

Podręcznik do kształcenia w zawodach  
mechanik pojazdów samochodowych  
technik pojazdów samochodowych



**Piotr Zając**

# **Silniki pojazdów samochodowych**

**Budowa, obsługa, diagnostyka i naprawa**

**Kwalifikacja MG.18**

Wydawnictwa Komunikacji i Łączności  
Warszawa

Projekt okładki i wnętrza: *Dariusz Litwiniec*  
Redaktor merytoryczny: *Zbigniew Otczyński*  
Opracowanie językowe: *mgr Barbara Głuch*  
Redakcja techniczna: *Zespół*  
Korekta: *Zespół*

Podręcznik dopuszczony do użytku szkolnego przez ministra właściwego do spraw oświaty i wychowania oraz wpisany do wykazu podręczników przeznaczonych do kształcenia w zawodach na podstawie opinii rzeczoznawców: *dr hab. Elżbiety Kur, mgra inż. Igora Lange, mgra inż. Marka Rudzińskiego*

Typy szkół: **branżowa szkoła I stopnia i technikum.**  
Zawody: **mechanik pojazdów samochodowych i technik pojazdów samochodowych.**  
Kwalifikacja: **MG.18. Diagnostowanie i naprawa podzespołów i zespołów pojazdów samochodowych.**

Rok dopuszczenia: **2018.**

621.432:629.02(075)

Podręcznik poświęcony podstawom budowy, obsługi, diagnostowania i naprawy silników spalinowych pojazdów samochodowych. Opisano zagadnienia teoretyczne, dotyczące pracy silnika oraz jego podstawowe parametry konstrukcyjne i eksploatacyjne. Przedstawiono budowę i działanie oraz zasady eksploatacji, obsługi i naprawy głównych zespołów i układów mechanicznych, czyli kadłubów i głowic, układów: korbowych, rozrządu, zasilania, chłodzenia, smarowania, dolotowych i wylotowych silników spalinowych. Materiał nauczania bogato zilustrowano przykładami, uwzględniając najnowsze rozwiązania konstrukcyjne silników. Na końcu każdego rozdziału zamieszczono pytania kontrolne i testy sprawdzające, umożliwiające uczniowi sprawdzenie stopnia opanowania podanych wiadomości.

Odbiorcy: uczniowie kształcący się w zawodach technik pojazdów samochodowych i mechanik pojazdów samochodowych oraz uczestnicy kursów zawodowych w zakresie kwalifikacji MG 18. *Diagnostowanie i naprawa podzespołów i zespołów pojazdów samochodowych.*

ISBN 978-83-206-1995-9

© Copyright by Wydawnictwa Komunikacji i Łączności spółka z o.o., Warszawa 2018

*Podręcznik szkolny dotowany przez Ministra Edukacji Narodowej.*

Znaki handlowe oraz nazwy firm i produktów zaprezentowane lub wymienione w książce należą do ich właścicieli i zostały użyte tylko w celach informacyjnych lub ilustracyjnych.

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

Wydanie 1. Warszawa 2018

Objętość 37 ark. wyd. Nakład 1400 egz.

<b>1</b>	<b>Podstawowe wiadomości o silnikach spalinowych</b>	7
1.1	Historia silników pojazdów samochodowych	7
1.2	Klasyfikacja tłokowych silników spalinowych	8
1.3	Układ konstrukcyjny silnika tłokowego	11
1.4	Parametry konstrukcyjne silnika tłokowego	12
1.5	Zasada działania silnika czterosuwowego i dwusuwowego	15
1.6	Obiegi teoretyczne i rzeczywiste silników spalinowych	19
1.7	Wymiana ładunku w cylindrze	24
1.7.1	Fazy rozrządu silnika czterosuwowego	24
1.7.2	Proces napełniania cylindra	26
1.7.3	Doładowanie silników	29
1.7.4	Proces wylotu spalin	31
1.8	Sprawdzenie wiadomości	31
<b>2</b>	<b>Proces spalania w silnikach</b>	35
2.1	Paliwa silnikowe	35
2.1.1	Benzyny silnikowe	35
2.1.2	Oleje napędowe	37
2.1.3	Paliwa alternatywne	39
2.2	Teoria spalania	46
2.3	Proces spalania w silnikach ZI	49
2.3.1	Przebieg spalania w silnikach ZI	49
2.3.2	Spalanie stukowe i zapłon żarowy	53
2.3.3	Komory spalania silników ZI	55
2.4	Proces spalania w silnikach ZS	58
2.4.1	Przebieg spalania w silnikach ZS	58
2.4.2	Komory spalania silników ZS	62
2.5	Spaliny silnika	66
2.6	Sprawdzenie wiadomości	70
<b>3</b>	<b>Parametry pracy i charakterystyki silników</b>	74
3.1	Parametry pracy silnika	74
3.2	Charakterystyki silników	82
3.3	Sprawdzenie wiadomości	88
<b>4</b>	<b>Kadłuby i głowice</b>	92
4.1	Wiadomości wstępne	92
4.2	Materiały i konstrukcja kadłubów	93

4.2.1	Cylindry silników chłodzonych cieczą .....	96
4.2.2	Cylindry silników chłodzonych powietrzem .....	98
4.3	Weryfikacja i naprawa kadłubów .....	102
4.3.1	Ocena szczelności przestrzeni roboczej cylindra .....	102
4.3.2	Pomiar zużycia gładzi cylindrów .....	109
4.3.3	Naprawa kadłubów .....	112
4.4	Konstrukcja głowic .....	116
4.5	Uszczelnianie połączenia kadłuba z głowicą .....	120
4.6	Weryfikacja i naprawa głowic .....	121
4.7	Sprawdzenie wiadomości .....	130
<b>5</b>	<b>Układ korbowy .....</b>	<b>133</b>
5.1	Budowa układu korbowego .....	133
5.2	Siły działające w układzie korbowym .....	136
5.3	Podstawy wyrównowazenia silników tłokowych .....	138
5.4	Konstrukcja układu korbowego .....	140
5.4.1	Tłoki .....	140
5.4.2	Pierścienie tłokowe .....	146
5.4.3	Sworznie tłokowe .....	149
5.4.4	Korbowody .....	150
5.4.5	Wał korbowy .....	154
5.4.6	Łożyska główne i korbowe .....	159
5.4.7	Koła zamachowe .....	161
5.4.8	Tłumiki drgań skrętnych .....	165
5.5	Weryfikacja i naprawa elementów układu korbowego .....	167
5.5.1	Weryfikacja i naprawa zespołu tłok-korbowód .....	168
5.5.2	Weryfikacja i naprawa wału korbowego .....	175
5.6	Sprawdzenie wiadomości .....	180
<b>6</b>	<b>Układ rozrządu .....</b>	<b>183</b>
6.1	Budowa układu rozrządu .....	183
6.2	Konstrukcja, weryfikacja i naprawa elementów układu rozrządu .....	187
6.2.1	Zawory .....	187
6.2.2	Sprężyny zaworów .....	192
6.2.3	Elementy mechanizmu napędu zaworów .....	195
6.2.4	Popychacze hydrauliczne .....	197
6.2.5	Wałki rozrządu .....	202
6.2.6	Napęd wałka rozrządu .....	205
6.3	Regulacja luzu zaworów .....	211
6.4	Zmienne fazy rozrządu i zmienne wzniosy zaworów .....	215
6.5	Sprawdzenie wiadomości .....	223
<b>7</b>	<b>Układy zasilania silników o zapłonie iskrowym .....</b>	<b>226</b>
7.1	Wiadomości wstępne .....	226
7.2	Gaźnikowy układ zasilania .....	226
7.3	Wtryskowy układ zasilania .....	229

7.3.1	Wiadomości ogólne .....	229
7.3.2	Pośredni wielopunktowy wtrysk benzyny sterowany mechanicznie i mechaniczno-elektronicznie .....	232
7.3.3	Pośredni wielopunktowy wtrysk benzyny sterowany elektronicznie .....	236
7.3.4	Pośredni jednopunktowy wtrysk benzyny sterowany elektronicznie .....	254
7.3.5	Bezpośredni wtrysk benzyny sterowany elektronicznie .....	258
7.3.6	Elektroniczny system sterowania pracą silnika .....	267
7.4	Układ zasilania gazem LPG .....	270
7.4.1	Wiadomości ogólne .....	270
7.4.2	Układ zasilania IV generacji pośredniego wtrysku LPG w fazie gazowej .....	273
7.4.3	Układ zasilania V generacji pośredniego wtrysku LPG w fazie ciekłej .....	278
7.4.4	Układ zasilania VI generacji bezpośredniego wtrysku LPG w fazie ciekłej .....	281
7.4.5	Obsługa instalacji gazowych LPG .....	282
7.5	Analiza spalin .....	284
7.6	Sprawdzenie wiadomości .....	287
<b>8</b>	<b>Układy zasilania silników o zapłonie samoczynnym .....</b>	<b>290</b>
8.1	Wprowadzenie .....	290
8.2	Układy zasilania z pompami wtryskowymi .....	292
8.2.1	Układ zasilania z rzędową pompą wtryskową .....	292
8.2.2	Układ zasilania z rozdzielaczową pompą wtryskową .....	300
8.2.3	Diagnostyka pomp wtryskowych .....	313
8.2.4	Wtryskiwacze paliwa .....	318
8.3	Układy wtryskowe z pompowtryskiwaczami .....	326
8.4	Układy wtryskowe z indywidualnymi zespołami wtryskowymi .....	335
8.5	Zasobnikowy układ wtryskowy Common Rail .....	336
8.5.1	Wiadomości wstępne .....	336
8.5.2	Obwód paliwa niskiego ciśnienia .....	338
8.5.3	Obwód paliwa wysokiego ciśnienia .....	340
8.5.4	Diagnostyka układu wtryskowego Common Rail .....	355
8.6	Elektroniczne układy sterowania silnika o zapłonie samoczynnym .....	359
8.7	Świece żarowe .....	361
8.8	Filtry paliwa .....	365
8.9	Ocena stanu technicznego silnika o zapłonie samoczynnym na podstawie zadymienia spalin .....	367
8.10	Sprawdzenie wiadomości .....	371
<b>9</b>	<b>Układ chłodzenia .....</b>	<b>374</b>
9.1	Wiadomości wstępne .....	374
9.2	Pośredni układ chłodzenia .....	375
9.2.1	Pompa cieczy chłodzącej .....	382
9.2.2	Termostat .....	387
9.2.3	Chłodnica cieczy chłodzącej .....	392
9.2.4	Wentylator .....	396
9.2.5	Zbiornik wyrównawczy .....	402
9.2.6	Ciecze chłodzące .....	403

9.2.7	Obsługa pośredniego układu chłodzenia .....	405
9.3	Bezpośredni układ chłodzenia .....	408
9.4	Sprawdzenie wiadomości .....	411
<b>10</b>	<b>Układ smarowania .....</b>	<b>414</b>
10.1	Wiadomości wstępne .....	414
10.2	Obiegowo-ciśnieniowy układ smarowania .....	416
10.2.1	Pompa oleju .....	420
10.2.2	Filtr oleju .....	428
10.2.3	Oleje silnikowe .....	434
10.3	Obsługa układu smarowania .....	440
10.4	Sprawdzenie wiadomości .....	449
<b>11</b>	<b>Układy dolotowe i wylotowe .....</b>	<b>451</b>
11.1	Wiadomości wstępne .....	451
11.2	Układ dolotowy .....	451
11.3	Układ doładowania .....	453
11.3.1	Doładowanie mechaniczne .....	453
11.3.2	Turbodoładowanie .....	460
11.3.3	Doładowanie mieszane .....	475
11.3.4	Doładowanie dynamiczne .....	478
11.4	Układ wylotowy .....	483
11.5	Układ oczyszczania spalin .....	488
11.5.1	Układ oczyszczania spalin silnika o zapłonie iskrowym .....	488
11.5.2	Układ oczyszczania spalin silnika o zapłonie samoczynnym .....	498
11.6	Układ recyrkulacji spalin .....	506
11.7	Sprawdzenie wiadomości .....	508
<b>12</b>	<b>Napędy alternatywne pojazdów samochodowych .....</b>	<b>511</b>
12.1	Wiadomości wstępne .....	511
12.2	Napęd elektryczny pojazdów samochodowych .....	511
12.2.1	Napęd elektryczny wykorzystujący baterię akumulatorów .....	512
12.2.2	Napęd elektryczny z ogniwami paliwowymi .....	513
12.2.3	Hybrydowy napęd spalinowo-elektryczny .....	516
12.3	Napęd silnikiem zasilanym paliwem CNG .....	528
12.4	Napęd silnikiem spalinowym o tłoku obrotowym .....	533
12.5	Napęd turbinowy .....	538
12.6	Sprawdzenie wiadomości .....	541
	<b>Rozwiązania testów sprawdzających .....</b>	<b>543</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>544</b>

# Podstawowe wiadomości o silnikach spalinowych

Motto: „Potrzeba jest matką wynalazków”

## W tym rozdziale dowiedzie się:

- jakie są sposoby klasyfikacji tłokowych silników spalinowych,
- z jakich głównych zespołów i układów składa się silnik tłokowy,
- jakie parametry konstrukcyjne charakteryzują silnik tłokowy,
- jak działa silnik czterosuwowy i dwusuwowy,
- co to są fazy rozrządu silnika,
- na czym polega doładowanie silnika i jakie są jego rodzaje.

