

**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.

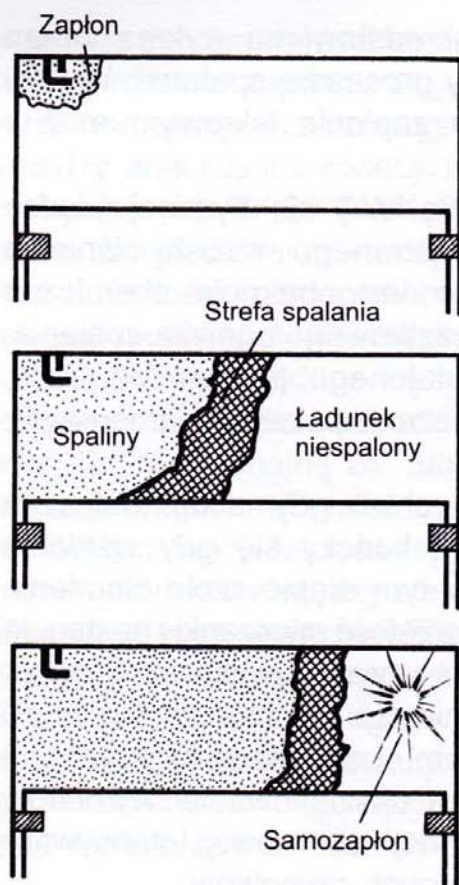
**Etap dopalania (III)** trwa od chwili wystąpienia maksymalnej wartości ciśnienia (3) do zakończenia wydzielania się ciepła. W tym etapie dopalają się resztki mieszanki w objętości komory spalania. Ciśnienie zmniejsza się w wyniku wzrostu objętości zajmowanej przez ładunek. Temperatura spalania w tym 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

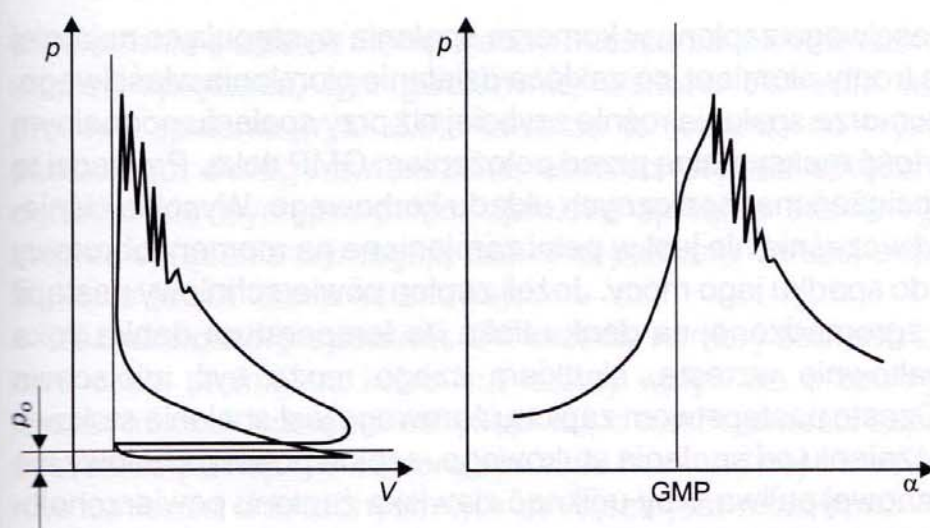


**Rys. 2.7.** Schemat powstawania spalania stukowego

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 iskry elektryczną częścią 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,



Rys. 2.8. Typowy dla spalania stukowego wykres indykatorowy  
 $p_0$  – ciśnienie otoczenia

- przegrzewania się elementów silnika (uszkodzenia termiczne denka tłoka, zaworów),
- innego nieprawidłowego spalania, którym jest zapłon żarowy.

