

przysparza wielu problemów. Znane są trzy sposoby magazynowania wodoru w zbiornikach w postaci:

- gazowej,
- ciekłej,
- związanej chemicznie.

Najłatwiejszym sposobem przechowywania wodoru jest sprężanie go w postaci gazowej w butlach do ciśnienia około 30 MPa. Aby utrzymać takie ciśnienie (przy małej gęstości wodoru), butla musi być bardzo duża oraz wytrzymała, a i tak zmagazynowana w niej energia umożliwi przejechanie zaledwie ok. 200 km. Magazynowanie wodoru w postaci ciekłej wymaga oziębienia go do temperatury  $-253^{\circ}\text{C}$  oraz zastosowania specjalnego zbiornika kriogenicznego. Zbiornik ten ma mniejszą masę niż ciśnieniowy, ale zajmuje dużo większą objętość niż zbiornik benzyny. Wodór magazynowany w stanie ciekłym w sposób naturalny paruje (ok. 1...2% na dobę), a to z jednej strony powoduje duże ubytki przy dłuższym przechowywaniu, a z drugiej strony stwarza zagrożenie wybuchowe. Ten sposób magazynowania nieznacznie zwiększa gęstość energetyczną wodoru, czyli umożliwia przejechanie nieco dłuższego dystansu niż na wodorze magazynowanym w postaci gazowej. Magazynowanie wodoru w postaci związanej chemicznie polega na zastosowaniu akumulatorów wodorkowych, wykorzystujących możliwość tworzenia przez wodór gazowy roztworów stałych lub połączeń z niektórymi metalami. Wodorki metali otrzymuje się, działając wodorem pod odpowiednim ciśnieniem na stopy tych metali. Wydzielanie wodoru z wodorków następuje w wyniku ich podgrzania do temperatury około  $70^{\circ}\text{C}$ . Proces ładowania i rozładowania akumulatora wodorkowego może być powtarzany wielokrotnie. Ten sposób magazynowania wodoru jest dość prosty, ale jego wadą jest bardzo duża masa całej instalacji (największa w porównaniu z dwoma poprzednimi sposobami magazynowania wodoru). Pojazdy zasilane wodorem jeżdżą po drogach, lecz są to pojedyncze egzemplarze wyprodukowane przez firmy motoryzacyjne. Wodór może być wykorzystywany ponadto do zasilania ogniw paliwowych, stanowiących źródło energii napędu elektrycznego pojazdów.

## 2.2. Teoria spalania

**Spalanie** jest zjawiskiem chemicznym, polegającym na gwałtownym łączeniu się składników paliwa z tlenem, któremu towarzyszy wywiązywanie się znacznej ilości ciepła. Tlen potrzebny do spalania jest pobierany z atmosfery, dlatego należy pamiętać, że w procesie tym bierze również udział azot atmosferyczny. W dalszych rozważaniach przyjęto, że azot jest gazem nieaktywnym i przechodzi do spalin w stanie niezmienionym (w rzeczywistych warunkach azot reaguje z tlenem). Warunkami niezbędnymi do zainicjowania procesu spalania jest wytworzenie mieszanki palnej o określonych proporcjach paliwa i powietrza oraz energia, która doprowadzi do rozpoczęcia procesu. Energia ta może pochodzić z zewnątrz, jako ciepło iskry świecy zapłonowej powodujące zapłon

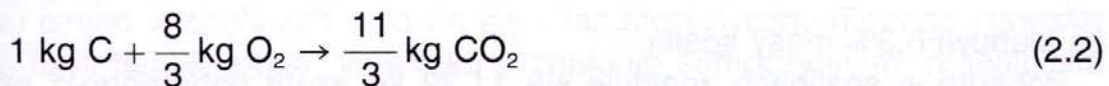
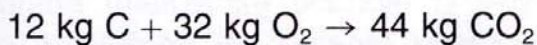
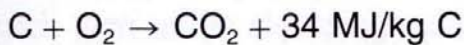
Tablica 2-5

## Przybliżony skład masowy paliw konwencjonalnych

Pierwiastek	Węgiel (C)	Wodór (H)	Siarka (S)	Tlen i azot
Benzyzna	0,855	0,145	–	–
Olej napędowy	0,866	0,129	0,003	0,002

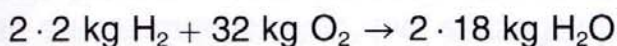
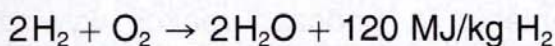
mieszanki lub może to być energia powstała podczas sprężania powietrza, w wyniku której powstaje samozapłon mieszanki palnej. Ilość powietrza potrzebną do spalania paliwa wyznacza się, znając skład chemiczny paliwa, wykorzystując do tego celu równania stechiometryczne. Do zasilania silników stosuje się paliwa węglowodorowe, których głównymi składnikami są: węgiel i wodór, a w ilościach śladowych występują: tlen, siarka i inne pierwiastki.

