Część 3

1. SPALNIE W SILNIKACH, PALIWA
2. SPALINY

Na podstawie niżej zamieszczonego materiału odpowiedz na pytania:

1. Co to jest spalanie stukowe(detonacyjne)?
2. Jakie znasz szkodliwe(toksyczne)składniki spalin?

Odpowiedzi prześlij na adres: aglanc@ckz.swidnica.pl

TERMIN: 06.05.2020

1.2.2. Silnik o zapłonie samoczynnym

Silnik o zapłonie samoczynnym jest maszyną spalania wewnętrznego, tak jak silnik o zapłonie iskrowym.

1.2.2.1. Budowa silników o zapłonie samoczynnym

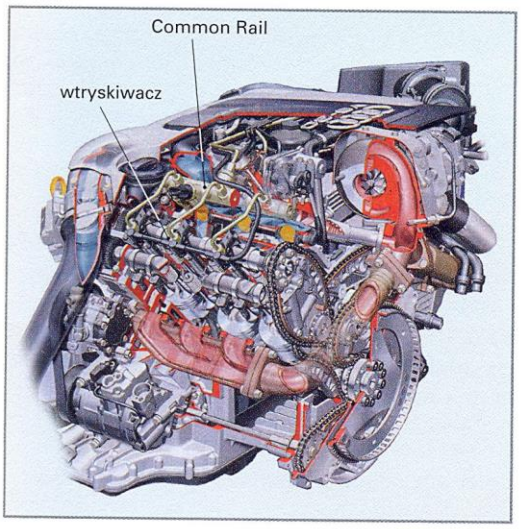
Silnik o zapłonie samoczynnym **(rys. 1)** składa się podobnie jak silnik o zapłonie iskrowym z czterech zasadniczych zespołów konstrukcyjnych i układów dodatkowych, są to:

- Blok silnika
- Mechanizm korbowy
- Układ rozrządu
- Układ zasilania w paliwo z pompą podającą, filtrem, wysokociśnieniowym układem wtryskowym, np.:
  - system Common Rail
  - system pompowtryskiwaczy
- Układy dodatkowe:

układ smarowania, układ chłodzenia, układ wylotowy, układ doładowania, np. z turbosprężarką, chłodzeniem powietrza doładowującego, układ ułatwiający rozruch zimnego silnika, np. układ świec żarowych.

Trakcyjny szybkoobrotowy silnik o zapłonie samoczynnym o maksymalnej prędkości obrotowej do 5500 min^{-1} jest montowany w samochodach osobowych i lekkich dostawczych samochodach użytkowych. W ciężarowych samochodach użytkowych montuje się silniki wolnoobrotowe (prędkość maksymalna do 2200 min^{-1}).

Silniki o zapłonie samoczynnym mają w porównaniu do silników o zapłonie iskrowym aż do 30 % mniejsze zużycie paliwa. Ich sprawność całkowita osiąga 46%.



Rys. 1. Trakcyjny silnik o zapłonie samoczynnym do samochodów osobowych

1.2.2.2. Cechy charakterystyczne silników o zapłonie samoczynnym

- **Praca**

  Silnik pracuje zasilany olejem napędowym lub olejem napędowym z domieszką paliwa pochodzenia roślinnego (np. ester metylowy oleju rzepakowego).
- **Tworzenie mieszanki palnej w komorze spalania**

  Podczas suwu dolotu do cylindra dostaje się jedynie powietrze. Mieszanka paliwowo-powietrzna powstaje w wyniku wtryśnięcia paliwa pod wysokim ciśnieniem do cylindra w czasie suwu sprężania.
- **Samozapłon**

  Paliwo zapala się samoczynnie w momencie wtryśnięcia do cylindra wskutek kontaktu z bardzo gorącym sprężonym powietrzem. Temperatura, którą osiąga powietrze na końcu suwu sprężania, jest wyższa od temperatury samozapłonu.
- **Zmiana nastaw silnika**

  Silnik wolnossący o zapłonie samoczynnym nie ma przepustnicy przed kolektorem dolotowym. W związku z tym przy tych samych obrotach silnik jest zasilany taką samą ilością powietrza niezależnie od obciążenia. Dostrojenie silnika do aktualnego zapotrzebowania na moc następuje w wyniku zmiany ilości paliwa wtryskiwanego do komór spalania.

Tworzenie mieszanki palnej wewnątrz komory spalania

Przed zakończeniem rozpoczętego procesu wtryskiwania ciekłe paliwo musi utworzyć zdolną do samozapłonu mieszankę paliwowo-powietrzną. W tabeli 1 przedstawiono kolejne fazy, począwszy od momentu rozpoczęcia wtrysku aż do samozapłonu paliwa. Podczas tworzenia mieszanki wewnątrz komory spalania gorące powietrze ochładza się wskutek wtryśnięcia paliwa. Jednakże końcowa temperatura mieszanki musi być zawsze wyższa od temperatury jej samozapłonu. Czas, który mija od rozpoczęcia procesu wtrysku do inicjacji samozapłonu, jest nazywany zwłoką zapłonu.

Tabela 1. Tworzenie mieszanki wewnątrz komory spalania i rozpoczęcie samozapłonu

Czas trwania zwłoki zapłonu	Paliwo zostaje wtryśnięte do gorącego powietrza i pozostaje w postaci zawiesiny płynnych drobin (mgła paliwowa).
Pozyskiwanie ciepła z gorącego powietrza	Mgła paliwowa ogrzewa się do temperatury parowania.
	Paliwo odparowuje, osiągnąwszy temperaturę parowania.
	Pary paliwa mieszają się z gorącym powietrzem.
	Pary paliwa ogrzewają się do momentu osiągnięcia temperatury samozapłonu.
	Mieszanka paliwowo-powietrzna ulega samozapłonowi.
	Wyzwolenie procesu spalania

1

Silniki z dzieloną komorą spalania

Paliwo jest wtryskiwane do pomocniczej komory spalania (komora wirowa lub wstępna). W wyniku podziału komory spalania powstaje duża powierzchnia wymiany ciepła z otoczeniem, co powoduje konieczność wprowadzenia wyższego stopnia sprężania, aby, rekompensując straty ciepła, zapewnić przekroczenie temperatury samozapłonu mieszanki. Stopień sprężania ε w silnikach z dzieloną komorą spalania jest równy 19 ÷ 30.

Silniki z wtryskiem bezpośrednim (silniki DI)

Paliwo jest wtryskiwanie bezpośrednio do komory spalania nad tłokiem. Powietrze ogrzane w wyniku sprężania do 900 °C traci niewiele ciepła w kompaktowej komorze o małej powierzchni ścian wewnętrznych, dlatego możliwe jest stosowanie w tych silnikach mniejszych stopni sprężania. Silniki o wtrysku bezpośrednim przeznaczone do samochodów osobowych mają stopień sprężania ε równy 14 ÷ 20. W wypadku silników z wtryskiem bezpośrednim przeznaczonych do samochodów dostawczych jest równy 14 ÷ 19.

1.2.3. Uwagi na temat silników o zapłonie iskrowym

- **Praca.** Silnik pracuje zasilany benzyną lub gazem.
- **Tworzenie mieszanki palnej**

Zewnętrzne tworzenie mieszanki palnej. Mieszanka paliwowo-powietrzna powstaje w gaźniku lub kolektorze dolotowym poza cylindrem.

Wewnętrzne tworzenie mieszanki palnej. Podczas suwu dolotu do cylindra zasysane jest jedynie powietrze. Mieszanka paliwowo-powietrzna powstaje w wyniku wtrysku paliwa do cylindra pod koniec suwu dolotu lub w trakcie suwu sprężania.

- **Zapłon obcowzbudny**
- **Spalanie przy stałej objętości**

W wyniku gwałtownego przebiegu proces spalania zachodzi w chwilowej objętości komory spalania.

- **Regulacja mocy**

Ilość mieszanki paliwowo-powietrznej zmienia się wprost proporcjonalnie do nastawy przepustnicy i jest zależna od obciążenia.

Napełnienie

Przez pojęcie „napełnienie" rozumie się ilość gazu (mieszanki paliwowo-powietrznej lub powietrza), jaka została doprowadzona do cylindra

Poprawa napełnienia. Aby poprawić napełnienie, a tym samym i moc silnika, można przedłużyć czas otwarcia zaworu dolotowego ze 135° OWK (w zależności od skoku tłoka) do 315° OWK. Podczas suwu wydechu gazy wylotowe poruszające się z dużą prędkością wywołują działanie ssące. Jeżeli zawór dolotowy zostanie otwarty przed osiągnięciem zwrotu zewnętrznego ZZ, to mieszanka lub powietrze może przeciwdziałać ruchowi tłoka wskutek wystąpienia podciśnienia w cylindrze.

Współprzekrycie zaworów

W fazie przejściowej (współprzekrycia zaworów) między suwem wylotu a suwem dolotu otwarty jest zarówno zawór wylotowy, jak i dolotowy.

Jeżeli zawór dolotowy pozostanie otwarty podczas suwu sprężania, to mieszanka paliwowo-powietrzna zasysana z prędkością 100 m/s (360 km/h) będzie wciąż napływała wskutek bezwładności swojej masy. Ten efekt doładowania kończy się wtedy, gdy w wyniku ruchu tłoka powstaje ciśnienie, które wyhamowuje mieszankę. Jest to ostatni moment, kiedy zawór dolotowy powinien zostać zamknięty. W wyniku przedłużenia czasu dolotu napełnienie cylindra w silniku niedoładowanym osiąga wartości większe o 80 %.

1.3. Stopień sprężania

Przestrzeń spalania. Jest to objętość ograniczona cylindrem, głowicą cylindrową i denkiem tłoka. Jej wielkość podczas skoku tłoka ulega ciągłym zmianom. Przestrzeń spalania jest największa, gdy tłok znajduje się w położeniu ZW, a najmniejsza, gdy osiąga położenie ZZ. Największa objętość przestrzeni spalania jest sumą objętości skokowej silnika i objętości komory spalania.

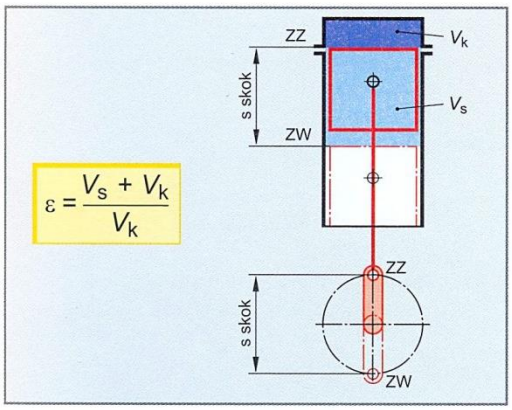
Komora spalania V_k. Jest to najmniejsza przestrzeń spalania.

Objętość skokowa V_s. Jest to przestrzeń zawarta między zewnętrznym zwrotnym położeniem tłoka (ZZ) i wewnętrznym zwrotnym położeniem tłoka (ZW)

Całkowita objętość skokowa V_S. Jest to suma objętości skokowych wszystkich cylindrów danego silnika spalinowego.

Stosunek sumy objętości całkowitej cylindra przed rozpoczęciem procesu sprężania (objętość skokowa V_s i objętości komory spalania V_k) do objętości po zakończeniu procesu (objętość komory spalania V_k) przyjęto za stopień sprężania ε **(rys. 1)**.

$$\text{Stopień sprężania} = \frac{\text{Objętość skokowa + Objętość komory spalania}}{\text{Objętość komory spalania}}$$



Rys. 1. Stopień sprężania

Tabela 1. Porównanie stopni sprężania

Stopień sprężania	7	9
Końcowe ciśnienie sprężania	~ 1,0 MPa	~ 1,6 MPa
Maksymalne ciśnienie spalania	~ 3,0 MPa	~ 4,2 MPa
Ciśnienie podczas otwarcia zaworu wylotowego	~ 0,4 MPa	~ 0,3 MPa
Końcowa temperatura sprężania	400 °C	500 °C

Im wyższy jest stopień sprężania silnika o zapłonie iskrowym, tym lepsze jest wykorzystanie energii zawartej w paliwie, a tym samym wyższa sprawność silnika. Zwiększenie stopnia sprężania do 9, pomimo zwiększenia związanej z tym pracy sprężania, przynosi, przy tym samym stopniu napełnienia, uzysk energetyczny przewyższający 10% i jednocześnie spadek zużycia paliwa o około 10%.

Możliwości zwiększenia mocy silnika:

- dokładniejsze opróżnienie komory spalania ze spalonych gazów;
- podwyższenie temperatury podczas sprężania oraz pełniejsze odparowanie paliwa;
- podwyższenie stopnia sprężania, które pozwala na rozprężenie gazów spalinowych do większej objętości, dzięki czemu temperatura gazów spalinowych zmniejsza się; w efekcie mniej energii cieplnej idzie na straty razem ze spalinami.

Wraz ze wzrostem stopnia sprężania rośnie również końcowa temperatura sprężania (**tabela 1**). Najniższy stopień sprężania jest ograniczony przez temperaturę samozapłonu paliwa. Jednakże w silnikach doładowanych sprężanie jest mniejsze, ponieważ powietrze trafia do cylindra już wstępnie sprężone.

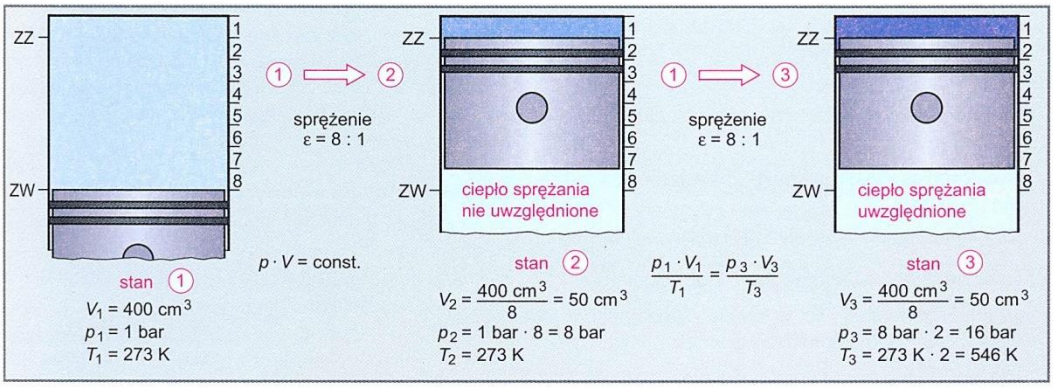
1.4. Zasady działania silnika czterosuwowego i dwusuwowego. Prawo Boyle'a – Mariotta

Ruch posuwisto-zwrotny tłoka w cylindrze wraz ze zmianą objętości wywołuje zmianę ciśnienia i temperatury.