## Historia silników pojazdów samochodowych

### 1.1

Od wynalezienia koła i zbudowania pojazdu kołowego próbowano zastosować różne źródła napędu do tego pojazdu. Początkowo wykorzystywano siłę mięśni ludzi i zwierząt oraz siły natury. W XVII i XVIII wieku poszukiwano mechanicznego źródła napędu pojazdów, z czasem nazwanego silnikiem. Do powstania silnika spalinowego przyczynił się m.in. nadworny uczoney króla Ludwika XIV – Christian Huygens, genialny fizyk i matematyk pochodzący z Holandii. Stworzył on podstawy teorii, które wiele lat później wykorzystał Nicolas Otto do opracowania silnika wewnętrznego spalania. W 1673 roku Huygens stworzył maszynę, która miała pompować wodę do ogrodów królewskich. Zapalał w jej cylindrze proch strzelniczy, a powstałe w wyniku eksplozji gazy przesuwają do góry umieszczony w nim tłok. System zadziałał tylko raz, gdyż potem nie było już w cylindrze prochu. Ale ten pierwszy ruch tłoka, który według zasad konstrukcji silnika należy nazwać suwem pracy, stanowił istotny krok w kierunku stworzenia silnika spalinowego.

W 1782 roku James Watt skutecznie wykorzystał parę wodną do napędzania tłoka w maszynie parowej, zapoczątkowując erę rewolucji przemysłowej. Silniki parowe, będące silnikami o spalaniu zewnętrznym, charakteryzowały się małą sprawnością i dużą masą, a ponadto wymagały wożenia wielkich kotłów parowych oraz niezbędnego zapasu paliwa (węгля lub drewna) i wody. Dlatego zainteresowania konstruktorów szybko zwróciły się w stronę koncepcji silnika cieplnego o spalaniu wewnętrznym, czyli silnika spalinowego zamieniającego ciepło powstałe ze spalania mieszanki paliwa i powietrza wewnątrz cylindra roboczego na pracę mechaniczną.

Druuga połowa XIX wieku przyniosła wiele prób konstruowania silników spalinowych przeznaczonych do napędu pojazdów. Po wielu latach prac, w 1877 roku niemiecki konstruktor Nicolas August Otto wspólnie z Eugenem Langenem uzyskał patent na pierwszy gazowy silnik czterosurowy. Otto w swojej konstrukcji zrealizował obieg cieplny ze spalaniem przy stałej objętości. Silnik Otta był zasilany gazem świetlnym i stanowi pierwowzór dzisiejszego czterosurowego silnika spalinowego o zapłonie iskrowym (ZI). W 1879 roku pojawiły się pierwsze silniki benzynowe, a w 1882 roku Gottlieb Daimler i Wilhelm Maybach utworzyli firmę produkującą małe silniki benzynowe. W rok później Daimler uzyskał patent na silnik szybkoobrotowy o niespotykanej wówczas prędkości obrotowej 900 obr/min. Zastosowano w nim zapłon od rurki żarowej i sterowany krzywkami rozrząd zaworowy. W 1885 roku Maybach skonstruował gaźnik pływakowy. W tym samym czasie Karl Benz otrzymał patent na pierwszy na świecie „automobil” i rozpoczął jazdy próbne tym trójkołowym pojazdem wyposażonym w silnik o pojemności skokowej 900 cm<sup>3</sup> i mocy 0,65 kW przy 400 obr/min. Małe moce budowanych silników jednocylindrowych były przyczyną stopniowego konstruowania silników wielocylindrowych. Pierwszy czterocylindrowy gaźnikowy silnik samochodowy zbudował w 1888 roku Ferdynand Forest. W ostatnich latach XIX wieku nastąpił znaczący postęp w konstrukcji silników o zapłonie iskrowym. Albert de Dion zbudował instalację wykorzystującą iskrę wysokiego napięcia wytwarzaną za pomocą cewki indukcyjnej i przerywacza niskiego napięcia. Instalacja ta była pierwowzorem współczesnego zapłonu akumulatorowego.

W 1892 roku Rudolf Diesel opatentował zasadę działania silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym (ZS), wykorzystującego wysokie ciśnienie sprężania. Pomysł swój Diesel zrealizował w 1897 roku, kiedy zbudował i uruchomił silnik, w którym czyste powietrze wypełniające cylinder było sprężone do takiego ciśnienia, że uzyskana pod koniec suwu temperatura powodowała samozapłon wtryskiwanego paliwa. W pierwszym silniku o zapłonie samoczynnym paliwem był pył węglowy, do rozpylenia którego wykorzystywano sprężarkę mechaniczną wytwarzającą ciśnienie ok. 6 MPa. W kolejnych wersjach silnika wysokoprężnego paliwem była ropa naftowa, a następnie olej napędowy. Przełomem w zasilaniu silników ZS było zastosowanie skonstruowanej przez Roberta Boscha w 1922 roku tłoczkowej pompy wtryskowej.

Od pierwszych modeli silników konstruktorom towarzyszyło dążenie do zwiększania ich mocy. Pierwszy patent dotyczący doładowania silnika spalinowego zgłosił w 1897 roku Francuz Paul Daniel, jednak pierwsze silniki doładowane zastosowano dopiero ponad 20 lat później.

Zasady działania silników czterosurowych o zapłonie iskrowym oraz o zapłonie samoczynnym, opracowane przez Nicolasa Otta i Rudolfa Diesla, nie uległy zmianie, mimo że od ich opatentowania minęło ponad 100 lat. Stałe doskonalenie konstrukcji poszczególnych układów silników oraz stosowanie coraz lepszych materiałów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych powoduje, że parametry określające efekty ich pracy są coraz korzystniejsze.

## 1.2 Klasyfikacja tłokowych silników spalinowych

Powszechnym źródłem mechanicznego napędu pojazdów samochodowych jest tłokowy silnik spalinowy. W silniku tym występuje *zamiana energii chemicznej zawartej w paliwie*



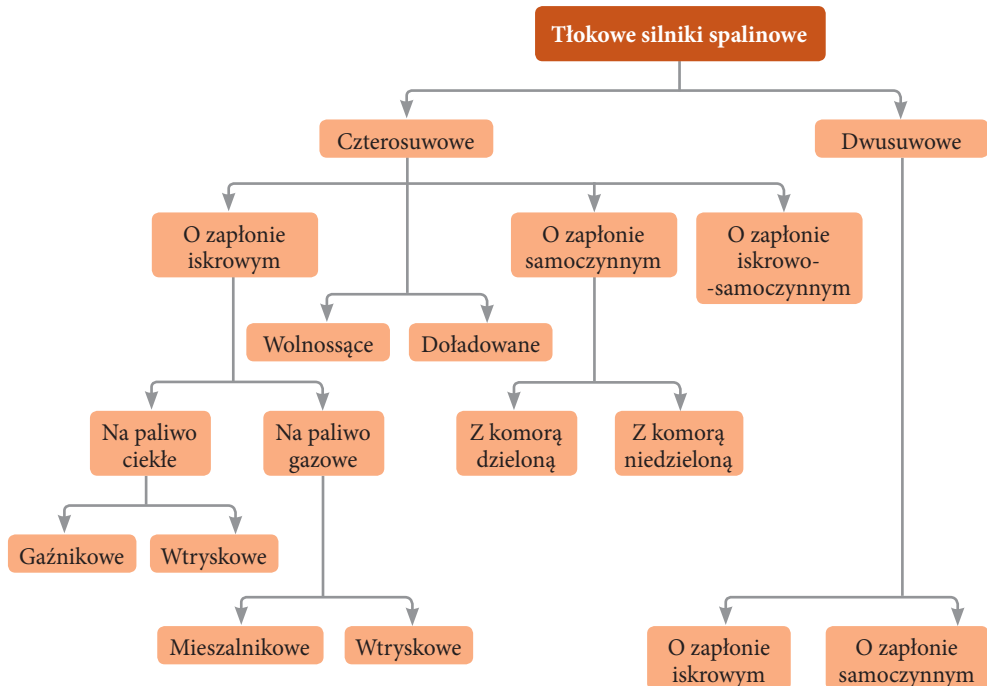
**na energię mechaniczną.** Czynnikiem roboczym w silniku spalinowym są spaliny powstające w wyniku spalania paliwa w cylindrze silnika. Uzyskana w ten sposób energia cieplna na skutek oddziaływania spalin na ruchomy tłok zostaje przetworzona na energię mechaniczną. Przemiana ciepła na energię mechaniczną zachodzi we wnętrzu cylindra – tam, gdzie paliwo uległo spaleni, stąd nazwa tych silników – silniki o spalaniu wewnętrznym.

Tłokowy silnik spalinowy nie jest idealnym źródłem napędu, lecz w porównaniu z innymi silnikami (parowe, elektryczne) nie ma wad uniemożliwiających zastosowanie go w pojazdach, a jego zalety są znaczne.

Do głównych zalet tłokowego silnika spalinowego zalicza się:

- względnie dużą sprawność ogólną w porównaniu z silnikami parowymi,
- łatwość uruchamiania silnika i krótki czas osiągnięcia stanu gotowości do pracy,
- krótki czas uzupełniania energii (paliwa),
- zasilanie paliwami o dużej zawartości energii w jednostce masy.

Podstawową wadą tłokowego silnika spalinowego jest niezgodność jego charakterystyki z wymaganiami trakcyjnymi samochodu. Niekorzystny przebieg charakterystyki momentu obrotowego, za duże wartości prędkości obrotowej oraz zbyt małe wartości momentu obrotowego wymuszają konieczność zastosowania dodatkowych urządzeń w układzie napędowym samochodu – np. skrzyni biegów. Do uruchomienia silnika tłokowego niezbędne jest doprowadzenie energii mechanicznej z zewnątrz w celu uzyskania minimalnej prędkości obrotowej rozruchu (konieczne zastosowanie rozrusznika). Spalinowe silniki tłokowe pracują stabilnie dopiero przy pewnej prędkości obrotowej, dlatego w czasie postoju przy pracującym silniku musi być zastosowane sprzęgło, które umożliwia płynne łączenie silnika



Rys. 1.1 Klasyfikacja tłokowych silników spalinowych

z układem napędowym samochodu i jego rozłączanie. Problemem wynikającym z masowego zastosowania silnika spalinowego jest również negatywny wpływ spalin na środowisko naturalne. Jednak mimo wielu wad tłokowe silniki spalinowe od ponad 100 lat są podstawowym źródłem napędu samochodów.

Klasyfikację tłokowych silników spalinowych przedstawiono na rysunku 1.1. Podstawowym kryterium ich podziału jest sposób realizacji cyklu przemian energetycznych. Cykl pracy w cylindrze silnika tłokowego może być realizowany w czasie jednego lub dwóch obrotów wału korbowego. Ponieważ w czasie jednego obrotu wału korbowego tłok wykonuje dwa przesunięcia (suwy) między skrajnymi położeniami, **silniki tłokowe** można podzielić na:

- **dwusuwowe** – realizujące cykl pracy podczas jednego obrotu wału korbowego,
- **czterosuwowe** – realizujące cykl pracy podczas dwóch obrotów wału korbowego.

Do napędu pojazdów samochodowych wykorzystuje się obecnie prawie wyłącznie silniki czterosuwowe, dlatego dalszy podział obejmuje tylko tę grupę silników.