Reakcja chemiczna spalania (utleniania) węgla:



Z równania (2.2) wynika, że do spalania 1 kg węgla potrzeba  $\frac{8}{3}$  kg tlenu, a w wyniku reakcji powstaje  $\frac{11}{3}$  kg dwutlenku węgla oraz wydzielą się 34 MJ ciepła.

Reakcja chemiczna spalania (utleniania) wodoru:



Z równania (2.3) wynika, że do spalania 1 kg wodoru potrzeba 8 kg tlenu, a w wyniku reakcji powstaje 9 kg wody oraz wydzielą się 120 MJ ciepła.

W podobny sposób wyznacza się zapotrzebowanie powietrza niezbędnego do utlenienia pozostałych składników paliwa.

Na podstawie podanych reakcji stechiometrycznych oraz znajomości udziałów masowych poszczególnych pierwiastków w paliwie można wyznaczyć niezbędną ilość powietrza potrzebną do spalania 1 kg tego paliwa.

$$L_t = \frac{1}{0,232} \left( \frac{8}{3} C + 8H + S - O \right) \quad [\text{kg pow./kg pal.}] \quad (2.4)$$

gdzie: C, H, S, O – masowe udziały odpowiednio węgla, wodoru, siarki i tlenu w paliwie.

Współczynnik 0,232 określa masowy udział tlenu w powietrzu atmosferycznym wynoszący 23,2%.

Wykorzystując równanie (2.4), można określić ilość powietrza potrzebną do spalania 1 kg benzyny o składzie masowym określonym w tabelicy 2-5.

$$L_t = \frac{1}{0,232} \left( \frac{8}{3} 0,855 + 8 \cdot 0,145 \right) = 14,83 \text{ kg pow./kg pal.}$$

W zaokrągleniu przyjmuje się wartość  $L_t = 14,8$ .

Wykorzystując równania (2.2) i (2.3), można wyznaczyć skład spalin powstałych ze spalania 1 kg benzyny.

Ze spalania węgla powstanie

$$0,855 \frac{11}{3} = 3,13 \text{ kg CO}_2$$

co stanowi 19,7% masy spalin.

Ze spalania wodoru powstanie

$$0,145 \cdot 9 = 1,31 \text{ kg H}_2\text{O}$$

co stanowi 8,3% masy spalin

Ponadto w spalinach znajduje się 11,39 kg azotu pobranego z powietrza atmosferycznego, co stanowi 72% masy spalin.

Dla paliw gazowych zapotrzebowanie powietrza do spalania 1 m<sup>3</sup> paliwa wyznacza się, uwzględniając we wzorze udział objętościowy tlenu w powietrzu atmosferycznym (21%) i wyraża się je w m<sup>3</sup> powietrza na m<sup>3</sup> paliwa.

Podane reakcje chemiczne, ilustrujące proces spalania składników paliwa, są słuszne przy założeniu, że proces ten przebiegł do końca, czyli wszystkie palne składniki paliwa uległy utlenieniu, a podczas reakcji wywiązała się

Tablica 2-6

#### Zapotrzebowanie powietrza do spalania jednostki paliwa

Rodzaj paliwa	Zapotrzebowanie powietrza w m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	Zapotrzebowanie powietrza w kg/kg
Benzyna	–	14,8
Olej napędowy	–	14,5
Nafta	–	15,0
Metanol	–	6,5
Etanol	–	9,0
LPG	15,7	–
Gaz ziemny	9,5	–
Wodór	2,41	–

maksymalna ilość ciepła. Spalanie takie nazywa się spalaniem całkowitym i zupełnym (bez reszty). W rzeczywistych warunkach pracy silnika spalinowego proces taki występuje rzadko, dlatego spalanie na ogół jest niezupełne i niecałkowite. Towarzyszy temu wywiązywanie się mniejszej ilości ciepła, a w spalinach pojawiają się składniki toksyczne. Do głównych przyczyn występowania spalania niecałkowitego lub niezupełnego zalicza się m.in.:

- niedostateczne wymieszanie paliwa z powietrzem,
- zbyt krótki czas na odparowanie paliwa i wymieszanie go z powietrzem,
- wzbogacenie mieszanki wymuszone warunkami pracy,
- bardzo ograniczony czas przeznaczony na spalanie mieszanki,
- występowanie podczas spalania zjawisk, wynikających z niejednorodności mieszanki oraz wychłodzenia mieszanki w obszarach przyściennych komory spalania.