Już w XVII wieku fizycy Boyle i Mariotte stwierdzili, że objętość danej masy gazu w stałej temperaturze zmienia się odwrotnie proporcjonalnie do ciśnienia.

Na przykład: gdy objętość zmniejsza się ośmiokrotnie, to ciśnienie zwiększa się również ośmiokrotnie. **(rys. 2)**

Iloczyn objętości i ciśnienia jest wartością stałą (constans).



Rys. 2. Porównanie ciśnienia, objętości i temperatury w trakcie suwu sprężania

1

1.8. Współczynnik napełnienia cylindra

Współczynnik napełnienia jest to iloraz rzeczywistej masy w *kg* zassanej mieszanki paliwowo-powietrznej do masy tej mieszanki, która teoretycznie jest możliwa do napełnienia cylindra.

W wypadku tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej wewnątrz cylindra jest to iloraz rzeczywistej ilości w *kg* zassanego powietrza do ilości powietrza, która teoretycznie jest możliwa do napełnienia cylindra.

$$\lambda_L = \frac{m_z}{m_t}$$

λ_L współczynnik napełnienia

m_z ilość zassanego powietrza lub mieszanki paliwowo-powietrznej w *kg*

m_t teoretycznie możliwa masa świeżego powietrza lub mieszanki paliwowo-powietrznej w *kg*

W silnikach wolnossących współczynnik napełnienia osiąga wartość 0,6 ÷ 0,9 (napełnienie 60% ÷ 90%), podczas gdy w silnikach doładowanych możliwe jest uzyskanie wyższych wartości współczynnika napełnienia: 1,2 ÷ 1,6 (napełnienie 120% ÷ 160%).
Napełnianie może być poprawiane poprzez zmniejszenie oporów przepływu, jak również poprzez obniżenie temperatury wewnątrz cylindra. Wymaga to:

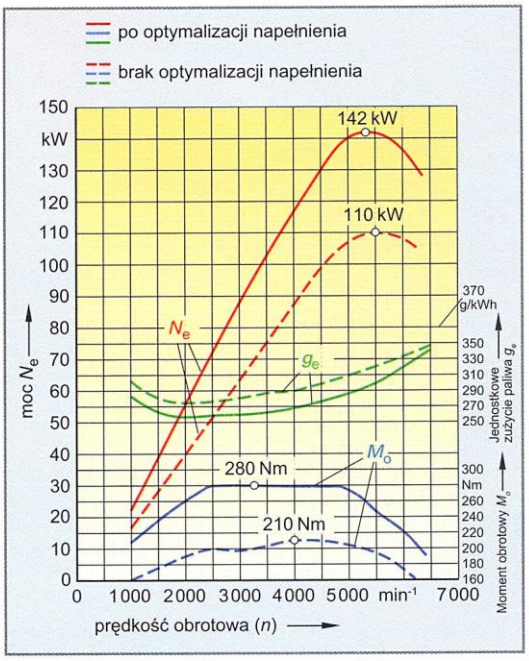
- optymalizacji układu dolotowego,
- odpowiedniego kształtu komory spalania,
- dużej powierzchni przekroju dolotu,
- większej liczby zaworów dolotowych,
- dobrego chłodzenia.

Napełnienie pogarsza się w wyniku:
- oporów przepływu przepustnicy,
- skracania się czasu otwarcia zaworów wraz ze zwiększaniem się prędkości obrotowej silnika,
- niskiego ciśnienia powietrza otaczającego silnik. Zwiększenie wysokości o 100 m n.p.m. powoduje spadek mocy silnika o 1%.

1.8.1. Optymalizacja napełnienia silnika

Przez pojęcie „optymalizacja napełnienia" rozumie się napełnienie cylindra świeżym ładunkiem z wykorzystaniem układu rozrządu o zmiennych fazach oraz wznosie i/lub doładowaniu silnika w możliwie maksymalnym zakresie obrotów użytecznych.

Zalety (rys. 1):
- większa moc,
- ulepszony przebieg momentu obrotowego w określonym zakresie obrotów,
- zmniejszona zawartość szkodliwych składników spalin,
- zmniejszone zużycie paliwa w wyniku poprawy w tworzeniu mieszaniny palnej.



Rys. 1. Charakterystyka zewnętrzna silnika

1.9. Doładowanie (regulacja napełnienia) silników

Moc silnika i jego moment obrotowy są uzależnione od ilości powietrza w świeżym ładunku dostarczonym do komory spalania podczas suwu dolotu.

Tabela 1. Współczynniki napełnienia silników wolnossących i doładowanych

Rodzaj silnika	Współczynnik napełnienia
Silnik wolnossący czterosuwowy	0,7 ÷ 0,9
Silnik wolnossący dwusuwowy	0,5 ÷ 0,7
Silnik doładowany	1,2 ÷ 1,6

Współczynnik napełnienia silnika można zwiększyć za pomocą systemu doładowania. Dzięki temu systemowi do komory spalania dostarczana jest większa masa powietrza i może być spalona większa ilość paliwa.
Zagadnienie doładowania omówiono szerzej w rozdziałach 11.10 i 11.11.

2. Proces spalania w silnikach

2.1. Podstawowe wiadomości o paliwach

Paliwa składają się z mieszaniny węglowodorów różniących się swą budową molekularną. Budowa i wielkość molekuły, jak również liczba atomów wodoru i węgla są podstawą zachowania się paliwa podczas procesu spalania w silniku. Czysty wodór również znajduje zastosowanie jako paliwo.

Budowa

Cząsteczka węglowodoru ma budowę łańcuchową lub pierścieniową (rys. 1). Cząsteczka w najprostszej łańcuchowej formie (parafina lub olefina) jest łatwo zapalna i palna. Z tego powodu w silniku o zapłonie iskrowym zachodzi proces spalania stukowego.

Olefiny różnią się od parafin podwójnym wiązaniem pomiędzy dwoma atomami węgla. W silnikach o zapłonie samoczynnym węglowodory te spalają się łatwo, nie wywołując spalania stukowego. Cząsteczki z łańcuchem zewnętrznym (izomery) lub w formie pierścieniowej (aromatyczne i cykloparafiny) nie są tak łatwo zapalne. W silnikach o zapłonie iskrowym są one odporne na spalanie stukowe, a w silnikach o zapłonie samoczynnym, z powodu znacznej zwłoki zapłonu, sprzyjają spalaniu stukowemu.

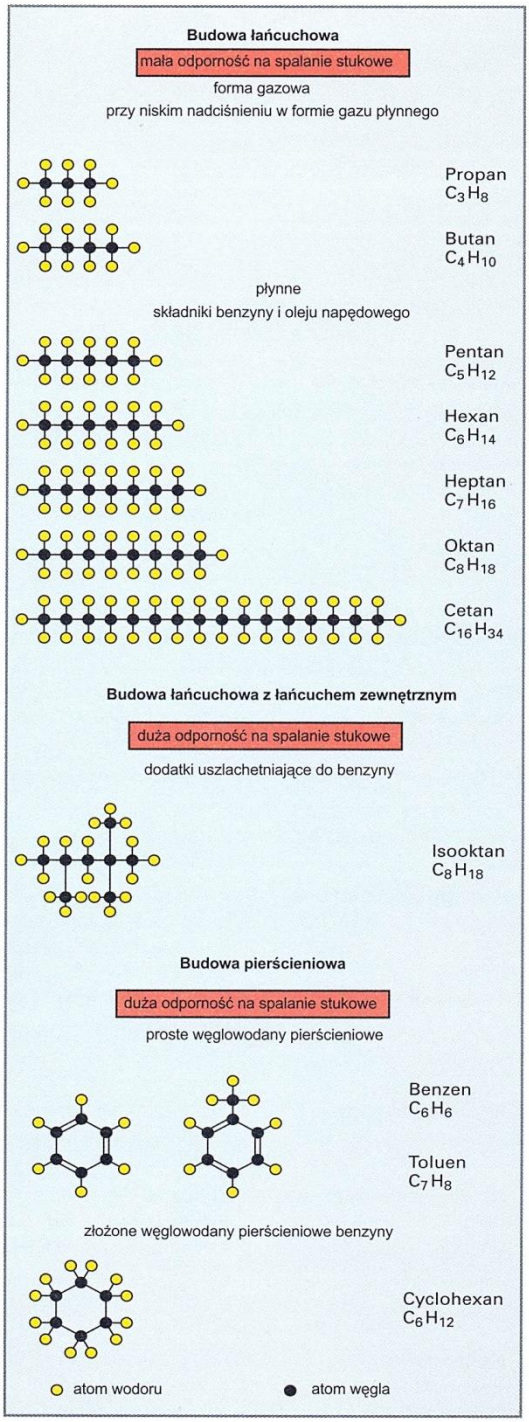
Otrzymywanie

Najpowszechniejszym i najważniejszym w świecie produktem wyjściowym do otrzymywania paliw jest ropa naftowa. Według wiedzy na dzień dzisiejszy ten nośnik energii chemicznej powstał w ciągu milionów lat w wyniku przemiany obumarłych i osadzonych na dnie organizmów mieszkańców mórz, które stanowiły zasobnik zgromadzonej energii słonecznej.

Nie wszystkie węglowodory wchodzące w skład ropy naftowej nadają się na paliwo do silników o zapłonie iskrowym i samoczynnym. Większość z nich musi być wcześniej poddana przekształceniom chemicznym.

Produkty końcowe wytwarza się w rafineriach dwoma metodami:

1. **rozdzielania,** np.: destylacja, filtrowanie,
2. **przekształcania,** np.: kraking, reforming.



Rys. 1. Budowa cząsteczkowa węglowodorów

TABELA 1. PROCESY PRZEKSZTAŁCANIA		
Reforming	Przekształcanie w obecności katalizatora (platyna: platformowanie benzyn) parafin łańcuchowych powstałych w wyniku destylacji w odporne na spalanie stukowe izoparafiny i węglowodory aromatyczne.	**LO 93 ÷ 98**
Polimeryzacja	Łączenie w obecności katalizatora węglowodorów gazowych powstałych podczas krakingu i reformingu w większe molekuły, przede wszystkim w izoparafiny. Proces przekształcania prostołańcuchowych parafin w izoparafiny nazywa się izomeryzacją.	**LO 95 ÷ 100**
Hydrogenizacja (uwodornianie)	Przyłączanie atomów wodoru do nienasyconych olefin w celu otrzymania stabilnych i odpornych na spalanie stukowe izoparafin.	**LO 92 ÷ 94**
Alkalizacja	Proces łączenia olefin i parafin, który prowadzi do powstania izoparafin odpornych na spalanie stukowe.	**LO 92 ÷ 94**

Procesy uszlachetniania

Paliwa otrzymywane w procesie rafinacji paliwa, które są odporne na spalanie stukowe, na dalszym etapie są poddawane procesom uszlachetniania. W trakcie tych procesów osiągany jest wyższy stopień czystości paliw: usuwane są pozostałości po formingu, siarka i rozpuszczone żywice, dodawane są natomiast komponenty zapobiegające skłonności do tworzenia osadów, odbarwiania, oblodzenia, spalania stukowego i korozji.

2.2. Charakterystyka paliw stosowanych do zasilania silników

2.2.1. Paliwa do silników o zapłonie iskrowym

Proces parowania, krzywa parowania

Paliwa do silnika o zapłonie iskrowym muszą łatwo i w pełni odparowywać. Lotność paliw przedstawia krzywa parowania **(rys. 1)**. Praktycznie biorąc, lotność paliwa w zakresie temperatury parowania od 40° C do 50° C musi być taka, aby zimny silnik mógł być łatwo uruchomiony zimą, a latem w gorącym silniku nie doszło do gwałtownego odparowywania paliwa. W temperaturze 180° C 90% objętości paliwa powinno się znajdować w stanie lotnym, jednocześnie paliwo nie powinno rozcieńczać oleju smarującego, szczególnie wtedy, kiedy silnik jest zimny. Z uwagi na zewnętrzne warunki temperaturowe, krzywa parowania latem powinna leżeć powyżej krzywej parowania zimą.

Uruchamianie zimnego silnika (zimny start)

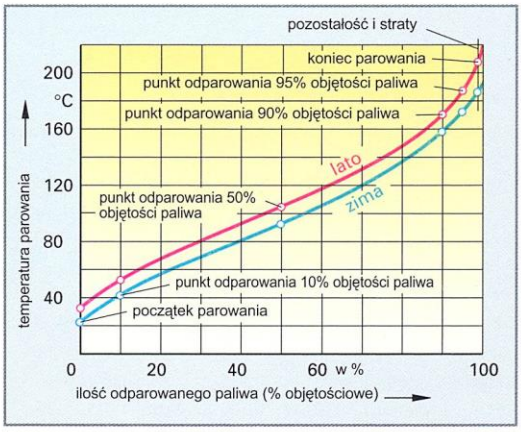
Aby można było łatwo uruchomić zimny silnik i w niskich temperaturach podtrzymać jego pracę na biegu jałowym, potrzebne jest paliwo o małej krzywej parowania.

Punkt odparowania 10% objętości paliwa (rys.1) oznacza, że w danej temperaturze 10% objętościowych paliwa uległo odparowaniu.

Prawidłowy zimny start wymaga, aby w temperaturze 40° C ÷ 50° C co najmniej 10% paliwa uległo odparowaniu. Jeżeli jednak krzywa parowania będzie leżała zbyt nisko, to może dojść do tworzenia się korków parowych.

Uruchamianie silnika gorącego (gorący start)

Gdy silnik jest gorący, a także latem, paliwo powinno być trudne do odparowania (wysoka krzywa parowania). Jest to osiągalne dzięki dodaniu określonej ilości trudno parujących wysokoenergetycznych paliw. Ten dodatek paliw po przekroczeniu punktu odparowania 90% objętości paliwa pozostaje w stanie płynnym. Pozostałe 90% objętości paliwa w danej temperaturze przechodzi w stan lotny. Zbyt duży dodatek paliwa trudno parującego może powodować jego kondensację na ściankach komory spalania i w efekcie rozrzedzanie oleju smarującego.



