



6. W pogoni za mocą

Jan Czyżewski

6.1 Wstęp

W zasadzie już od momentu powstania pierwszych poprawnie działających silników (przy czym jako pierwsze znacznie rozpowszechniły się silniki parowe), zaczął się wyścig konstruktorów w zwiększaniu mocy tych maszyn. Przekładało się to na większe możliwości transportowe napędzanych nimi pojazdów, jak i możliwość napędzania coraz większych maszyn i urządzeń. Najwięcej emocji budziła jednak zawsze prędkość pojazdów, która rosła cały czas wraz ze wzrostem mocy ich silników. Oprócz pojazdów drogowych, rosła też prędkość statków i okrętów. Widowiskowym przykładem tego wyścigu były szybkie lokomotywy parowe, które pod koniec lat 30. XX wieku potrafiły przekroczyć, ciągnąc pociągi ekspresowe, barierę 200 km/h. Stopniowo odkrywano kolejne rozwiązania konstrukcyjne, pozwalające nie tylko wydawnie zwiększyć moc, ale też sprawność silników parowych. Przykładowo, stopniowo podnoszono ciśnienie pary w zasilających te maszyny kotłach i dodatkowo zwiększano jej temperaturę przed wlotem do silnika. Podobne ewolucje przechodziły w swym rozwoju silniki spalinowe, o czym opowiada krótko niniejszy rozdział.

Wraz z rozwojem techniki, jeśli chodzi o silniki cieplne, pierwszeństwo w wielu zastosowaniach zaczęły zdobywać silniki o spalaniu wewnętrznym. Jako pierwsze - na szeroką skalę - pojawiły się spali-

nowe silniki tłokowe. Ich konstrukcja z tłokiem wykonującym ruch posuwisto-zwrotny, przekształcanym następnie w ruch obrotowy wału korbowego, wywodziła się w dużym stopniu z silników parowych. Zasadniczą różnicę stanowiło to, że silnik nie był zasilany czynnikiem roboczym (czyli zazwyczaj parą wodną) pod ciśnieniem dostarczonym z zewnątrz. Wzrost ciśnienia uzyskiwano w komorze spalania silnika na skutek zachodzącej gwałtownie reakcji chemicznej. Silniki takie, nie potrzebując kotłów czy zapasów wody, były zdecydowanie mniejsze i lepsze od parowych odpowiedników. Otworzyło to drogę dla rozwoju samolotów oraz coraz szybszych i mocniejszych pojazdów lądowych, które mogły być teraz również mniejsze i lepsze.

Poniżej zostanie omówionych krótko kilka ważnych zagadnień dotyczących budowy silników oraz historia zmagania, które toczyli konstruktorzy na przestrzeni wielu dekad. Stopniowe zdobywanie doświadczeń i wprowadzanie nowych rozwiązań zaowocowało powstaniem nowoczesnych silników spalinowych, które znamy dzisiaj. Wspomniane zostaną też kierunki rozwoju silników, które wydawały się bardzo obiecujące, ale okazały się jednak być ślepą uliczką. Przy czym skupimy się tylko na silnikach tłokowych.

6.2 Paliwa

Od początku ery silników o spalaniu wewnętrznym, aż do dzisiaj, reakcja chemiczna w komorze spalania zachodzi najczęściej między paliwem węglowodorowym (benzyna, olej napędowy, gaz ziemny lub LPG i szereg innych substancji), a tlenem zawartym w otaczającym nas powietrzu. Aby proces spalania mógł przebiegać poprawnie, paliwo i powietrze muszą zostać właściwie wymieszane i stworzyć mieszaninę palną. W tym momencie warto wspomnieć o dwóch podstawowych cyklach pracy silnika.

6.3 Cykle pracy silnika

Silniki z zapłonem wymuszonym

Pierwszym jest tzw. **cykl Otta**, który znamy z silników o zapłonie wymuszonym. Silniki te pracują w ten sposób, że w komorze spalania zamknięta jest gotowa mieszanina paliwa i powietrza zapalana w odpowiednim momencie przez układ zapłonowy. Najpopularniejszym rozwiązaniem są świece zapłonowe posiadające elektrody, pomiędzy którymi przeskakuje iskra elektryczna. Iskra ta inicjuje proces spalania, który obejmuje stopniowo całą zgromadzoną w komorze spalania mie-

szankę palną. W bardzo wczesnych silnikach z zapłonem wymuszonym, mieszanka palna nie była sprężana przed procesem spalania. Bardzo szybko odkryto jednak, że sprężenie jej przed spalaniem pozwala na drastyczny wzrost możliwości silnika.

Silniki z zapłonem samoczynnym

Drugim cyklem jest **cykl Diesla**. Tutaj zasada działania jest nieco inna. W komorze spalania znajduje się tylko powietrze sprężone do odpowiednio wysokiego ciśnienia (przez co wzrasta też jego temperatura). W ustalonym momencie do komory spalania podawane jest paliwo, które w takich warunkach jest zdolne do samozapłonu (np. olej napędowy). W kontakcie z powietrzem, paliwo zaczyna się spalać i dalej rozprzestrzenia się po komorze spalania, zużywając stopniowo dostępny tlen. Wynika stąd, że silnik Diesla wymaga do działania wstępnego sprężenia powietrza i to w znacznym stopniu. Stąd też popularnie nazywa się te silniki wysokoprężnymi.