Ze względu na sposób zapłonu tłokowe silniki spalinowe dzieli się na:

- **silniki o zapłonie iskrowym (ZI)** – zapłon mieszanki paliwowo-powietrznej sprężonej w komorze spalania następuje od zewnętrznego źródła energii, czyli od iskry elektrycznej powstającej między elektrodami świecy zapłonowej;
- **silniki o zapłonie samoczynnym (ZS)** – samoczynny zapłon (samozapłon) mieszanki palnej następuje w wyniku wtrysku paliwa do silnie sprężonego powietrza o wysokiej temperaturze; ze względu na wysokie ciśnienie sprężania silniki te są nazywane także silnikami wysokoprężnymi;
- **silniki o zapłonie iskrowo-samoczynnym (ZIS)** – w ostatnich latach konstruktorzy Mazdy opracowali i w 2018 roku wprowadzili do produkcji seryjnej silnik, w którym podstawowym sposobem zapłonu mieszanki jest zapłon iskrowy, ale w określonych warunkach pracy występuje tzw. zapłon częściowo samoczynny. Jest to więc silnik o zapłonie iskrowo-samoczynnym.

Ze względu na sposób zasilania zynnikiem roboczym **silniki ZI, ZS oraz ZIS** mogą być:

- **wolności** (niedoładowane), jeśli ładunek dopływa do cylindrów dzięki różnicy ciśnień panującej między cylindrem (podciśnienie) i otoczeniem (ciśnienie atmosferyczne);
- **doładowane**, jeśli ładunek przed wprowadzeniem do cylindra jest wstępnie sprężony; powoduje to zwiększenie różnicy ciśnień między ciśnieniem w cylindrze (podciśnienie) i ciśnieniem ładunku poza cylindrem (nadcisnienie) oraz lepsze napełnienie cylindra świeżym ładunkiem.

Ze względu na rodzaj stosowanego paliwa rozróżnia się **silniki ZI na paliwo**:

- **ciekłe,**
- **gazowe.**

Podstawowym paliwem ciekłym stosowanym w silniku ZI jest benzyna. Coraz powszechniej wykorzystuje się w nim także mieszaninę propan-butan (LPG). Silniki ZS są zasilane w zasadzie paliwem ciekłym, którym jest olej napędowy.

Według sposobu tworzenia mieszanki palnej **zasilane paliwem ciekłym silniki ZI** dzieli się na:

- **gaźnikowe,**
- **wtryskowe.**

*W silniku gaźnikowym* mieszanka palna jest wytwarzana w urządzeniu zwanym gaźnikiem dzięki wykorzystaniu podciśnienia panującego w układzie dolotowym silnika. Powietrze przepływające przez gardziel gaźnika zasysa paliwo z jego komory pływakowej, tworząc mieszankę palną. W Polsce ten sposób tworzenia mieszanki nie jest stosowany od połowy lat 90. XX wieku w produkowanych pojazdach, lecz może występować w nadal eksploatowanych starszych modelach samochodów.

*We wtryskowym silniku ZI* w celu wytworzenia mieszanki palnej paliwo jest wtryskiwane do powietrza dolotowego. Wtrysk paliwa może być skierowany do kolektora dolotowego (tzw. wtrysk pośredni) lub do cylindrów silnika (tzw. wtrysk bezpośredni).

*W gazowych silnikach ZI* mieszanka palna może być wytwarzana w mieszalniku (stare rozwiązanie, analogiczne do gaźnika) lub za pomocą wtrysku gazu do powietrza dolotowego.

Istotnym kryterium podziału silników o zapłonie samoczynnym jest rodzaj zastosowanej komory spalania.

Rozróżnia się *silniki ZS*:

- *o wtrysku pośrednim* (inaczej zwane silnikami z dzielonymi komorami spalania),
- *o wtrysku bezpośrednim* (inaczej zwane silnikami z dzielonymi komorami spalania).

## Układ konstrukcyjny silnika tłokowego

### 1.3

Tłokowy silnik spalinowy jest zbudowany z układów, które, współpracując ze sobą, decydują o efektach pracy silnika.

**Główne zespoły i układy silnika tłokowego to:**

- głowica,
- kadłub,
- układ korbowy,
- układ rozrządu,
- układ zasilania,
- układ smarowania,
- układ chłodzenia,
- układ dolotowy,
- układ wylotowy,
- osprzęt elektryczny.

**Głowica** zamyka od góry przestrzeń roboczą silnika i zawiera elementy innych jego układów (np. rozrządu, zasilania, smarowania, chłodzenia).

**Kadłub** stanowi główną obudowę silnika, zamkniętą od góry głowicą, a od dołu miską olejową. W kadłubie są umieszczone ruchome elementy układów korbowego i rozrządu oraz są wykonane kanały przepływu oleju silnikowego i cieczy chłodzącej lub przestrzenie przepływu powietrza chłodzącego. Zewnętrzne ścianki kadłuba wykorzystuje się do mocowania osprzętu silnika, a odpowiednio ukształtowane miejsca kadłuba służą do mocowania silnika w pojeździe.

**Układ korbowy** służy do zamiany postępowo-zwrotnego ruchu tłoka na ruch obrotowy wału korbowego. Tłoki pracujące w cylindrach przejmują energię zawartą w gazach powstałych ze spalania paliwa. Ta energia powoduje ich ruch. Za pośrednictwem korbowodu ruch

łoka jest przenoszony na wał korbowy, a następnie z koła zamachowego jest przekazywany do dalszych zespołów układu napędowego.

**Układ rozrządu** odpowiada za wymianę ładunku w cylindrze, czyli napełnianie cylindra świeżym ładunkiem i opróżnianie go ze spalin. W silnikach czterosurowych stosuje się rozrząd zaworowy, w którym elementami wykonawczymi są zawory dolotowe i wylotowe. We współczesnych silnikach wykorzystuje się rozrząd górnozaworowy, w którym zawory są umieszczone w głowicy silnika. Pracą zaworów steruje krzywkowy wałek rozrządu (lub wałki), napędzany od wału korbowego za pomocą paska zębatego (lub pasków), łańcucha (lub łańcuchów) albo kół zębatych.

**Układ zasilania** dostarcza w odpowiednich ilościach paliwo do tworzenia mieszanki palnej. Rodzaj i budowa układu zasilania zależy od rodzaju silnika oraz paliwa, którym jest zasilany. We współczesnych silnikach ZS oraz ZI dominuje zasilanie wtryskowe, czyli ciśnieniowy wtrysk paliwa do powietrza. W silniku ZI wtrysk paliwa ma zapewnić powstanie mieszanki palnej, która zostanie zapalona od energii iskry świecy zapłonowej, a w silniku ZS wtrysk paliwa umożliwia uzyskanie mieszanki ulegającej samozapłonowi.

**Układ smarowania** dostarcza olej między współpracujące części silnika w celu zmniejszenia siły tarcia, aby ograniczyć ich zużycie i je chłodzić. W silnikach czterosurowych stosuje się obiegowo-ciśnieniowy układ smarowania, tzn. olej krąży w układzie pod ciśnieniem wytworzonym przez pompę oleju.

**Układ chłodzenia** utrzymuje odpowiednią temperaturę elementów silnika. W zależności od zastosowanego czynnika chłodzącego rozróżnia się silniki chłodzone:

- cieczą,
- powietrzem.

W silnikach samochodowych stosuje się wymuszony obieg chłodzenia, tzn. ruch czynnika chłodzącego zapewnia pompa cieczy lub dmuchawa powietrza.

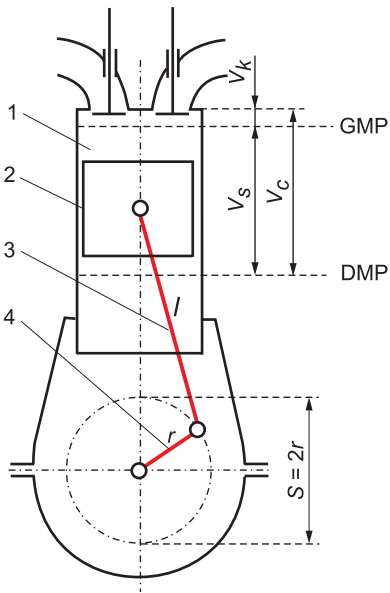
**Układ dolotowy** zapewnia najkorzystniejsze warunki napełniania cylindrów świeżym ładunkiem. W układzie dolotowym znajduje się filtr powietrza, a w silnikach doładowanych także urządzenia sprężające (np. jedna lub więcej sprężarek).

**Układ wylotowy** odprowadza spaliny z silnika z jak najmniejszymi oporami przepływu. W układzie wylotowym znajdują się tłumiki wylotu spalin oraz urządzenia zmniejszające zawartość składników toksycznych w spalinach.

Budowę silnika tłokowego uzupełnia osprzęt elektryczny odpowiedzialny za jego ruch, zapłon w silniku ZI oraz sterowanie różnymi funkcjami silnika. Elektryczny osprzęt silnika, należący do elektrotechniki i elektroniki samochodowej, w niniejszym podręczniku nie został opisany.

## 1.4 Parametry konstrukcyjne silnika tłokowego

Budowę tłokowego silnika spalinowego charakteryzują wielkości nazywane parametrami konstrukcyjnymi. Wielkości te dotyczą konstrukcji układu korbowego i komory spalania. Mają one duży wpływ na przebieg pracy silnika, zwłaszcza na proces zamiany energii cieplnej uzyskiwanej ze spalania paliwa na energię mechaniczną. Z tego względu dobór wartości poszczególnych parametrów konstrukcyjnych jest ważną częścią projektowania silnika.



**Rys. 1.2** Schemat mechanizmu korbowego silnika czterosuwowego (opis w tekście)

Na rysunku 1.2 pokazano schemat mechanizmu korbowego silnika czterosuwowego. W cylindrze 1 silnika jest umieszczony tłok 2 połączony z wałem korbowym 4 za pośrednictwem korbowodu 3. Przedstawiony mechanizm korbowy zamienia prostoliniowy ruch tłoka na obrotowy ruch wału korbowego.

Podczas pracy silnika tłok wykonuje w cylindrze ruch postępowo-zwrotny, ograniczony skrajnymi położeniami tłoka. Najdalsze od wału korbowego skrajne położenie tłoka nazywa się **górnym martwym położeniem (GMP)**, a skrajne położenie tłoka najbliższe wałowi korbowemu nazywa się **dolnym martwym położeniem (DMP)**.

**Skokiem tłoka** nazywamy odległość między skrajnymi położeniami tłoka (GMP i DMP), oznaczaną symbolem  $S$ . Skok tłoka jest parametrem zależnym od promienia wykorbienia wału korbowego

$$S = 2r \text{ [mm]}$$

(1.1)

gdzie  $r$  jest promieniem wykorbienia wału korbowego w mm.

Wartość skoku tłoka wynosi od 60 mm w silnikach małych do 170 mm w silnikach najcięższych pojazdów ciężarowych. W opisie technicznym silnika skok tłoka podaje się zawsze łącznie ze średnicą cylindra  $D$ .

**Stosunek skoku tłoka do średnicy cylindra  $S/D$**  może być:

- mniejszy niż 1 – tzw. silniki krótkoskokowe,
- równy 1 – tzw. silniki kwadratowe,
- większy niż 1 – tzw. silniki długoskokowe.

Wybór tego stosunku zawsze należy do konstruktorów silnika i wynika z wielowątkowej analizy tego zagadnienia.

Spotyka się następujące wartości stosunku skoku tłoka do średnicy cylindra:

- $S/D = 0,7-1,15$  w silnikach ZI,
- $S/D = 0,95-1,25$  w silnikach ZS.

**Objętością (pojemnością) skokową cylindra**  $V_s$  nazywamy objętość cylindra zawartą między skrajnymi położeniami tłoka (GMP i DMP). Jako objętość walca jest ona iloczynem pola powierzchni przekroju poprzecznego cylindra i skoku tłoka

$$V_s = \frac{\pi D^2}{4} S \quad [\text{m}^3] \quad (1.2)$$

gdzie:

$D$  – średnica cylindra w m,

$S$  – skok tłoka w m.

**Objętość (pojemność) skokową silnika** wielocylindrowego  $V_{ss}$ , będącą jego podstawowym parametrem geometrycznym, wyznacza się według wzoru

$$V_{ss} = V_s i \quad (1.3)$$

gdzie  $i$  jest liczbą cylindrów.

Wyrażanie objętości skokowej silnika w metrach sześciennych ( $\text{m}^3$ ) jest niewygodne, dlatego w praktyce najczęściej wyraża się ją w centymetrach sześciennych ( $\text{cm}^3$ ). Do porównań i klasyfikacji silników pojemność skokową zwykle podaje się w decymetrach sześciennych ( $\text{dm}^3$ ) w zaokrągleniu do pierwszego miejsca po przecinku (np.  $1,4 \text{ dm}^3$ ).

