

Moduł 1

Podstawowe wiadomości o silnikach spalinowych

Wstęp

1. Klasyfikacja silników spalinowych
2. Procesy spalania

Wstęp

W tym module zostaną omówione zagadnienia dotyczące konstrukcji silników spalinowych, ich klasyfikacji, zasady działania oraz procesy zachodzące podczas spalania mieszanki paliwowo-powietrznej. Zagadnienia dotyczą silników z zapłonem samoczynnym, i z zapłonem iskrowym.

1. Klasyfikacja silników spalinowych

Zadaniem silnika spalinowego jest zamiana energii cieplnej w energię mechaniczną, która następnie zostaje wykorzystana do napędu spalinowego pojazdu trakcyjnego poprzez przekładnię elektryczną, mechaniczną lub hydrauliczną.

Silniki spalinowe można podzielić na **tłokowe, turbinowe i odrzutowe**.

Najczęściej stosowane są silniki tłokowe, dlatego podział przedstawiony w dalszej części będzie dotyczył tylko ich.

Spalanie mieszaniny paliwowo-powietrznej następuje w silniku. Ze względu na sposób spalania mieszaniny paliwowo-powietrznej rozróżniamy silniki:

a) z zapłonem iskrowym (niskoprężne) – w których mieszanka paliwowo-powietrzna wytwarzana jest na zewnątrz i wewnątrz komory spalania silnika. Zapłon mieszanki jest inicjowany przez iskrę, którą wytwarza świeca zapłonowa;

b) z zapłonem samoczynnym (wysokoprężne) – w których mieszanka wytwarzana jest w cylindrze silnika, nad tłokiem, a zapłon następuje w wyniku sprężania powietrza, dzięki temu wytwarza się bardzo wysoka temperatura powodująca zapłon. Do cylindra doprowadzane jest czyste powietrze. Silniki te nazywa się silnikami Diesla – od nazwiska ich wynalazcy.

Do napędu silników z zapłonem iskrowym stosowane są zwykle lekkie paliwa ciekłe (mieszanki benzyny, benzolu, alkoholu), a czasami także paliwa gazowe. Silniki z zapłonem samoczynnym są zazwyczaj napędzane ciężkimi paliwami płynnymi, takimi jak olej napędowy.

Sposób zapłonu w wymienionych silnikach ma znaczący wpływ na ich konstrukcję i procesy, które w nich zachodzą. W silniku z zapłonem samoczynnym ciśnienie jest znacznie wyższe niż w silniku z zapłonem iskrowym. Silnik z zapłonem iskrowym (ZI) jest wyposażony w układ zasilania paliwem oraz zapłonową instalację elektryczną.

Z kolei silnik z zapłonem samoczynnym (ZS) ma pompę wtryskową i wtryskiwacze.

Ze względu na sposób pracy silniki z zapłonem iskrowym i zapłonem samoczynnym mogą być:

a) dwusuwowe;

b) czterosuwowe.

Można je podzielić także pod względem liczby cylindrów na silniki:

a) jednocyldrowe;

b) wielocyldrowe.

Silniki jednocyldrowe raczej nie są stosowane w pojazdach samochodowych ze względu na dużą nierównomierność pracy oraz dużą masę jednostkową. Najczęściej stosowane są silniki wielocyldrowe. Silniki te charakteryzują się większą mocą (im więcej cylindrów, tym większa moc), mniejszą nierównomiernością pracy i mniejszą masą jednostkową. W silniku wielocyldrowym obiegi pracy każdego z suwów są odpowiednio przesunięte w czasie. Suwy rozprężania następują kolejno po sobie lub mogą nawet się pokrywać, dzięki temu praca silnika wielocyldrowego jest bardziej płynna.

Ze względu na sposób zasilania czynnikiem roboczym silniki mogą być

a) wolnossące (niedoładowane), w których ładunek dopływa do cylindrów dzięki różnicy ciśnień panującej między cylindrem i otoczeniem;

b) doładowane, w których ładunek przed wprowadzeniem do cylindra jest wstępnie sprężony, co powoduje zwiększenie różnicy ciśnień między ciśnieniem w cylindrze a ciśnieniem ładunku poza cylindrem oraz lepsze napełnienie cylindra nowym ładunkiem.

W silnikach wielocylindrowych stosowane są różne układy rozmieszczenia cylindrów. Można je więc podzielić na:

a) silniki rzędowe – osie wszystkich cylindrów leżą w jednej płaszczyźnie, tworząc rząd, wał znajduje się z jednej strony cylindrów, a głowica (głowice) zamyka cylinder z drugiej strony. Silniki te mogą być ustawione w pionie, leżeć poziomo lub skośnie;

b) silniki widlaste dwurzędowe – osie dwóch rzędów cylindrów ułożone są do siebie równolegle, ale ich płaszczyzny tworzą tzw. kąt rozwidlenia, który wynosi zazwyczaj 60° albo 90°. Układ ten przypomina literę V;

c) silniki o cylindrach poziomych przeciwległych – cylindry leżą poziomo, przeciwnie i na przemian po obu stronach wału korbowego, układ ten zwany jest **bokserem**.

