotu „Bezpieczeństwo pracy w warsztacie samochodowym”.

Jednym z głównych źródeł czynników niebezpiecznych, powodujących wypadki przy pracy, są środki pracy, zwłaszcza maszyny i inne urządzenia techniczne. Według danych Głównego Urzędu Statystycznego wśród czynności, przy których dochodzi do wypadków, prace związane z maszynami różnego rodzaju stanowią aż 40%. Wypadki te najczęściej mają miejsce podczas obsługi produkcyjnej stacjonarnych maszyn i urządzeń, użytkowania sprzętu przeznaczonego do pracy na wysokości, maszyn i urządzeń mobilnych oraz wyposażenia do podnoszenia ładunków.

Poprawa bezpieczeństwa i higieny pracy związanej z użytkowaniem maszyn i innych urządzeń technicznych stała się w Polsce jednym z priorytetów w dziedzinie ochrony zdrowia i życia ludzkiego podczas pracy.

Aby zapewnić zakładowi utrzymanie produkcji, niezbędne jest dostosowywanie maszyn i urządzeń do nowych wymagań bezpieczeństwa, narzucanych w unijnych dyrektywach bezpieczeństwa i wynikających z nich normach bezpieczeństwa. Podstawą wszelkich działań umożliwiających zapewnienie bezpieczeństwa w każdym zakładzie pracy powinna być ocena bezpieczeństwa maszyn i urządzeń własnego parku maszynowego. Koniecznie trzeba w tym uwzględnić obowiązujące przepisy bezpieczeństwa maszyn i urządzeń. Kolejnym krokiem jest podjęcie działań na rzecz dostosowania posiadanego parku maszynowego do wymagań określonych w normach bezpieczeństwa maszyn i urządzeń. Skutecznym rozwiązaniem problemu na ogół jest modernizacja, polegająca na dodatkowym wyposażeniu maszyn w obudowy i systemy zabezpieczeń, spełniające wymagania określone w nowych dyrektywach bezpieczeństwa. Działania te zapewnią bezpieczeństwo maszyn i sprawią, że posiadany park maszynowy będzie w pełni sprawny.

Poniżej podano podstawowe zasady bezpieczeństwa i higieny pracy obowiązujące podczas obsługi maszyn i urządzeń technicznych.

### **Warunki dopuszczenia pracownika do pracy:**

- ukończenie 18 lat (pracownik niepełnoletni w ramach praktycznej nauki zawodu może być dopuszczony do pracy tylko pod nadzorem instruktora);
- ukończenie co najmniej szkoły zawodowej w danej specjalności lub posiadanie innych uprawnień do wykonywania zawodu;
- przejście odpowiedniego instruktażu zawodowego, zapoznanie się z instrukcją obsługi, przeszkolenie z zakresu bhp i ppoż.;
- posiadanie stanu zdrowia odpowiedniego do wykonywanej pracy, potwierdzonego świadectwem wydanym przez uprawnionego lekarza;
- posiadanie ubioru roboczego przewidzianego dla danego stanowiska pracy w zakładowej tabeli norm odzieży roboczej.

Uwaga: przy obsłudze maszyn zawierających ruchome elementy nie wolno pracować w odzieży z luźnymi (zwisającymi) częściami jak np. luźno zakończony rękawy, krawaty, szaliki, poły, oraz bez nakryć głowy okrywających włosy.

### **Czynności przed rozpoczęciem pracy:**

- przygotować urządzenia pomocnicze do składowania materiałów, przyrządów, narzędzi i odpadów;
- dokładnie zapoznać się z dokumentacją wykonawczą i instrukcją obsługi urządzeń;
- zaplanować kolejność wykonywania poszczególnych czynności;
- przygotować materiał do przetworzenia (obróbki), ustawiając go w sposób zapewniający maksymalne bezpieczeństwo w obrębie stanowiska roboczego;
- sprawdzić stan techniczny urządzeń mechanicznych i oświetlenia stanowiska, a zwłaszcza stan instalacji elektrycznej; uwaga: przed uruchomieniem urządzenia pracownik powinien dokładnie sprawdzić, czy jego uruchomienie nie grozi wypadkiem;
- próbnie uruchomić zmechanizowane urządzenia i sprawdzić jakość ich działania;
- przygotować niezbędne pomoce warsztatowe, przyrządy pomiarowe, narzędzia pracy oraz niezbędne środki ochrony osobistej, np. okulary, maski, ochronniki słuchu itp.;
- wszelkie zauważone usterki i nieprawidłowości zgłosić natychmiast przełożonemu.