Najmniejsze silniki wykorzystywane do napędu współczesnych samochodów mają pojemność skokową ok.  $800 \text{ cm}^3$ , chociaż np. w historii polskiej motoryzacji chlubnie zapisał się silnik samochodu Polski Fiat 126p o mniejszej pojemności, wynoszącej początkowo  $600 \text{ cm}^3$ , zwiększonej następnie do  $650 \text{ cm}^3$ . Pojemność skokowa największych silników wykorzystywanych w samochodach ciężarowych wynosi nawet  $15\text{--}16 \text{ dm}^3$ .

**Objętość komory sprężania**  $V_K$  jest to objętość przestrzeni roboczej zamkniętej nad tłokiem w chwili, gdy on znajduje się w położeniu GMP.

**Objętość całkowita cylindra**  $V_C$  jest sumą objętości komory sprężania oraz objętości skokowej cylindra

$$V_C = V_K + V_s \quad (1.4)$$

**Stopień sprężania** jest stosunkiem początkowej objętości sprężania do końcowej objętości sprężania. Jest on bardzo ważnym parametrem konstrukcyjnym charakteryzującym silnik, mającym wpływ na przebieg przemian zachodzących w silniku, a w efekcie końcowym m.in. na moc użyteczną silnika. W odniesieniu do parametrów konstrukcyjnych silnika tłokowego stopień sprężania jest stosunkiem objętości całkowitej cylindra do objętości komory sprężania

$$\varepsilon = \frac{V_C}{V_K} = \frac{V_K + V_s}{V_K} = 1 + \frac{V_s}{V_K} \quad (1.5)$$

Stopień sprężania jest wielkością bezwymiarową i określa, ile razy w czasie suwu sprężania zmniejszyła się objętość sprężanego ładunku. We współczesnych silnikach dąży się do wzrostu stopnia sprężania, bo wpływa on na wzrost mocy silnika. W silniku o zapłonie iskrowym maksymalna wartość stopnia sprężania jest ograniczona występowaniem zjawiska nieprawidłowego spalania – spalania stukowego. Dobór wartości stopnia sprężania

w silniku ZI zależy od liczby oktanowej paliwa, konstrukcji komory spalania, rodzaju spalanej mieszanki, materiałów głowicy i tłoka oraz wymiarów cylindra.

Średnie wartości stopnia sprężania  $\varepsilon$  w silnikach ZI są następujące:

- $\varepsilon = 9-11,5$  – w niedoładowanych silnikach z pośrednim wtryskiem paliwa,
- $\varepsilon = 8-10$  – w doładowanych silnikach z pośrednim wtryskiem paliwa,
- $\varepsilon = 9,5-14$  – w silnikach z bezpośrednim wtryskiem paliwa.

W silniku o zapłonie samoczynnym stopień sprężania musi być dostatecznie duży, aby zapewnić warunki samozapłonu paliwa wtrysniętego do sprężonego powietrza wypełniającego komorę spalania (zwłaszcza podczas rozruchu zimnego silnika). Zbyt duży stopień sprężania powoduje jednak zwiększenie strat mechanicznych w wyniku wzrostu ciśnień maksymalnych oraz pogarsza przebieg spalania w wyniku trudności mieszania się rozpylonego paliwa ze sprężonym powietrzem o dużej gęstości.

Średnie wartości stopnia sprężania  $\varepsilon$  w silnikach ZS wynoszą:

- $\varepsilon = 14-19$  – w doładowanych silnikach o wtrysku bezpośrednim,
- $\varepsilon = 18-22$  – w silnikach o wtrysku pośrednim (większe wartości w silnikach niedoładowanych).

Z powyższego zestawienia wynika, że wartości stopnia sprężania silników ZI oraz ZS są coraz bardziej zbliżone. Szczególnym przypadkiem są najnowsze silniki ZI oraz ZS stosowane w samochodach Mazda charakteryzujące się taką samą wartością stopnia sprężania równą 14.

Do niedawna stopień sprężania był parametrem konstrukcyjnym, który dla każdego silnika miał wartość stałą. Od 2018 roku produkuje się seryjnie turbodoładowany silnik Infiniti 2.0 VC-Turbo o zapłonie iskrowym oraz stopniu sprężania zmieniającym się w zakresie od 8 do 14 w zależności od warunków pracy.

## Zasada działania silnika czterosuwowego i dwusuwowego

### 1.5

W tłokowym silniku spalinowym na cykl pracy składa się pięć przemian (procesów), w wyniku których silnik wykonuje pracę jednego obiegu.

Procesy zachodzące w silniku to:

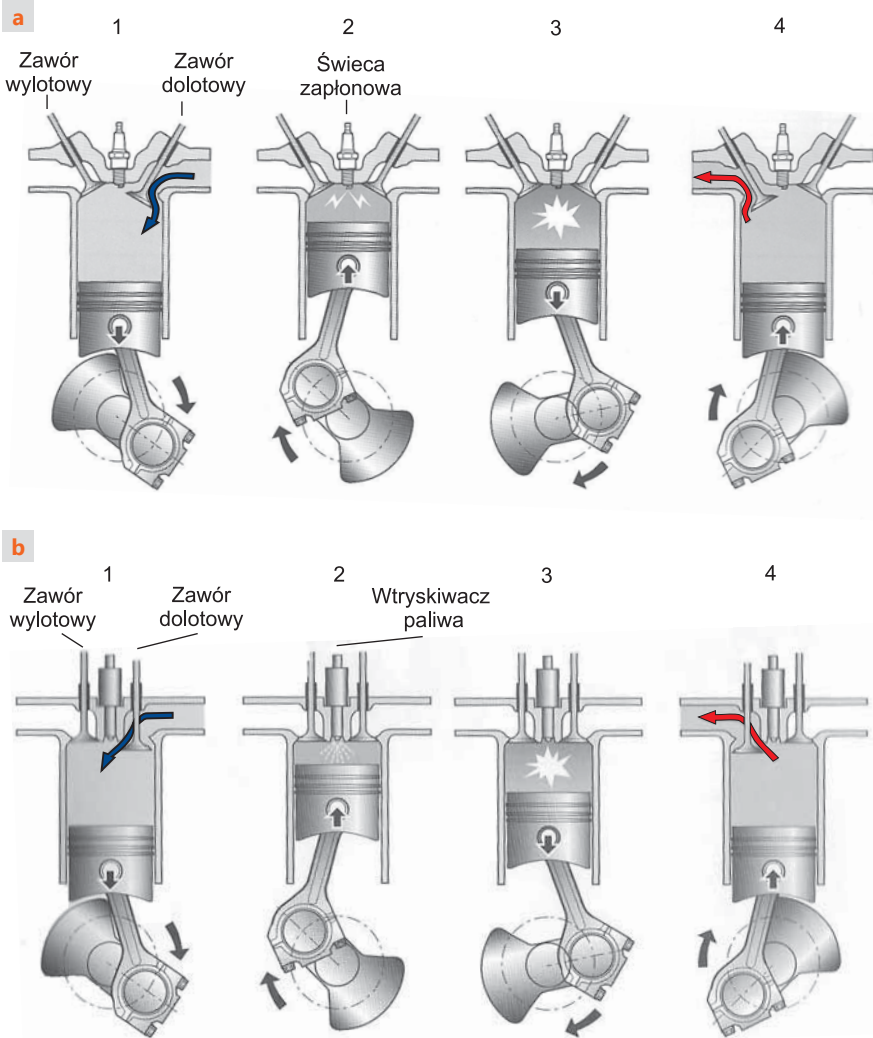
- napełnianie cylindra powietrzem lub mieszanką paliwowo-powietrzną,
- sprężanie ładunku zamkniętego w cylindrze,
- spalanie sprężonej mieszanki,
- rozprężanie spalin powstałych w wyniku spalania paliwa,
- usuwanie spalin z cylindra.

**Suwem** nazywa się część obiegu pracy silnika zawartą między dwoma skrajnymi położeniami tłoka. Jak podano w podrozdziale 1.2, przemiany niezbędne do wykonania pracy przez silnik mogą być realizowane podczas:

- dwóch suwów – w silnikach dwusuwowych,
- czterech suwów – w silnikach czterosuwowych.

**Silnik czterosurowy** charakteryzują opisane poniżej suwy (rys. 1.3).

**Suw dolotu (napełniania)** – w czasie poruszania się tłoka od GMP do DMP w cylindrze silnika powstaje podciśnienie powodujące zasysanie do cylindra przez otwarty w tym czasie zawór dolotowy mieszanki paliwa i powietrza (w większości silników ZI) lub tylko powie-

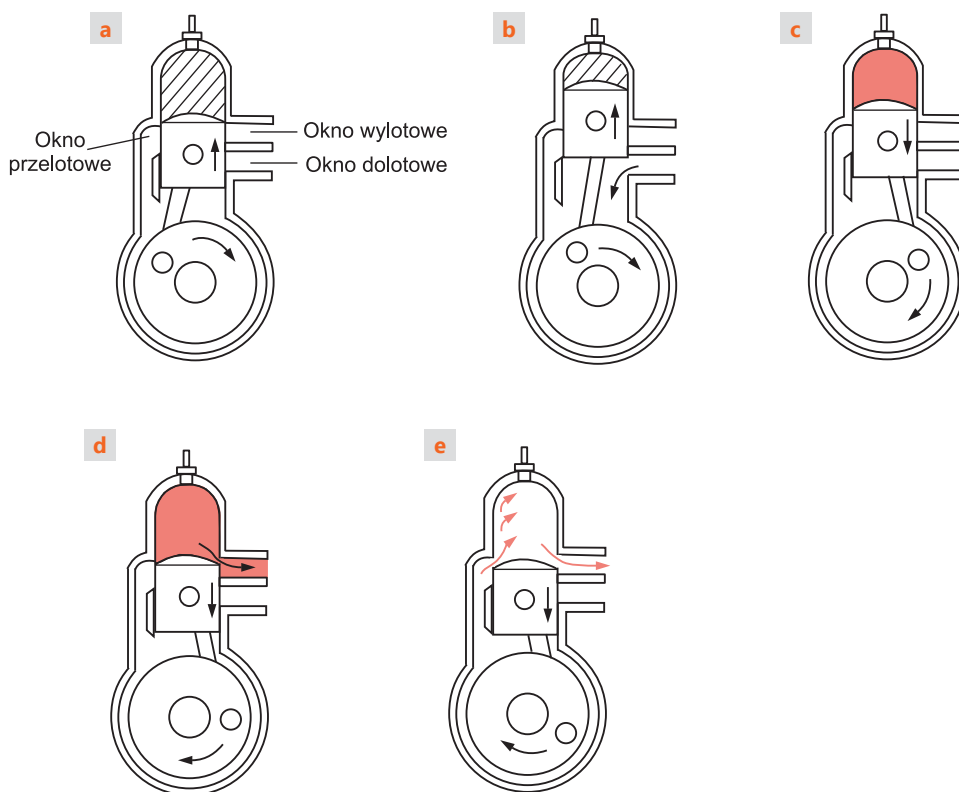


**Rys. 1.3** Zasada działania silnika czterosuwowego  
 a – silnik ZI, b – silnik ZS,  
 1 – suw dolotu, 2 – suw sprężania, 3 – suw rozprężania, 4 – suw wylotu

trza (w silnikach ZS oraz w silnikach ZI z bezpośrednim wtryskiem paliwa do cylindra). W silnikach doładowanych napełnianie cylindra jest wspomagane zwykle przez sprężarkę, która wytwarza nadciśnienie w kolektorze dolotowym silnika. Podczas suwu dolotu zawór wylotowy jest zamknięty.

**Suw sprężania** – podczas tego suwu tłok porusza się w kierunku GMP, dzięki czemu zmniejsza się objętość przestrzeni nad tłokiem. Ładunek (mieszanka palna lub powietrze) w cylindrze zostaje sprężony, ponieważ oba zawory są zamknięte. Pod koniec tego suwu w ściśle kontrolowanym położeniu tłoka przed GMP następuje zapłon mieszanki palnej od iskry elektrycznej świecy zapłonowej (silnik ZI) albo wtrysk oleju napędowego do silnie sprężonego powietrza i samoczynny zapłon powstającej mieszanki (silnik ZS).





**Rys. 1.4** Zasada działania silnika dwusuwowego (opis w tekście)

**Suw rozprężania (pracy)** – pod działaniem ciśnienia gazów powstałych podczas spalania ładunku tłok przesuwają się w kierunku DMP, a rozprężające się spaliny wykonują pracę mechaniczną (przemiana energii cieplnej gazów spalinowych na pracę mechaniczną). Z tego względu suw ten jest nazywany suwem pracy. W miarę oddalania się tłoka od GMP ciśnienie i temperatura gazów maleją. W czasie suwu rozprężania zawory dolotowy i wylotowy są zamknięte.