Głównym sposobem zapobiegania temu zjawisku jest stosowanie paliw o odpowiedniej liczbie oktanowej. W warunkach eksploatacyjnych, w silnikach z układami zapłonowymi sterowanymi elektronicznie, w razie pojawienia się pierwszych oznak spalania stukowego następuje zmniejszenie kąta wyprzedzenia zapłonu, czyli opóźnienie zapłonu. Kierowca decydujący o warunkach pracy silnika, aby zapobiec spalaniu stukowemu, powinien zmniejszyć obciążenie silnika i doprowadzić do wzrostu jego prędkości obrotowej (zmiana biegu na niższy).

**Zapłon żarowy.** Zjawisko zapłonu żarowego (powierzchniowego) jest związane z występowaniem dodatkowego źródła zapłonu w postaci dowolnego gorącego miejsca w komorze spalania. Zapłon powierzchniowy może wystąpić przed lub po przeskoku iskry elektrycznej między elektrodami świecy zapłonowej w jednym lub jednocześnie w kilku miejscach komory spalania. Bezpośrednią przyczyną powstawania zapłonu żarowego jest zbyt wysoka temperatura w cylindrze silnika, która nadmiernie nagrzewa metalowe elementy komory spalania. Ponadto, zjawisko to może wystąpić wskutek zanieczyszczenia wnętrza komory spalania nagarem, który intensywnie się nagrzewa lub nieprawidłowo dobranej do silnika świecy zapłonowej. Świeca zapłonowa o zbyt niskiej wartości cieplnej (za gorąca) szybko osiąga temperaturę pracy. Przy dużym obciążeniu silnika temperatura izolatora i elektrod świecy nadmiernie wzrasta, doprowadzając do zapłonu mieszanki przed wystąpieniem iskry. Powstający przy zapłonie powierzchniowym płomień rozprzestrzenia się z normalną prędkością. Szczególnie groźny dla pracy silnika jest zapłon żarowy występujący przed pojawieniem się iskry na świecy zapłonowej. Proces spalania rozpoczyna się wcześniej niż wynika to z wartości kąta wyprzedzenia zapłonu.

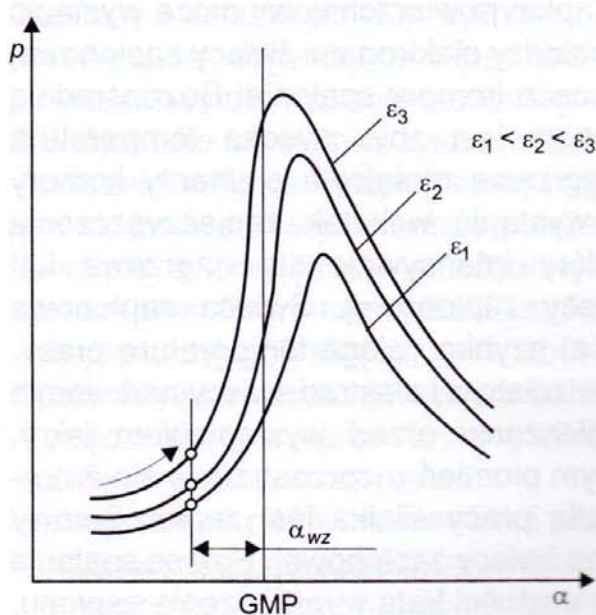
Po pojawieniu się właściwego zapłonu w komorze spalania występują co najmniej dwa poruszające się fronty płomieni, co zakłóca działanie płomienia właściwego. Ciśnienie gazów w komorze spalania rośnie szybciej niż przy spalaniu normalnym i może osiągnąć wartość maksymalną przed położeniem GMP tłoka. Prowadzi to do bardzo dużych obciążeń mechanicznych układu korbowego. Wysokie ciśnienie występujące zbyt wcześnie nie jest w pełni zamieniane na moment obrotowy silnika, co prowadzi do spadku jego mocy. Jeżeli zapłon powierzchniowy nastąpił od warstwy nagaru zgromadzonej na denku tłoka, to temperatura denka tłoka w tym miejscu gwałtownie wzrasta, skutkiem czego może być miejscowe nadtopienie denka. Często następstwem zapłonu żarowego jest spalanie stukowe (i odwrotnie). W odróżnieniu od spalania stukowego, zapłon powierzchniowy nie zależy od liczby oktanowej paliwa. Aby uniknąć zjawiska zapłonu powierzchniowego, należy ograniczyć nadmierny wzrost temperatury w komorze spalania.