6.4 Spalanie stukowe

Szybko pojawił się jednak problem zwany **spalaniem stukowym**. Najlepiej, aby proces spalania odbywał się stosunkowo powoli (rozprzestrzenianie się czoła płomienia z prędkością kilkudziesięciu, a maksymalnie kilkuset km/h). Nie dochodzi wtedy do niszczenia elementów silnika. Jednak im bardziej gotowa mieszanka palna jest sprężona i rozgrzana, tym gwałtowniej zachodzi proces spalania. Prędkość spalania może się wtedy zwiększać o rzędy wielkości. Tak gwałtowny przebieg spalania ma już charakter eksplozji niszczącej elementy silnika. Wywołuje też wyraźne efekty dźwiękowe w postaci charakterystycznego stuk, od którego zjawisko wzięło swoją nazwę. Oprócz tego, przy wysokim ciśnieniu i temperaturze, możliwy jest też samozapłon mieszanki, czyli jej samorzutne i niekontrolowane zapalenie. Jest to również zjawisko bardzo groźne dla silnika. Podstawowym rozwiązaniem jest więc ograniczenie stopnia sprężania silnika, aby zmniejszyć ciśnienie i temperaturę w komorze spalania. Efektem jest jednak mała moc i sprawność silnika. Dlatego zaczęto eksperymentować z paliwami, które niechętnie zapalałyby się samoczynnie i płonęły powoli, nawet w silnikach o dużym stopniu sprężania. Jednym z takich paliw jest trujący metanol. Okazało się też, że benzynę da się do tego „zniechęcić”, mieszając z nią pewne dodatki. Niegdyś stosowano w tym celu czteroetylek ołowiu. Wprawdzie bardzo dobrze spełniał on swoje zadanie, był jednak substancją trującą oraz trudną do usunięcia ze śro-

dowiska naturalnego. Dlatego stworzono, znane nam dzisiaj, benzyny bezołowiowe. Czteroetylek ołowiu zastąpiono w nich innymi związkami chemicznymi, które działają podobnie, ale są znacznie mniej szkodliwe. O odporności danego paliwa na spalanie stukowe mówi liczba oktanowa. Wynika ona z porównania danego paliwa z testową mieszaniną dwóch paliw wzorcowych – jednego o liczbie oktanowej 0 (n-heptanu, nieodpornego na spalanie stukowe) i drugiego o liczbie 100 (izooktanu, bardzo odpornego). Przykładowo więc benzyna o liczbie oktanowej 95 odpowiada swoją odpornością na spalanie stukowe mieszance paliw wzorcowych w proporcji 5% n-heptanu i 95 % izooktanu. Istnieją przy tym paliwa o liczbie oktanowej wyższej niż 100 (np. popularny gaz LPG), czyli odporne na spalanie stukowe bardziej niż czysty izooktan. Silniki o dużym stopniu wysilenia wymagają stosowania paliw o wysokiej liczbie oktanowej, dlatego często samochody po modyfikacjach wymagają tankowania benzyny 98, a konstrukcje wyczynowe wykorzystują paliwa specjalne. Spalanie stukowe ogranicza też (w przypadku zasilania silnika benzyną) podawanie do komory spalania wody lub metanolu. Dlatego też wtrysk tych substancji, przy maksymalnych obciążeniach silnika, był (i jest) stosowany w silnikach wyczynowych czy w erze masowego stosowania silników tłokowych w samolotach bojowych.

6.5 Wydajność

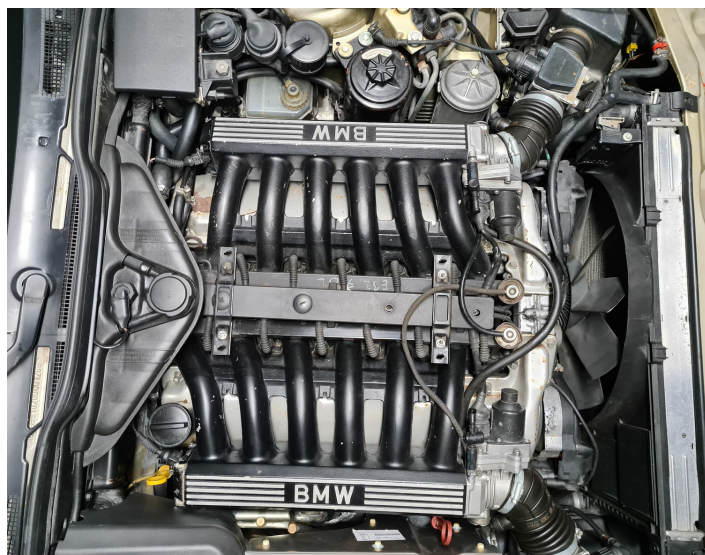
Kolejną kwestią jest przekształcenie jak największej ilości energii cieplnej, uwolnionej w procesie spalania, w energię mechaniczną. Mówimy wtedy o sprawności silnika. Jeszcze niedawno w najbardziej rozpowszechnionych odmianach silników z zapłonem iskrowym docierano do granicy około 30%, a w wysokoprężnych do 40%. Oznacza to, że zaledwie 30% lub 40% uwolnionej energii było przekształcane przez silnik w użyteczną pracę. Reszta energii była zużywana na pokonywanie oporów ruchu samego silnika, rozpraszana przez układ chłodzenia utrzymujący silnik w wymaganej temperaturze pracy oraz ulatywała wraz ze spalinami. Oczywiście straty te od zawsze starano się ograniczać. Dlatego zawsze dążono do ograniczenia oporów własnych silnika. W tym celu starano się ograniczyć liczbę elementów ruchomych w silnikach, konstruować doskonalsze łożyska i stosować oleje o mniejszej lepkości (generujące mniejsze opory). Między innymi właśnie dlatego współcześnie buduje się mniejsze silniki o mniejszej liczbie cylindrów, aby ograniczyć liczbę i masę współpracujących elementów i uzyskać w ten sposób mniejsze opory ruchu. Nieco trudnej jest z chłodzeniem,