**Suw wylotu** – tłok przesuwający się w kierunku GMP wypycha spaliny z cylindra przez otwarty w tym czasie zawór wylotowy.

W czterosuwowym obiegu pracy tylko podczas jednego suwu (rozprężania) uzyskuje się pracę mechaniczną. Pozostałe trzy suwy służą do realizacji procesów pomocniczych (napełnianie cylindra, sprężanie ładunku, wylot spalin). Dlatego, aby zachować ciągłość obiegu, część pracy mechanicznej uzyskiwanej podczas rozprężania silnik musi zużyć do realizacji suwów pomocniczych.

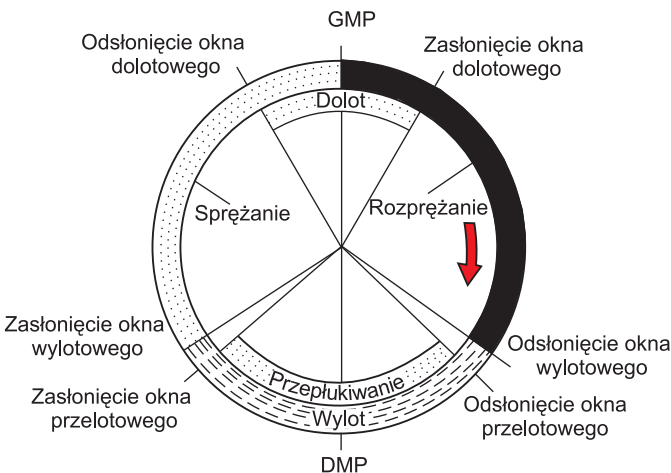
**Silnik dwusuwowy** charakteryzuje się realizacją pełnego obiegu pracy podczas dwóch suwów tłoka: sprężania i rozprężania. Napełnianie cylindra świeżym ładunkiem i wylot spalin odbywają się jednocześnie, kiedy tłok znajduje się w pobliżu DMP. W celu zrealizowania wymiany ładunku (przepłukania, czyli opróżnienia ze spalin i napełnienia świeżym ładunkiem) w silniku dwusuwowym przed wprowadzeniem do cylindra ładunek należy wstępnie sprężyć. Znane są dwa sposoby wstępnego sprężenia ładunku:

- sprężanie w skrzyni korbowej przez tłok poruszający się w kierunku DMP,
- sprężanie za pomocą zewnętrznej sprężarki.

Zasadę działania silnika dwusuwowego przedstawiono na przykładzie silnika ze sprężaniem wstępnym w skrzyni korbowej (rys. 1.4). W kadłubie tego silnika są wykonane okna dolotowe i wylotowe oraz okno przelotowe, które kanałem łączy cylinder ze skrzynią korbową.

Na początku **suwu sprężania** tłok znajdujący się w DMP odsłania okna wylotowe i przelotowe, zasłania zaś okno dolotowe. Cylinder silnika jest napełniany ładunkiem wstępnie sprężonym w skrzyni korbowej. W pierwszej fazie tego suwu tłok poruszający się w kierunku GMP przysłania okna przelotowe i wylotowe (rys. 1.4a). Zamknięty w cylindrze ładunek ulega sprężeniu, a w wyniku ruchu tłoka do góry w skrzyni korbowej następuje spadek ciśnienia, aż do wystąpienia podciśnienia. Podczas dalszego ruchu tłoka w dolnej części cylindra zostaje odsłonięte okno dolotowe i świeży ładunek zostaje zassany do skrzyni korbowej (rys. 1.4b). Pod koniec suwu sprężania rozpoczyna się spalanie ładunku od iskry elektrycznej świecy zapłonowej (silnik ZI) lub w wyniku wtrysku paliwa do sprężonego powietrza (silnik ZS). Podczas **suwu rozprężania** pod działaniem ciśnienia gazów spalinowych tłok przesuwa się w kierunku DMP – jest wykonywana praca mechaniczna (rys. 1.4c). Jednocześnie tłok przysłania okno dolotowe i ładunek zgromadzony w skrzyni korbowej zostaje wstępnie sprężony. Pod koniec suwu rozprężania rozpoczyna się faza wymiany ładunku. Tłok przesuwany się w kierunku DMP najpierw odsłania okno wylotowe, przez które spaliny wypływają na skutek różnicy ciśnień między cylindrem a układem wylotowym (rys. 1.4d). Następnie odsłania okno przelotowe, jednocześnie nadal odsłaniając okno wylotowe. Sprężony wstępnie ładunek przepływa ze skrzyni korbowej do cylindra, wypychając znajdujące się w nim spaliny (rys. 1.4e). Zjawisko usuwania spalin wstępnie sprężonym ładunkiem nazywa się przepłukiwaniem cylindra. Cykl pracy silnika dwusuwowego kończy się, gdy tłok osiąga DMP, kończąc suw rozprężania. Na rysunku 1.5 przedstawiono wykres kołowy, na którym zaznaczono procesy zachodzące w silniku dwusuwowym.

W silniku czterosuwowym, w porównaniu z dwusuwowym, pracę uzyskuje się dwa razy rzadziej, bo jeden suw pracy przypada na dwa obroty wału korbowego, a nie na jeden, jak w silniku dwusuwowym. Fakt ten niekorzystnie wpływa również na równomierność



**Rys. 1.5** Kołowy wykres procesów zachodzących w silniku dwusuwowym

pracy silnika czterosuwowego. Wadą silnika dwusuwowego jest gorsze opróżnienie cylindra z reszty spalin i gorsze napełnienie cylindra świeżym ładunkiem. W silniku dwusuwowym do wymiany ładunku w cylindrze konieczne jest także wstępne sprężenie tego ładunku, co wiąże się z poborem mocy z wału korbowego silnika. Ponadto silniki dwusuwowe charakteryzują się znaczną toksycznością spalin ze względu na mieszanie się świeżego ładunku ze spalinami oraz spalanie znacznej ilości oleju, który przedostaje się do komory spalania w wyniku stosowanego w nich smarowania mieszankowego.

Ze względu na wady dominujące nad zaletami silników dwusuwowych w porównaniu z silnikami czterosuwowymi, zwłaszcza znaczną toksyczność spalin, silników dwusuwowych nie stosuje się we współcześnie produkowanych pojazdach samochodowych.

## Obiegi teoretyczne i rzeczywiste silników spalinowych

### 1.6

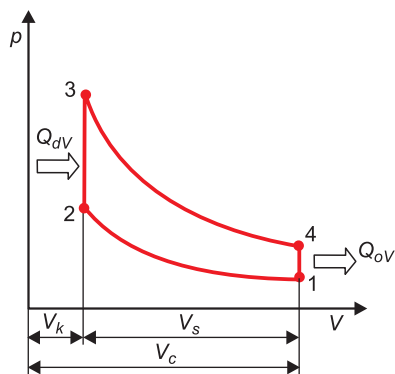
Pracę tłokowego silnika spalinowego można opisać cyklicznie następującymi po sobie przemianami termodynamicznymi. Przemiany te najczęściej przedstawia się w układzie współrzędnych ciśnienie-objętość ( $p$ - $V$ ) jako zależność ciśnienia od objętości  $p=f(V)$ . Układ ten jest bardzo wygodny do analizy zjawisk termodynamicznych w silniku tłokowym. Na wykresie wykonanym we współrzędnych  $p$ - $V$  miarą ilości pracy uzyskanej z jednego obiegu silnika jest pole figury zamkniętej liniami reprezentującymi poszczególne przemiany zachodzące podczas tego obiegu.

**Obiegi teoretyczne.** Próbę najprostszego powiązania przemian z wykorzystaniem podstawowych zależności podjęli Otto, Diesel i Sabathé. Byli oni twórcami tzw. obiegów teoretycznych, umożliwiających dokonanie podstawowych porównań oraz obliczeń charakteryzujących pracę silnika. Obieg teoretyczny ma na celu przedstawienie idealnego przebiegu zachodzącej w silniku przemiany energii cieplnej na pracę mechaniczną. Przy tworzeniu obiegów teoretycznych ich twórcy przyjęli wiele uproszczeń, dlatego też odbiegają one od rzeczywistych przemian zachodzących w przestrzeni roboczej cylindra silnika.

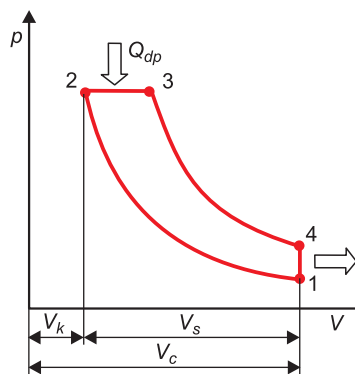
Budowę obiegów teoretycznych oparto na następujących założeniach upraszczających:

- w obiegu bierze udział gaz doskonały, czyli gaz o stałych wartościach ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu oraz przy stałej objętości,
- masa gazu biorącego udział w obiegu jest stała, czyli przemianom nie towarzyszą żadne straty czynnika,
- sprężanie i rozprężanie czynnika odbywa się adiabatycznie, tj. bez wymiany ciepła z otoczeniem,
- ciepło jest dostarczane do czynnika nie przez spalanie, lecz przez izochoryczne, tj. przy niezmięnionej objętości, lub izobaryczne, tj. przy stałym ciśnieniu, ogrzewanie, przy czym skład chemiczny czynnika nie ulega zmianie; podobnie odprowadzanie ciepła odbywa się przez izochoryczne chłodzenie gazu,
- wszystkie przemiany czynnika odbywają się nieskończenie wolno, wobec czego prędkość rozszerzania i kurczenia się gazu jest równa zeru oraz nie występują straty ciepła.

Obiegi teoretyczne wprawdzie odbiegają od rzeczywistego przebiegu zjawisk występujących w silniku spalinowym, mają jednak doniosłe znaczenie dla ich badania i ulepszenia. Analiza obiegów teoretycznych pozwala na ocenę obiegów rzeczywistych i umożliwia uzyskanie wskazówek dotyczących zwiększania sprawności silnika.



**Rys. 1.6** Schemat teoretycznego obiegu Otta [21]\*  
 $Q_{dV}$  – ciepło doprowadzane przy stałej objętości,  
 $Q_{oV}$  – ciepło odprowadzane przy stałej objętości



**Rys. 1.7** Schemat teoretycznego obiegu Diesla [21]  
 $Q_{dp}$  – ciepło doprowadzane przy stałym ciśnieniu,  
 $Q_{oV}$  – ciepło odprowadzane przy stałej objętości

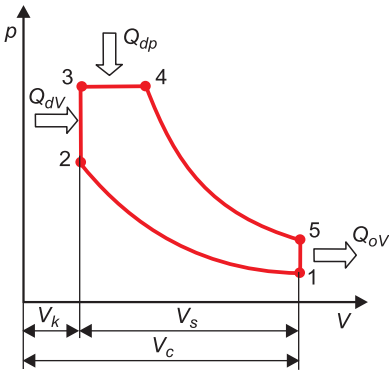
**Obieg Otta** charakteryzuje dostarczanie i odprowadzanie ciepła podczas przemiany izochorycznej (przy stałej objętości). Schemat przedstawiający przebieg poszczególnych przemian w obiegu Otta pokazano na rysunku 1.6. Teoretyczny obieg Otta zwykle przyjmuje się jako obieg odniesienia dla wolnoobrotowego tłokowego silnika spalinowego o zapłonie iskrowym. W silniku tym dostarczanie ciepła w wyniku spalania dobrze przygotowanej mieszanki palnej trwa bardzo krótko, dlatego można przyjąć, że odbywa się ono przy stałej objętości.

**Obieg Diesla** (rys. 1.7) powstał przy założeniu, że ciepło jest dostarczane podczas przemiany izobarycznej. Teoretyczny obieg Diesla przez wiele lat był przyjmowany jako najbardziej zbliżony do obiegu uzyskiwanego w tłokowym silniku spalinowym o zapłonie samoczynnym. Proces spalania w pierwszych konstrukcjach tego typu silników trwał stosunkowo długo, ze względu na czas trwania wtrysku paliwa, realizowanego przez mechaniczne układy wtryskowe pracujące przy niezbyt wysokich ciśnieniach. Potwierdza to przyjęte założenie, że dostarczanie ciepła odbywa się przy zmiennej objętości (efekt ruchu tłoka) i stałym ciśnieniu.

**Obieg Sabathégo** (rys. 1.8) jest teoretycznym obiegiem, który może być rozpatrywany jako obieg odniesienia do analizy podstawowych zależności termodynamicznych we współczesnych silnikach tłokowych o zapłonie zarówno iskrowym, jak i samoczynnym. W obiegu tym ciepło jest dostarczane w dwóch przemianach – izochorycznej i izobarycznej. W przypadku silników ZS obieg ten charakteryzuje się większymi przyrostami objętości przy stałym ciśnieniu, a w przypadku silników ZI – większymi przyrostami ciśnienia przy stałej objętości.