### 2.3.3. Wpływ czynników konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na przebieg spalania w silniku ZI

**Czynniki konstrukcyjne**, mające wpływ na przebieg spalania w silniku o zapłonie iskrowym, stanowią:

- stopień sprężania,
- kształt komory spalania,
- wymiary i liczba cylindrów,
- usytuowanie świecy zapłonowej w komorze spalania,
- materiał tłoka i głowicy,
- doładowanie silnika,
- recyrkulacja spalin.

**Stopień sprężania.** Ze względu na sprawność silnika jest korzystne stosowanie możliwie dużych stopni sprężania. Wzrost stopnia sprężania powoduje



Rys. 2.9. Wpływ stopnia sprężania  $\varepsilon$  na przebieg ciśnienia spalania w silniku ZI  
 $\alpha_{wz}$  – kąt wyprzedzenia zapłonu

zwiększenie ciśnienia i temperatury mieszanki w chwili zapłonu. Im większy jest stopień sprężania, tym gwałtowniej wzrasta ciśnienie w cylindrze podczas procesu spalania (rys. 2.9). Stwarza to warunki do występowania spalania stukowego, dlatego zwiększanie wartości stopnia sprężania w silniku ZI jest ograniczone występowaniem zjawiska spalania stukowego. Silniki o dużym stopniu sprężania wymagają zasilania paliwem o dużej odporności na spalanie stukowe (duża liczba oktanowa).

**Kształt komory spalania.** Od kształtu komory spalania zależy pole powierzchni czoła płomienia, które ma istotny wpływ na przebieg procesu spalania. Kształt komory spalania decyduje też o intensywności i sposobie zawirowania mieszanki palnej. Im komora spalania ma bardziej zwarty kształt o ściankach równomiernie chłodzonych, tym mniejsza jest możliwość wystąpienia spalania stukowego. Większa intensywność zawirowania mieszanki decyduje o przygotowaniu jej do spalania, co z kolei wpływa na szybkość spalania. Zbyt duże prędkości spalania nie są wskazane, ze względu na tzw. twardość pracy silnika (gwałtowny przyrost ciśnienia wewnątrz cylindra) i skłonność do spalania stukowego.

**Wymiary i liczba cylindrów.** W cylindrze o dużej objętości, a zwłaszcza o dużej średnicy (przy tym samym stopniu sprężania) wydłuża się droga czoła płomienia od źródła zapłonu do najodleglejszego miejsca komory spalania. Przy mniejszej średnicy cylindra (zachowanej objętości) droga ta skraca się, a ponadto polepszają się warunki odprowadzania ciepła, gdyż zwiększa się powierzchnia chłodzenia. Ze względu na możliwość występowania spalania stukowego w silnikach ZI stosuje się cylindry o niewielkich objętościach skokowych. Przy dużej objętości skokowej silnika korzystne jest stosowanie większej liczby mniejszych cylindrów.

**Usytuowanie świecy zapłonowej w komorze spalania.** Świeca zapłonowa w komorze spalania powinna być umieszczona w pobliżu jej najgorętszej części, czyli w pobliżu zaworu (zaworów) wylotowych, tak aby w końcowym okresie spalania mieszanka najmniej się ogrzewała. Ponadto wskazane jest, aby świeca zapłonowa była umieszczona w komorze spalania centralnie, co przyspiesza spalanie mieszanki, a tym samym skraca czas działania wysokiej temperatury i wysokiego ciśnienia na mieszankę jeszcze nie zapaloną, znajdującą się w obszarach położonych najdalej od świecy. Takie umieszczenie świecy zapłonowej w komorze spalania, lub zastosowanie więcej niż jednej świecy, zmniejsza możliwość wystąpienia spalania stukowego.