ponieważ nie da się zbyt podnieść temperatury pracy silnika ze względu na stosowane materiały i ciecz chłodzącą. Jednak nowe silniki samochodowe posiadają często niezależne obiegi chłodzące dla głowicy i bloku silnika pracujące w różnych temperaturach, co pozwala na optymalizację warunków pracy silnika. W kwestii sprawności tradycyjnie przewagę posiadają silniki Diesla, głównie ze względu na wysoki stopień sprężania. Jednak zawsze dużo energii jest traconej na skutek wypuszczania z cylindrów spalin posiadających duże ciśnienie i wysoką temperaturę.

Jedno z rozwiązań tego problemu zaproponował pod koniec XIX wieku James Atkinson. Skonstruował on silnik, w którym tłok pokonywał dłuższą drogę w czasie suwu pracy niż w czasie suwu sprężania. Taka konstrukcja umożliwia odzyskanie ze spalin większej ilości energii. Silnik ten posiadał skomplikowany układ korbowy, co przyczyniło się do nie rozprzestrzenienia go na rynku. Do idei powrócono na większą skalę dopiero wiek później, ale w uproszczonej formie. Podobny efekt uzyskano w silnikach z klasycznym układem korbowym, wydłużając czas otwarcia zaworów ssących, tak aby zamykały się dopiero po pokonaniu przez tłok pewnego dystansu podczas suwu sprężania. W praktyce pozwoliło to na skrócenie suwu sprężania względem suwu pracy i uzyskanie efektu, jak w oryginalnym silniku Atkinsona. Silnik taki jest bardziej ekonomiczny, jednak rozwija niższą od klasycznego odpowiednika moc. Dlatego zaczęto do tego typu silników dodawać sprężarki mechaniczne pozwalające na zwiększenie mocy. Silniki takie znamy jako pracujące w cyklu Millera.

6.6 Więcej mocy

Aby zwiększyć moc silnika należy skutecznie spalić jak najwięcej paliwa w danej jednostce czasu. Ma to na celu uwolnienie jak największej ilości energii. Wynika z tego również, że im bardziej kaloryczne jest paliwo (im więcej energii jest zmagazynowanej w danej jego masie), tym lepiej. Najpopularniejszym paliwem są węglowodory pochodzące z rafinacji ropy naftowej. Dla osiągania dużych mocy, często używa się paliw specjalnych, np. z dodatkiem nitrometanu, które wyzwalają jeszcze więcej energii. **Moc** jest iloczynem momentu obrotowego i obrotów silnika. Moment obrotowy uzyskujemy nie inaczej niż przez jednorazowe „upakowanie” w komorach spalania możliwie największej ilości mieszanki palnej. Niezawodną metodą jest zwiększenie pojemności silnika. Można to uzyskać poprzez zwiększanie pojemności poszczególnych cylindrów, jak również dodając kolejne cylindry. Stąd wzięły



Rysunek 6.1: Samochodowy silnik V12 (BMW E34 750i)

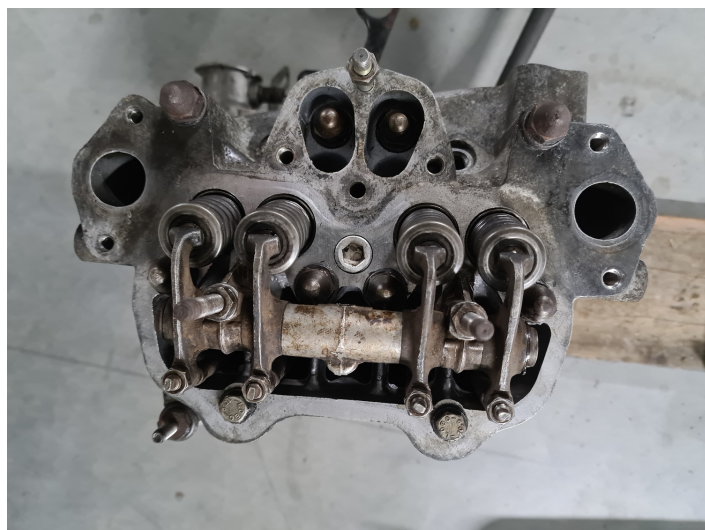
się różne konfiguracje cylindrów - od układów rzędowych, przez silniki widlaste (popularnie oznaczane literą V) o dwóch cylindrach lub rzędach cylindrów ustawionych względem siebie pod kątem oraz układy o większej ilości rzędów cylindrów ustawionych względem siebie również pod określonym kątem (np. silniki W o czterech rzędach cylindrów), aż po silniki typu bokser o przeciwległe ustawionych cylindrach. Osobną, bardzo ciekawą grupę stanowią silniki gwiazdowe, które są najbardziej rozpowszechnione w lotnictwie. Cylindry otaczają tam wał korbowy. Zdarzają się również bardziej niecodzienne konfiguracje, jak np. silnik Deltic, w którym cylindry stanowią boki trójkąta, a w wierzchołkach znajdują się wały korbowe. W każdym cylindrze pracują po dwa tłoki maksymalnie zbliżające się do siebie pod koniec suwu sprężania. Powiększanie silnika wiąże się jednak ze zwiększeniem jego wielkości i masy. Żeby jak najlepiej wykorzystać pojemność, którą już dysponujemy, można wykorzystać opisane dalej sztuczki z układem dolotowym i wydechowym. Po drugie, można zwiększać prędkość obrotową silnika, co jednak nie jest do końca takie proste. Wymaga bowiem zazwyczaj skrócenia skoku tłoka (ze względu na ograniczenia prędkości ruchu, jakie tłok jest w stanie wytrzymać), co z kolei zmniejsza moment obrotowy (krótsze ramię, na które działa siła nacisku przenoszona z tłoka). Wymagane jest też dużo dokładniejsze wyważenie elementów układu korbowego.