Rys. 1. Krzywa parowania paliw do silnika o zapłonie iskrowym

Odporność na spalanie stukowe (BLO, MLO)

Wysoka temperatura zapłonu paliw do silników o zapłonie iskrowym odpowiada dużej ich odporności na spalanie stukowe. Miarą odporności na spalanie stukowe jest Badawcza Liczba Oktanowa (BLO) i Motorowa Liczba Oktanowa (MLO). Obie liczby oktanowe są mierzone w badawczym silniku o zmiennym stopniu sprężania, w wyniku porównania jego wskaźników pracy podczas zasilania paliwem bazowym, składającym się z izooktanu (LO = 100) i n-heptanu (LO = 0), oraz paliwem badanym. Badane paliwo osiąga LO = 95, wtedy gdy jego odporność na spalanie stukowe jest taka sama jak mieszaniny 95% izooktanu i 5% n-heptanu. Motorowa Liczba Oktanowa jest mniejsza niż Badawcza Liczba Oktanowa, ponieważ mierzy się ją przy wyższej prędkości obrotowej i w temperaturze mieszanki około 150° C.

Benzyna bezołowiowa

Pojazdy wyposażone w katalizatory wymagają zastosowania paliw bezołowiowych. Użycie benzyny ołowiowej (etyliny) powoduje osadzanie się związków ołowiu zawartych w spalinach w przestrzeniach katalizatora i jego zatykanie. To prowadzi do sytuacji, w której szkodliwe związki zawarte w spalinach już nie mogą być zmienione w związki nieszkodliwe. Z tego powodu zawartość ołowiu w paliwie bezołowiowym jest ograniczona do maksimum 13mg/litr.

Wraz ze zmniejszaniem zawartości ołowiu w paliwie zmniejsza się również jego liczba oktanowa. A zatem już na etapie wytwarzania paliwa bezołowiowego konieczne jest dodanie, w procesach reformingu, polimeryzacji i alkalizacji, większej ilości dodatków zapobiegających spalaniu stukowemu. Niezbędną liczbę oktanową osiąga się przede wszystkim w wyniku dodania **antydetonatorów**, czyli dodatków przeciwstukowych.

Antydetonatory zawierające metale

Antydetonatory te nie są stosowane w Unii Europejskiej z uwagi na powstające w wyniku ich spalania toksyczne składniki spalin: ołów, związki bromu i chloru.

Antydetonatory nie zawierające metali

Węglowodory aromatyczne, takie jak: benzen, toluen i ksylen, osiągają badawczą liczbę oktanową 108 ÷ 112 i dodane do paliw podwyższają sumaryczną liczbę oktanową paliw. Zawartość benzenu, który ma działanie rakotwórcze, jest ograniczona do 5%. Normalna benzyna zawiera przeciętnie 2% benzenu, benzyna super 1%.

Organiczne związki tlenu jako antydetonatory

Alkohole (metanol, etanol), fenole i eter mają niewielkie zastosowanie, gdyż trudno rozpuszczają się w paliwie, cechuje je nieprzyjemny zapach i mają małą wartość opałową. Wartość opałowa to ilość energii uzyskanej w wyniku spalenia jednostki paliwa.

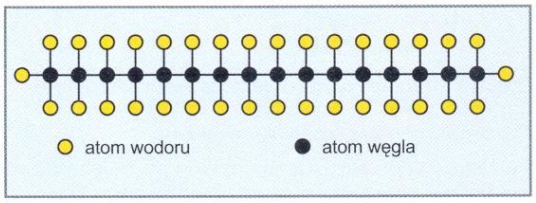
MTB (metyl – trzeciorzędowy – etyl butylowy) jako antydetonator

Z uwagi na dużą liczbę oktanową BLO wynoszącą 110 ÷ 115 MTB znacznie wpływa na podwyższenie wartości LO paliw.

Paliwa do silników o zapłonie iskrowym mają punkt zapłonu poniżej 21° C i tym samym należą do grupy A środków łatwopalnych (najwyższy stopień zagrożenia).

2.2.2. Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym

W przeciwieństwie do paliw przeznaczonych do silników o zapłonie iskrowym paliwa do silników o zapłonie samoczynnym powinny być możliwie łatwo zapalne. Miarą zdolności do samozapłonu jest liczba cetanowa LC. Im więcej jest w paliwie węglowodorów łańcuchowych, tym łatwiejszy jest jego samozapłon. Liczba cetanowa paliwa do silników o zapłonie samoczynnym powinna być większa niż 51. Obecnie LC w paliwach dochodzi do 62. Liczba cetanowa jest określana w silniku badawczym, w którym czas między początkiem wtrysku paliwa a rozpoczęciem samozapłonu jest możliwy do ścisłego określenia (zwłoka zapłonu). Liczba cetanowa badanego paliwa jest określana na podstawie porównania zwłoki samozapłonu z mieszaniną n-cetanu ($C_{16}H_{34}$) **(rys. 1)** o LC 100 i metylonaftaleniu (LC 0). Im wyższa jest liczba cetanowa, tym większa jest skłonność paliwa do samozapłonu.



Rys. 1. Cetan

Dopuszczalna zawartość siarki w paliwie do roku 2005 wynosiła 200 mg/l. W celu ograniczenia emisji dwutlenku siarki podczas spalania paliwa w silnikach o zapłonie samoczynnym po roku 2005 dopuszczalna zawartość siarki została ograniczona do 50 mg/l paliwa. Dopalacz katalityczny redukujący tlenki azotu (NO_x) może być zastosowany, kiedy zawartość siarki w paliwie nie przekracza 50 ppm.

Związane ze zmniejszeniem zawartości siarki pogorszenie właściwości smarnych paliwa do silników o zapłonie samoczynnym musi być zrekompensowane przez dodanie odpowiednich dodatków, które wpływają na poprawę smarowności. Poza zmniejszeniem emisji dwutlenku siarki (SO_2) redukcji podlega również ilość cząstek stałych w spalinach.

Paliwo zimowe do silników o zapłonie samoczynnym

Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym mają właściwość wytrącania kryształów parafiny w niskich temperaturach otoczenia, co prowadzi do zablokowania filtrów paliwa i w konsekwencji unieruchomienia silnika.

Paliwo zimowe do silników o zapłonie samoczynnym w temperaturze do -15° C musi mieć zdolność swobodnego przepływania przez wkłady filtracyjne. Zdolność przepływania paliwa przez filtry ma swoją nazwę Cold Filter Pugging Point (CFPP).

Cold Filter Pugging Point określa temperaturę, w której paliwo do silników o zapłonie samoczynnym tworzy kryształy parafiny o takiej wielkości, żeby w określonym czasie znormalizowana bibuła filtracyjna nie stanowiła dla nich żadnej przeszkody.

Kryształy parafiny mogą być rozpuszczone jedynie w wyniku oddziaływania ciepła, doprowadzanego przez zainstalowany w obudowie filtra system podgrzewania paliwa.

Dodatki do paliwa (poprawiające płynność) nie zapobiegają tworzeniu się parafiny, lecz skutecznie spowolniają szybkość wzrostu jej kryształów i jeśli temperatura nie przekroczy -20° C przepływ paliwa przez filtry jest możliwy.

Dodawanie benzyny do oleju napędowego jest niedopuszczalne, ponieważ:

- smarowanie wysokociśnieniowej aparatury paliwowej jest niewystarczające,
- wytwórcy silników spalinowych nie dopuszczają takiego postępowania, w wypadku uszkodzenia skutkuje ono utratą gwarancji,
- powoduje pogorszenie zdolności do samozapłonu paliwa do silników o zapłonie samoczynnym, wskutek kondensacji paliwa na ściankach komory spalania, a w efekcie rozrzedzenie oleju smarującego i zmniejszenie szczelności układu Tłok – Pierścienie tłokowe – Cylinder (TPC),
- powoduje wzrost zużycia paliwa,
- zmienia się punkt zapłonu, a mieszanina staje się łatwopalna i trafia do I klasy produktów łatwopalnych.

Podczas dodawania nafty do oleju napędowego w celu polepszenia jego płynności należy uwzględnić odpowiednie przepisy wytwórcy paliwa.

Ekopaliwa do silników o zapłonie samoczynnym; biodiesel

Wytwarzane są z oleju rzepakowego, także z przekwitniętego surowca (ester metylowy oleju rzepakowego).

Stosując te paliwa w silniku o zapłonie samoczynnym, należy zwrócić uwagę, czy jest on przystosowany do spalania takiego paliwa. W przeciwnym razie węże z tworzyw sztucznych i uszczelki mogą ulec degradacji i stracić szczelność.

Ekopaliwa cechują się hydroskopijnością, to znaczy, że rozpuszczają w sobie wodę. Działają na lakier samochodowy tak jak rozpuszczalnik, dlatego nie wolno dopuścić do kontaktu ekopaliwa z powłoką lakierniczą.

Podczas spalania w silniku pozostaje więcej niespalonych węglowodorów i powstaje większa ilość tlenku węgla oraz cząstek stałych niż przy spalaniu w tym samym silniku oleju napędowego. Udział tlenków azotu jest nieco większy. Spalanie ekopaliw nie powoduje wzrostu zawartości CO_2 w atmosferze, gdyż zostaje on jedynie uwolniony z roślin w tej samej ilości, w jakiej był z niej zaabsorbowany.

Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym mają punkt zapłonu w granicach 55 °C ÷ 100 °C i znajdują się w grupie A środków łatwopalnych w klasie III.

PYTANIA SPRAWDZAJĄCE

1. **Z jakich surowców powstają paliwa silnikowe?**
2. **Jakie się rozróżnia dwa podstawowe rodzaje budowy molekuł paliw silnikowych?**
3. **Jaka forma budowy molekuły paliwa jest najbardziej odporna na spalanie stukowe?**
4. **Co oznacza skrót BLO?**
5. **Dlaczego paliwa muszą być wytwarzane w procesie destylacji?**
6. **Co oznacza na krzywej parowania paliwa do silnika o zapłonie iskrowym punkt 90% obj.?**
7. **W jaki sposób jest osiągana w paliwach wymagana liczba oktanowa?**
8. **Jakie cechy posiadają paliwa do silników o zapłonie samoczynnym?**
9. **Jakie węglowodory aromatyczne mają zastosowanie jako dodatki przeciwstukowe w paliwach?**
10. **Jak jest określana zdolność do samozapłonu paliwa do silników o zapłonie samoczynnym?**
11. **Jaka jest dopuszczalna zawartość siarki w paliwie do silników o zapłonie samoczynnym?**
12. **Jakie cechy posiada ekopaliwo (biodiesel)?**

2.3. Teoria spalania

2

Zadania układu tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej

Układ ten ma zapewnić we wszystkich możliwych warunkach pracy silnika stworzenie mieszanki paliwowo-powietrznej, której ilość będzie wystarczająca do zupełnego i całkowitego spalenia.

Zupełne spalanie mieszanki paliwowo-powietrznej

Przez to pojęcie rozumie się zupełne utlenienie wszystkich atomów węgla i wodoru do dwutlenku węgla i wody z wydzieleniem pewnych ilości energii cieplnej.

Ponieważ paliwa w zależności od wielkości i budowy molekuł zawierają różne ilości atomów węgla i wodoru, to do zupełnego ich spalenia potrzebne są różne ilości powietrza. Kiedy brak jest odpowiedniej ilości powietrza lub występuje jego nadmiar w komorze, proces spalania przebiega nieprawidłowo. Paliwo nie zostaje w pełni spalone. Jeżeli pewne granice składu mieszanki (granice zapłonu) zostaną przekroczone, to proces spalania w ogóle się nie rozpocznie.

Współczynnik składu mieszanki paliwowo-powietrznej

Współczynnik składu mieszanki paliwowo-powietrznej określa ilość paliwa i powietrza w mieszance. Rozróżnia się teoretyczny i praktyczny współczynnik składu mieszanki.

Teoretyczny współczynnik składu mieszanki (współczynnik stechiometryczny = teoretyczne zapotrzebowanie powietrza). Określa on, jaka ilość (w kg) powietrza jest niezbędna do zupełnego spalenia 1 kg paliwa. Do spalenia 1 kg benzyny potrzeba 14,8 kg powietrza, czyli 10300 litrów.

Praktyczny współczynnik składu mieszanki. W zależności od stanu pracy silnika współczynnik ten odbiega od wartości teoretycznej. Przy nadmiarze paliwa, np. 1 : 13, mówi się, że mieszanka jest „bogata". Przy nadmiarze powietrza mieszankę uważa się za „ubogą".

2.4. Współczynnik nadmiaru powietrza (λ = Lambda)

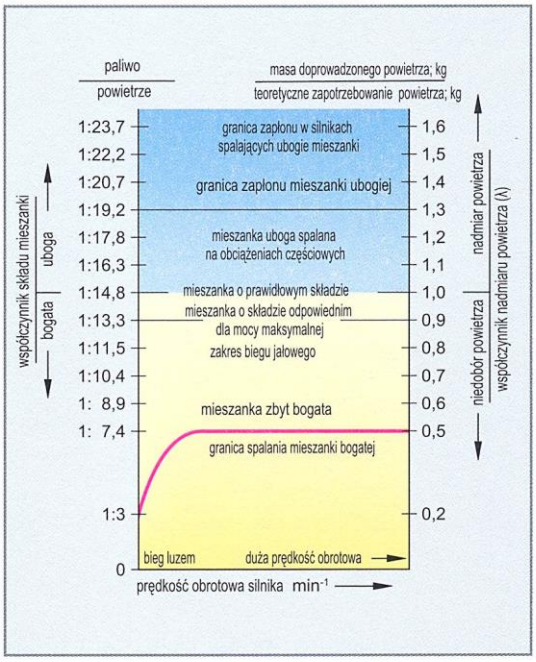
Współczynnik nadmiaru powietrza jest to iloraz masy powietrza dostarczonego do komory spalania do masy teoretycznej potrzebnej do całkowitego i zupełnego spalenia paliwa znajdującego się w komorze spalania.

$$\text{współczynnik nadmiaru powietrza } \lambda = \frac{\text{doprowadzona masa powietrza, kg}}{\text{teoretyczne zapotrzebowanie powietrza, kg}}$$

Jeśli współczynnik składu mieszanki równy jest ilorazowi 1:14,8, współczynnik nadmiaru powietrza ma wartość $\lambda = 1$. W tym wypadku do silnika jest dostarczana dokładnie taka ilość powietrza, jaka jest wymagana do zupełnego spalenia paliwa znajdującego się w komorze spalania. Jeżeli do spalenia 1 kg paliwa dostarczono np. 16 kg powietrza, to współczynnik nadmiaru powietrza przyjmie wartość:

$$\lambda = \frac{16 \text{ kg powietrza}}{14{,}8 \text{ kg powietrza}} = 1{,}08,$$

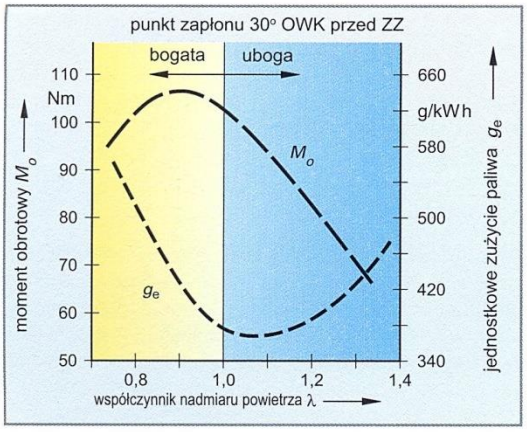
Oznacza to, że mieszanka powstała w komorze spalania jest „uboga" i zawiera więcej powietrza, niż jest wymagane do zupełnego spalenia paliwa. Nadmiar powietrza wynosi 8 %.