Spalanie niezupełne jest zjawiskiem typowym dla silnika o zapłonie iskrowym. W silnikach tych udaje się osiągnąć dobre wymieszanie paliwa z powietrzem, lecz spalaną mieszankę cechuje ogólny niedobór powietrza. Część węgla z paliwa zawartego w spalanej mieszance ulega niezupełnemu utlenieniu, w wyniku czego w spalinach pojawia się charakterystyczny dla tego zjawiska związek, czyli tlenek węgla. W silniku o zapłonie samoczynnym, pracującym najczęściej z ogólnym nadmiarem powietrza, spalanie niecałkowite może wystąpić jako wynik miejscowych niedoborów powietrza lub wskutek przedłużającego się spalania mieszanek z nadmiarem powietrza. Węgiel cząsteczkowy, wydzielający się z rozpadu paliwa węglowodorowego pod wpływem wysokiej temperatury oraz miejscowych niedoborów tlenu, spala się niecałkowicie; część węgla nie bierze udziału w reakcji, czego wynikiem jest występowanie w spalinach sadzy (czysty węgiel).

Spalanie paliwa w teoretycznie niezbędnej ilości powietrza, wyznaczonej z równań stechiometrycznych, jest szczególnym i dość rzadko występującym przypadkiem spalania. Stosunek ilości paliwa do ilości powietrza zmienia się w dość szerokich granicach, zależnie od konstrukcji silnika, sposobu tworzenia mieszanki, sposobu regulacji silnika oraz warunków jego pracy. Różnice ilości powietrza w mieszance w stosunku do teoretycznej ilości powietrza liczbowo ujmuje **współczynnik nadmiaru powietrza**

$$\lambda = \frac{L}{L_t} \quad (2.5)$$

gdzie:

- $L$  – rzeczywista ilość powietrza zawarta w spalanej mieszance,
- $L_t$  – teoretyczna ilość powietrza niezbędna do całkowitego i zupełnego spalania paliwa zawartego w mieszance.

Współczynnik nadmiaru powietrza jest wielkością bezwymiarową.

- Zależnie od wartości  $\lambda$ , spalana w silnikach mieszankę określa się jako:
- mieszankę bogatą (w mieszance jest za dużo paliwa lub za mało powietrza) dla  $\lambda < 1$ ,
  - mieszankę stechiometryczną (idealną) dla  $\lambda = 1$ ,
  - mieszankę ubogą (w mieszance jest za mało paliwa lub za dużo powietrza) dla  $\lambda > 1$ .

Skład mieszanki ma decydujący wpływ na przebieg procesu spalania, zużycie paliwa i moc osiąganą przez silnik oraz toksyczność spalin.

Silniki o zapłonie iskrowym z pośrednim wtryskiem paliwa sterowanym elektronicznie są zasilane mieszankami o składzie zbliżonym do stechiometrycznego. Wynika to głównie z faktu współpracy silnika z reaktorem katalitycznym. Oczywiście jest, że mieszanka musi być wzbogacana w czasie rozruchu. W silniku ZI z bezpośrednim wtryskiem paliwa jest tworzona tzw. mieszanka uwarstwiona, która charakteryzuje się średnim współczynnikiem nadmiaru powietrza co najmniej  $\lambda = 1,3$ . Mieszanka paliwowo-powietrzna w silniku ZI, aby uległa zapłonowi, musi zawierać się w granicach zapalności, określonych współczynnikiem  $\lambda = 0,4 \dots 1,4$ . Silniki o zapłonie samoczynnym charakteryzują się pracą na mieszankach ubogich o wartości współczynnika  $\lambda = 1,15 \dots 1,7$ . Skład mieszanki w tych silnikach zależy głównie od typu zastosowanej komory spalania (większy nadmiar powietrza przy komorach niedzielonych). W silnikach doładowanych współczynnik nadmiaru powietrza osiąga wartości  $\lambda > 2$ .