### **Podstawowe zasady bezpiecznego wykonywania pracy**

#### ***Pracownikowi nie wolno:***

- przechowywać na stanowisku pracy materiałów i odpadów w ilościach większych niż wynikające z potrzeb technologicznych, umożliwiających utrzymanie ciągłości pracy na danej zmianie;
- naprawiać, czyścić ani smarować maszyn będących w ruchu (z wyjątkiem smarowania za pomocą specjalnych urządzeń, określonych w dokumentacji techniczno-ruchowej);

- pozostawiać bez obsługi lub nadzoru maszyn będących w ruchu (chyba że dopuszczono taką możliwość w dokumentacji techniczno-ruchowej);
- wznawiać pracy maszyny lub urządzenia bez usunięcia wykrytego wcześniej uszkodzenia;
- zdejmować osłon i zabezpieczeń z obsługiwanych maszyn i narzędzi;
- używać maszyny bez wymaganego urządzenia ochronnego (zerowania);
- obsługiwać urządzeń specjalistycznych, np. dźwignicowych, bez odpowiednich uprawnień i przeszkolenia;
- posługiwać się uszkodzonymi narzędziami z napędem elektrycznym lub pneumatycznym;
- dotykać dłonią przedmiotu obrabianego podczas ruchu obrabiarki mechanicznej;
- usuwać wiórów ani ścinków materiału z obrabiarek i urządzeń będących w ruchu;
- używać szafki narzędziowej do składania wyrobów;
- przedłużać klucza innym kluczem albo rurą;
- ręcznie przemieszczać ani przewozić ciężarów o masie przekraczającej wartości dopuszczalne.

#### **Pracownik ma obowiązek:**

- używać środków ochrony osobistej wymaganych na danym stanowisku pracy;
- sukcesywnie usuwać odpady powstające w toku produkcji;
- utrzymywać porządek w miejscu pracy oraz nie rozrzucać narzędzi ani przedmiotów przeznaczonych do obróbki albo już obrobionych;
- utrzymywać posadzkę w stanie czystym i suchym;
- stosować odpowiednie podstawki przy obróbce materiałów o znacznej długości;
- wykonywać czynności dokładnie oraz w sposób bezpieczny dla siebie i otoczenia;
- zachowywać prawidłową pozycję ciała podczas wykonywania pracy;
- używać tylko sprawnych narzędzi i pomocy warsztatowych;
- mocować przedmiot obrabiany dokładnie i na tyle mocno, aby nie uległ uszkodzeniu;
- przed wykonaniem pracy na wiertarce, szlifierce lub innym urządzeniu mechanicznym zapoznać się z instrukcją obsługi tego urządzenia;
- używać odpowiednich urządzeń pomocniczych do przemieszczania ciężkich przedmiotów.

#### **Czynności po zakończeniu pracy:**

- wyłączyć maszynę lub urządzenie;
- ułożyć obrabiane i gotowe elementy na wyznaczonych miejscach;
- uporządkować stanowisko pracy oraz narzędzia i sprzęt ochronny.

#### **Zasady postępowania w sytuacjach awaryjnych:**

- o wykryciu wady lub uszkodzenia maszyny pracownik powinien niezwłocznie powiadomić przełożonego;

- maszyny, których uszkodzenie wykryto podczas pracy, należy niezwłocznie zatrzymać i odłączyć od zasilania energią;
- w razie zaistnienia wypadku przy pracy obowiązkowo trzeba udzielić pierwszej pomocy poszkodowanym;
- w przypadku awarii maszyny stwarzającej zagrożenie dla otoczenia należy wyraźnie ją oznakować, wykorzystując tablice ostrzegawcze oraz inne elementy sygnalizacyjne – widoczne z dostatecznej odległości;
- każdy wypadek przy pracy obowiązkowo należy niezwłocznie zgłosić przełożonemu, a stanowisko pracy pozostawić w stanie odpowiadającym wystąpieniu wypadku.