**Materiał tłoka i głowicy.** Własnością fizyczną materiału tłoka i głowicy, mającą wpływ na przebieg spalania, jest przewodność cieplna. Im przewodność cieplna zastosowanego materiału jest większa, tym mniejsza jest możliwość wystąpienia spalania stukowego ze względu na niższą temperaturę ładunku w cylindrze. Zastosowanie na tłoki i głowice stopów lekkich zamiast żeliwa umożliwia zwiększenie stopnia sprężania silnika bez narażania go na spalanie stukowe.

**Doładowanie silnika.** Podczas sprężania powietrza w procesie doładowania wzrasta jego ciśnienie i temperatura. Prowadzi to do wzrostu parametrów

termodynamicznych ładunku w czasie sprężania i spalania. Sprawia to, że mieszanka w czasie spalania jest bardziej narażona na zjawisko spalania stukowego.

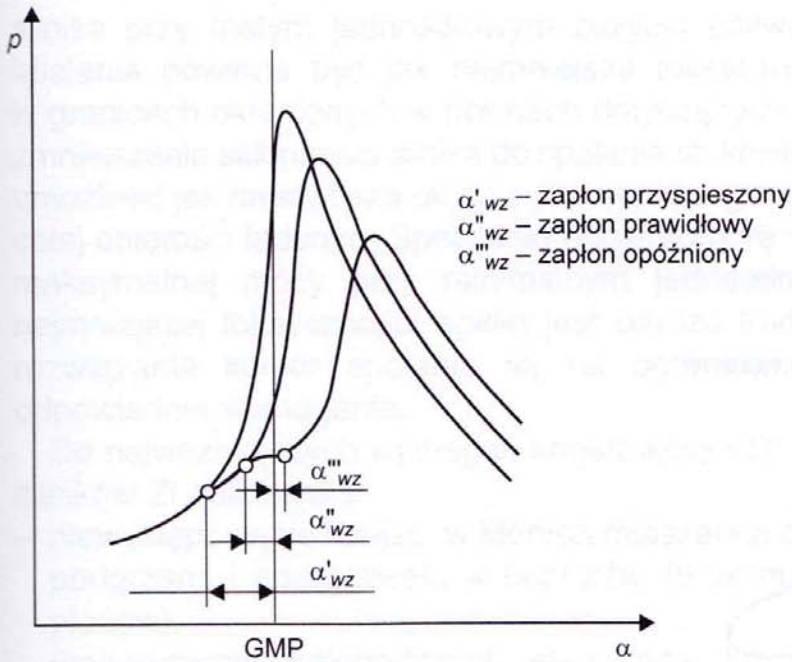
**Recyrkulacja spalin.** Celem recyrkulacji spalin jest doprowadzenie pewnej ilości spalin do świeżego ładunku. Zmniejsza to ilość tlenu w komorze spalania, obniżając temperaturę spalania mieszanki. W wyniku takiego działania spalana mieszanka ma większą odporność na spalanie stukowe.

**Czynniki eksploatacyjne**, mające wpływ na przebieg spalania w silniku o zapłonie iskrowym, stanowią:

- skład i rodzaj mieszanki palnej,
- kąt wyprzedzenia zapłonu,
- prędkość obrotowa silnika,
- obciążenie silnika,
- intensywność chłodzenia,
- stan techniczny silnika.

**Skład i rodzaj mieszanki palnej.** Szybkość spalania mieszanki palnej zależy od składu określonego współczynnikiem nadmiaru powietrza. Największą szybkością spalania charakteryzują się mieszanki o współczynniku  $\lambda = 0,8 \dots 0,9$ . Przy spalaniu takiej mieszanki silnik osiąga maksymalną moc (charakterystyka regulacyjna składu mieszanki – patrz rys. 3.10), lecz mieszanka ta ma również największą skłonność do spalania stukowego. Zmiana składu mieszanki, w kierunku zarówno jej wzbogacenia, jak i zubożenia, zwiększa jej odporność na spalanie stukowe. Mieszanki jednorodnie spalają się najszybciej, dlatego im jednorodność mieszanki jest większa, tym jest ona bardziej narażona na spalanie stukowe. Na zjawisko spalania stukowego bardzo odporne są mieszanki uwarstwione, co umożliwia zwiększenie stopnia sprężania w silnikach z wtryskiem bezpośrednim.