W podrozdziale 2.1 każde z paliw scharakteryzowano wartością opałową, czyli ilością ciepła wywiązanej podczas spalania jednostki paliwa zmniejszonego o ciepło parowania wody powstałej w czasie tego procesu. Rzeczywiście procesowi spalania paliw towarzyszą jednak zawsze straty, które powodują, że ilość rzeczywiście wywiązanej ciepła jest mniejsza od wartości opałowej paliwa. Główne przyczyny strat ciepła w czasie spalania paliwa to:

- odprowadzanie pewnej ilości ciepła przez czynnik chłodzący oraz skutek promieniowania,
- niezupełne i niecałkowite spalanie,
- dysocjacja produktów spalania.

Wartość strat ciepła określa **współczynnik wykorzystania ciepła**  $\xi$  (ksi). Rzeczywistą ilość ciepła uzyskiwanego podczas spalania  $Q$  stanowi iloczyn wartości opałowej paliwa  $W_u$  i współczynnika wykorzystania ciepła  $\xi$ .

$$Q = \xi W_u \quad [\text{kJ/kg pal.}] \quad (2.6)$$

W znamionowych warunkach pracy silnika współczynnik wykorzystania ciepła  $\xi = 0,7 \dots 0,9$  (mniejsze wartości dla silników ZI).

W cylindrze silnika podczas spalania parametry gazów spalinowych osiągają następujące wartości maksymalne:

- temperatura spalania:
  - $T_s = 1900 \dots 2300 \text{ K}$  w silnikach ZS,
  - $T_s = 2500 \dots 2800 \text{ K}$  w silnikach ZI;

- ciśnienie spalania:
  - $p_s = 3...6$  MPa w silnikach ZI,
  - $p_s = 5...9$  MPa w niedoładowanych silnikach ZS (zależnie od typu komory spalania, ciśnienie wyższe dla komór niedzielonych).
  - W doładowanych silnikach ZS ciśnienie spalania może wynosić do 12 MPa.

## 2.3. Proces spalania w silnikach ZI

### 2.3.1. Przebieg spalania w silnikach ZI

W silnikach ZI zapłon mieszanki palnej jest wymuszony i powstaje od iskry elektrycznej, która stanowi zewnętrzne źródło energii. Warunkiem koniecznym do powstania i rozwoju procesu spalania jest uprzednie odpowiednie przygotowanie mieszanki palnej. Na przygotowanie mieszanki palnej składa się rozpylenie paliwa, jego odparowanie oraz wymieszanie par paliwa z powietrzem. W silniku ZI z wtryskiem pośrednim mieszanka jest tworzona w kolektorze dolotowym, a w silniku ZI z wtryskiem bezpośrednim mieszanka jest tworzona wewnątrz cylindra. Intensywność odparowania paliwa, a następnie jego skuteczne wymieszanie z powietrzem, można zwiększyć, stosując:

- podgrzewanie mieszanki w kolektorze dolotowym,
- większe wartości stopnia sprężania, a tym samym temperatury ładunku w cylindrze podczas sprężania,
- intensywne zawirowanie ładunku podczas napełniania cylindra i w czasie sprężania.

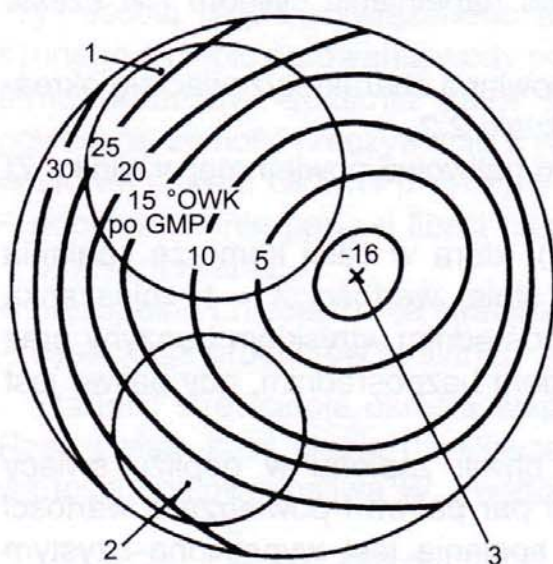
Odpowiednio przygotowana mieszanka powinna charakteryzować się określonym składem przedstawionym w podrozdziale 2.2.