Rys. 1. Współczynniki składu mieszanki i nadmiaru powietrza przy spalaniu benzyny

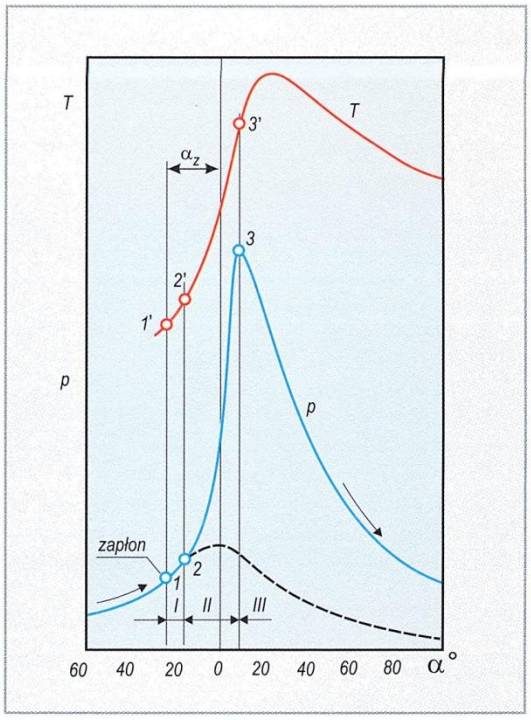
W każdym z możliwych stanów pracy silnika o zapłonie iskrowym zużycie paliwa, moc i skład spalin zależą od współczynnika nadmiaru powietrza.

Specyficzna zależność między współczynnikiem nadmiaru powietrza, momentem obrotowym i jednostkowym zużyciem paliwa jest przedstawiona na **rys. 1**.



Rys. 1. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza

Silniki o zapłonie iskrowym z wtryskiem benzyny do kolektora dolotowego wyposażone w dopalacz katalityczny spalin muszą pracować przy współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda = 1$. Ta wartość powinna być dokładnie utrzymywana, aby emisja toksycznych składników spalin była możliwie mała.



Rys. 2. Przebieg zmian ciśnienia *p* i temperatury *T* w cylindrze silnika o zapłonie iskrowym w zależności od kąta obrotu wału korbowego

2.5. Przebieg procesu spalania w silnikach o zapłonie iskrowym. Spalanie zupełne i niezupełne

Silniki o zapłonie iskrowym mogą być zasilane benzyną, metanolem lub gazem (LPG, CNG). Powstała mieszanka paliwowo-powietrzna ulega zapłonowi od iskry elektrycznej pod koniec suwu sprężania.

Spalanie w silnikach o zapłonie iskrowym dzieli się na trzy charakterystyczne okresy (**rys. 2**):

I – wstępny, zwany okresem indukcji, rozpoczyna się w punkcie 1 w momencie przeskoku iskry na świecy zapłonowej, a kończy w punkcie 2, gdy następuje widoczny wzrost ciśnienia,

II – właściwe spalanie, które trwa od punktu 2 do 3, czyli od momentu rozpoczęcia wzrostu ciśnienia do osiągnięcia ciśnienia maksymalnego (rozprzestrzenianie się płomienia w całej objętości komory spalania),

III – dopalanie.

Zapłon mieszanki w wypadku normalnego spalania następuje przy końcu suwu sprężania kilka stopni OWK przed osiągnięciem ZZ. Kąt wyprzedzenia zapłonu waha się od 10 – 50 °OWK. Większe wartości odpowiadają większej prędkości obrotowej. Maksymalne ciśnienie spalania, dochodzące do 8 MPa, jest osiągane przy około 5 – 20 °OWK. Nieco później, przy około 25 – 30 °OWK po ZZ temperatura osiąga swoje maksimum, dochodząc niekiedy do 3100 K. Przy czym wielkość przyrostu ciśnienia waha się od 0,15 do 0,25 MPa/°OWK.

Ponieważ spalenie mieszanki paliwowo-powietrznej musi nastąpić w bardzo krótkim czasie (spalanie kończy się bardzo szybko po ZZ), molekuły paliwa i tlenu powinny znajdować się jak najbliżej siebie. Niezbędny do spalenia tlen pochodzi z zassanego powietrza. Ponieważ w powietrzu jest jedynie około 20 % tlenu, do spalenia paliwa powinna być dostarczona odpowiednio duża ilość powietrza. Do zupełnego spalenia 1 kg benzyny niezbędna jest minimalna ilość powietrza o masie około 14,8 kg (~12 m^3 o gęstości $\rho = 1{,}29$ kg/m^3).

Węgiel zawarty w paliwie spala się z tlenem, tworząc dwutlenek węgla (CO_2), pozostały wodór łączy się

nem, tworząc parę wodną. Zawarty w powietrzu azot nie ma znaczącego udziału w procesie spalania. Jednakże przy dużym ciśnieniu i w wysokiej temperaturze spalania mogą powstawać trujące tlenki azotu (NO_x).

Zupełne spalanie:

Energia chemiczna paliwa jest zamieniana w energię cieplną.

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 + \text{energia cieplna}$$

$$2\,H_2 + O_2 \rightarrow 2\,H_2O + \text{energia cieplna}$$

Niezupełne spalanie:

Jeżeli do spalenia 1 kg paliwa pozostaje jedynie 13 kg powietrza, to mieszanka paliwowo-powietrzna będzie zbyt bogata (1 : 13), ponieważ znajdzie się w niej zbyt mało tlenu. W efekcie część węgla nie ulegnie pełnemu spaleniu, powstanie natomiast tlenek węgla CO, który jest bardzo niebezpieczny dla zdrowia.

$$2\,C + O_2 \rightarrow 2\,CO + \text{ciepło}$$

Jeżeli do spalenia 1 kg paliwa dostarczone zostało powietrze o masie 16 kg, to mieszanka paliwowo-powietrzna będzie zbyt uboga (1 : 16). Nastąpi wprawdzie pełne spalanie, lecz z uwagi na mniejszą ilość paliwa, które może odparować, chłodzenie komory spalania będzie zbyt małe. W efekcie może to doprowadzić do przegrzania silnika.

2.5.1. Formowanie mieszanki paliwowo-powietrznej

Mieszanka homogeniczna. W zamkniętych komorach spalania przygotowanie mieszanki odbywa się w samej komorze. Aby powstała mieszanka o składzie homogenicznym, musi upłynąć odpowiednia ilość czasu niezbędna do wzajemnego wymieszania się paliwa z powietrzem. Warunkiem jest odpowiednio wczesny wtrysk paliwa do komory spalania, realizowany w suwie sprężania (wtrysk bezpośredni), lub do kolektora ssącego, realizowany w suwie dolotu (wtrysk pośredni).

Mieszanka heterogeniczna. W komorze spalania znajdują się obszary, w których skład mieszanki jest odmienny od stechiometrycznego (ładunek uwarstwiony). Późny wtrysk paliwa do komory spalania (wtrysk z tle bezpośredni) w suwie sprężania oraz zawirowania powietrza w cylindrze wpływają na powstawanie mieszanki niejednorodnej w przestrzeni komory, czyli ładunku uwarstwionego. W celu umożliwienia zapłonu ładunku uwarstwionego konieczne jest zapewnienie występowania mieszanki o współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda = 1$ w okolicy świecy zapłonowej. W obszarach przyściennych komory spalania mieszanka jest w tym wypadku uboga.

2.5.2. Regulacja mocy

Regulacja ilościowa. W silnikach z zewnętrznym tworzeniem mieszanki o składzie homogenicznym regulacja mocy silnika odbywa się za pomocą przepustnicy, która w zależności od zapotrzebowania jest uchylana w mniejszym lub większym stopniu. W efekcie zmienia się ilość zassanego powietrza. Utworzona mieszanka pozostaje zawsze homogeniczna ($\lambda = 1$).

Regulacja jakościowa. W silnikach z wewnętrznym tworzeniem mieszanki o niejednorodnym składzie regulacja mocy odbywa się przy otwartej przepustnicy przez wtryskiwanie różnych dawek paliwa. Ilość zassanego powietrza pozostaje przy tym prawie taka sama. Jakość mieszanki wytworzonej (jej jakość) w komorze spalania zmienia się w zależności od wymaganej zmiany mocy silnika.

2.6. Wpływ czynników konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na spalanie w silniku o zapłonie iskrowym (ZI)

Istnieją dwa parametry regulacyjne, mające zasadniczy wpływ na przebieg procesu spalania; kąt wyprzedzenia zapłonu i skład mieszanki. W silniku ZI są one automatycznie dobierane w zależności od warunków pracy. Istnieje optymalny kąt wyprzedzenia zapłonu; odchylenie od kąta, powoduje zmniejszenie wartości momentu obrotowego i mocy silnika. Optymalny kąt wyprzedzenia zapłonu rośnie wraz ze wzrostem prędkości obrotowej. Skład mieszanki ma wpływ na szybkość spalania. Najszybciej spalają się mieszanki o składzie nieco bogatszym od stechiometrycznego ($\lambda = 0{,}8 \div 0{,}9$). Czas spalania maleje wraz ze wzrostem temperatury zasysanego powietrza (przy temperaturze 100 °C ten wpływ zanika) oraz zwiększaniem się stopnia sprężania (przy stopniu sprężania powyżej 14 wpływ ten zanika).

Czynniki eksploatacyjne, wpływając na pracę silnika o zapłonie iskrowym, powodują:*

- wzrost prędkości obrotowej silnika wywołuje wzrost bezwzględnej szybkości spalania; po osiągnięciu dużej prędkości obrotowej, względny czas spalania w °OWK jest na tyle duży, że wymaga to przyspieszenia kąta wyprzedzenia zapłonu;
- zwiększenie obciążenia powoduje wzrost temperatury i ciśnienia w cylindrze; w efekcie zwiększa się szybkość reakcji chemicznych i skraca czas spalania;
- wzrost ciśnienia atmosferycznego powoduje również wzrost ciśnienia w cylindrze, a tym samym wzrost szybkości spalania i skrócenie czasu jego trwania; spadek ciśnienia powoduje efekt odwrotny; w związku z tym eksploatacja pojazdu na dużych wysokościach nad poziomem morza wymaga zwiększenia kąta wyprzedzenia zapłonu;
- dławienie silnika na wylocie powoduje zmniejszenie szybkości spalania wywołane wzrostem ilości reszty spalin z poprzedniego cyklu roboczego; spaliny będące gazem obojętnym spowalniają proces spalania;
- zbyt bogata lub zbyt uboga mieszanka powoduje wydłużenie czasu spalania. Maksymalna prędkość spalania zachodzi wtedy, gdy skład mieszanki jest zbliżony do stechiometrycznego ($\lambda = 0{,}8 \div 0{,}9$).

Dopasowywanie składu mieszanki do warunków ruchu silnika

W każdych warunkach ruchu silnik potrzebuje określonej ilości mieszanki o określonym składzie.

Rozruch zimnego silnika. W zimnym silniku odparowują jedynie te składniki paliwa, których temperatura parowania jest niska. Większość paliwa ulega kondensacji i osiada na ściankach rury dolotowej i kolektora dolotowego oraz ściankach cylindra. Dlatego ta część paliwa nie ulega spaleniu lub ulega niezupełnemu spaleniu. Aby w tych warunkach wytworzyć palną mieszaninę, należy wtrysnąć bardzo dużą ilość paliwa ($\lambda = 0{,}3$). Ilość wtryśniętego paliwa jest w tym wypadku zależna od temperatury silnika.

Ponieważ opory ruchu przy zimnym silniku są duże, głównie z uwagi na niską temperaturę oleju smarującego, należy wytworzyć więcej mocy na ich pokonanie. Jest to realizowane przez zwiększenie ilości mieszaniny paliwowo-powietrznej.

* Kowalewicz A. Wybrane zagadnienia samochodowych silników spalinowych, WSI Radom, 1996

Rozgrzewanie silnika. Pojęcie to oznacza pracę silnika od momentu rozruchu do osiągnięcia temperatury roboczej. Podczas rozgrzewania silnika zapotrzebowanie na paliwo, zależne od temperatury silnika, ulega zmniejszeniu. W związku z tym wraz z rozgrzewaniem się elementów silnika wzbogacanie mieszaniny paliwowo-powietrznej systematycznie ulega zmniejszeniu, ponieważ straty związane z kondensacją paliwa na ścianach rury dolotowej, kolektora i cylindra maleją wraz z ich ogrzewaniem się.

Zmiana biegów, przyspieszanie. Podczas otwarcia przepustnicy mieszanka na krótko ubożeje. Aby pokryć chwilowy wzrost zapotrzebowania mocy, należy w krótkim czasie wtrysnąć więcej paliwa.

Pełne obciążenie. O pełnym obciążeniu mówi się wtedy, gdy przepustnica jest w pełni otwarta. Aby w tym stanie pracy zapewnić pełną moc silnika, skład mieszanki paliwowo-powietrznej jest utrzymywany na poziomie $\lambda = 0{,}85 - 0{,}95$ **(rys. 1, str. 31)**.

Zanik obciążenia. W tym trybie pracy przepustnica jest w pełni zamknięta, a silnik pracuje ze zwiększoną prędkością obrotową. Do takiego stanu dochodzi wtedy, gdy pojazd zjeżdża z góry lub kierowca zdejmuje nogę z pedału przyspieszenia i zmniejsza się prędkość jazdy w wyniku hamowania silnikiem. Ze względu na oszczędność paliwo nie jest wtryskiwane do czasu osiągnięcia przez silnik określonej prędkości obrotowej lub do ponownego otwarcia przepustnicy.