#### **Uwagi dodatkowe:**

- wykonywanie prac niebezpiecznych, na wysokości, w zbiornikach lub dużych zagłębieniach terenu może odbywać się tylko zgodnie z zasadami określonymi w odpowiednich instrukcjach;
- narzędzia i urządzenia o napędzie mechanicznym podlegają okresowym przeglądom oraz badaniom na skuteczność zerowania;
- pracownik ma prawo powstrzymać się od wykonywania pracy, zawiadamiając o tym niezwłocznie przełożonego, gdy warunki pracy nie odpowiadają wymaganiom przepisów bhp i stwarzają bezpośrednie zagrożenie dla zdrowia lub życia pracownika albo gdy kontynuowanie przez niego pracy zagraża bezpieczeństwu innych osób.

## **4.12. Pytania i ćwiczenia kontrolne**

1. Podaj klasyfikację i ogólną charakterystykę maszyn.
2. Jakie znasz rodzaje energii?
3. Zdefiniuj odnawialne źródła energii i podaj ich rodzaje.
4. Co to są ogniwa paliwowe?
5. Jakie znasz rodzaje biopaliw?
6. Podaj podstawowe parametry cieczy.
7. Sklasyfikuj maszyny hydrauliczne.
8. Co to są silniki wodne i gdzie się je stosuje?
9. Podaj definicję i rodzaje pomp.
10. Jakie napędy nazywamy hydrostatycznymi, a jakie hydrokinetycznymi?
11. Opisz zalety i wady napędów hydraulicznych.
12. Podaj przykłady wykorzystania pomp i napędów hydraulicznych w pojazdach samochodowych.
13. Wymień podstawowe właściwości gazów.
14. Podaj pierwszą zasadę termodynamiki.
15. Jaki gaz nazywamy gazem doskonałym?
16. Jakie znasz charakterystyczne przemiany gazów doskonałych?
17. Podaj drugą zasadę termodynamiki.

18. Co to jest wymiana ciepła?
19. Wymień sposoby przekazywania ciepła.
20. Na jakiej zasadzie działa turbina parowa?
21. Jakie znasz rodzaje silników spalinowych?
22. Podaj podstawowe wielkości charakteryzujące silniki spalinowe.
23. Opisz budowę tłokowego silnika spalinowego.
24. Sklasyfikuj tłokowe silniki spalinowe.
25. Wymień najważniejsze rodzaje silników odrzutowych.
26. Jakie są rodzaje silników raketowych?
27. Scharakteryzuj podstawowe parametry silników raketowych.
28. Na jakiej zasadzie działają reaktory jądrowe?
29. Gdzie wykorzystuje się sprężarki?
30. Czym różnią się sprężarki waporowe od przepływowych?
31. Jakie podstawowe grupy elementów występują w pneumatycznym układzie napędu i sterowania?
32. Podaj zalety i wady napędów pneumatycznych.
33. Gdzie wykorzystuje się napędy pneumatyczne?
34. Jakie znasz urządzenia chłodnicze?
35. Na czym polega różnica między transportem bliskim i dalekim?
36. Podaj przykłady środków transportu lądowego, wodnego, lotniczego i specjalnego.
37. Scharakteryzuj podstawowe rodzaje środków transportu wewnętrznego.