Ze względu na rozkład i postać mieszanki paliwowo-powietrznej w silniku ZI wyróżnia się:

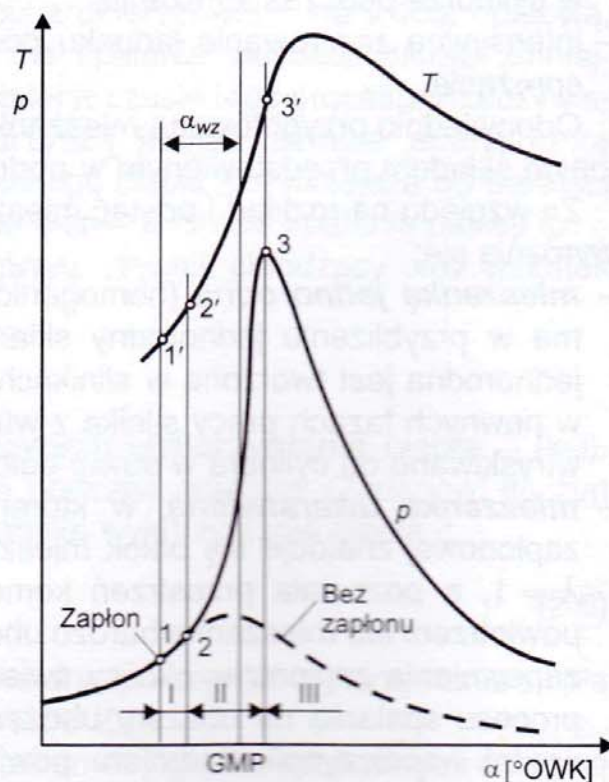
- **mieszankę jednorodną** (homogeniczną), która w całej komorze spalania ma w przybliżeniu jednorodny skład o stałej wartości  $\lambda = 1$ ; mieszanka jednorodna jest tworzona w silnikach z pośrednim wtryskiem benzyny oraz w pewnych fazach pracy silnika z wtryskiem bezpośrednim, gdy paliwo jest wtryskiwane do cylindra w suwie dolotu;
- **mieszankę uwarstwioną**, w której w chwili zapłonu w pobliżu świecy zapłonowej znajduje się obłok mieszanki par paliwa i powietrza o wartości  $\lambda = 1$ , a pozostała przestrzeń komory spalania jest wypełniona czystym powietrzem lub mieszanką bardzo ubogą; uwarstwienie ładunku prowadzi do zapewnienia zapłonu w okolicy świecy zapłonowej i rozprzestrzeniania się procesu spalania na obszary uboższej mieszanki już od frontu płomienia; średni współczynnik nadmiaru powietrza mieszanki uwarstwionej wynosi zwykle ok.  $\lambda = 1,3$ ; mieszankę tego typu uzyskuje się w pewnych fazach pracy silnika z bezpośrednim wtryskiem benzyny do cylindra.

Do uzyskania zapłonu mieszanki energia iskry świecy zapłonowej musi być większa od energii niezbędnej do wywołania spalania. Iskra zapłonowa inicjująca

spalanie występuje pod koniec suwu sprężania. Chwilę tę ściśle określa **kąt wyprzedzenia zapłonu**  $\alpha_{wz}$ . Wartość tego kąta określa, na ile stopni obrotu wału korbowego przed osiągnięciem przez tłok położenia GMP występuje iskra między elektrodami świecy zapłonowej. Wartość kąta wyprzedzenia zapłonu wynosi zwykle  $5...30^\circ\text{OWK}$ . Dobór wartości kąta wyprzedzenia zapłonu odbywa się z uwzględnieniem małej toksyczności spalin, małego zużycia paliwa oraz dużej wartości momentu obrotowego. Spełnienie tych kryteriów jednocześnie nie jest możliwe, dlatego wartość kąta wyprzedzenia zapłonu stanowi kompromis uwzględniający podane kryteria. Kąt wyprzedzenia zapłonu powinien być tak dobrany do silnika, aby ciśnienie w cylindrze podczas spalania osiągnęło wartość maksymalną ok.  $10...15^\circ\text{OWK}$  po GMP. Aby zachować stały punkt występowania maksymalnego ciśnienia w cylindrze w czasie spalania przy zmiennych warunkach pracy silnika, kąt wyprzedzenia zapłonu, a więc chwila wystąpienia iskry między elektrodami świecy zapłonowej, musi ulegać zmianie. Zapalona w strefach najbliższych świecy zapłonowej część mieszanki palnej podgrzewa dalsze jej części i w ten sposób płomień rozprzestrzenia się na cały ładunek z prędkością nazywaną prędkością rozprzestrzeniania się płomienia (rys. 2.5). Prędkość ta zależy od właściwości paliwa, składu i struktury mieszanki palnej oraz wielu innych czynników. Przeciętna prędkość rozprzestrzeniania się płomienia przy prawidłowym przebiegu procesu spalania wynosi  $20...40\text{ m/s}$ .