Zasady działania silników

Zasada działania silnika czterosuwowego

Na cykl pracy silnika czterosuwowego składają się **cztery suwy: suw dolotu, suw sprężania, suw pracy i suw wylotu**. Cykl pracy silnika czterosuwowego z zapłonem iskrowym (rys. 1.2) i zapłonem samoczynnym (rys. 1.1) jest taki sam, istotne różnice dotyczą sposobu tworzenia mieszanki palnej i sposobu jej zapłonu. W silniku ZI mieszanka jest wytwarzana poza cylindrem (z wyjątkiem nowoczesnych silników z wtryskiem bezpośrednim) i dostarczana przez otwarty zawór dolotowy, a następnie zapalana wskutek przeskoku iskry na świecy zapłonowej. W silnikach ZS do cylindra jest dostarczane tylko powietrze, a paliwo wtryskiwane w odpowiednim czasie bezpośrednio do cylindra pod wysokim ciśnieniem, powodując jego samozapłon. W czasie jednego suwu wał korbowy wykona pół obrotu, a więc **na pełny cykl pracy silnika czterosuwowego przypadają dwa obroty wału korbowego**. W poszczególnych suwach zachodzą następujące procesy.

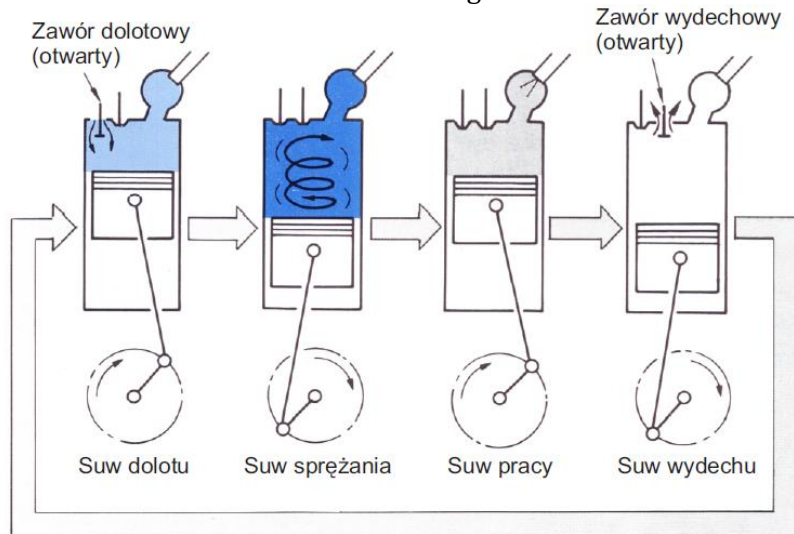
1) Suw napełniania (dolotu) - w tym suwie tłok przemieszcza się z GMP do DMP i przez otwarty zawór dolotowy zasysa nowy ładunek do cylindra (w silnikach ZI mieszankę paliwowo-powietrzną, a w silnikach ZS tylko powietrze). Zawór wylotowy jest w tym czasie zamknięty.

2) Suw sprężania – w suwie sprężania tłok przesuwa się w kierunku GMP, ponieważ oba zawory są zamknięte, zmniejszająca się przestrzeń nad cylindrem powoduje sprężanie ładunku. Procesowi temu towarzyszy wzrost ciśnienia i temperatury ładunku.

3) Suw pracy (rozprężania) – tuż przed dojściem tłoka do GMP następuje zapłon czynnika roboczego (w silnikach ZI za pomocą iskry elektrycznej powstającej między elektrodami świecy zapłonowej, a w silnikach ZS wskutek samozapłonu paliwa wtryskniętego do sprężonego pod dużym ciśnieniem powietrza znajdującego się w cylindrze). Zapłon powoduje gwałtowny wzrost ciśnienia i temperatury. Powstające gazy spalinowe rozprężają się i naciskają na denko tłoka, przesuując go z GMP do DMP. W czasie suwu pracy objętość cylindra zwiększa się, a ciśnienie spalin maleje. Zawory dolotowy i wylotowy są nadal zamknięte.

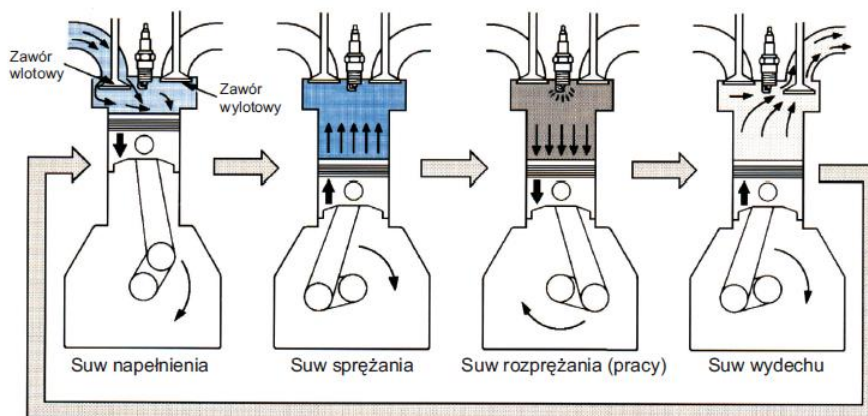
4) Suw wylotu (wydechu) – w suwie wylotu tłok przemieszcza się z DMP do GMP, a spaliny są wypychane przez otwarty zawór wylotowy na zewnątrz cylindra. W tym czasie zawór dolotowy jest zamknięty. Gdy tłok osiągnie GMP, otwiera się zawór dolotowy i cykl pracy silnika się powtarza.