Pracę teoretyczną każdego wymienionego obiegu w układzie  $p$ - $V$  wyraża pole ograniczone krzywymi przedstawiającymi poszczególne przemiany obiegu. Podstawą analizy obiegu teoretycznego jest obliczenie jego sprawności teoretycznej wyrażonej zależnością

\* Odsyłacz [21] oznacza – zob. Literatura (s. 581), pozycja 21. Ten sposób odwoływania się do literatury obowiązuje w całym podręczniku.



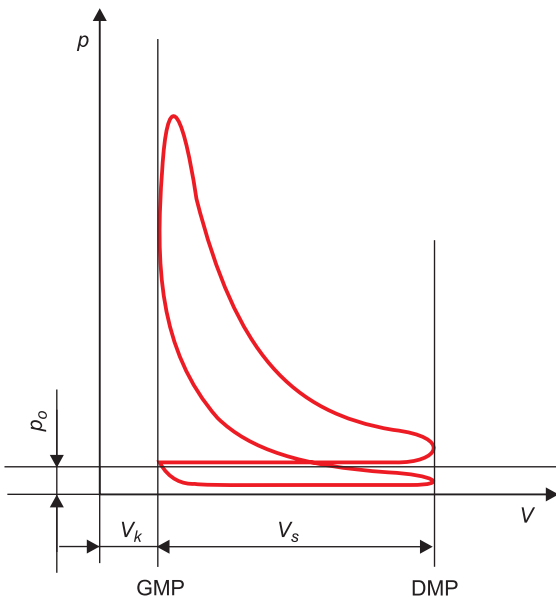
**Rys. 1.8** Schemat teoretycznego obiegu Sabathégo [21]  
 $Q_{dV}$  – ciepło doprowadzane przy stałej objętości,  
 $Q_{dp}$  – ciepło doprowadzane przy stałym ciśnieniu,  
 $Q_{oV}$  – ciepło odprowadzane przy stałej objętości

$$\eta_t = \frac{L_t}{Q_d} = \frac{Q_d - Q_o}{Q_d} \tag{1.6}$$

gdzie:

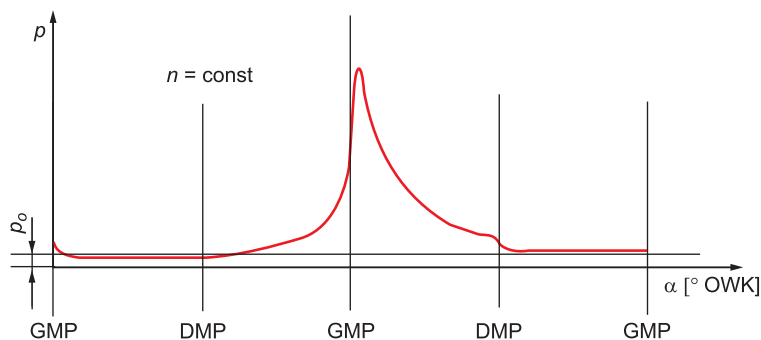
- $L_t$  – praca teoretyczna układu,
- $Q_d$  – ciepło dostarczone do układu,
- $Q_o$  – ciepło oddane przez układ.

Po przekształceniu podanego wzoru przy wykorzystaniu odpowiednich zależności termodynamicznych można uzyskać wzory określające sprawność teoretyczną każdego z opisanych obiegu. Ze względu na dość skomplikowaną postać, zrezygnowano z podawania ich w niniejszym podręczniku. Podstawowy wniosek, wypływający z analizy wzorów na sprawność teoretyczną, dotyczy wpływu stopnia sprężania na sprawność. W silnikach spalinowych sprawność jest tym większa, im większy jest stopień sprężania.



**Obiegi rzeczywiste** są efektem rejestracji ciśnienia w komorze spalania z jednoczesną rejestracją położenia wału korbowego lub objętości nad tłokiem. Procedurę tę, zwaną indykowaniem silnika, przeprowadza się na stanowisku pomiarowym zwanym indykatorem, a wykres przedstawiający rzeczywisty przebieg zmian ciśnienia w funkcji kąta obrotu wału korbowego lub położenia tłoka w cylindrze nazywa się wykresem indykatorowym. Rozróżnia się dwa rodzaje wykresów indykatorowych:

**Rys. 1.9** Zamknięty wykres indykatorowy silnika czterosurowego [21]



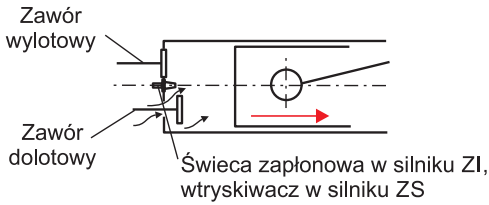
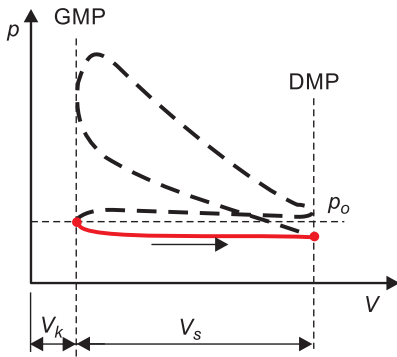
Rys. 1.10 Rozwinięty wykres indykatorowy silnika czterosuwowego [21]

- zamknięte (pętlowe), na których zmiany ciśnienia w cylindrze są przedstawione w funkcji objętości cylindra (rys. 1.9),
- otwarte (rozwinięte), na których zmiany ciśnienia w cylindrze są przedstawione w funkcji kąta obrotu wału korbowego (rys. 1.10).

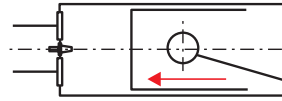
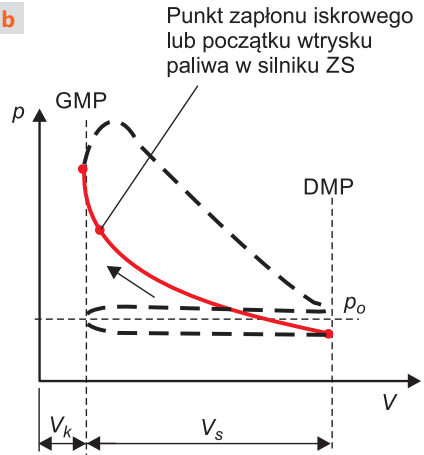
Etapy powstawania **zamkniętego wykresu indykatorowego** przedstawiono na rysunku 1.11. Podczas suwu dolotu, w wyniku ruchu tłoka w cylindrze powstaje podciśnienie, a więc linia wykresu znajduje się poniżej linii odniesienia  $p_0$ , która oznacza ciśnienie otoczenia (atmosferyczne). Tłok przemieszczający się w czasie suwu sprężania w kierunku GMP przy zamkniętych zaworach powoduje wzrost ciśnienia przy malejącej objętości cylindra. Pod koniec tego suwu w wyniku zapłonu iskrowego lub wtrysku paliwa w silniku ZS rozpoczyna się spalanie, co skutkuje gwałtownym wzrostem ciśnienia i załamaniem się linii wykresu do góry. Po minięciu przez tłok GMP i rozpoczęciu suwu rozprężania w wyniku trwania spalania, ciśnienie w cylindrze nadal rośnie, mimo powiększającej się objętości przestrzeni roboczej cylindra. Ciśnienie osiąga wartość maksymalną i rozpoczyna się rozprężanie, w trakcie którego ciśnienie gazów spalinowych zmniejsza się wraz z powiększającą się objętością cylindra. W DMP w cylindrze panuje niewielkie nadciśnienie spowodowane obecnością tam gazów spalinowych. Podczas suwu wylotu spaliny opuszczają malejącą objętość cylindra, w której panuje ciśnienie nieco wyższe od atmosferycznego.

Zamknięty wykres indykatorowy składa się z dwóch pętli. Pole powierzchni pętli górnej reprezentuje pracę wykonaną przez gazy spalinowe w cylindrze, a pole powierzchni pętli dolnej przedstawia pracę zużytą na wymianę ładunku w cylindrze. Rzeczywistą pracę wykonaną w czasie jednego obiegu wyznacza różnica pól powierzchni pętli górnej i dolnej. Jest to praca wykonana w cylindrze, nazywana pracą indykowaną  $L_i$ . Wykresy indykatorowe służą do określania między innymi obciążen mechanicznych i cieplnych elementów silnika. Pozwalają także na obliczenie wielu parametrów charakteryzujących pracę silnika, a w konsekwencji umożliwiają optymalizację konstrukcji silnika i jego parametrów regulacyjnych.

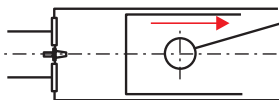
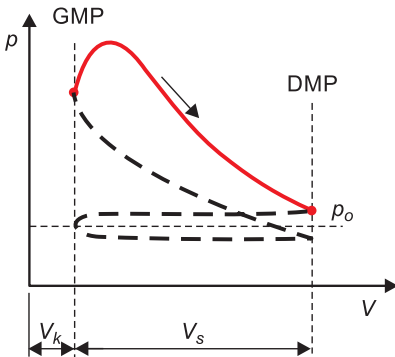
**a**



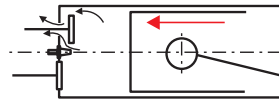
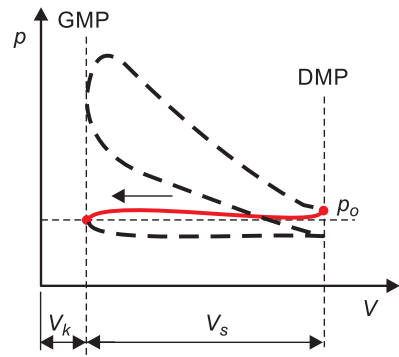
**b**



**c**



**d**

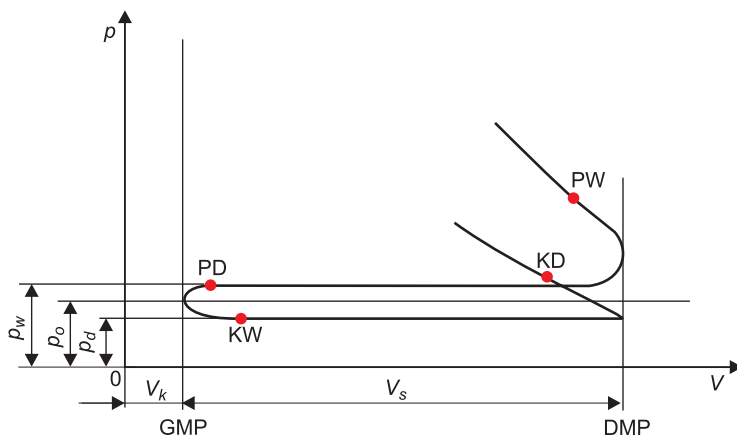


**Rys. 1.11** Zasada działania silnika czterosuwowego [21]  
 a - suw dolotu, b - suw sprężania, c - suw sprężania (pracy), d - suw wylotu

## 1.7 Wymiana ładunku w cylindrze

### 1.7.1 Fazy rozrządu silnika czterosuwowego

Otwarcie zaworu kojarzy się zawsze z odpowiednim suwem silnika. Oczywiście wydaje się, że w czasie suwu dolotu musi być otwarty zawór dolotowy, a podczas suwu wylotu – zawór wylotowy. Taki tok rozumowania zastosowano w podrozdziale 1.5 przy omawianiu zasady działania silnika czterosuwowego. Wynikało z niego, że procesy wymiany ładunku (dolotu świeżego ładunku i wylotu spalin) odpowiadają suwom tłoka silnika. W rzeczywistości procesy te rozpoczynają się wcześniej, a kończą później niż odpowiadające im suwy. Każdy z procesów wymiany ładunku rozpoczyna się z chwilą początku otwarcia, a kończy z chwilą zamknięcia odpowiedniego zaworu. **Zawory w silniku czterosuwowym otwierają się z pewnym wyprzedzeniem** względem zwrotnego położenia tłoka, od którego zaczyna się suw odpowiadający danemu procesowi. Natomiast **zamknięcie zaworów następuje z pewnym opóźnieniem**, tzn. po przejściu tłoka przez zwrotne położenie, w którym kończy się suw odpowiadający danemu procesowi. Na części wykresu indykatorowego (rys. 1.12) zaznaczono przykładowe punkty odpowiadające chwilom otwierania się i zamykania zaworów. Proces dolotu świeżego ładunku rozpoczyna się pod koniec suwu wylotu, przed osiągnięciem przez tłok położenia GMP, w punkcie *PD* odpowiadającym początkowi otwarcia zaworu dolotowego. Koniec procesu dolotu określa punkt *KD*, w czasie suwu sprężania, po przekroczeniu przez tłok położenia DMP, w którym następuje zamknięcie zaworu dolotowego. Proces wylotu spalin jest zawarty między punktami *PW* oraz *KW*. Zawór wylotowy otwiera się w punkcie *PW* pod koniec suwu rozprężania, przed osiągnięciem przez tłok położenia DMP, a zamyka w punkcie *KW* podczas suwu dolotu, po minięciu przez tłok położenia GMP. W celu dokładnego określenia chwil otwierania i zamykania zaworów punkty *PD*, *KD*, *PW* i *KW* odniesiono do określonych położenia wału korbowego. Na



**Rys. 1.12** Chwile otwarcia i zamknięcia zaworów w silniku czterosuwowym  
 $p_d$  – ciśnienie dolotu,  $p_w$  – ciśnienie wylotu (opis w tekście)



rysunku 1.13 przedstawiono kołowy wykres faz rozrządu silnika czterosuwowego. Na tym wykresie punkty określające chwile otwierania i zamykania zaworów względem skrajnych położen tłoka są określone następującymi kątami:

$\alpha_d$  – kąt wyprzedzenia otwarcia zaworu dolotowego,

$\beta_d$  – kąt opóźnienia zamknięcia zaworu dolotowego,

$\alpha_w$  – kąt wyprzedzenia otwarcia zaworu wylotowego,

$\beta_w$  – kąt opóźnienia zamknięcia zaworu wylotowego.