**Kąt wyprzedzenia zapłonu.** Wpływ kąta wyprzedzenia zapłonu na przebieg ciśnienia spalania pokazano na rysunku 2.10 (stały stopień sprężania). Kąt  $\alpha_{wz}$  to kąt optymalny, przy którym maksymalna wartość ciśnienia występuje ok.  $10 \dots 15^\circ \text{OWK}$  po GMP. Silnik w takich warunkach pracy ma największą sprawność, czyli osiąga największą moc przy minimalnym jednostkowym zużyciu paliwa. Wzrost kąta wyprzedzenia zapłonu powoduje, że spalanie przenosi się bardziej na suw sprężania. Występuje szybszy wzrost ciśnienia, a wartość maksymalna ciśnienia jest wyższa niż przy spalaniu z prawidłowym kątem wyprzedzenia zapłonu. Z gwałtownym wzrostem ciśnienia jest związany również wzrost temperatury spalanego ładunku. Przedwczesny zapłon zwiększa skłonność spalanej mieszanki do spalania stukowego, a elementy silnika w tych warunkach są bardziej narażone na przegrzanie i uszkodzenia mechaniczne. Zwiększa się tzw. twardość biegu silnika (szybkość wzrostu ciśnienia w cylindrze). Przy opóźnionym zapłonie (kąt wyprzedzenia zapłonu mniejszy niż prawidłowy) proces spalania przesuwają się bardziej na suw rozprężania. Ruch tłoka w kierunku GMP i związana z tym zwiększająca się objętość komory spalania powodują, że spalanie ładunku odbywa się z mniejszą szybkością.