Rys. 1.1. Zasada działania silnika czterosuwowego ZS



Źródło: Materiały szkoleniowe Toyoty.

Rys. 1.2. Zasada działania silnika czterosuwowego ZI

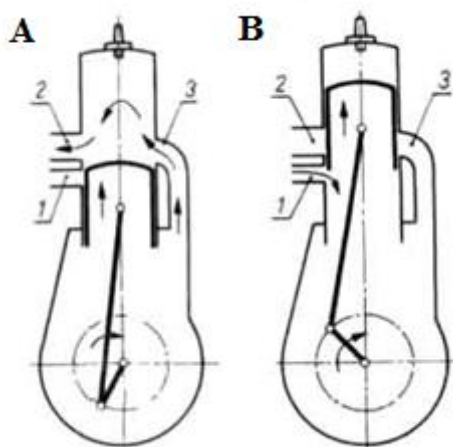


Źródło: Materiały szkoleniowe Toyoty.

Zasada działania silnika dwusuwowego

1) Suw pierwszy (ssanie – sprężanie) – tłok przemieszcza się z DMP do GMP. W pierwszej fazie do cylindra przetłaczany jest (przez otwarty kanał przelotowy – 3) ładunek wstępnie sprężony w skrzyni korbowej (**rys. 1.3 A**). W drugiej fazie, gdy tłok przymknie wszystkie kanały (przelotowy 3 i wylotowy 2), następuje sprężanie ładunku nad tłokiem. Jednocześnie do skrzyni korbowej, gdy tylko zostanie odsłonięty kanał dolotowy, jest zasysany nowy ładunek (**rys. 1.3 B**).

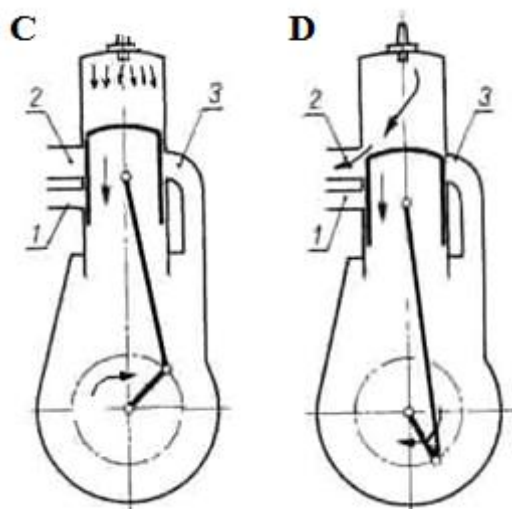
Rys. 1.3. Zasada działania silnika dwusuwowego – suw pierwszy (ssanie – sprężanie)



Źródło: Materiały własne.

2) Suw drugi (praca – wydech) – tuż przed dojściem tłoka do GMP następuje przeskok iskry między elektrodami świecy zapłonowej i zapłon mieszanki. Powstające gazy spalinowe, rozprężając się, przesuwały tłok w kierunku DMP (**rys. 1.4 C**). Gdy tłok, przesuwał się, odsłonił okno kanału wylotowego, spaliny zaczynają opuszczać cylinder (**rys. 1.4 D**). Niemal równocześnie tłok odsłania również okno kanału przelotowego, którym do cylindra napływa nowy ładunek. Nowy ładunek, zapełniając cylinder, wypycha z cylindra resztę spalin. **Jest to tzw. przepłukiwanie cylindra**. Następnie cykl pracy silnika się powtarza.

Rys. 1.4. Zasada działania silnika dwusuwowego – suw drugi (praca – wydech)



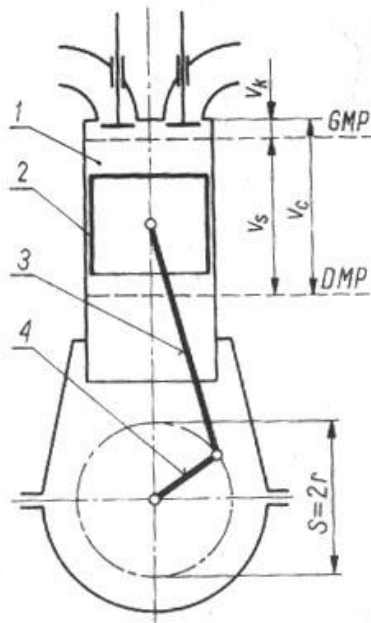
Źródło: Materiały własne.

Parametry konstrukcyjne silnika

Podstawowe parametry konstrukcyjne silnika to m.in.: **skok tłoka, pojemność skokowa i stopień sprężania**. Aby dokładniej poznać, co to takiego, warto przyjrzeć się poniższemu rysunkowi.