**Fazami rozrządu** nazywamy położenia kątowe wału korbowego odpowiadające wyprzedzeniu otwarcia i opóźnieniu zamknięcia zaworów. Fazy rozrządu stosuje się w celu poprawy sprawności opróżnienia cylindra ze spalin i napełnienia go świeżym ładunkiem. Większa ilość świeżego ładunku oznacza więcej energii, która może być wywiązana podczas spalania zawartego w nim paliwa, a więc większą moc silnika. Fazy rozrządu dla każdego silnika dobiera się doświadczalnie i są one podstawą do wykonania krzywek na wałku rozrządu. Przeciętne wartości faz rozrządu w silniku czterosuwowym są następujące:

$\alpha_d = 5\text{--}30^\circ$  OWK,

$\beta_d = 0\text{--}70^\circ$  OWK,

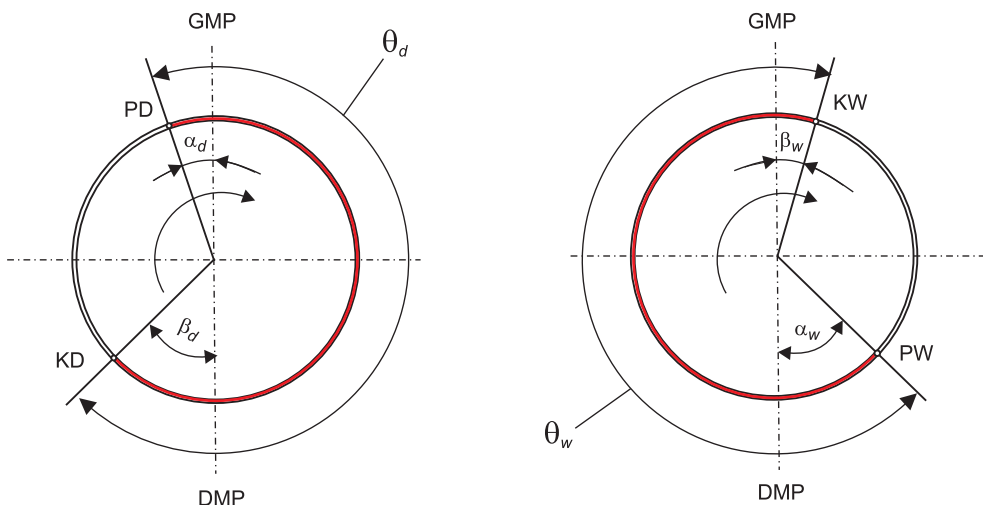
$\alpha_w = 0\text{--}70^\circ$  OWK,

$\beta_w = 5\text{--}30^\circ$  OWK.

Podany obok wartości faz rozrządu symbol  $^\circ$  OWK oznacza kąt obrotu wału korbowego.

Wartości faz rozrządu zależą od indywidualnych cech silnika i możliwości wykorzystania zjawisk pozwalających na wydłużenie procesów dolotu i wylotu. Na marginesie warto zaznaczyć, że w niektórych silnikach spotyka się zerowe, a także ujemne wartości faz rozrządu.

Na ogół zawór wylotowy jest otwierany w czasie suwu rozprężania z dość dużym wyprzedzeniem. Może to budzić obawy, że wypuszcza się z cylindra gazy, które mają jeszcze dużą energię i mogłyby wykonać pracę użyteczną. Wcześniejsze otwarcie zaworu nie wpływa jednak negatywnie na proces zamiany energii cieplnej na pracę mechaniczną, gdyż zasadniczo zamiana ta zachodzi w pierwszej części suwu pracy. W drugiej części tego suwu tłok jest już w fazie hamowania. Wcześniejsze otwarcie zaworu wylotowego umożliwia



**Rys. 1.13** Kołowy wykres faz rozrządu silnika czterosuwowego (opis w tekście)

wpływ z cylindra dużej ilości spalin przed osiągnięciem przez tłok DMP dzięki istniejącej różnicy ciśnień w cylindrze i układzie wylotowym. Wpływa to korzystnie na zmniejszenie pracy, którą tłok musi wykonać podczas suwu wylotu, aby wypchnąć spaliny z cylindra. Kąty opóźnienia zamknięcia zaworu wylotowego oraz wyprzedzenia otwarcia zaworu dolotowego są ze sobą ściśle związane. Między suwami wylotu i dolotu oba zawory są otwarte, bo zawór wylotowy jeszcze się nie zamknął, a zawór dolotowy już zaczął się otwierać. Jest to tzw. przekrycie zaworów. W tym krótkim czasie otwarcia obu zaworów wykorzystuje się działanie gazów spalinowych, które pod wpływem siły bezwładności, opuszczając cylinder, zasysają na swoje miejsce świeży ładunek. Umożliwia to wcześniejsze rozpoczęcie procesu dolotu w zasadzie bez działania tłoka. Najbardziej nielogiczne może się wydawać znacznie późniejsze zamknięcie zaworu dolotowego w czasie suwu sprężania. Zastosowanie tego kąta umożliwia wykorzystanie siły bezwładności działającej na cząsteczki świeżego ładunku po ustaniu zasysającego działania tłoka. Energia napływającego ładunku ze względu na duże prędkości przepływu na początku suwu sprężania jest jeszcze na tyle duża, że nie zachodzi obawa wypchnięcia go przez tłok poruszający się z niewielką prędkością w kierunku GMP. Z powodu zastosowania faz rozrządu całkowite kąty otwarcia zaworów w silniku są następujące:

- całkowity kąt otwarcia zaworu dolotowego  $\Theta_d = \alpha_d + 180^\circ + \beta_d$ ;
- całkowity kąt otwarcia zaworu wylotowego  $\Theta_w = \alpha_w + 180^\circ + \beta_w$ ,

gdzie  $\alpha_d$ ,  $\beta_d$ ,  $\alpha_w$ ,  $\beta_w$  – kąty wyprzedzenia otwarcia i opóźnienia zamknięcia odpowiednio zaworów dolotowych i wylotowych (patrz wcześniejszy opis).

Jeśli przyjmie się średnie wartości kątów wcześniejszego otwarcia i późniejszego zamknięcia, to okazuje się, że zawór jest otwarty około 230–280° OWK.

Zjawiska umożliwiające zastosowanie faz rozrządu zależą od warunków pracy silnika. W silnikach o stałych fazach rozrządu przyjmuje się średnie wartości kątów, które umożliwiają poprawną pracę w całym zakresie zmian warunków pracy silnika. We współczesnych silnikach konstruktorzy stwarzają warunki do regulacji tych kątów w celu dostosowywania ich do chwilowych warunków pracy. Są to silniki o zmiennych fazach rozrządu, dzięki którym można jeszcze bardziej poprawić skuteczność wymiany ładunku w cylindrze.

## 1.7.2 Proces napełniania cylindra

Proces napełniania cylindra świeżym ładunkiem w silniku czterosuwowym trwa od chwili rozpoczęcia otwierania zaworu dolotowego, a kończy się z chwilą jego zamknięcia. Obejmuje więc część suwu wylotu, cały suw dolotu oraz część suwu sprężania. W silniku wolnossącym (niedoładowanym) napełnianie świeżym ładunkiem odbywa się pod działaniem podciśnienia wytworzonego ruchem tłoka w cylindrze i dlatego zwykle mówi się o zasysaniu ładunku. Ładunkiem w większości silników ZI jest mieszanka paliwowo-powietrzna. Natomiast w silnikach ZI z bezpośrednim wtryskiem paliwa i w silnikach ZS jest zasysane czyste powietrze. Na początku procesu napełniania, przed rozpoczęciem suwu dolotu w cylindrze znajduje się resztkę spalin z poprzedniego obiegu. Dopływ świeżego ładunku do cylindra może się rozpocząć po rozprężeniu reszty spalin do wartości ciśnienia niższej od ciśnienia otoczenia  $p_o$ . Zasysanie świeżego ładunku jest procesem dynamicznym, podczas którego występują niestanne zmiany ciśnienia. Jest to spowodowane zmiennością prędkości przepływu ładunku przez układ dolotowy, zmiennością przekroju przelotowego zaworu oraz występowaniem dynamicznych zjawisk przepływu ładunku. Zmiany te są bardzo trudne do określenia, dla-

tego w obliczeniach przyjmuje się zwykle, że wartość ciśnienia podczas napełniania jest stała. Proces napełniania cylindra jest pierwszym ogniwem w obiegu pracy silnika. Rozpoznanie zjawisk występujących podczas tego procesu jest bardzo ważnym elementem analizy pracy silnika. Umożliwia ono stworzenie optymalnych warunków do napełniania cylindra i zgromadzenia maksymalnej masy ładunku, która decyduje o efekcie pracy silnika, czyli jego mocy użytecznej. Proces napełniania cylindra zależy od wielu czynników, które powodują, że do cylindra wpływa mniejsza ilość ładunku niż ilość, jaka mogłaby się zmieścić w jego objętości skokowej. Wielkością charakteryzującą stopień napełnienia cylindra podczas procesu dolotu jest współczynnik napełnienia cylindra, zwany też sprawnością napełnienia.

**Współczynnik (stopień) napełnienia cylindra**, oznaczany symbolem  $\eta_v$ , jest określany stosunkiem masy świeżego ładunku zamkniętego w cylindrze do masy ładunku odpowiadającej objętości skokowej cylindra w warunkach normalnych

$$\eta_v = \frac{m_1}{m_2}$$

(1.7)

gdzie:

$m_1$  – masa ładunku rzeczywiście doprowadzonego do cylindra,

$m_2$  – masa ładunku, który przy ciśnieniu i temperaturze odpowiadającym warunkom normalnym wypełniłby całą objętość skokową cylindra.

Masa ładunku rzeczywiście doprowadzonego do cylindra w silnikach niedoładowanych jest zawsze mniejsza od masy odpowiadającej objętości skokowej cylindra, dlatego współczynnik napełnienia cylindra tych silników jest mniejszy od jedności ( $\eta_v < 1$ ).

Współczynnik napełnienia zależy od wielu czynników, które można podzielić na trzy grupy:

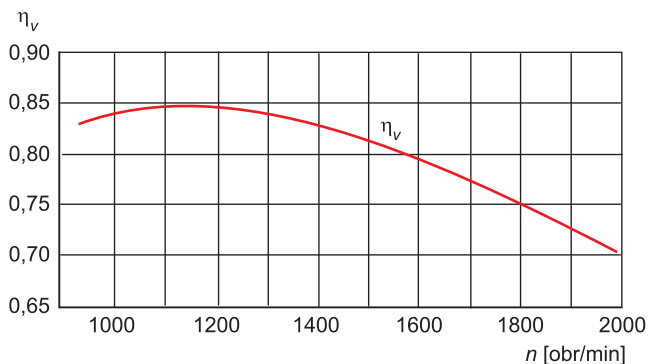
- czynniki termodynamiczne,
- czynniki konstrukcyjne,
- czynniki eksploatacyjne.