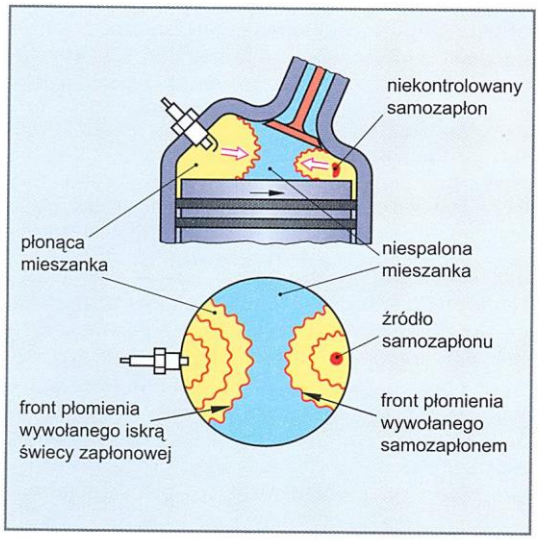
PYTANIA SPRAWDZAJĄCE

1. **Co należy rozumieć przez pojęcie „teoretyczny współczynnik składu mieszanki"?**
2. **Jak wyjaśnić pojęcie: „współczynnik nadmiaru powietrza λ".**
3. **Jakie są następstwa stosowania: ubogiej, bogatej i stechiometrycznej mieszanki paliwowo-powietrznej?**
4. **Do jakiej wartości współczynnika składu mieszanki i współczynnika nadmiaru powietrza mieszanka paliwowo-powietrzna wykazuje zdolność zapłonu?**
5. **Co oznacza wewnętrzne tworzenie mieszanki?**
6. **Co należy rozumieć przez pojęcia: „mieszanka heterogeniczna" i „mieszanka homogeniczna"?**
7. **Co oznacza zewnętrzne tworzenie mieszanki?**
8. **Dlaczego podczas rozruchu mieszanka musi być znacząco wzbogacona?**

2.7. Spalanie stukowe, zapłon powierzchniowy

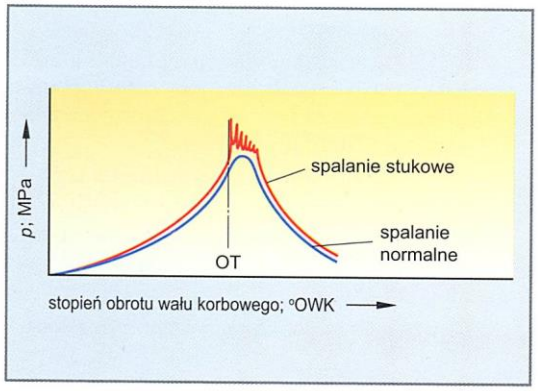
2

Spalanie stukowe zdarza się w silniku o zapłonie iskrowym wtedy, gdy oprócz zainicjowanego iskrą elektryczną procesu ciągłego spalania dochodzi do samozapłonu (rys. 1).



Rys.1. Spalanie stukowe

Samozapłon następuje w wielu punktach jednocześnie, co prowadzi do zbyt szybkiego i gwałtownego spalania, w trakcie którego dochodzi do zderzania się frontów płomieni o kulistym kształcie. Prędkość spalania osiąga wartości od 300 do 500 m/s, co prowadzi do zbyt dużego wzrostu ciśnienia (rys. 2).



Rys. 2. Ciśnienie spalania w silniku o zapłonie iskrowym

Charakterystyczny odgłos stukania lub nawet dzwonienia, będący następstwem wielu niekontrolowanych samozapłonów i powstałej fali uderzeniowej, wywołuje drgania poszczególnych elementów silnika. Spalanie stukowe jest dużym obciążeniem mechanicznym i termicznym układu korbowo-tłokowego, a także przyczyną spadku podaży mocy.

Inne powody spalania stukowego

Poza opisaną poprzednio przyczyną powstawania spalania stukowego w postaci nieodpowiedniego paliwa może ono być wywołane jeszcze przez inne czynniki, takie jak:

- zbyt wczesny zapłon,
- niejednorodna mieszanka paliwowo-powietrzna,
- niewystarczający odpływ ciepła w wyniku osadzenia się nagarów lub uszkodzeń układu chłodzenia,
- zbyt wysoki stopień sprężania, będący np. wynikiem zbyt cienkiej uszczelki podgłowicowej.

Spalanie stukowe będące efektem przyspieszania

Do spalania stukowego dochodzi przede wszystkim podczas przyspieszania pod pełnym obciążeniem z małą prędkością obrotową silnika. Przyczyną tego stanu rzeczy jest przede wszystkim zbyt mała liczba oktanowa, jak również nieprawidłowo ustawiony kąt wyprzedzenia zapłonu.

Spalanie stukowe towarzyszące prędkości maksymalnej

Jest to proces, do którego dochodzi przy maksymalnej prędkości obrotowej silnika podczas jazdy pod pełnym obciążeniem. Przyczyną tego zjawiska jest mała motorowa liczba oktanowa MLO paliwa, co oznacza, że różnica między liczbą oktanową motorową i badawczą paliwa jest zbyt duża. W wyniku głośnych szumów wewnątrz pojazdu dochodzi często do przekroczenia dopuszczalnego poziomu natężenia dźwięku. W efekcie przegrzania silnika może dojść do różnorodnych uszkodzeń, np. do przepalenia denka tłoka i głowicy cylindrowej, jak również do zatarcia tłoków.

Spalanie stukowe powstałe wskutek żarzenia się elementów

Spalanie wywołane przez różne żarzące się części silnika w przestrzeni spalania, które powodują samozapłon, zanim zostanie on zainicjowany w momencie przeskoku iskry na świecy zapłonowej (niekontrolowany przedwczesny zapłon, zwany też zapłonem powierzchniowym).

2.8. Komory spalania w silnikach o zapłonie iskrowym

Komora spalania stanowi najmniejszą objętość przestrzeni spalania. Od dołu w położeniu zwrotu zewnętrznego tłoka (ZZ) jest ograniczona denkiem tłoka, w którym może być umieszczona część jej objętości.

Kształt geometryczny komory spalania ma istotny wpływ na przebieg procesu spalania w silniku spalinowym ze względu na:

- zawirowanie wstępne mieszanki,
- przebieg spalania,
- zużycie paliwa,
- emisję toksycznych składników spalin,
- odporność na spalanie stukowe,
- moment obrotowy,
- moc,
- sprawność.

Kształt i wielkość komory spalania jest określony przez:

- stopień sprężania,
- stosunek powierzchni wewnętrznej do objętości,
- miejsce posadowienia świecy zapłonowej lub wtryskiwacza,
- posadowienia zaworów.

Jeżeli powierzchnia wewnętrzna komory spalania jest duża, wzrastają straty ciepła wskutek jego przenikania przez ścianki komory. Równie dobrze mogą być projektowane komory spalania o zbyt małej powierzchni ścianek, w wyniku czego paląca się mieszanka paliwowo-powietrzna wygasza się samoczynnie. W efekcie zwiększa się emisja węglowodorów w spalinach silnika.

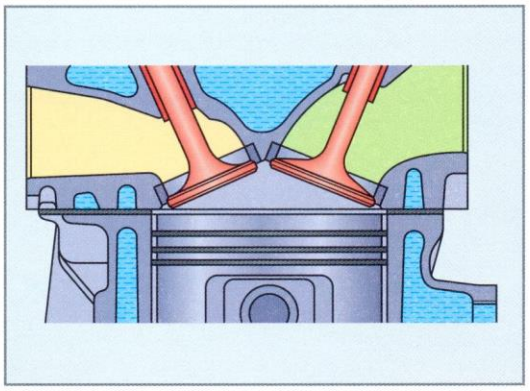
Miejsce posadowienia świecy zapłonowej lub wtryskiwacza ma wpływ na długość drogi rozprzestrzeniania się czoła płomienia. Największą sprawność osiągają silniki, w których droga, jaką przebywa czoło płomienia, jest najkrótsza, co oznacza centralne posadowienie zarówno świecy zapłonowej, jak i wtryskiwacza.

Od optymalnie wykonanej komory spalania oczekuje się następujących własności:

- dużego napełnienia cylindra w wyniku odpowiednich czasoprzekrojów otwarcia zaworu dolotowego,
- dobrego zawirowania i wymieszania zassanego powietrza z wtryśniętym paliwem, przy odpowiednim wykorzystaniu do sprężania mieszanki tłoka zmierzającego w kierunku ZZ,
- szybkiego i możliwie całkowitego usunięcia gazów spalinowych przez zawór wylotowy,
- zwartej przestrzeni bez wad nad denkiem tłoka przy jego krawędziach.

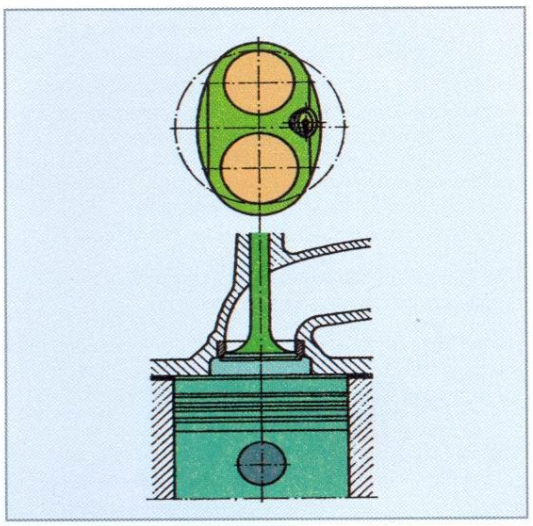
Najprostszy z kształtów komory spalania to przestrzeń półkulista, w której droga rozprzestrzeniania się czoła płomienia jest najkrótsza, a powierzchnia wewnętrzna ścianek komory spalania najmniejsza. Niestety, z uwagi na posadowienie zaworów kształt ten musi być modyfikowany.

Daszkowa komora spalania (rys. 1) jest podobna do komory półkulistej. Zawory dolotowy i wydechowy są umieszczone naprzeciw siebie w przekroju poprzecznym głowicy cylindrowej. Powierzchnia grzybka zaworu dolotowego jest najczęściej większa od powierzchni grzybka zaworu wylotowego i umożliwia tym samym lepsze napełnienie cylindra.



Rys. 1. Daszkowa komora spalania

Wanienkowa komora spalania (rys. 1 str. 36). Komora ta ma postać odwróconej płaskiej wanny. Gniazda zaworów dolotowego i wylotowego są umieszczone na dnie wanny i w jednym rzędzie, a świeca zwykle w bocznej ścianie pomiędzy zaworami. Komory te pozwalają na stosowanie najprostszych i najtańszych rozrządów górnozaworowych, o równoległych osiach zaworów.

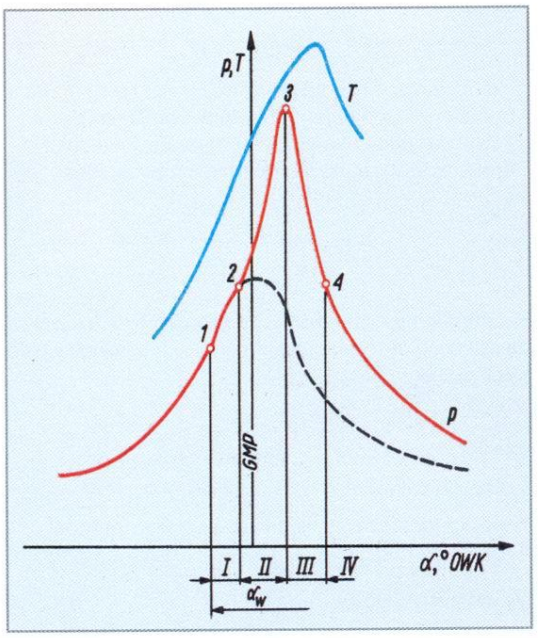


Rys. 1. Wanienkowa komora spalania

Komora spalania z przestrzeniami wyciskania o formie klinowej (rys. 2, str. 89). Komory te są najbardziej kompaktowe i mogą mieć formę daszkową, klinową lub wanienkową. Krótko przed osiągnięciem przez tłok zwrotu zewnętrznego powietrze lub mieszanka paliwowo-powietrzna jest wyciskana z przestrzeni klinowych. Powstające przy tym zawirowanie prowadzi do intensyfikacji procesu mieszania wtryskiwanego paliwa z powietrzem, dzięki czemu szybciej dochodzi do procesu spalania. Zwłoka zapłonu ulega skróceniu, mogą być zastosowane zimniejsze świece zapłonowe, wyższy stopień sprężania, benzyna o niższej liczbie oktanowej. Ponadto dzięki pełniejszemu spalaniu zmniejsza się udział niespalonych węglowodorów w spalinach.

2.9. Przebieg spalania w silniku o zapłonie samoczynnym. Spalanie całkowite i niecałkowite

Spalanie w silnikach o zapłonie samoczynnym zasadniczo różni się od spalania w silnikach o zapłonie iskrowym. W silnikach o zapłonie samoczynnym nie występuje spalanie stukowe. Zapłon i spalanie dawki paliwa ciekłego następuje przy znacznym nadmiarze powietrza. Z tym wiąże się fakt, że gdyby cała dawka paliwa odparowała jednocześnie, to mieszanka palna znajdowałaby się poza granicami samozapłonu. Samozapłon występuje w miejscach, gdzie lokalnie powstała mieszanka gazowa o składzie $\lambda \approx 1$. Istotnym ograniczeniem dawki paliwa jest granica dymienia, pojawiająca się przy dużym obciążeniu silnika, gdy $\lambda \rightarrow 1$ i zaczyna lokalnie brakować powietrza. Parametrem regulacyjnym jest kąt wtrysku. Przebieg ciśnienia i temperatury w cylindrze silnika o zapłonie samoczynnym przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Przebieg zmian ciśnienia i temperatury w cylindrze silnika ZS w funkcji kąta OWK; 1 – początek wtrysku paliwa, 2 – samozapłon mieszaniny paliwowo –powietrznej, 3 – koniec drugiego okresu spalania (maksimum ciśnienia spalania), 4 – umowny koniec spalania, I – opóźnienie samozapłonu (pierwszy okres), II – rozprzestrzenianie się płomienia w komorze; spalanie kinetyczne (drugi okres), III – sterowane spalanie paliwa; spalanie dyfuzyjne (trzeci okres), IV – dopalanie (czwarty okres)

Przy końcu suwu sprężania następuje początek wtrysku paliwa. Samozapłon, czyli początek spalania następuje po upływie czasu zwanego opóźnieniem samozapłonu. Wtrysk trwa nadal po samozapłonie i kończy się po ZZ tłoka. Ciśnienie gazu w cylindrze osiąga maksimum po ZZ tłoka w pobliżu końca wtrysku paliwa. Koniec procesu spalania jest trudny do określenia, lecz następuje wcześniej, zanim otworzy się zawór wylotowy.