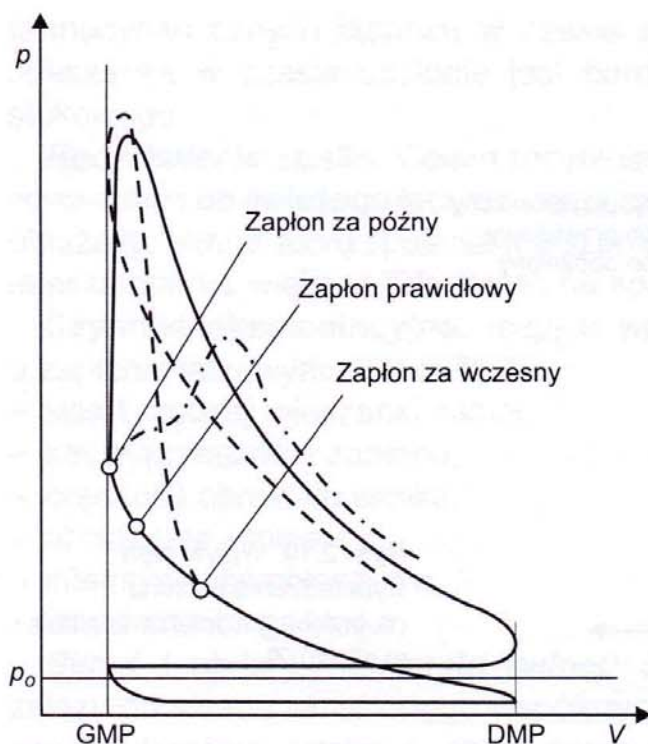


**Rys. 2.10.** Wpływ kąta wyprzedzenia zapłonu na przebieg ciśnienia spalania w silniku ZI

Krzywe przyrostu ciśnienia podczas spalania stają się mniej strome, a krzywa rozprężania przebiega wyżej, zmniejsza się więc sprawność ogólna silnika. Moc silnika maleje, a jego elementy ulegają przegrzewaniu. Silniki współczesnych pojazdów samochodowych są silnikami o znacznym wysileniu, czyli podczas pracy są poddawane dużym obciążeniom mechanicznym i cieplnym. Powoduje to, że przy optymalnym kącie wyprzedzenia zapłonu są one narażone na występowanie zjawiska spalania stukowego. Dlatego w elektronicznym systemie sterowania zapłonem umieszcza się czujnik spalania stukowego, którego zadaniem jest wykrycie drgań silnika świadczących o rozpoczynającym się spalaniu stukowym. Na podstawie tej informacji sterownik zapłonu w silniku zmniejsza chwilową wartość kąta wyprzedzenia zapłonu aż do uzyskania niewystępowania objawów świadczących o spalaniu stukowym, a następnie stopniowo zwiększa ten kąt do wartości optymalnej w celu uzyskania najlepszych warunków pracy silnika. Typowe wykresy indykatorowe dla zbyt wczesnego i zbyt późnego zapłonu przedstawiono na rysunku 2.11.

**Prędkość obrotowa.** Ze wzrostem prędkości obrotowej wału korbowego silnika zwiększa się zawirowanie mieszanki, które sprzyja zwiększeniu szybkości spalania. Jednocześnie skraca się czas kontaktu paliwa z powietrzem, zwiększa się współczynnik oddawania ciepła przez ścianki komory spalania oraz zwiększa się procentowa zawartość spalin w świeżym ładunku. Wszystko to sprawia, że w miarę wzrostu prędkości obrotowej silnika zmniejsza się skłonność mieszanki palnej do spalania stukowego.

**Obciążenie silnika.** W silniku o zapłonie iskrowym chwilową moc silnika reguluje się kątem uchylenia przepustnicy. Wzrost obciążenia to większy kąt uchylenia przepustnicy i mniejsze dławienie przepływu ładunku w czasie przepływu przez układ dolotowy, w wyniku czego napełnienie cylindra jest lepsze. Zwiększa się wartość ciśnienia na początku sprężania. Sprzyja to



Rys. 2.11. Wykresy indykatorowe dla niewłaściwych kątów wyprzedzenia zapłonu

występowaniu spalania stukowego i to tym bardziej, im większe jest obciążenie silnika (przy stałej prędkości obrotowej silnika).

**Intensywność chłodzenia silnika.** Niedostateczne chłodzenie silnika powoduje wzrost temperatury ścianek komory spalania i cylindra, co sprzyja spalaniu stukowemu. Nadmierne chłodzenie prowadzi z kolei do wychłodzenia ładunku i pogorszenia warunków spalania, a wskutek tego zmniejszenia mocy i zwiększenia jednostkowego zużycia paliwa.

**Stan techniczny silnika.** Podczas eksploatacji silnika w jego komorze spalania gromadzą się zanieczyszczenia, którymi są cząstki stałe powstałe w trakcie procesu spalania. Warstwa osadu (tzw. nagaru) zwiększa stopień sprężania oraz stanowi izolację w przewodzeniu ciepła. Skutkiem tego jest wzrost skłonności mieszanki do spalania stukowego oraz możliwość wystąpienia zapłonu powierzchniowego od żarzących się cząstek zanieczyszczeń. Ten negatywny wpływ zanieczyszczenia komory spalania na przebieg procesu spalania zależy od stopnia zużycia elementów komory spalania. Pogorszenie szczelności komory spalania powoduje zmniejszenie ciśnienia sprężania, co wpływa na zmniejszenie skłonności do spalania stukowego.

### 2.3.4. Komory spalania silników ZI

Na przebieg procesu spalania w silniku o zapłonie iskrowym istotny wpływ ma **komora spalania**, czyli przestrzeń nad tłokiem znajdującym się w GMP. Właściwa konstrukcja komory spalania powinna zapewniać przede wszystkim prawidłowy przebieg procesu spalania. Skutkiem właściwego spalania powinno być osiągnięcie dużej mocy (objętościowego wskaźnika mocy, patrz podrozdz. 3.1)