Rys. 1.5. Budowa oraz schemat mechanizmu korbowego silnika

1. cylinder
2. tłok
3. korbowód
4. wał korbowy



Źródło: Materiały własne.

Na rysunku 1.5 przedstawiono schemat mechanizmu korbowego silnika czterosuwowego. Skrót **GMP** i **DMP** oznaczają skrajne położenia tłoka. GMP to górne martwe położenie, a DMP – dolne martwe położenie. Dlaczego martwe? Bo tłok, zmieniając kierunek ruchu w skrajnych położeniach, musi na chwilę się zatrzymać. Odległość między DMP a GMP nazywamy **skokiem tłoka** i oznaczamy literą **S**. Skok tłoka zależy od promienia r wykorbienia wału korbowego i jest od niego dwa razy większy (dlatego $S = 2r$).

Pojemnością skokową V_s cylindra nazywamy objętość cylindra zawartą między GMP i DMP.

Ponieważ pojemność ta ma w przybliżeniu kształt walca, możemy więc uznać, że jest ona równa iloczynowi pola czynnej powierzchni denka tłoka i skoku tłoka. Możemy to zapisać wzorem:

$$V_s = F_{\text{tł}} \cdot S = \frac{\pi D^2}{4} \cdot S$$

gdzie:

V_s – pojemność skokowa cylindra,

$F_{\text{tł}}$ – pole czynnej powierzchni denka tłoka,

D – średnica cylindra,

S – skok tłoka.

Pojemność skokowa silnika V_{ss} jest sumą objętości skokowych wszystkich cylindrów.

Pojemność komory sprężania V_k to objętość, jaką zajmuje tłok znajdujący się w GMP.

Pojemność całkowita cylindra V_c to suma pojemności komory sprężania V_k i pojemności skokowej cylindra V_s .

Stopniem sprężania nazywamy stosunek pojemności całkowitej cylindra V_c do pojemności komory sprężania V_k . Stopień sprężania oznaczamy grecką literą epsilon:

$$\xi = \frac{V_c}{V_k} = \frac{V_k + V_s}{V_k}$$

Stopień sprężania jest parametrem bezwymiarowym, wszystkie pojemności podaje się najczęściej w cm³ lub litrach.

2. Procesy spalania

Paliwa silnikowe

Wśród paliw ciekłych wyróżniamy:

- **benzynę** – jest stosowana w samochodach o zapłonie iskrowym (ZI). W jej skład wchodzi węglowodory o temperaturze wrzenia od 30 do 200 stopni Celsjusza. Otrzymywana jest zazwyczaj przez rafinację ropy naftowej, choć możliwe są także inne, alternatywne metody jej pozyskiwania;
- **olej napędowy** – jest stosowany do silników o zapłonie samoczynnym (ZS). Otrzymuje się go podobnie jak benzynę przez rafinację ropy naftowej. Ostatnio na coraz szerszą skalę takie paliwa pozyskuje się z roślin (tzw. estry). Temperatura wrzenia składników wynosi od 170 do 380 stopni Celsjusza. Ważnym parametrem jest wysoka wartość liczby cetanowej;
- **alkohole** – w samochodach wykorzystuje się alkohole metylowe i etylowe. Zazwyczaj występują jako dodatek do benzyny, zwiększając wartość liczby oktanowej. Z powodu niewielkiej liczby cetanowej praktycznie unika się ich stosowania w autach z silnikiem Diesla. Jedną z najpopularniejszych mieszanin alkoholu i benzyny jest E85 (85% biotetanolu, 15% benzyny). Jednak aby tankować takie paliwo, konieczne jest odpowiednie przygotowanie samochodu – takie specjalne wersje aut są zazwyczaj oznaczane jako FlexiFuel. Warto pamiętać o tym, że ze względu na zmniejszoną wartość energetyczną samochód spalający ok. 10 l benzyny będzie potrzebował w podobnych warunkach pracy około 12 l E85;
- **naftę** – stosuje się ją do silników ZI, ale tylko o niskim stopniu sprężania i niskoobrotowych. Charakteryzuje się wydłużonym czasem spalania i opóźnieniem przy samozapłonie.

Paliwa gazowe to:

- **wodór** – paliwo przyszłości. Wodór może być stosowany do zasilania silników z wewnętrznym spalaniem w samochodach osobowych, autobusach i statkach. Tak jak w przypadku turbin gazowych możliwe jest wykorzystanie do tych celów czystego wodoru lub jego mieszaniny z metanem. Produktem spalania jest woda;
- **gaz ziemny CNG** (*Compressed Natural Gas*) – składa się głównie z metanu. Jest sprężony do ciśnienia 20–25 MPa. Może być wykorzystywany zarówno do napędzania silników ZI, jak i ZS;
- **LPG** (*Liquefied Petroleum Gas*) – mieszanina skroplonych gazów propanu i butanu. Ze względu na różnice klimatyczne proporcje mogą być różne. Paliwo może być przewożone w stanie ciekłym pod niewielkim ciśnieniem 1–1,5 MPa. Ze względu na jego nieściśliwość konieczne jest stosowanie zbiorników odpornych na uderzenie. W przeciwnym razie mogłoby dojść do rozerwania zbiornika od wewnątrz.