Zwłoka zapłonu silnika o zapłonie samoczynnym

Czas, który upływa od momentu wtrysku paliwa do komory spalania do rozpoczęcia procesu spalania, jest nazywany zwłoką zapłonu.

Zwłoka zapłonu to czas, który upływa od początku wtrysku paliwa do rozpoczęcia procesu spalania.

W normalnych warunkach zwłoka zapłonu w silniku nagrzanym do temperatury pracy jest równa 0,001 s. Zwłoka zapłonu zależna jest przede wszystkim od:

- budowy molekuł paliwa (zdolność do samozapłonu; liczba cetanowa),
- temperatury powietrza dolotowego przed rozpoczęciem procesu spalania,
- stopnia rozpylenia paliwa (ciśnienie wtrysku, wielkość kropel wtryskiwanego paliwa).

Im wyższa jest temperatura i większe ciśnienie, tym mniejsza jest zwłoka zapłonu.

Wtrysk paliwa w silniku o zapłonie samoczynnym przebiega w ten sposób, że główna część wtryskiwanego paliwa dostaje się do komory spalania, gdzie już uległy samozapłonowi pierwsze partie wtryśniętego paliwa. W ten sposób od płonącego już paliwa zapala się wtryskiwane paliwo.

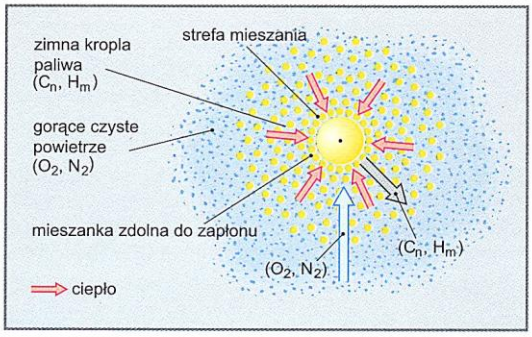
Twarde spalanie silnika o zapłonie samoczynnym

Jeżeli temperatura silnika i temperatura na zewnątrz są niskie, przykładowo podczas rozruchu zimnego silnika, to wydłuża się czas niezbędny do przygotowania mieszanki paliwowo-powietrznej. Zwłoka zapłonu jest zbyt duża (ponad 0,002 s), zgromadzone paliwo spala się gwałtownie, powodując silny hałas, zwany twardym spalaniem silnika o zapłonie samoczynnym (dzwonienie). W efekcie dochodzi do gwałtownego spalania nagromadzonego w komorze spalania paliwa, mającego wiele źródeł zapłonu. Powstały w efekcie duży gradient ciśnienia może prowadzić do uszkodzeń układu korbowego. Twarde spalanie może być ograniczone w wyniku przedwtrysku małej ilości paliwa i dzięki stosowaniu paliwa o większej liczbie cetanowej w chłodnej porze roku.

Całkowite spalanie (rys. 1)

Paliwo jest wtryskiwane do komory spalania pod bardzo wysokim ciśnieniem, zmieniającym się w zależności od układu wtryskowego i obciążenia w granicach od 18,0 do 220 MPa. Paliwo to w wyniku tak wysokiego ciśnienia oraz małej średnicy otworów rozpylaczy (około: 0,15 mm) jest rozdrobnione na bardzo małe krople, a wtryśnięte do komory spalania, w której panuje temperatura rzędu 800°C, ogrzewa się i zaczyna parować; początkowo na powierzchni kropel. Pary paliwa mieszają się z bardzo rozgrzanym powietrzem, nadal się rozgrzewając, i spalają się z tlenem zawartym w powietrzu.

W wyniku rozpoczęcia procesu spalania temperatura w strefie mieszania wciąż wzrasta. W efekcie dochodzi do szybszego parowania paliwa i mieszania z powietrzem. W wypadku idealnego spalania wewnątrz dochodzi również do spalania kropelek paliwa.



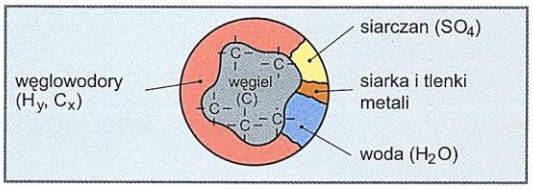
Rys. 1. Całkowite spalanie na kroplach paliwa

Niecałkowite spalanie

Ponieważ strefa zewnętrzna na powierzchni kropelki paliwa reaguje z otaczającym go powietrzem, podczas gdy jądro kropelki jeszcze nie osiągnęło temperatury samozapłonu, dochodzi do zubożenia tlenowego strefy wnętrza odparowanej kropelki paliwa. W związku z tym zachodzi niecałkowite spalanie paliwa. Im większe są kropelki paliwa, tym większa jest strefa, w której panują niedobory tlenu, i przez to większa ilość molekuł węglowodorowych nie jest w pełni spalona.

Tworzenie cząstek stałych. W wyniku niecałkowitego procesu spalania powstają jądra sadzy, na których osadzają się produkty spalania, np. siarczany i węglowodory (**rys. 2**). Są one nazywane cząstkami stałymi. Wykorzystanie nowoczesnych układów wtryskowych pozwoliło w ciągu ostatnich lat zmniejszyć ilość tworzących się cząstek stałych o 90%.

Jednakże obecnie tworzące się cząstki stałe są tak małe, że wdychanie ich do płuc może powodować niszczenie komórek. Mogą też być przyczyną chorób nowotworowych i układu krążenia.



Rys. 2. Cząstki stałe

Intensyfikacja tworzenia się cząstek stałych (powstawanie sadzy) zachodzi w określonych sytuacjach, między innymi wtedy, gdy:

- następuje rozruch zimnego lub gorącego silnika,
- silnik pracuje przy pełnym obciążeniu,
- filtr powietrza nie jest w pełni drożny,
- uszkodzeniu uległ wtryskiwacz,
- wystąpiły uszkodzenia w komorze spalania lub układzie dolotowym.

Zwłoka zapłonu. Czas upływający od rozpoczęcia wtrysku, gdy pierwsze kropelki paliwa opuszczą dyszę wtryskiwacza, do rozpoczęcia spalania nazywany jest zwłoką zapłonu.

Jeżeli czas upływający od opuszczenia wtryskiwacza pierwszej kropli do jej zapłonu jest zbyt długi (powyżej 1 ms), to mówi się o zwiększonej zwłoce zapłonu.

W wyniku zbyt długiej zwłoki zapłonu zbiera się w komorze spalania duża ilość paliwa, która szybko się ogrzewa i spala bardzo gwałtownie. Duża ilość paliwa, spalającego się eksplozyjnie, powoduje gwałtowne narastanie ciśnienia w komorze spalania. To prowadzi do bardzo silnego obciążenia elementów układu korbowo-tłokowego (podobnego do spalania stukowego w silnikach o zapłonie iskrowym) i strat mocy.

Twarde spalanie jest wyraźnie słyszalne w postaci donośnych stuków, porównywalnych do wbijania gwoździ.

Zbyt długa zwłoka zapłonu następuje między innymi wtedy, gdy:

- silnik jest zimny, a w efekcie straty ciepła są znaczne,
- wtrysk paliwa jest zbyt wczesny.
- jakość paliwa jest zła (zbyt mała liczba cetanowa),
- sprężanie jest niewystarczające,
- wtryskiwacze są nieszczelne; podciekają.

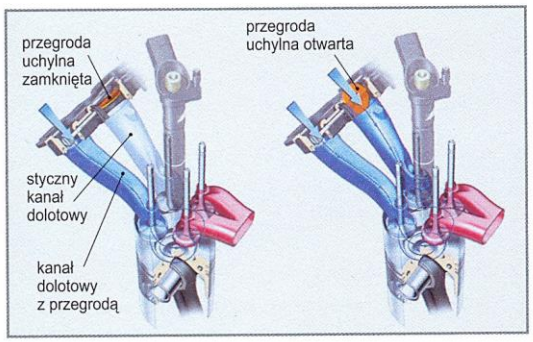
2.10. Wpływ czynników konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na spalanie w silniku o zapłonie samoczynnym

Tworzenie mieszanki zależy w znacznym stopniu od zawirowania powietrza w komorze spalania oraz od wartości ciśnienia wtryskiwanego paliwa. Szczególnie godne uwagi są następujące warunki poprawy tworzenia mieszanki:

- praca silników spalinowych o zapłonie samoczynnym z dużym współczynnikiem nadmiaru powietrza (aż do wartości $\lambda \approx 8$) i ograniczenie maksymalnej ilości paliwa, tak aby w najbardziej ubogim rejonie komory spalania współczynnik nadmiaru powietrza miał wartość nie mniejszą niż $\lambda \approx 1{,}3$;
- zawirowanie powietrza pod wpływem spiralnego kształtu kanału dolotowego (**patrz: Sterowanie kanałem dolotowym**) i kształtu denka tłoka (wtrysk bezpośredni), jak również tworzenie zawirowania w komorach wstępnych i wirowych (wtrysk pośredni) w celu polepszenia wymieszania paliwa z powietrzem;
- optymalizacja kształtu komory spalania w celu poprawy przebiegu procesu spalania;
- wstępne podgrzewanie paliwa w celu ułatwienia powstawania mgły paliwowej i jej odparowania;
- regulacja czasu grzania komory spalania za pomocą świec żarowych w celu wstępnego nagrzania podczas rozruchu (grzanie rozruchowe) i ograniczenia strat ciepła (grzanie ruchowe);
- wtrysk wstępny małej dawki pilotowej paliwa w celu rozgrzania powietrza w komorze spalania, skrócenia zwłoki zapłonu oraz zmniejszenia intensywności narastania ciśnienia (mały gradient ciśnienia) w komorze;
- duże ciśnienie wtrysku w celu tworzenia małych kropelek paliwa i tym samym stworzenie warunków szybkiego i całkowitego ich spalania;
- dotrysk paliwa w celu dopalenia niespalonych cząstek stałych.

Regulowane kanały dolotowe (rys. 1)

Kanały napełniające komory spalania powietrzem są za pomocą odpowiednich przesłon częściowo zamykane lub otwierane całkowicie. Sterowanie tym procesem prowadzi sterownik silnika na podstawie zapamiętanej charakterystyki obciążeń. Odpowiedni sygnał wysłany ze sterownika powoduje ruch silnika krokowego, który przenoszony jest na wszystkie przesłony w kolektorze dolotowym silnika wielocylindrowego.



Rys. 1. Sterowane kanały dolotowe

Małe obroty i obciążenie. Podczas pracy silnika wszystkie przegrody uchylne są zamknięte. Cała masa powietrza przepływa przez kanały styczne. To powoduje intensywne zawirowanie powietrza w komorze spalania i optymalne jego wymieszanie z paliwem, a co za tym idzie najlepsze spalanie. Tworzenie cząstek stałych jest bardzo ograniczone.

Duże obroty i obciążenie. W czsie pracy silnika wszystkie przegrody uchylne są stale otwarte, tak aby w każdym punkcie pracy silnika zachować najlepszy z możliwych stosunek zawirowania ładunku do masy powietrza. W ten sposób optymalizowana jest moc silnika i skład spalin.

2.11. Niedzielone komory spalania w silniku o zapłonie samoczynnym

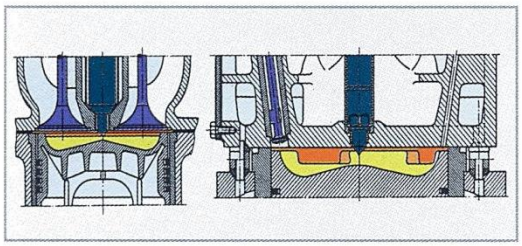
W silnikach tych paliwo jest wtryskiwane za pośrednictwem wtryskiwaczy otworkowych, pod ciśnieniem do 220 MPa, do komory spalania wypełnionej gorącym powietrzem (proces objętościowy). Przeważnie wtrysk jest skierowany do ukształtowanej w denku tłoka komory spalania zamkniętej od góry płaszczyzną głowicy. Potrzebne do całkowitego spalenia zawirowanie powietrza jest uzyskiwane dzięki spiralnie ukształtowanemu kanałowi dolotowemu i odpowiedniemu kształtowi denka tłoka **(rys. 1, str. 144)**.

Aby uzyskać mały gradient ciśnienia (przyrost ciśnienia w czasie), co się wiąże się spokojną pracą silnika, wcześniej wtryskuje się małą dawkę pilotową paliwa (przedwtrysk).

Dzięki małej powierzchni komory, w porównaniu do silników z dzieloną komorą spalania, straty ciepła są znacznie zmniejszone. Wpływa to na większą sprawność cieplną. Urządzenia wspomagające rozruch zimnego silnika są konieczne jedynie wtedy, kiedy temperatura otoczenia jest bardzo niska. Mimo to są one montowane w silnikach w celu ograniczenia emisji szkodliwych składników spalin podczas zimnego startu i ruchu w stanie nagrzanym.

Podstawową zaletą silników z wtryskiem bezpośrednim w porównaniu do silników z wtryskiem pośrednim jest mniejsze o około 20% zużycie paliwa. Głośna praca silnika (duży gradient ciśnienia) może być ograniczona poprzez przedwtrysk małej dawki paliwa. Zalety te zagwarantowały praktycznie stuprocentowy udział w rynku silników z wtryskiem bezpośrednim.

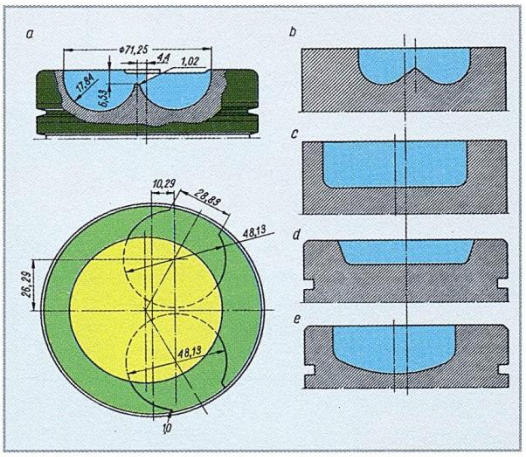
Komory spalania w silnikach ZS o wtrysku bezpośrednim wykonuje się w różnym ukształtowaniu, umieszczając je zasadniczo w denku tłoka. W wypadku silników wolnoobrotowych i dużych średnicach tłoków dominują płytkie komory spalania głownie Hesselmana, zapewniające w tych warunkach dobre wymieszanie paliwa z powietrzem **(rys. 1)**.