6.7 Rozrząd

Dla uzyskania dużej mocy silnika, konieczne jest zapewnienie skutecznej wymiany ładunku (pozbywanie się spalin i zastępowanie ich świeżym powietrzem/mieszaną palną). Wraz ze wzrostem obrotów staje się to coraz trudniejsze ze względu na skracający się czas, przypadający na każdy cykl pracy. To zaś wymaga stosowania coraz większych zaworów (lub zwiększania ich liczby, stąd silniki o trzech, czterech, pięciu lub czasami większej ilości zaworów na cylinder) wraz z odpowiednio dużymi kanałami dolotowymi i wydechowymi oraz długich czasów otwarcia zaworów, które jednak nie sprawdzają się przy niższych prędkościach obrotowych. Dlatego wysokoobrotowe silniki z klasycznym rozrządem zazwyczaj są słabe w zakresie niskich czy nawet średnich obrotów.

Ogólnie układy rozrządu podlegały długiej drodze rozwoju. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem są zawory, które otwierają się na skutek obrotu krzywki - na wałku rozrządu - unoszącej zawór w odpowiednim momencie. Za zamknięcie zaworu odpowiada zaś sprężyna. Znane są też rozrządy desmodromowe, gdzie również za zamykanie zaworów odpowiada specjalna krzywka. Stosuje się je w niektórych silnikach osiągających bardzo wysokie obroty, gdzie potrzebne byłyby sprężyny o bardzo dużej sile nacisku. Innym ciekawym rozwiązaniem konstrukcyjnym jest tzw. rozrząd Knighta, który wykorzystuje ruchomą tuleję cylindrową wyposażoną w okna, podobnie jak w silnikach dwusuwowych. Ruch tulei jest tu jednak sterowany dosyć złożonym układem mechanicznym i to sama tuleja odpowiada za otwieranie i zamykanie okien.

Jeśli chodzi o klasyczne układy rozrządu, pierwszymi były te z zaworami umieszczonymi w bloku silnika obok cylindrów (oznaczane skrótem SV od ang. Side Valve – boczny zawór). Układ taki był prostszy w produkcji i umożliwiał stosowanie prostych głowic wyposażonych jedynie w świecę zapłonową. Skuteczna wymiana ładunku była jednak utrudniona, nie dało się też uzyskać wysokiego stopnia sprężania. Niemożliwe było więc stworzenie silnika wysokoprężnego z takim układem rozrządu. Dziś tego typu układ możemy spotkać np. w kosiarkach do trawy. Następnie przeniesiono zawory do głowicy, co skomplikowało konstrukcję silnika, ale pozwoliło na znaczący wzrost mocy dzięki usprawnieniu wymiany ładunku i wzrostowi stopnia sprężania. Wałek rozrządu pozostał w bloku, a układy takie nazwano OHV (ang. Over Head Valve, czyli zawór w głowicy). Do napędu zaworów służyły dźwigienki i długie popychacze, które łączą wałek z zaworami. Elementy te posiadały w sumie sporą masę, a więc i bezwładność



Rysunek 6.2: Silnik czterosuwowy typu OHV - widoczne dźwigniki zaworowe oraz sprężyny zaworów

oraz generowały dodatkowe opory ruchu. Dlatego zaczęto przenosić wałki rozrządu do głowic, w bezpośrednie sąsiedztwo zaworów (układ OHC, od ang. Over Head Cam, czyli wałek w głowicy). W bardziej wyrafinowanych układach stosuje się po dwa wałki rozrządu w głowicy, zazwyczaj osobne dla zaworów ssących i wydechowych (DOHC – ang. Double Over Head Valve). Wadą klasycznego rozrządu jest niezmienny kąt otwarcia zaworów (liczony jako kąt obrotu wału korbowego, od momentu otwarcia do momentu zamknięcia zaworu). Oznacza to, że wraz ze wzrostem obrotów silnika, czas przeznaczony na ucieczkę spalin i dopływ świeżego ładunku skraca się. Powoduje to kłopoty z wymianą ładunku i wraz ze wzrostem obrotów silnik słabnie. Ogranicza to oczywiście moc maksymalną. Z tego powodu rozpowszechniły się układy zmiennych faz rozrządu, pozwalające dostosować czas otwarcia zaworów do chwilowych potrzeb silnika. Część z tych układów potrafi regulować również skok zaworu, czyli wysokość na którą unosi się zawór. Wczesne układy zmiennych faz działały tylko na zawory ssące, a w nowszych rozwiązaniach również na wydechowe. Najnowszym i rewolucyjnym rozwiązaniem jest układ całkowicie płynnego sterowania otwarciem zaworów. Może to być realizowane elektromagnetycznie, pneumatycznie lub hydraulicznie. Tego typu rozrząd określa się mianem „bezwalkowego” ze względu na brak wałków rozrządu. Układ taki pozwala nawet na pozbycie się przepustnicy w silnikach z zapłonem iskrowym

i daje zupełnie nowe możliwości sterowania mocą silnika. Pomimo trwających od lat prac badawczych, ze względu na skomplikowaną konstrukcję, obecnie tylko jeden producent wprowadził na rynek silnik z funkcjonalnym układem tego typu.