Podstawowe parametry paliw:

- **wartość opałowa** – jest to ilość ciepła, która powstaje w wyniku całkowitego i zupełnego spalania danego paliwa. Wyróżnia się także tzw. wartość opałową dolną, w której pomija się nieefektywnie wykorzystane ciepło skroplenia pary wodnej w spalinach;
- **liczba oktanowa** – oznacza odporność paliwa na spalanie stukowe. Określając liczbę oktanową, można porównać badane paliwo z paliwem wzorcowym. Paliwo wzorcowe jest odpowiednią procentową mieszaniną izooktanu ($lo = 100$) i n-heptanu ($lo = 0$);
- **liczba cetanowa LC** – to nic innego jak określenie zdolności paliwa do samozapłonu. Wyznacza się ją tak samo jak liczbę oktanową – metodą porównawczą, analizując badane paliwo z paliwem złożonym z cetanu ($LC = 100$) i alfametylonaftalenu ($LC = 0$);
- **temperatura samozapłonu** – jest to temperatura, przy której następuje samozapłon mieszanki par paliwa i powietrza. Zależy od parametrów składu mieszanki i jej ciśnienia. Temperatura samozapłonu ma szczególne znaczenie przy zasilaniu silników o zapłonie samoczynnym (diesel);
- **temperatura krzepnięcia** – to taka temperatura, przy której z paliwa zaczynają wytrącać się frakcje stałe. Jest to bardzo ważny parametr dla silników Diesla. Zimą rafinerie produkują olej napędowy o niższej temperaturze krzepnięcia, tzw. olej zimowy, który umożliwi rozruch samochodu przy niskich temperaturach;
- **lotność** – zdolność paliw do odparowywania;
- **lepkość i napięcie powierzchniowe** – te parametry decydują o łatwości rozdrabniania paliwa na mgiełkę paliwa konieczną w nowoczesnych silnikach. Im parametry te są niższe, tym lepiej dla rozdrobnienia; jednak w silnikach ZS niska lepkość zwiększa przecieki i pogarsza smarowanie;
- **ciepło parowania** – ważny parametr ze względu na napełnianie cylindrów; rozumiany jest jako ilość ciepła potrzebnego do odparowania określonej dawki paliwa.

Spalanie – reakcja chemiczna przebiegająca między materiałem palnym lub paliwem a utleniaczem z wydzieleniem ciepła i światła. Paliwa i utleniacze mogą występować w trzech stanach skupienia: gazowym, ciekłym i stałym. Powszechnie dostępnym utleniaczem gazowym jest tlen zawarty w powietrzu. Utleniacze ciekłe i stałe są stosowane w silnikach raketowych.

Są trzy typy zapoczątkowania reakcji spalania:

- zapłon;
- samozapłon;
- samozapalenie.

Zależnie od zastosowanego materiału palnego wyróżnia się spalanie:

- homogeniczne – charakterystyczne dla mieszanin gazów palnych, par cieczy z powietrzem;
- heterogeniczne – dotyczy spalania ciał stałych, charakterystyczne jest żarzenie się na powierzchni zetknięcia się ciała stałego z tlenem, przykładem jest spalanie węgla drzewnego, sadzy, niektórych metali;
- homogeniczno-heterogeniczne – najczęściej występujące spalanie przejściowe, przykładem takiego surowca jest węgiel kamienny.

Przebieg spalania w silniku z zapłonem iskrowym (ZI)

Spalanie przebiega w 3 etapach:

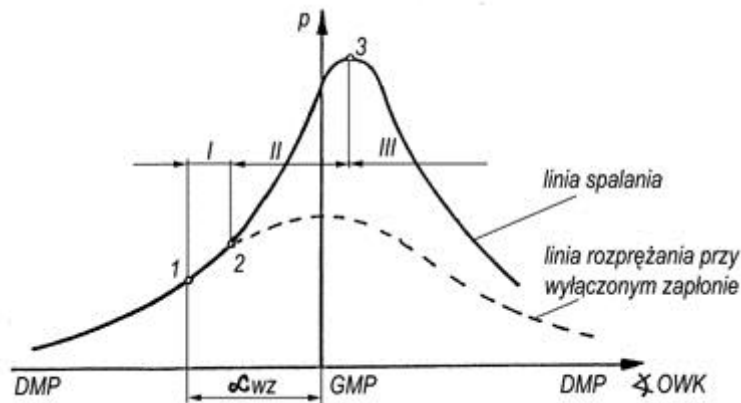
I – okres spalania utajonego od pkt 1, w którym występuje iskra, do pkt 2, w którym następuje zapalenie mieszanki (w tym okresie następuje podgrzanie paliwa i jego odparowanie);

II – okres spalania właściwego (od pkt 2 do 3), w którym następuje szybki przyrost ciśnienia w cylindrze (linia ciągła), znacznie większy niż przy sprężaniu czynnika bez spalania (linia przerywana);

III – okres dopalania się resztek paliwa (od pkt 3).