Rys. 1. Komora spalania Hesselmana wg patentu K.J.E. Hesselmana z 1930 r *

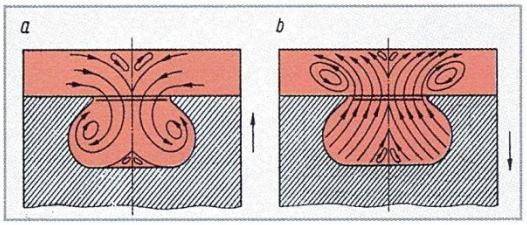
* Patent szwedzki nr 11182 K.J.E. Hesselman z 1930 r.

W wypadku wyższych prędkości obrotowych (2000 – 2500 min^{-1}) korzystne jest wprowadzenie zawirowania powietrza ze względu na przyspieszenie procesów tworzenia mieszanki i spalania. Takie warunki spełniają komory toroidalne lub kubkowe bez przewężenia na wlocie **(rys. 2)**. Są to tzw. komory otwarte.



Rys. 2. Otwarte komory toroidalne i kubełkowe; a), b) komory toroidalne, c) komora kubkowa, d) komora spodkowa, e) komora filiżankowa

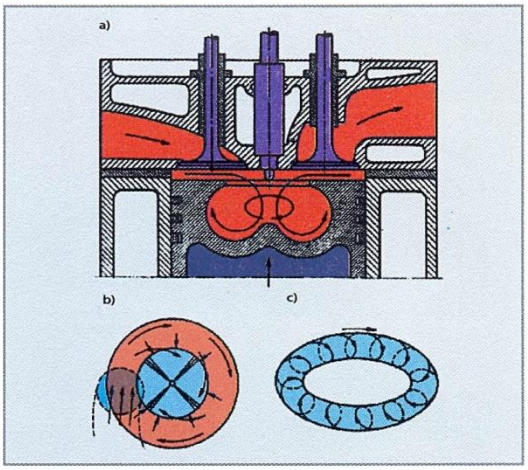
W wypadku jeszcze wyższych prędkości obrotowych (powyżej 2500 min^{-1}) stosuje się przewężenie na wlocie do komory spalania. Istotnym elementem tych komór jest krawędź komory tworząca wspomniane przewężenie na wejściu do niej, wywołująca zawirowanie i turbulencję podczas ruchu tłoka w kierunku ZZ i w kierunku ZW **(rys. 3)**.



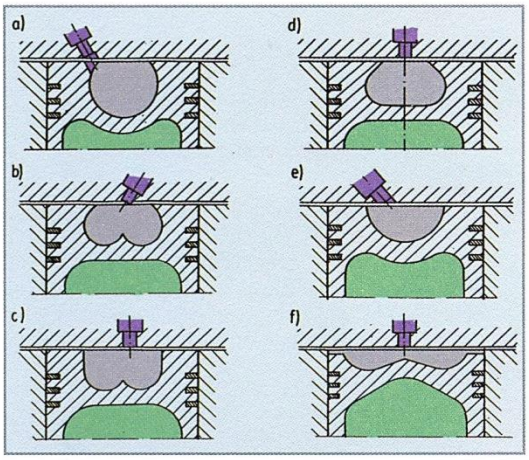
Rys. 3. Obraz linii prądu w przypadku komory z przewężeniem podczas ruchu tłoka w kierunku ZZ (a) oraz w kierunku ZW (b)**

Wśród rozwiązań zasługujących na uwagę na czoło wysuwa się opatentowana przez Saurera w 1934 roku komora toroidalna (**rys. 1 str. 40**), która doczekała się wielu modyfikacji polegających na wyeliminowaniu stożka centralnego lub nadaniu dnu komory kształtu spłaszczonej sfery (**rys. 2 str. 40**).

** Kowalewicz A., Systemy spalania szybkoobrotowych tłokowych silników spalinowych, WKiŁ Warszawa 1980.



Rys. 1. Komora Saurera wg patentu z 1934 r.; a) kierunki wtrysku, b) kierunki zawirowania powietrza, c) wir toroidalny***



Rys. 2. Modyfikacje komory Saurera (a, b, d) oraz przykłady współczesnych komór otwartych (c, e, f)

2.12. Dzielone komory spalania w silniku o zapłonie samoczynnym

Ze względu na kształt komory pośredniej rozróżnia się **komory wstępne** i **komory wirowe.**

Komora pośrednia, w której znajduje się wtryskiwacz, osadzony za pomocą odpowiedniej obejmy, oraz świeca żarowa, jest umieszczona w głowicy cylindrowej. Komora pośrednia jest połączona kanałem ogniowym (komora wirowa) lub kanałami strumieniowymi (komora wstępna) z główną komorą spalania **(rys. 1, str. 144)**.

Podczas sprężania powietrze jest wtłaczane kanałami do komory pośredniej, w której zachodzi intensywna rotacja. Do tak wirującego powietrza wtryskiwacz czopikowy wtryskuje paliwo pod ciśnieniem od 18 do 45 MPa. Większa część wtryśniętego paliwa osadza się na ściankach komory (**proces przyścienny**).

Rozdrobnione w powietrzu paliwo zapala się. Ciepło powstałe podczas spalania umożliwia odparowanie paliwa zgromadzonego na ściankach komory. Odparowane paliwo ogrzewa się i również ulega spaleniu.

W wyniku wzrostu ciśnienia w komorze pośredniej paląca się mieszanka przedostaje się do głównej komory spalania, gdzie następuje pełne jej spalanie. Jest to opóźnione, dwustopniowe i tym samym miękkie spalanie.

Duża powierzchnia komory spalania związana z podziałem procesu spalania przyczynia się do znacznych strat ciepła. Z tego powodu sprawność cieplna tych silników w porównaniu do silników z wtryskiem bezpośrednim jest mała.

Podczas rozruchu silnika straty ciepła są tak duże, że przygotowanie mieszanki jest utrudnione i powoduje zbyt dużą zwłokę zapłonu. W niskiej temperaturze otoczenia prowadzi to do trudności z rozruchem silnika. Dlatego niezbędny jest dodatkowy układ ułatwiający rozruch zimnego silnika.

2.13. Skład gazów spalinowych silników o zapłonie iskrowym

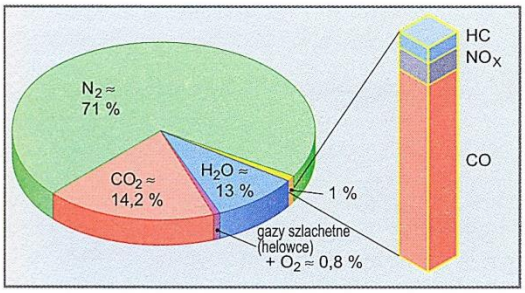
Ze względu na duże obciążenie środowiska naturalnego gazami spalinowymi z pojazdów samochodowych uczestniczących w ruchu drogowym prawodawca zaostrzył przepisy dotyczące zawartości szkodliwych substancji w spalinach emitowanych przez pojazdy. Paliwa składają się przede wszystkim z węglowodorów. Podczas zupełnego ich spalania powstaje dwutlenek węgla, para wodna, azot i gazy szlachetne. Dwutlenek węgla w dużej mierze jest odpowiedzialny za zjawisko zmiany klimatu (efekt cieplarniany).

W wyniku niezupełnego spalania paliwa w silniku powstają, poza dwutlenkiem węgla, parą wodną, azotem i gazami szlachetnymi, dodatkowo:

- tlenek węgla, CO,
- niespalone węglowodory, HC,
- tlenki azotu, NO_x,
- cząstki stałe.

W nagrzanym do temperatury pracy silniku o zapłonie iskrowym udział szkodliwych składników (CO, HC, NO_x) w całkowitej objętości spalin przed katalizatorem wynosi około 1% (**rys. 1, str. 41**).

*** Patent szwajcarski nr 25578 Hippolyt Saurer z 1934 r.



Rys. 1. Skład spalin przed katalizatorem

Zawartość szkodliwych substancji w spalinach w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza

Udział poszczególnych szkodliwych substancji w spalinach jest szczególnie zależny od współczynnika nadmiaru powietrza λ (**rys. 2**).

Silnik spalinowy o zapłonie iskrowym osiąga moc maksymalną przy wynoszącym 5% do 10 % niedoborze powietrza; λ = 0,95 ÷ 0,9; mieszanka bogata (**rys. 3**). Z uwagi na niedobór powietrza paliwo nie jest w pełni wykorzystane. Zwiększa się jednostkowe zużycie paliwa. Zwiększa się również zawartość tlenku węgla i niespalonych węglowodorów w spalinach.

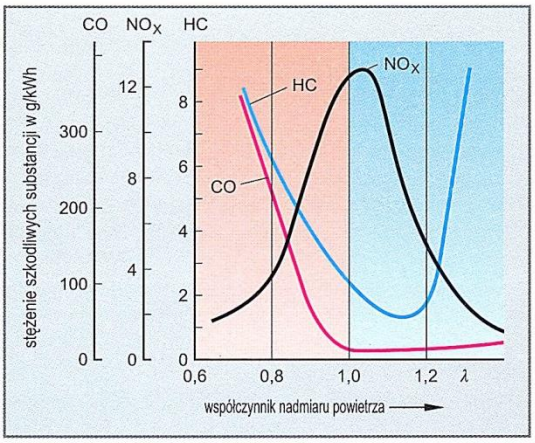
Przy wynoszącym 5 % do 10 % nadmiarze powietrza (λ = 1,05 ÷ 1,1; mieszanka uboga) silniki o zapłonie iskrowym osiągają minimum zużycia paliwa. Moc silnika jest jednak mniejsza, a temperatura procesu spalania, między innymi z uwagi na działanie chłodzące odparowanego paliwa, wyższa. W efekcie udział dwutlenku węgla i niespalonych węglowodorów jest zmniejszony, lecz jednocześnie udział tlenków azotu (NO_x) bardzo duży.

Dopuszczalna zawartość szkodliwych składników w spalinach emitowanych przez silniki o zapłonie iskrowym

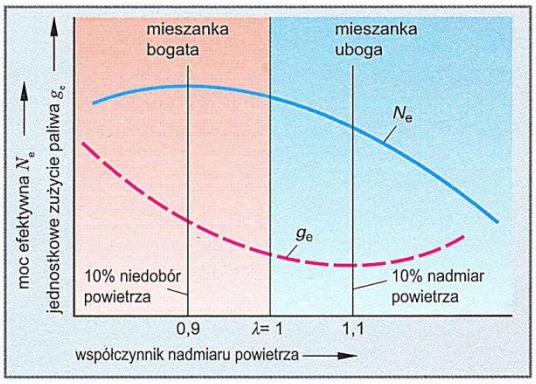
Prawodawca ustalił graniczną dopuszczalną zawartość szkodliwych składników w spalinach z podziałem na typy pojazdu (**tabela 1**) oraz odpowiednie testy sprawdzające ich emisję (badanie emisji spalin; OBD).

Tabela 1. Dopuszczalna emisja toksycznych składników samochodów osobowych /kombi (M1) z silnikami ZI w Europie

M1 (≤ 2,5t; ≤ 6 osób)	CO (g/km)	HC (g/km)	NO_x (g/km)
Euro III Obowiązuje od 2000	2,30	0,20	0,15
Euro IV Obowiązuje od 2005	1,00	0,10	0,08



Rys. 2. Zawartość szkodliwych substancji w spalinach przy różnej wartości współczynnika nadmiaru powietrza λ w komorze spalania



Rys. 3. Moc i zużycie paliwa w zależności od wartości współczynnika nadmiaru powietrza λ

2.14. Skład gazów spalinowych silników o zapłonie samoczynnym ZS

Spaliny silnika o zapłonie samoczynnym (ZS), oprócz składników reszty powietrza, azotu N_2 i tlenu O_2, zawierają szereg związków chemicznych będących produktami reakcji węgla C, wodoru H, tlenu O i azotu N.

Spalanie całkowite. W warunkach idealnych (praktycznie nieosiągalnych w komorze spalania silnika) węglowodory (HC) utleniają się, tworząc cząsteczki wody (H_2O) i dwutlenku węgla (CO_2).

Spalanie niecałkowite. Silnik o zapłonie samoczynnym zawsze pracuje z nadmiarem powietrza; współczynnik nadmiaru powietrza λ > 1. W zależności od warunków ruchu nadmiar ten ma różne wartości. Przy obciążeniu

całkowitym nadmiar ten jest niewielki (λ ~ 1,3). Przy obciążeniach częściowych i na biegu jałowym jego wartość osiąga λ ~ 18. Pomimo tak znacznego nadmiaru powietrza paliwo spala się punktowo niecałkowicie.

2

Jako produkty niecałkowitego spalania powstają następujące szkodliwe substancje: tlenek węgla (CO), niespalone węglowodory (HC), jak również cząstki stałe (ang.: PM = Particulate Matter). Składają się one z jądra sadzy i odłożonych na nim osadów, takich jak tlenki metali (porównaj str. 37).

Do tego dochodzą zanieczyszczenia powstałe ze spalenia dodatków znajdujących się w paliwie lub w oleju smarującym. Są to np. związki metali i siarki.

Tlenki azotu NO_x (tlenek azotu i dwutlenek azotu) powstają w wysokiej temperaturze spalania, kiedy panuje duże szczytowe ciśnienie spalania oraz duża prędkość spalania. Z uwagi na znaczny nadmiar powietrza emisja NO_x przy obciążeniach częściowych i biegu jałowym jest zwiększona.

Graniczna zawartość szkodliwych substancji w spalinach silnika ZS samochodu osobowego

Pomimo wprowadzonych w połowie lat siedemdziesiątych ograniczeń dotyczących zawartości szkodliwych składników spalin, emisja spalin silników ZS zmniejsza się w sposób powolny. Głównym motorem zmian są normy emisji spalin.

Tabela 1 zawiera obowiązujące w Europie normy emisji spalin dotyczące nowych samochodów osobowych z silnikami o zapłonie samoczynnym.

Tabela 1. Dopuszczalna emisja toksycznych składników spalin silników ZS samochodów osobowych, w tym kombi, obowiązująca w Europie, g/km

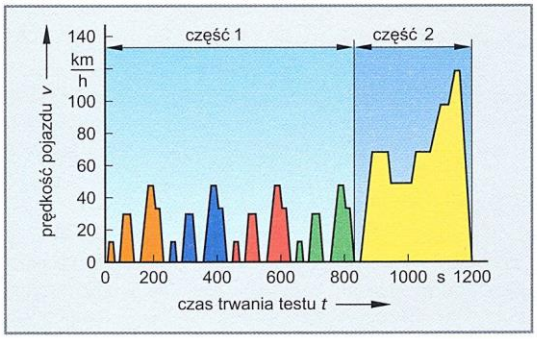
	CO	CH + NO_x	NO_x	Cząstki stałe PM
Euro 2 od 1996	1,00	0,70	–	0,080
Euro 3 od 2000	0,64	0,56	0,50	0,050
Euro 4 od 2005	0,50	0,30	0,25	0,250
Euro 5 od 2008	0,50	?	0,08	0,025

2.15. Toksyczność spalin silników o zapłonie iskrowym i samoczynnym

2.15.1. Określanie składu spalin

Określanie składu spalin typowych pojazdów jest prowadzone na hamowniach podwoziowych. W toku tych badań stosuje się reprezentatywne testy pomiarowe, analizując w trakcie ich trwania skład spalin, określając przy tym zawartość szkodliwych składników.