**Rys. 2.5.** Schemat rozprzestrzeniania się płomienia od świecy zapłonowej  
1 – zawór dolotowy, 2 – zawór wylotowy,  
3 – świeca zapłonowa



**Rys. 2.6.** Przebieg zmian ciśnienia i temperatury w cylindrze silnika ZI w funkcji kąta obrotu wału korbowego (opis w tekście)

**Etapy procesu spalania.** Na rysunku 2.6 przedstawiono wykres zmian ciśnienia i temperatury w cylindrze spowodowany procesem spalania. W procesie spalania mieszanki w cylindrze silnika o zapłonie iskrowym można wyróżnić trzy etapy.

**Etap wstępny (I)** trwa od chwili pojawienia się iskry elektrycznej między elektrodami świecy zapłonowej (1) do chwili gwałtownego wzrostu ciśnienia spowodowanego zapłonem mieszanki (2). Etap ten obejmuje chemiczne opóźnienie zapłonu mieszanki i tworzenie się początkowego ogniska spalania. Etap wstępny, zwany również etapem spalania utajonego, jest bardzo krótki, a czas jego trwania zależy od składu i struktury mieszanki palnej, od temperatury i ciśnienia mieszanki oraz od energii źródła zapłonu.

**Etap właściwego spalania (II)** rozpoczyna się w chwili, gdy nastąpi widoczny wzrost ciśnienia spowodowany spalaniem (2), a kończy się gdy ciśnienie w cylindrze osiągnie wartość maksymalną (3). W tym etapie czoło płomienia rozprzestrzenia się od obszaru zapłonu przez całą objętość mieszanki i następuje bardzo szybkie wywiązywanie się ciepła, któremu towarzyszy gwałtowny przyrost ciśnienia. Etap ten kończy się, gdy czoło płomienia ogarnia najodleglejsze od świecy zapłonowej obszary komory spalania, czemu odpowiada maksymalna wartość ciśnienia. Czas trwania tego etapu zależy od ukształtowania i wymiarów komory spalania, położenia w komorze spalania świecy zapłonowej, intensywności zawirowania mieszanki, właściwości paliwa i innych czynników.

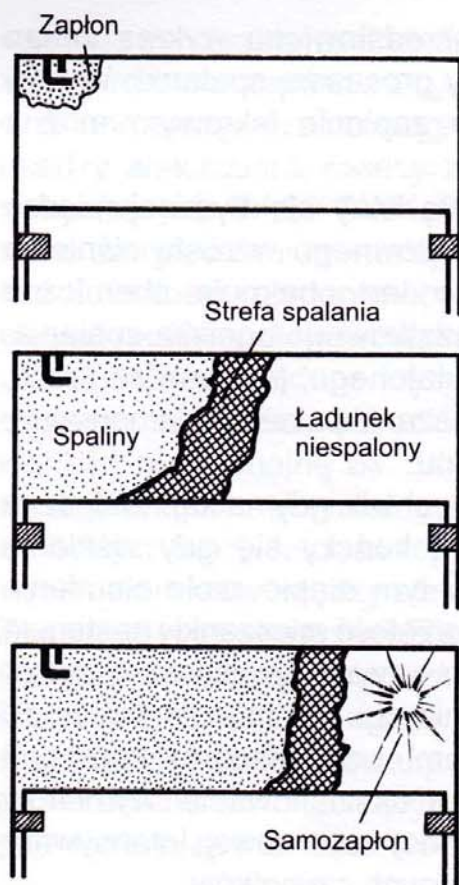
**Etap dopalania (III)** trwa od chwili wystąpienia maksymalnej wartości ciśnienia (3) do zakończenia wydzielania się ciepła. W tym etapie dopalają się resztki mieszanki w objętości komory spalania. Ciśnienie zmniejsza się w wyniku wzrostu objętości zajmowanej przez ładunek. Temperatura spalania w tym etapie osiąga wartość maksymalną. Etap ten powinien być w miarę krótki, gdyż wydzielanie ciepła odbywa się przy powiększającej się objętości. Powoduje to zwiększenie strat cieplnych, a więc zmniejsza sprawność silnika. Etap dopalania kończy proces spalania.