Rys. 1.6. Wykres przebiegu spalania w silniku z zapłonem iskrowym

I, II, III – okresy spalania, 1 – wystąpienie iskry, 2 – punkt zapłonu, 3 – punkt maksymalnego ciśnienia, OWK – obroty wału korbowego, α_{wz} – kąt wyprzedzenia zapłonu



Źródło: <https://sites.google.com/site/silnikipojazdowsamochodowych/home/proces-spalania-w-silnikach/spalanie-w-silnikach-zi>.

Zapłon następuje przed osiągnięciem GMP, aby mieszanka miała czas na pełne zapalenie się i wytworzenie odpowiedniego ciśnienia na początku suwu.

Spalanie w silniku z ZS

W nowoczesnych rozwiązaniach układów zasilania silników ZS przebieg wtrysku paliwa oprócz wtrysku zasadniczego może mieć dodatkowo wtrysk wstępny, wczesny dotrysk oraz późny dotrysk. Zagadnienia te będą omówione w module związanym z układami zasilania silników ZS.

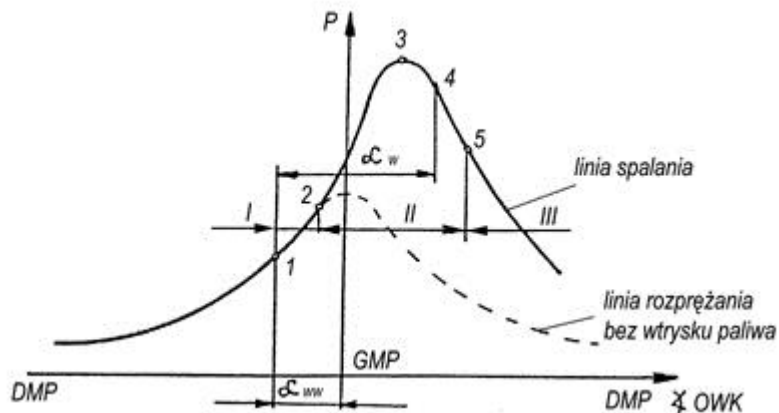
Wtrysk zasadniczy w silniku ZS dzieli się na trzy okresy:

I – okres indukcji, zwany zwłoką zapłonu (między punktami 1 i 2), w którym następuje wtrysk paliwa, jego podgrzanie i odparowanie (trwający ok. 1/500 sekundy);

II – okres rozprzestrzeniania się płomienia od licznych ognisk zapłonu i gwałtowny wzrost ciśnienia;

III – okres dopalania się resztek paliwa. Na wartość ciśnienia spalin w pkt. 3 i gwałtowność jego wzrostu ma wpływ kąt wyprzedzenia wtrysku oraz długość okresu indukcji. Ponieważ im dłuższy jest pierwszy okres, tzn. im więcej paliwa znajduje się w cylindrze w chwili zapłonu, tym gwałtowniejszy jest wzrost ciśnienia w drugim okresie.

Rys. 1.7. Wykres przebiegu spalania w silniku z zapłonem samoczynnym
 I, II, III – okresy spalania, 1 – początek wtrysku, 2 - samozapłon, 3 – punkt maksymalnego ciśnienia spalin, 4 – koniec wtrysku, 5 – początek dopalania się resztek paliwa, *OWK* – obroty wału korbowego, α_{ww} – kąt wyprzedzenia wtrysku, α_w – kąt wtrysku



Źródło: http://autowiedza.republika.pl/proc_spal_w_zs.html.

Na długość III okresu ma wpływ kąt wyprzedzenia wtrysku, czyli kąt obrotu wału korbowego między momentem, w którym rozpoczyna się wtrysk paliwa w silniku wysokopiętnym, a położeniem, gdy tłok osiągnie GMP. Kąt wyprzedzenia wtrysku jest konieczny, aby mieszanka miała czas na pełne zapalenie się.

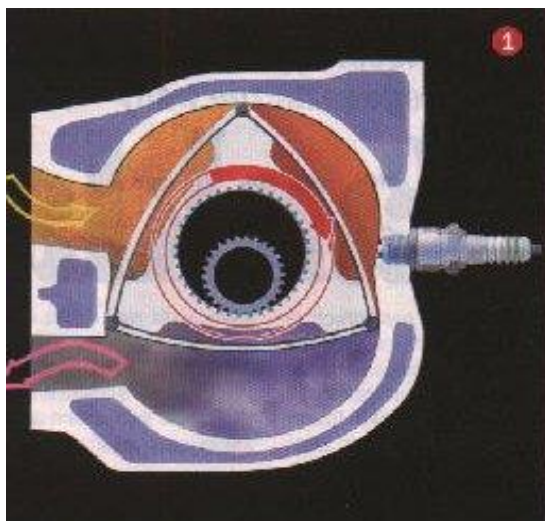
Silnik Wankla

Zamiast cylindrów, które są zazwyczaj stosowane, silnik Wankla ma komory spalania z obrotowymi tłokami (stąd nazwa silnik rotacyjny lub z wirującym tłokiem). Wewnątrz tłoka znajduje się wał, który umożliwia przekazanie napędu do skrzyni biegów i dalej na koła. Silnik Wankla nie ma zaworów, jego konstrukcja jest prosta, ale zużywa on duże ilości paliwa, a szybko zużywające się uszczelnienia tłoka to jego główna wada. Silnik ten pracuje według czterech faz cyklu Otta, czyli jest **czterosuwowy**.