6.8 Doładowanie

Kiedy jednak wyczerpiemy już limit wielkości silnika i obrotów, do których możemy go rozkręcić, a wymiany ładunku nie da się już poprawić, konieczne staje się sięgnięcie po doładowanie. Doładowanie polega na napełnianiu komory spalania pod ciśnieniem większym niż atmosferyczne. Metody dynamiczne zostały wspomniane przy omawianiu układu dolotowego i wydechowego, natomiast teraz skupmy się na pozostałych.

Najprostszym sposobem na spalenie większej ilości paliwa, jest dostarczenie większej ilości tlenu. Naturalnie, ktoś wpadł na pomysł dostarczania do silnika dodatkowego tlenu (np. z butli) celem uzyskania chwilowych wzrostów mocy. Czysty tlen nie jest jednak najlepszym rozwiązaniem, ze względu na tendencję do wchodzenia w reakcję z paliwem jeszcze przed momentem zapłonu mieszanki. Dlatego w takim charakterze wykorzystuje się podtlenek azotu N_2O – popularnie „nitro”), używany też jako gaz rozweselający. Związek ten rozpada się w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury na azot i tlen. W sam raz takich, jakie panują w komorze spalania pod koniec suwu sprężania. Jest więc bezpieczny. Wystarczy zwiększyć odpowiednio dawkę paliwa i uzyskujemy wzrost mocy. Jest to jednak wzrost krótkotrwały, ograniczony pojemnością butli i bardzo wysoką ceną N_2O . Co jeśli chcemy dysponować mocą przez cały czas? Należy tutaj zastosować którąś ze sprężarek.

Najstarszym rozwiązaniem są sprężarki mechaniczne - napędzane przez wał korbowy silnika. Najczęściej są to sprężarki wyporowe, np. sprężarki Roots'a czy Lysholma. Bardzo ciekawym rozwiązaniem była sprężarka spiralna typu G, której konstrukcja była jednak trapiąca pewnymi usterkami. Rzadziej spotyka się sprężarki przepływowe, głównie promieniowe z napędem mechanicznym. Wspólną cechą wymienionych rozwiązań jest konieczność wytworzenia dodatkowej mocy do ich napędu, a moc ta jest często niemała. W zamian otrzymuje się jednak natychmiastową reakcję sprężarki na wzrost obrotów silnika i zapotrzebowania na tłoczone powietrze. Oczywiście im więcej chcemy uzyskać mocy, tym większej potrzeba sprężarki.

Nieco sprytniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie turbosprężarki.



Rysunek 6.3: Turbosprężarka w silniku z zapłonem iskrowym

Urządzenie to składa się ze sprężarki przepływowej, najczęściej promieniowej, napędzanej przez turbinę. Źródłem napędu turbiny są spaliny, których energia po opuszczeniu silnika jest zazwyczaj bezpowrotnie tracona. Turbosprężarka pracuje więc w pewnym sensie za darmo. Oprócz oczywistych zalet rozwiązanie to posiada też wady. Należy do nich opóźnienie działania tym dłuższe, im większa w stosunku do silnika jest turbosprężarka. Po gwałtownym dodaniu gazu, podjęcie pracy przez turbosprężarkę często nie następuje natychmiast, lecz potrzebny jest czas na rozpedzenie jej wirnika, szczególnie kiedy silnik wytwarza jeszcze niewiele spalin. Jest to efekt zwany „turbodziurą”. Z tego powodu, w silnikach o dużych mocach, stosuje się układy z większą ilością turbosprężarek połączonych równolegle (mniejszym turbosprężarkom towarzyszy nieco mniejsze opóźnienie działania) lub z turbosprężarkami różnej wielkości. W takim przypadku przy niższych obrotach pracuje mała turbosprężarka, która rozpoczyna pracę bardzo szybko, a przy wyższych obrotach wchodzi do akcji turbosprężarka większa, pozwalając na osiągnięcie dużej mocy.