### 2.3.2. Spalanie stukowe i zapłon żarowy

Charakterystyczną cechą prawidłowego spalania w silniku o zapłonie iskrowym jest spalanie mieszanki tylko od płomienia pierwotnie zapalonego w komorze spalania od iskry świecy zapłonowej. W pewnych warunkach, w cylindrze silnika ZI może dojść do zapłonu mieszanki od innego źródła niż iskra świecy zapłonowej. Proces spalania, podczas którego występują nieprawidłowości, jest procesem zakłóconym, wywołującym straty mocy silnika, wzrost zużycia paliwa, niszczenie silnika i inne niepożądane skutki. Rozróżnia się dwa groźne zjawiska, prowadzące do nieprawidłowego przebiegu spalania w silniku ZI:

- spalanie stukowe,
- zapłon żarowy (powierzchniowy).

**Spalanie stukowe.** Zjawisko spalania stukowego jest związane z samozapłonem mieszanki spowodowanym nadmiernym wzrostem temperatury powyżej



**Rys. 2.7.** Schemat powstawania spalania stukowego

temperatury samozapłonu. Dla benzyn graniczna temperatura, powyżej której następuje samozapłon części mieszanki, wynosi około  $750^{\circ}\text{C}$ . Schemat powstawania spalania stukowego przedstawiono na rysunku 2.7. Proces spalania, w którym występuje spalanie stukowe, zaczyna się tak samo, jak prawidłowy proces spalania, od zapalenia iskrą elektryczną części mieszanki znajdującej się w najbliższych okolicach świecy zapłonowej. Początkowo powstały płomień rozprzestrzenia się z prędkością  $20 \dots 40 \text{ m/s}$  w kierunku nie zapalanej części mieszanki. Zapalona część mieszanki podgrzewa i spręża część nie objętą jeszcze płomieniem. Jeżeli temperatura nie zapalanej mieszanki przekroczy w jakimś obszarze temperaturę graniczną, następuje w nim gwałtowny samozapłon tej części ładunku. Narażone są na to obszary najbardziej oddalone od świecy zapłonowej, gdyż mieszanka najdłużej pozostaje w nich pod działaniem zapalonego już ładunku. Po samozapłonie części mieszanki powstaje kolejne źródło płomienia, który przemieszcza się z bardzo dużą prędkością,

przekraczającą nawet  $1000 \text{ m/s}$ . Ciśnienie w komorze spalania rośnie szybciej niż przy prawidłowym spalaniu. Wysoka temperatura powoduje tworzenie się nowych, kolejnych ognisk samozapłonu. W komorze spalania zderzają się fale uderzeniowe powstałych płomieni, powodując rozbite ukierunkowanego na tłok płomienia właściwego, powstałego od zapłonu elektrycznego. Fale te uderzają o ścianki głowicy, cylindra i denko tłoka, wywołując ogromne drgania masy gazów, objawiające się pulsacjami ciśnienia. Charakterystyczny wykres indykatorowy dla spalania stukowego (tzw. piłokształtny) pokazano na rysunku 2.8. Zjawisku temu towarzyszą metaliczne dźwięki (stuk), stąd nazwa zjawiska – spalanie stukowe. Bezpośrednią przyczyną występowania spalania stukowego jest to, że w określonej temperaturze panującej w komorze spalania benzyna tworząca z powietrzem mieszankę nie ma wystarczającej odporności na samozapłon. Pośrednio spalanie stukowe zależy od czynników konstrukcyjnych i eksploatacyjnych silnika, które zostaną przedstawione w kolejnym rozdziale. Spalanie stukowe jest zjawiskiem bardzo niekorzystnym, ponieważ prowadzi do:

- znacznego zmniejszenia mocy silnika,
- zwiększenia zużycia paliwa,
- zwiększenia nierównomierności pracy silnika,
- nadmiernego obciążenia mechanicznego elementów układu korbowego, co przyczynia się do zmniejszenia trwałości silnika lub jego nagłej awarii,