W przeciwieństwie do typowego silnika tłokowego mieszanka paliwowo-powietrzna jest przetłaczana z miejsca na miejsce, w związku z tym cztery fazy cyklu (suwy, choć tu nic się nie suwa, tylko kręci) przebiegają w różnych miejscach silnika.

Faza I – ssanie (rys. 1.8) – w cyklu pracy rozpoczyna się wtedy, gdy wierzchołek rotora mija okno kanału ssącego. W momencie gdy okno kanału wlotowego otwiera się na komorę, objętość komory jest bliska minimum. Gdy rotor wciąż się obraca, objętość komory rośnie, powodując wciągnięcie mieszanki paliwowo-powietrznej do komory. Gdy następny wierzchołek rotora mija okno kanału ssącego, komora się zamyka i rozpoczyna się sprężanie.

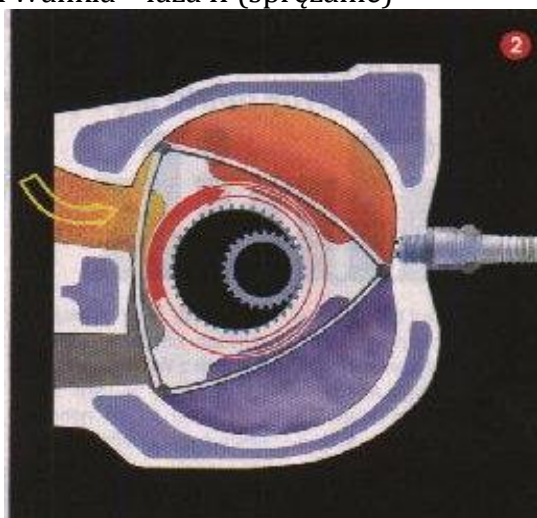
Rys. 1.8. Silnik Wankla – faza I (ssanie)



Źródło: Materiały własne.

Faza II – sprężanie (rys. 1.9) – gdy rotor kontynuuje swój ruch w komorze silnika, objętość komory zmniejsza się i mieszanka paliwowo-powietrzna się spręża. W tym czasie ścianka rotora przemieszcza się przed świecami zapłonowymi, a objętość komory jest ponownie najbliższa minimum. Wtedy następuje zapłon.

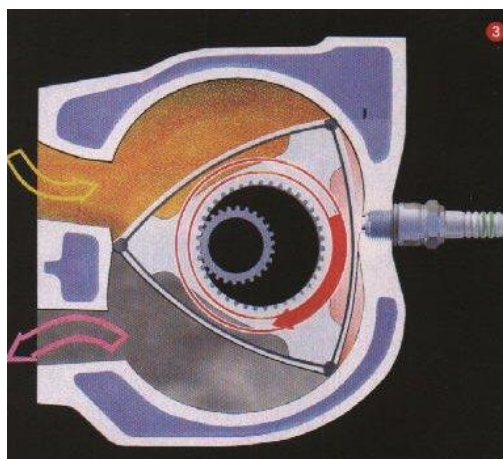
Rys. 1.9. Silnik Wankla – faza II (sprężanie)



Źródło: Materiały własne.

Faza III – praca (rys. 1.10) – większość silników rotacyjnych ma dwie świece zapłonowe. Komora spalania jest długa, a więc czoło płomienia rozprzestrzeniałoby się zbyt wolno, gdyby była tam tylko jedna świeca. Gdy świece zapłonowe zapalają mieszankę paliwowo-powietrzną (sekwencyjnie, odpalają się jedna po drugiej), ciśnienie szybko rośnie, zmuszając rotor do ruchu. Ciśnienie spalanej mieszanki zmusza rotor do ruchu w kierunku, który spowoduje wzrost objętości komory. Gazy spalinowe rozprężają się, poruszając rotor i wytwarzając energię, zanim wierzchołek rotora nie minie okna kanału wydechowego.

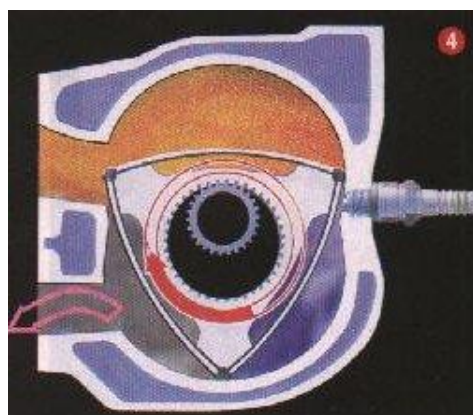
Rys. 1.10. Silnik Wankla – faza III (praca)



Źródło: Materiały własne.

Faza IV – wydech (rys. 1.11) – gdy tylko wierzchołek rotora minie okno kanału wydechowego, sprężone gazy spalinowe mogą swobodnie wydostać się na zewnątrz. Gdy rotor się obraca, komora kurczy się, wyłaczając resztę gazów spalinowych przez okno kanału wydechowego. W tym czasie objętość komory zbliża się do minimum, wierzchołek rotora mija okno kanału ssącego i cały cykl rozpoczyna się od nowa.