Bardzo ciekawym rozwiązaniem jest układ Comprex przypominający nieco swoim układem bębenek rewolweru. Posiada on napęd mechaniczny, ale energia jest potrzebna tylko do wywołania obrotu bębna. W bębnie znajdują się rury. Z obu stron bęben jest zamknięty ściankami, do których doprowadzone są (w odpowiednich miejscach) z jednej strony wlot powietrza z filtra powietrza i wlot powietrza do silnika oraz z drugiej strony wylot spalin z silnika i wylot do układu



Rysunek 6.4: Silnik z turbodoładowaniem w zmodyfikowanym Fiacie Cinquecento

wydechowego. Każda z rur bębna, obracając się, trafia po kolei na wlot z filtra powietrza, kiedy rura wypełnia się świeżym powietrzem. Obracając się dalej, trafia naraz na wlot spalin z silnika z jednej strony i wlot powietrza do silnika z drugiej. Rozpędzone spaliny, będąc pod ciśnieniem, przetłaczają świeże powietrze z bębna do układu dolotowego. Bęben kręci się dalej i rura zostaje zamknięta. Strumień rozpędzonych spalin uderza w ścinę, odbija się od niej i rusza w przeciwnym kierunku. Wtedy dalszy obrót bębna powoduje otwarcie się wylotu do układu wydechowego, gdzie wpadają spaliny. Ich bezwładność powoduje powstanie z drugiej strony podciśnienia, ale wtedy otwiera się kanał z filtra powietrza, umożliwiając zasśanie świeżego powietrza. Cykl toczy się dalej. Oczywiście zdarzają się połączenia dwóch systemów doładowania, np. zastosowanie sprężarki mechanicznej plus turbosprężarki.

6.9 Silniki dwusuwowe

Najczęściej spotykany, tzw. czterosuwowy cykl pracy składa się z czterech suwów: ssania, sprężania, pracy i wydechu. Każdy suw odpowiada ruchowi tłoka od jednego skrajnego położenia do drugiego, a więc połowie pełnego obrotu wału korbowego. Pełny cykl pracy zajmuje więc dwa obroty wału. Łatwo domyślić się, że gdyby udało się przeprowadzać cykl pracy częściej, doprowadziłoby to do zwiększenia mocy silnika.



Rysunek 6.5: Motocyklowy silnik dwusuwowy o jednym cylindrze chłodzonym powietrzem (DKW NZ 350)

Tak działają silniki dwusuwowe. Praca zachodzi w każdym z ich cylindrów, co obrót wału korbowego. Wymaga to jednak przeprowadzania w tym samym czasie opróżniania cylindra ze spalin i napełniania go świeżą mieszanką. Stanowi to problem, ponieważ w silniku czterosuwowym każdy z tych procesów jest naturalnie wymuszony przez ruch tłoka. W silniku dwusuwowym można tego dokonać na dwa sposoby. W mniejszych i prostszych konstrukcjach do procesu wymiany ładunku wykorzystuje się skrzynię korbową silnika, czyli przestrzeń pod tłokiem zajmowaną też przez wał korbowy i olej smarujący silnik. W tym przypadku w czasie suwu sprężania, czyli ruchu tłoka w górę, trwa jednocześnie zasysanie świeżej mieszanki do skrzyni korbowej, a więc ssanie. Rozrząd w takim silniku jest najczęściej realizowany za pomocą okien wykonanych w tulei cylindra, odsłanianych i przysłanianych przez tłok. W głowicy znajduje się tylko świeca zapłonowa. Brak ruchomych elementów rozrządu bardzo upraszcza konstrukcję. Pod koniec suwu pracy tłok odsłania najpierw okno wydechowe, pozwalając ujść spalinom, a zaraz potem okna płuczące połączone ze skrzynią korbową. Zamknięta tam mieszanka jest wtedy przetłaczana do cylindra (ponad tłok) i wypycha stamtąd resztki spalin. Tłok, który powraca ku górze, zamyka kolejno okna płuczące i wydechowe, a jego dolna krawędź odsłania wlot mieszanki do skrzyni korbowej. W tym miejscu może być też alternatywnie stosowany, jednokierunkowy zawór mem-

branowy. Silniki takie nie mogą zwykle posiadać zwyczajnego układu smarowania, smarowane są więc olejem dodawanym do zasilającego je paliwa (które odparowuje w kontakcie z rozgrzаныmi elementami silnika, a olej spływa do elementów wymagających smarowania) lub jest podawany przez specjalne pompki dozujące. Olej jest później porwany do cylindra i ulega spalaniu, stąd charakterystyczne dymienie tych silników.



Rysunek 6.6: 3-cylindrowy silnik dwusuwowy z chłodzeniem cieczą (FSO Syrena Laminat)

Alternatywnym rozwiązaniem jest silnik dwusuwowy z osobną pompą ładującą. W takim wypadku skrzynia korbowa nie jest wykorzystywana do przetłaczania ładunku i silnik może mieć zamknięty układ smarowania. Do wymuszenia wymiany ładunku stosuje się wspomniane pompy ładujące. Kiedyś stosowano pompy tłokowe, później rozpowszechniły się sprężarki wyporowe omówione już w kontekście doładowania. Silniki takie często posiadały też dodatkowo turbosprężarki, które rozpoczynały pracę przy większym obciążeniu silnika, kiedy ilość spalin była już wystarczająca do ich napędu. Występują również silniki dwusuwowe wyposażone w głowice z zaworami wydechowymi. W takim wypadku spaliny opuszczają silnik przez zawory sterowane jak w czterosuwach, a świeży ładunek napływa przez okna w cylindrze. W dwusuwach niezwykle istotny jest układ wydechowy. Jest on zaprojektowany tak, aby w momencie otwarcia wylotu spalin z cylindra, maksymalnie wspomagać ich ucieczkę. Ze względu na to,

że świeża mieszanka ma bezpośredni kontakt ze spalinami, jej część ucieka do wydechu. Dlatego układy te umożliwiają też wywołanie fali powrotnej, która wtłacza tą mieszankę na powrót do cylindra, tuż przed zamknięciem wylotu przez tłok. Proces wymiany ładunku nie jest tu jednak doskonały, dlatego dwusuwowy praktycznie nigdy nie osiągał mocy dwukrotnie większej niż silnik czterosuwowy o analogicznej wielkości.