**Czynniki termodynamiczne** to: temperatura świeżego ładunku, ciśnienie ładunku pod koniec suwu dolotu, ciśnienie reszty spalin pozostałych w cylindrze z poprzedniego obiegu oraz współczynnik reszty spalin. Współczynnik napełnienia jest określony stosunkiem mas, dlatego istotny wpływ na jego wartość ma temperatura, która decyduje o gęstości ładunku. Ładunek przegrzany ma mniejszą gęstość, co wpływa na mniejszą masę ładunku i sprawność napełnienia się zmniejsza.

**Czynniki konstrukcyjne** najsilniej wpływające na napełnienie cylindra to ukształtowanie układu dolotowego oraz odpowiedni dobór faz rozrządu. Ukształtowanie układu dolotowego decyduje o sprawności napełnienia poprzez wielkość oporów przepływu i wpływ na zjawiska dynamiczne w procesie napełniania. Ukształtowanie i wymiary układu dolotowego dobiera się na podstawie obliczeń i badań prototypu silnika. Odpowiednio dobrane fazy rozrządu stosuje się w celu uzyskania zwiększenia sprawności napełnienia, czyli aby umożliwić napełnienie cylindra dużą ilością świeżego ładunku.

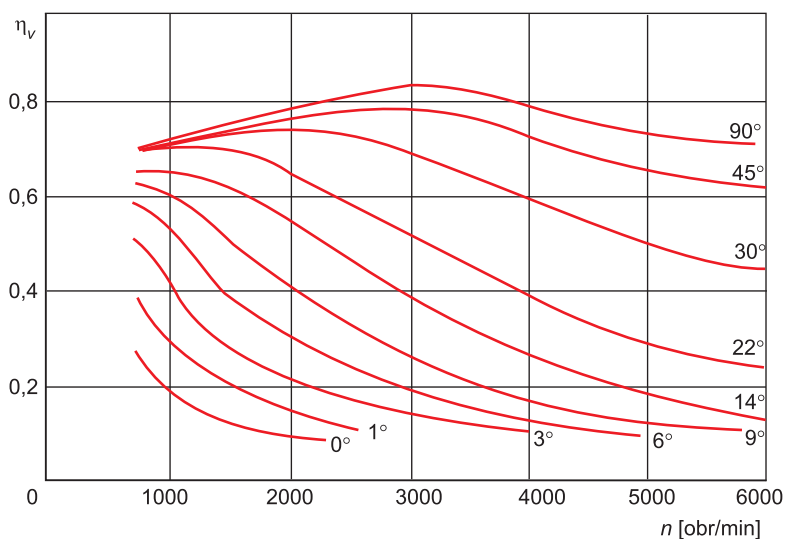
**Czynniki eksploatacyjne**, od których zależy sprawność napełnienia cylindra, to prędkość obrotowa silnika i obciążenie silnika.

Istotny, bezpośredni wpływ na napełnienie cylindra wywiera prędkość obrotowa silnika, gdyż wszystkie opory przepływu ładunku są proporcjonalne do kwadratu prędkości przepływu ładunku przez kanały układu (rys. 1.14). Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej silnika zwiększa się również napełnienie cylindra. Jest to uzasadnione większym wymuszeniem



**Rys. 1.14** Zależność współczynnika napełnienia od prędkości obrotowej silnika

przepływu ładunku, który skuteczniej napełnia cylinder. Po przekroczeniu pewnej prędkości obrotowej, przy której współczynnik napełnienia osiąga maksimum, napełnienie cylindra maleje, gdyż coraz większe prędkości przepływu decydują o gwałtownie rosnących oporach przepływu przez układ dolotowy. Wpływ obciążenia silnika na współczynnik napełnienia jest istotny w silnikach z przepustnicą w układzie dolotowym, czyli głównie w silnikach o zapłonie iskrowym. W silnikach tych miarą ich obciążenia jest kąt uchylenia przepustnicy. Na biegu jałowym, czyli w stanie pracy bez obciążenia, przepustnica jest przymknięta, a przy maksymalnym obciążeniu – uchylona o kąt bliski  $90^\circ$ . Przepustnica w układzie dolotowym stanowi duże zakłócenie przepływu dla ładunku zasysanego do cylindra. Wynika z tego, że największe opory przepływu, decydujące o napełnieniu cylindra, występują na biegu jałowym. Wraz ze wzrostem obciążenia, czyli podczas uchylania przepustnicy, opory przepływu maleją i napełnienie cylindra zwiększa się. Największa ilość ładunku jest zasysana do cylindra przy maksymalnym obciążeniu, gdy przepustnica jest całkowicie otwarta (rys. 1.15).



**Rys. 1.15** Charakterystyka współczynnika napełnienia w zależności od kąta otwarcia przepustnicy i prędkości obrotowej silnika

Średnie wartości współczynnika napełnienia uzyskiwane w najkorzystniejszych warunkach eksploatacyjnych wynoszą:

$$\eta_v = 0,6-0,85 \text{ w silnikach ZI,}$$

$$\eta_v = 0,75-0,9 \text{ w silnikach ZS.}$$

## Doładowanie silników

### 1.7.3

Sposobem na poprawienie stopnia napełnienia cylindra, a tym samym na zwiększenie mocy silnika, jest wykorzystanie zewnętrznej siły do wtłaczania ładunku, dzięki czemu w cylindrze można zgromadzić nawet większą masę ładunku niż wynikająca z objętości skokowej. Sposób ten stanowi istotę doładowania silnika.

**Doładowaniem silnika** nazywa się dostarczanie świeżego ładunku do cylindra pod ciśnieniem wyższym od ciśnienia atmosferycznego w celu zwiększenia masy ładunku zgromadzonej w cylindrze. Efektem tego jest uzyskanie większego momentu obrotowego i większej mocy silnika bez zmiany prędkości obrotowej wału korbowego lub objętości skokowej. Świeży ładunek podczas sprężania nagrzewa się, więc zmniejsza się jego gęstość. Aby osiągnąć pełny efekt doładowania, powietrze przed wprowadzeniem do cylindra zwykle ochładza się w tzw. chłodnicy powietrza doładowanego, dzięki czemu wzrasta jego gęstość.

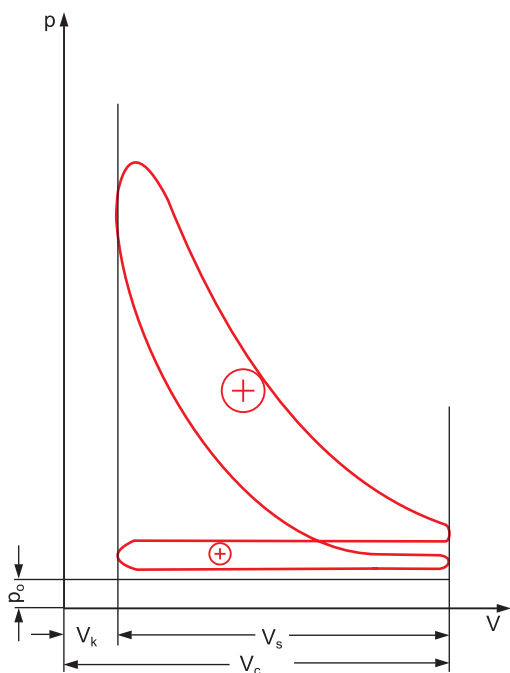
**Stopniem doładowania** nazywamy wzrost mocy uzyskany dzięki doładowaniu, wyrażony w procentach mocy znamionowej silnika. Większość czterosuwowych silników o zapłonie samoczynnym wykazuje stopień doładowania równy około 50%. W silnikach o zapłonie iskrowym jest on znacznie mniejszy.

Zależnie od wartości ciśnienia ładunku rozróżnia się:

- **doładowanie niskie**, przy którym ciśnienie bezwzględne świeżego ładunku nie przekracza 150 kPa;
- **doładowanie wysokie**, przy którym ciśnienie świeżego ładunku przekracza 150 kPa, a czasem osiąga nawet 300 kPa;

Ze względu na sposób zwiększania ciśnienia ładunku rozróżnia się:

- **doładowanie sprężarkowe** – w tym sposobie zwiększanie ciśnienia powietrza wprowadzanego do cylindra odbywa się w sprężarce, a w zależności od typu sprężarki rozróżnia się:
  - **doładowanie mechaniczne**, wykorzystujące sprężarkę mechaniczną napędzaną od wału korbowego silnika;
  - **turbodoładowanie**, w którym powietrze jest sprężane w sprężarce napędzanej turbiną gazową zasilaną gazami spalinowymi opuszczającymi komory spalania poszczególnych cylindrów;
  - **turbodoładowanie wspomagane sprężarką napędzaną silnikiem elektrycznym**;
  - **doładowanie mieszane**, wykorzystujące sprężarkę mechaniczną i turbosprężarkę, pracujące szeregowo;
- **doładowanie bezsprężarkowe**, wykorzystujące zjawiska dynamiki przepływu gazów, w którym rozróżnia się:
  - **doładowanie Complex**, polegające na impulsowym sprężaniu powietrza przez stykające się z nim bezpośrednio gazy spalinowe w urządzeniu zwanym wymiennikiem ciśnienia;
  - **doładowanie dynamiczne**, uzyskiwane dzięki wykorzystaniu zjawiska rezonansu ciśnienia słupa powietrza w układzie dolotowym silnika.



**Rys. 1.16** Wykres indykatorowy silnika doładowanego

Typowy dla silnika doładowanego wykres indykatorowy przedstawiono na rysunku 1.16. Cechą charakterystyczną tego wykresu jest położenie dolnej pętli wymiany ładunku powyżej linii ciśnienia atmosferycznego. Ponadto linia napełniania cylindra jest położona wyżej niż linia wylotu spalin, czyli pętla wymiany ładunku jest dodatnim polem pracy. Wprowadzenie uprzednio sprężonego ładunku nie wymaga zużycia energii przez silnik.

Doładowanie bardzo dobrze pasuje do silnika o zapłonie samoczynnym. W tym silniku, oprócz podstawowej korzyści doładowania, czyli zwiększenia mocy silnika, wprowadzenie do cylindra powietrza pod ciśnieniem wyższym od atmosferycznego wpływa bardzo korzystnie na przebieg spalania. W silnikach doładowanych wtryskiwane do sprężonego powietrza paliwo łatwiej ulega samozapłonowi. Proces spalania przebiega spokojniej, a praca silnika jest mniej „twarda” (wolniejszy wzrost ciśnienia w cylindrze). Z tego względu doładowanie współcześnie stosuje się (poza

nielicznymi wyjątkami) we wszystkich silnikach o zapłonie samoczynnym.

Najistotniejszym problemem zastosowania doładowania w silniku o zapłonie iskrowym jest powstawanie przedwczesnych samozapłonów oraz spalania stukowego, wynikającego z podwyższenia ciśnienia w komorze spalania na skutek wyższej jego wartości na początku sprężania ładunku. Z tego względu w doładowanych silnikach ZI obniża się wartość stopnia sprężania. Ograniczone zastosowanie doładowania w starszych rozwiązaniach silników ZI (gaźnikowych) związane było z umieszczeniem sprężarki. Zastosowanie sprężarki przed gaźnikiem wymagało zastosowania odpowiedniego typu gaźnika, a w przypadku umieszczenia sprężarki za gaźnikiem istniało niebezpieczeństwo wybuchu mieszanki podczas sprężania. Problem ten rozwiązano po zastosowaniu układów wtrysku benzyny. W doładowanych silnikach z pośrednim wielopunktowym wtryskiem benzyny spręża się tylko powietrze, a paliwo jest wtryskiwane do części układu dolotowego o podwyższonym ciśnieniu. W silnikach ZI z bezpośrednim wtryskiem benzyny, w których paliwo wtryskuje się bezpośrednio do cylindrów, doładowanie stosuje się coraz częściej. Kolejnym problemem związanym z doładowaniem silników o zapłonie iskrowym z pośrednim wtryskiem paliwa są straty przepłukiwania cylindrów, wynikające ze współotwarcia zaworów. Straty ładunku powstające podczas przepłukiwania cylindra można zmniejszyć, opóźniając otwarcie zaworu dolotowego, prowadzi to jednak do pogorszenia przepłukiwania. Problem ten nie występuje w silnikach z bezpośrednim wtryskiem paliwa, w których podobnie jak w silnikach ZS cylinder jest napełniany powietrzem.

Sposoby realizacji poszczególnych typów doładowania w silnikach samochodowych zostały przedstawione w dalszej części podręcznika.