Rys. 1.11. Silnik Wankla – faza IV (wydech)



Źródło: Materiały własne.

Główne elementy silnika Wankla

- **Rotor**

Rotor (rys. 1.12) ma trzy wypukłe ścianki, a każda z nich ma w sobie zagłębienie zwiększające pojemność skokową silnika, gdyż każda z nich działa jak tłok i umożliwia dostanie się większej ilości mieszanki paliwowej. Na obu końcach każdej ze ścianek znajduje się metalowa listwa, która uszczelnia punkt styku rotora z komorą spalania, tak jak pierścienie w silnikach tłokowych. Na każdej z powierzchni bocznych rotora znajdują się pierścienie uszczelniające boki komory spalania. Wewnątrz rotora, po jednej stronie znajduje się również wewnętrzne koło zębate z zębami skierowanymi do środka. Zazębiają się one z przekładnią zamocowaną do obudowy. To połączenie kół zębatach wymusza tor ruchu i kierunek, w jakim rotor obraca się w komorze.

Rys. 1.12. Rotor z silnika Wankla



Źródło: Materiały własne.

Komora silnika

Komora silnika (rys. 1.13) ma owalny kształt (jest to epitrochoida, czyli bardzo gruba ósemka). Kształt komory spalania został tak pomyślany, aby trzy wierzchołki rotora zawsze pozostawały w kontakcie ze ścianami komory, tworząc trzy szczelne zbiorniki gazu. Każda część komory odpowiada za jedną część procesu pracy. Kanały ssący i wydechowy są umieszczone w obudowie. W tych kanałach nie ma zaworów (podobnie jak w silniku dwusuwowym). Okno kanału wydechowego łączy się bezpośrednio z systemem wydechowym, a ssącego – z kolektorem dolotowym.

Rys. 1.13. Komora spalania z silnika Wankla



Źródło: Materiały własne.

Wał napędowy

Wał napędowy (rys. 1.14) ma wymodelowane krzywki o przekroju walcowym, umieszczone mimośrodowo, czyli przesunięte względem osi podłużnej wału. Każdy rotor jest nałożony na jedną z nich. Działają one podobnie jak wał korbowy w silniku tłokowym. Gdy rotor obraca się w komorze silnika i toczy się po nieruchomym kole zębatym, popycha krzywki. Ponieważ są one zamontowane mimośrodowo względem wału napędowego, siła wywierana przez rotor na krzywki wytwarza moment obrotowy wału, przez co jest on wprawiany w ruch obrotowy.

Rys. 1.14. Wał napędowy z silnika Wankla

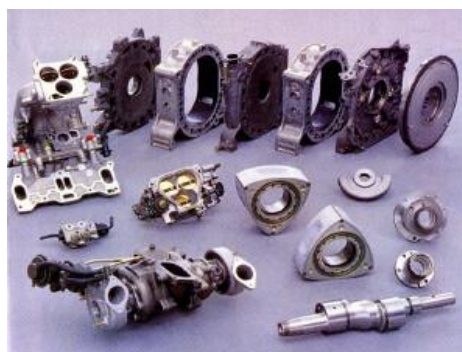


Źródło: Materiały własne.

Silnik rotacyjny jest pakietem złożonym z warstw. Silnik dwurotorowy ma pięć głównych warstw, które w całości utrzymuje komplet długich śrub. Chłodziwo przepływa kanałami przechodzącymi przez wszystkie części. Dwie warstwy zamykające z obu końców zawierają uszczelki i łożyska wału napędowego. One również łączą się szczelnie z dwiema dalszymi warstwami, w których są umieszczone rotory.

Powierzchnia wewnętrzna części czołowych ma dużą gładkość, co ułatwia działanie bocznych pierścieni uszczelniających w rotorach. Okna kanału ssącego są umieszczone w każdej z części skrajnych silnika dwurotorowego. Następną warstwą, patrząc z zewnątrz, są warstwy zawierające rotory. One również są pokryte gładkim metalem i znajdują się w nich okna kanałów wylotowych. Część środkowa pakietu zawiera dwa okna kanałów ssących, jeden dla każdego rotora. Rozdziela również oba rotory, w związku z tym jej zewnętrzne powierzchnie muszą być bardzo gładkie. Pośrodku każdego rotora znajduje się również duże wewnętrzne koło zębate, które toczy się wokół mniejszego koła zębatego, zamocowanego do bloku silnika. To właśnie determinuje orbitę rotora. Rotor obraca się również na dużej, walcowej krzywce na wale korbowym.

Rys. 15. Elementy silnika Wankla



Źródło: Materiały własne.

W kolejnym module poznamy budowę silników spalinowych. Najpierw zostaną przedstawione informacje dotyczące konstrukcji głównych elementów, z których zbudowany jest każdy silnik, bez względu na to, czy jest to silnik z zapłonem samoczynnym, czy z zapłonem iskrowym. Omówione zostaną również kadłuby i głowice.