6.10 Silnik Wankla

Jedną z podstawowych wad klasycznych silników tłokowych jest konieczność zamiany posuwisto-zwrotnego ruchu tłoka w ruch obrotowy wału korbowego. Konstrukcja ta wywodzi się jeszcze z tłokowych silników parowych. Wiąże się z tym większa ilość elementów ruchomych silnika, problemy z wyważeniem silnika (w efekcie powstawanie wibracji), większe opory ruchu i ograniczenia w dopuszczalnej prędkości obrotowej. Od zawsze marzeniem konstruktorów było zbudowanie silnika, którego tłok od razu wykonywałby ruch obrotowy.



Rysunek 6.7: Mazda z serii RX - jeden z niewielu wywarzanych seryjnie samochodów z silnikiem Wankla

Pierwszym funkcjonalnym silnikiem tego typu i wielką nadzieją motoryzacji był silnik Wankla, zwany silnikiem z wirującym tłokiem. Tłok w kształcie trójkąta o wypukłych bokach pracuje w cylindrze o epitrochoidalnym kształcie. Tłok obraca się mimośrodowo, a jego wierzchołki, będąc cały czas w kontakcie z cylindrem, dzielą jego objętość na komory. W komorach, których objętość i kształt zmieniają się wraz z ruchem tłoka, zachodzą suwy ssania, sprężania, pracy i wydechu. Rozrząd jest realizowany, podobnie jak w dwusuwach, za pomocą

okien wykonanych w cylindrze. Silniki Wankla charakteryzują się osiągnięciem bardzo dużej mocy przy niewielkiej masie i gabarytach oraz bardzo ograniczoną liczbą elementów składowych. Nie generują też odczuwalnych drgań. Powodem, ze względu na który silniki te nie zawojsowały świata motoryzacji, był problem z trwałością. Szczególnie trudne okazało się stworzenie uszczelnień tłoka. Dodatkowo Wankle charakteryzowały się zazwyczaj sporym apetytem na paliwo i dużą emisją substancji szkodliwych. Obecnie zaprezentowano silnik zwany Liquid Piston, podobny w swej idei do silnika Wankla, ale charakteryzujący się innym kształtem cylindra i zupełnie nową konstrukcją tłoka, która ma pozwolić na pozbycie się problemów z uszczelnieniem.

6.11 Układ zapłonowy

Za zapłon mieszanki paliwowo-powietrznej odpowiada tradycyjnie przeskok iskry elektrycznej. Przez dłuższy czas wiele nie zmieniło się w budowie układów zapłonowych. Prąd o wysokim napięciu (kilkadziesiąt – kilkaset tysięcy volt) był wytwarzany w uzwojeniu wtórnym cewki zapłonowej. Przeskok iskry następował w momencie otwarcia



Rysunek 6.8: Układ zapłonowy z mechanicznym przerywaczem, pojedynczą cewką i rozdzielaczem (FSO Warszawa M20)

obwodu uzwojenia pierwotnego tej samej cewki. Za otwieranie obwodu początkowo odpowiadał mechaniczny przerywacz.

Najczęściej używano jednej cewki, z której prąd był kierowany do poszczególnych cylindrów przez rozdzielacz. O odpowiedni moment przeskoiku iskry dbały układy mechanicznej regulacji kąta wyprzedzenia zapłonu. Jak łatwo się domyślić, precyzja działania w takich układach pozostawiała często sporo do życzenia. Dużo energii było też traconej po drodze - od cewki do świecy. Im wyższe ciśnienie w komorze spalania, tym trudniej wywołać przeskok iskry, rośnie też ryzyko awarii silnika, gdy zapłon zachodzi w nieodpowiednim momencie. Tak więc wraz ze wzrostem mocy silników, zaczęły rosnać wymagania wobec układów zapłonowych. W nowszych wersjach, pracą cewki zapłonowej sterują układy w pełni elektroniczne, a najczęściej każdy z cylindrów posiada własną cewkę zapłonową zlokalizowaną bezpośrednio nad świecą zapłonową. Zapewnia to dużą precyzję czasu zapłonu i dużą energię iskry. Bada się możliwość zastosowania innych metod zapłonu, np. za pomocą lasera. Wytwarzane są też silniki benzynowe wykorzystujące kontrolowany samozapłon mieszanki.

6.12 Układ dolotowy

Układ dolotowy odpowiada za dostarczanie do cylindrów silnika powietrza (silniki diesla, silniki z zapłonem iskrowym o wtrysku bezpośrednim) lub gotowej mieszanki palnej (silniki z zapłonem iskrowym zasilane gaźnikiem lub wtryskiem pośrednim). Zadaniem tego układu jest również usunięcie zanieczyszczeń z zasysanego z otoczenia powietrza, których obecność jest szkodliwa dla silnika.