---

# Literatura

- [1] Gabryelewicz M.: *Podwozia i nadwozia pojazdów samochodowych. Cz. 1.* Warszawa, WKŁ 2011.
- [2] Gabryelewicz M.: *Podwozia i nadwozia pojazdów samochodowych. Cz. 2.* Warszawa, WKŁ 2011.
- [3] Godlewski M., Tym Z.: *Poradnik dla mechaników.* Warszawa, WSiP 1991.
- [4] Górecki A.: *Technologia ogólna, podstawy technologii mechanicznych.* Warszawa, WSiP 2009.
- [5] Górecki A., Grzegórski Z.: *Montaż, naprawa i eksploatacja maszyn i urządzeń przemysłowych.* Warszawa, WSiP 1986.
- [6] Gundlach W. R.: *Podstawy maszyn przepływowych i ich systemów energetycznych.* Warszawa, WNT 2008.
- [7] Katalog Polskich Norm ([www.pkn.pl](http://www.pkn.pl))
- [8] Korewa W.: *Części maszyn.* Warszawa, PWN 1974.
- [9] Kozak B.: *Części maszyn z elementami mechaniki technicznej.* Warszawa, WSiP 2000.
- [10] Kurmaz L., Kurmaz O.: *Projektowanie węzłów i części maszyn.* Kielce, Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej 2004.
- [11] Lewandowski T.: *Rysunek techniczny dla mechaników.* Warszawa, WSiP 2009.
- [12] Lubośny Z.: *Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym.* Warszawa, WNT 2009.
- [13] Mały poradnik mechanika. T. I/II. Warszawa, WNT 1988.
- [14] Marecki J.: *Podstawy przemian energetycznych.* Warszawa, WNT 2007.
- [15] Mistur L.: *Spawanie gazowe w pytaniach i odpowiedziach.* Warszawa, WNT 1989.
- [16] Okoniewski S.: *Technologia maszyn.* Warszawa, WSiP 1996.
- [17] Okraszewski K.: *Ćwiczenia konstrukcyjne.* Warszawa, WSiP 1991.
- [18] Orzełowski S.: *Budowa podwozi i nadwozi samochodowych.* Warszawa, WSiP 1998.
- [19] *Poradnik inżyniera samochodowego. Elementy i materiały.* Warszawa, WKŁ 1990.
- [20] *Poradnik mechanika.* Warszawa, REA 2009.
- [21] *Poradnik techniki samochodowej.* Warszawa, REA 2010.
- [22] Potyński A.: *Podstawy technologii i konstrukcji mechanicznych.* Warszawa, WSiP 1988.
- [23] Rutkowski A.: *Części maszyn.* Warszawa, WSiP 1994.
- [24] Rutkowski A., Stępniewska A.: *Zbiór zadań z części maszyn.* Warszawa, WSiP 1996.
- [25] *Samochody od A do Z.* Warszawa, WKŁ 1978.
- [26] Solis H., Lenart T.: *Technologia i eksploatacja maszyn.* Warszawa, WSiP 1982.
- [27] Stępniewski D.: *Bezpieczeństwo pracy w warsztacie samochodowym.* Warszawa, WKŁ 2010.
- [28] Tomczyk J.: *Modele dynamiczne elementów i układów napędów hydrostatycznych.* Warszawa, WNT 1999.
- [29] Tytko R.: *Odnawialne źródła energii.* Bydgoszcz, Oficyna Wydawnicza Branta 2010.
- [30] Zając P.: *Silniki pojazdów samochodowych. Cz. 1.* Warszawa, WKŁ 2009.
- [31] Zając P.: *Silniki pojazdów samochodowych. Cz. 2.* Warszawa, WKŁ 2010.
- [32] Zogbaum E. A.: *Poradnik mechanika samochodowego.* Warszawa, WKŁ 2011.



Podręcznik **Podstawy konstrukcji maszyn**, przeznaczony do kształcenia w zawodzie technik pojazdów samochodowych i dopuszczony do użytku szkolnego na poziomie technikum oraz szkoły policealnej, opracowano zgodnie z obowiązującą podstawą programową.

Przedstawiono w nim najważniejsze zagadnienia z zakresu rysunku technicznego, pomiarów warsztatowych, tolerancji i pasowań oraz mechaniki technicznej, jak również podstawy wytrzymałości materiałów z uwzględnieniem różnych stanów obciążeń, rodzajów naprężeń oraz różnorodnych obliczeń wytrzymałościowych. Omówiono też właściwości i przykłady zastosowania różnych rodzajów materiałów konstrukcyjnych, najistotniejsze wiadomości z zakresu technik wytwarzania stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym, najważniejsze informacje dotyczące części maszyn i zasad obliczania ich wytrzymałości oraz podstawy maszynoznawstwa. Materiał nauczania przejrzysto zilustrowano w celu ułatwienia zrozumienia treści nauczania oraz podano praktyczne przykłady obliczeń wytrzymałościowych różnych części maszyn. Na końcu każdego rozdziału zamieszczono pytania i ćwiczenia kontrolne, umożliwiające uczniowi samoocenę w zakresie opanowania materiału.

Podręcznik będzie przydatny również osobom zdobywającym kwalifikacje zawodowe w ramach kształcenia pozaszkolnego oraz zajmującym się działalnością praktyczną w zakresie techniki samochodowej.

**W części drugiej** opisano:

- materiały konstrukcyjne (metalowe i niemetalowe),
- obróbkę cieplną i cieplno-chemiczną,
- techniki wytwarzania stosowane w przemyśle samochodowym,
- części maszyn i zasady obliczania ich wytrzymałości,
- podstawy maszynoznawstwa.

**Wydawnictwa  
Komunikacji  
i Łączności**  
[www.wkl.com.pl](http://www.wkl.com.pl)