Test europejski (rys. 1) dotyczy pojazdów osobowych do 2,5 t masy całkowitej oraz pojazdów dostawczych do 3,5 t. Pierwsza część testu obejmuje jazdę w przerywanym cyklu miejskim z prędkością od 0 km/h do 50 km/h. Program testu jest realizowany nieprzerwanie w trakcie 13 minut i powtarzany czterokrotnie. Rozruch silnika przy rozpoczęciu testu według normy Euro III następuje w temperaturze otoczenia 20°C. Końcowe dwie części odpowiadają 7-minutowej jeździe poza miastem, podczas której pojazd osiąga prędkość do 120 km/h. Podczas trwania testu zbierane są gazy spalinowe, a po zakończeniu testu analizowany jest ich skład. Wartości graniczne emisji w g/km niezależnie od pojemności skokowej silnika nie mogą być przekroczone. Od 2002 roku wprowadzono również sprawdzanie spalin w pojazdach z silnikami o zapłonie iskrowym klasy M1, uruchamianych w niskiej temperaturze otoczenia, ustalając rozruch silnika w temperaturze -7 °C i odpowiednie wartości graniczne emisji: HC < 1,8 g/km i CO < 15 g/km.



Rys. 1 Test europejski

Badanie spalin jest prowadzone, kiedy pojazd uczestniczy w normalnym ruchu miejskim, w określonych odstępach czasu. Podczas testu sprawdzana jest zawartość CO w spalinach w zależności od różnych parametrów ruchu, takich jak: temperatura pracy silnika, moment obrotowy. Dodatkowo są jeszcze prowadzone inne testy sprawdzające, np.:

- sprawdzanie względnej zawartości szkodliwych składników spalin,
- sprawdzanie emisji króćca napełniania zbiornika paliwa,
- sprawdzanie obwodów regulacji,
- sprawdzanie punktu zapłonu (o ile istnieje możliwość jego sprawdzenia).

On-Board-Diagnose (OBD). W systemie diagnostyki pojazdu OBD wszystkie zaistniałe uszkodzenia są zapamiętywane w pamięci błędów sterownika. Diagnozowane systemy to: układy regulacji ruchu silnika (wtryskowy, zapłonowy), układ wydechowy (działanie katalizatora, sonda λ), układ paliwowy. Lampka kontrolna umieszczona na tablicy rozdzielczej wewnątrz pojazdu informuje kierującego o nieprawidłowym działaniu, które może prowadzić do wzrostu emisji toksycznych składników

spalin. Zaistniałe nieprawidłowe działanie należy niezwłocznie wyeliminować.

2.15.2. Wpływ szkodliwych składników spalin na organizmy żywe

Tlenek węgla CO. Tlenek węgla jest gazem bezbarwnym i bezwonnym. Wdychany blokuje transport tlenu we krwi. Małe stężenie w powietrzu powoduje ból głowy, nudności i trudności z koncentracją. Przy stężeniu większym niż 0,3% i dłuższym czasie oddziaływania jest śmiertelny. Tlenek węgla powstaje z powodu niedostatku powietrza, w wyniku niezupełnego spalenia paliwa. Udział tlenku węgla w spalinach jest tym większy, im bogatsza jest mieszanka paliwowo-powietrzna. Przy nadmiarze powietrza także może dojść do powstawania niewielkiej ilości tlenku węgla. W tym wypadku wymieszanie paliwa z powietrzem nie jest homogeniczne, w komorze spalania tworzą się obszary z bogatą i ubogą mieszanką.

Niespalone węglowodory (ang. Hydrocarbon). Są to związki węgla z wodorem w różnorodnych konfiguracjach. Węglowodory uszkadzają błonę śluzową, powodują stany zapalne górnych dróg oddechowych, a część z nich przyczynia się do powstawania chorób nowotworowych. Pod wpływem działania promieni słonecznych w obecności tlenku azotu i tlenu zachodzi reakcja fotochemiczna. W efekcie tej reakcji tworzy się m.in. ozon (O_3), który powoduje powstawanie tzw. słonecznego smogu o toksycznym działaniu na organizmy żywe. Niespalone węglowodory powstają podczas niezupełnego spalania ubogiej mieszanki paliwowo-powietrznej; $\lambda < 1$. Ponadto niespalone węglowodory powstają również w tych obszarach komory spalania, do których nie dotarło w pełni czoło płomienia, przykładowo w szczelinie pomiędzy płaskim denkiem tłoka a płaszczyzną głowicy w okolicach progu ogniowego.

Tlenki azotu NO_x. Przez pojęcie „tlenki azotu" rozumie się różne tlenki (tlenek azotu NO, dwutlenek azotu NO_2, tlenek dwuazotowy). W zależności od składu tlenki azotu mogą być bezwonne i bezbarwne lub czerwonobrązowe o intensywnym przykrym zapachu. Tlenki azotu uszkadzają drogi oddechowe, w dużym stężeniu prowadzą do nieodwracalnych zmian w płucach, są współodpowiedzialne za niszczenie warstwy ozonowej i niszczenie lasów. Tlenki azotu powstają przede wszystkim w wysokiej, maksymalnej temperaturze spalania w komorze spalania.

Cząstki stałe. Powstają w wyniku niecałkowitego spalania, tworząc formy osadów na różnych cząsteczkach, między innymi sadzy, produktów korozji, czy wreszcie stałych produktów spalania. Osady związków HC powstałe na cząsteczkach sadzy są najbardziej rakotwórcze. W przeciwieństwie do cząstek stałych powstałych w procesie spalania w silnikach o zapłonie samoczynnym w wypadku silników ZI można je pominąć, gdyż jest ich od 20 do 200-krotnie mniej.

W celu zredukowania emisji szkodliwych składników spalin, zgodnie z normą Euro 4 oraz Euro 5, działania wewnętrzne w silniku muszą być zsynchronizowane z zewnętrznymi działaniami zaradczymi.

Działania wewnętrzne

Składają się na nie przykładowo:
- optymalizacja komory spalania,
- duże ciśnienie wtrysku,
- sterowanie kolektorem dolotowym,
- regulacja czasu samozapłonu,
- technika wielozaworowa,
- regulacja ciśnienia doładowania,
- optymalizacja początku wtrysku i ilości wtryskiwanego paliwa.

Działania zewnętrzne

Obecnie wchodzą do użytku następujące systemy:
- katalizator utleniający,
- filtr cząstek stałych,
- recyrkulacja spalin (EGR),
- katalizator gromadzący NO_x.

PYTANIA SPRAWDZAJĄCE

1. **Jakie produkty powstają podczas spalania mieszanki paliwowo-powietrznej?**
2. **Jakie są przyczyny spalania stukowego w silnikach o zapłonie iskrowym?**
3. **Co oznacza zwłoka zapłonu w silniku o zapłonie samoczynnym?**
4. **Co oznacza pojęcie „dzwonienie" w silniku o zapłonie samoczynnym?**
5. **Jakie najważniejsze cechy posiada silnik o zapłonie samoczynnym?**
6. **Jak nazywają się 4 podstawowe układy silnika o zapłonie iskrowym i samoczynnym?**
7. **Jakie uszkodzenia można stwierdzić na podstawie analizy wykresu indykatorowego?**
8. **Co należy rozumieć przez pojęcie „symetryczne koła faz rozrządu"?**
9. **Czym różnią się silniki krótkoskokowe od silników długoskokowych?**
10. **Jak przedstawia się kolejność zapłonów w rzędowym silniku sześciocylindrowym?**
11. **Jakie szkodliwe substancje powstają podczas niepełnego spalania paliwa w silniku spalinowym?**
12. **Jaki wpływ na skład spalin ma ilość powietrza?**
13. **Jakie podstawowe czynności prowadzą do zmniejszenia ilości szkodliwych składników spalin?**
14. **Jakie działania w silniku pozwalają uzyskać efekt ograniczenia szkodliwych substancji w spalinach?**

2.5. Spaliny silnika

Do zasilania silników spalinowych stosuje się najczęściej paliwa węglowodorowe, a ich spalanie to proces gwałtownego utleniania. Przy założeniu, że w skład paliwa wchodzą tylko węgiel i wodór oraz przy stworzeniu idealnych warunków spalania (jednorodność składu mieszanki, nieograniczony czas na przebieg reakcji, wyeliminowanie wszelkich znaczących wpływów czynników zewnętrznych), w wyniku spalania paliwa powstają tylko para wodna (H_2O) i dwutlenek węgla (CO_2). W komorze spalania rzeczywistego silnika spalinowego panują jedynie dobre a nie idealne warunki spalania. W rezultacie, w spalinach silnika znajduje się wiele związków chemicznych, które można podzielić na dwie grupy: nietoksyczne i toksyczne.

Nietoksyczne składniki spalin stanowią:
- dwutlenek węgla (CO_2),
- para wodna (H_2O),
- azot (N_2),
- tlen (O_2).

Najważniejsze **toksyczne składniki spalin** to:
- tlenek węgla (CO),
- węglowodory (HC),
- tlenki azotu (NO_X),
- sadza (C),
- tlenki siarki (SO_2, SO_3),
- związki ołowiu (Pb).

Zawartości poszczególnych składników spalin określa się stosunkiem objętości każdego składnika do całkowitej objętości spalin, czyli w procentach objętościowych oznaczonych (% obj.). Oznaczają one, jaki procent objętości spalin zajmuje dany składnik. Zawartość w spalinach węglowodorów i tlenków azotu określa się za pomocą mniejszej jednostki. Jest nią 1 ppm, który jest równy jednej milionowej części objętości (ppm – ang. *parts per million*). Jednostki udziału objętościowego ppm i % obj. są związane następującymi zależnościami:

$$100 \text{ ppm} = 0{,}01\% \text{ obj.}$$

$$10\,000 \text{ ppm} = 1\% \text{ obj.}$$

W badaniach homologacyjnych, potwierdzających, że silnik danego pojazdu spełnia odpowiednie wymagania, zawartości składników spalin określa się w g/km lub g/(kW · h).

Z danych zawartych w tablicy 2-7 wynika, że tylko bardzo niewielka część spalin ma właściwości trujące dla środowiska naturalnego. Współczesne zagrożenie środowiska naturalnego wynika jednak przede wszystkim z liczby eksploatowanych samochodów i dlatego jest konieczne rozpoznanie składu spalin silnika oraz podjęcie działań w celu ograniczenia emisji związków toksycznych.

Tablica 2-7

Procentowe udziały objętościowe podstawowych składników spalin

Rodzaj silnika		Silnik ZI	Silnik ZS
Składniki nietoksyczne			
Azot N_2	(% obj.)	71...77	76...78
Tlen O_2	(% obj.)	0,5...1,5	8...15
Dwutlenek węgla CO_2	(% obj.)	12...14	5...10
Para wodna H_2O	(% obj.)	7...11	0,5...5
Składniki toksyczne			
Tlenek węgla CO	(% obj.)	1,0...5,0	0,01...0,2
Węglowodory HC	(ppm)	200...1000	200...1000
Tlenki azotu NO_x	(ppm)	500...2500	500...1200
Sadza C	(mg/m^3)	–	100...300

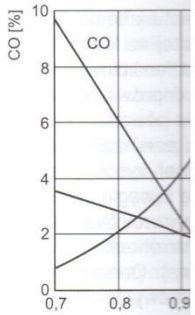
Charakterystyka nietoksycznych składników spalin

Dwutlenek węgla jest produktem całkowitego i zupełnego spalania węgla zawartego w paliwie, zachodzącego w cylindrze silnika. Jest to gaz niepalny, bezbarwny, charakteryzujący się lekko kwaśnym posmakiem. Jego gęstość jest większa o połowę od gęstości powietrza. Dwutlenek węgla naturalnie występuje w przyrodzie w stężeniu ok. 3...4% i reguluje wiele procesów życiowych w świecie roślin oraz zwierząt. Gaz ten nie jest gazem toksycznym, lecz przy nadmiernym stężeniu (od ok. 10%) staje się niebezpieczny dla życia, utrudniając oddychanie. Dwutlenek węgla jest głównym gazem odpowiedzialnym za efekt cieplarniany, którego skutkiem jest wzrost średniej temperatury na powierzchni Ziemi. Z tego powodu we współczesnych silnikach dąży się do ograniczenia zużycia paliwa w celu zmniejszenia emisji dwutlenku węgla do atmosfery.

Tlen zawarty w spalinach pochodzi z powietrza atmosferycznego doprowadzonego do silnika w celu wytworzenia mieszanki palnej. W silnikach o zapłonie iskrowym zawartość tlenu jest bardzo mała ze względu na to, że silniki te są zasilane mieszanką o składzie bliskim stechiometrycznemu, czyli doprowadzony tlen jest wykorzystywany prawie całkowicie. Mieszanki spalane w silniku o zapłonie samoczynnym charakteryzują się nadmiarem powietrza ($\lambda > 1$), dlatego w spalinach tego silnika występuje znaczna ilość tlenu.

Woda w spalinach jest produktem spalania wodoru wchodzącego w skład paliw węglowodorowych. Większa zawartość H_2O w spalinach silnika ZI wynika z większego udziału wodoru w benzynie niż w oleju napędowym.

Azot zawarty w spalinach pochodzi z powietrza atmosferycznego zasysanego przez silnik niezbędnego do wytworzenia mieszanki palnej.



Rys. 2.25. Stężenie tlen
od współczynnika nadm

Charakterystyka t

Stężenie składników
mieszanki palnej (r

Tlenek węgla jes
Największy wpływ
spalanej mieszanki
tlenu i w niskiej tem
się w wyniku dys
w komorze spalania
- spalanie bogatyc
takiej mieszanki
zaworu wylotowe
- spalanie zbyt ub
proces spalania n
- złe wymieszanie
- obecność nagar
mieszanki oraz o
- nadmierna ilość
utrudnia zasysan
paliwa z powietrz

W silnikach o za
nadmiaru powietrza
w silniku o zapłonie

Tlenek węgla (C
utrudnia jego rozp
zakłócenie prawidło