W silnikach Diesla, jak już wiemy, nie ma konieczności stosowania elementów do regulacji ilości napływającego do silnika powietrza. Czasami jednak elementy tego typu bywają używane, np. do wspomagania gaszenia silnika. Silniki z zapłonem iskrowym, których moc jest regulowana ilością dostarczonej mieszanki, wymagają stosowania przepustnic. We wczesnych silnikach układy dolotowe były bardzo proste, nie przywiązywano zbytnej wagi do ich kształtu czy długości. Z czasem okazało się jednak, że odpowiednie zaprojektowanie układu dolotowego pozwala na istotną poprawę osiągnięć. Nie chodzi tu tylko o odpowiednio duży przekrój kanałów pozwalający na przepływ dużych ilości powietrza (lub mieszanki). Bardzo istotną kwestią jest też ich długość. Ma to znaczenie z powodu istnienia bezwładności słupa gazu oraz zjawisk falowych. Bezwładność można wykorzystać do zwiększenia ilości powietrza (mieszanki) zgromadzonego w cylindrze. Podczas suwu

ssania powietrza w rurze dolotowej, zaczyna poruszać się ze znaczną prędkością. Pod koniec tego suwu, kiedy tłok zwalnia i kończy się efekt zasysania, powietrze w rurze ssącej wciąż jest rozprężone i „tłoczy się” w cylindrze, zamieniając swoją energię kinetyczną na pewien wzrost ciśnienia. Podobnie jest z ruchem fali powietrza (mieszanki), która porusza się w układzie dolotowym na skutek otwarcia zaworów ssących. Odbitą (na początku rury dolotowej) i powracającą w stronę cylindra falę również można wykorzystać do zwiększenia ilości zamkniętej w cylindrze mieszanki. W tym celu konieczny jest dobór odpowiedniej długości układu dolotowego, ponieważ fale poruszają się ze stałą, określoną prędkością, a więc to, jak szybko fala powróci zależy od drogi, jaką będzie musiała pokonać.

Tego typu układ doładowania działa jednak tylko w pewnym zakresie obrotów silnika. Przy wyższych obrotach fala nie zdąży wrócić na czas, a przy niższych spóźni się. Dlatego często stosuje się kolektory ssące o zmiennej długości, regulowanej automatycznie w zależności od obrotów silnika. Istotna dla zjawisk falowych jest też pojemność dolotu, stąd czasami można spotkać w samochodach pozornie bezsensowne, puste „puszki” połączone z układem dolotowym. W silnikach wyposażonych w gaźniki lub wczesne odmiany wtrysku paliwa często układ dolotowy jest podgrzewany, celem ułatwienia odparowania benzyny. W silnikach z wielopunktowym wtryskiem pośrednim lub bezpośrednim na ogół jest na odwrót i dąży nawet do odizolowania układu dolotowego od silnika, aby zasysane powietrze nie ogrzewało się i nie zmniejszało tym samym swojej gęstości.



Rysunek 6.9: Sportowy układ dolotowy zastosowany w zmodyfikowanym Fiacie Cinquecento

6.13 Układ wydechowy

Zadaniem układu wydechowego jest jak najskuteczniejsze odprowadzenie spalin z silnika, a dodatkowo również zmniejszenie towarzyszącego temu procesowi hałasu. W układzie wydechowym znajdują się też elementy pozwalające na oczyszczenie spalin ze szkodliwych związków chemicznych, a więc katalizatory i filtry cząstek stałych. Podobnie jak w przypadku układów dolotowych, wydechy wczesnych silników były bardzo proste. Później zdano sobie sprawę, że odpowiednie zaprojektowanie wydechu pozwala na znaczny wzrost osiągnięć i kształtowanie przebiegu momentu obrotowego silnika. Obowiązują tutaj te same prawa, a więc mamy do czynienia z bezwładnością spalin, która odpowiednio wykorzystana pozwala na skuteczne wyssanie resztek spalin z cylindra, kiedy tłok zbliża się do końca swojej drogi ku górze. Podobnie dobranie odpowiedniej długości rur układu wydechowego i jego pojemności, pozwala na wykorzystanie ruchu fal spalin w układzie wydechowym. Fala taka powstaje w momencie otwarcia zaworów wydechowych i rozpoczyna swoją drogę przez układ wydechowy. Jest to fala nadciśnienia (odwrotnie niż w układzie dolotowym). Po natrafieniu na przeszkodę (np. gwałtowną zmianę średnicy rury), fala odbija się i powraca jako fala podciśnienia (znowu odwrotnie niż w dolocie). Jeśli fala powróci do cylindra w odpowiednim momencie, pomaga w usunięciu resztek spalin.



Rysunek 6.10: Kolektor wydechowy silnika 4-cylindrowego wyposażony w izolację cieplną



Rysunek 6.11: Układ wydechowy silnika dwusuwowego klasy 50 cm³

6.14 Podsumowanie

Powyżej przedstawiono jedynie krótki i zawierający wybrane przykłady, przegląd ewolucji rozwiązań, stosowanych w silnikach spalinowych. Takich przykładów jest dużo więcej. Jednak już na tej podstawie widać, jak długą drogę rozwoju przebyły silniki spalinowe i jak duże możliwości ich rozwoju wciąż istnieją. Dlatego warto prowadzić dalsze prace w kierunku ich rozwoju, tak aby tworzyć coraz lepsze i bardziej przyjazne dla środowiska układy napędowe pojazdów. Rozwijana coraz bardziej idea napędów elektrycznych jest słuszna, ale na bieżącym etapie rozwoju technologii magazynowania energii, niemożliwa do zastosowania we wszystkich odmianach pojazdów. Dlatego dobrą alternatywą pozostają nowoczesne silniki spalinowe, wciąż czekające na zdolnych konstruktorów i ich nowe pomysły.

