

Richard D. ATKINS*

Stulecie badań silników wyczynowych

Minione stulecie było okresem intensywnego rozwoju wyczynowych silników spalinowych.

W pierwszej połowie wieku zmiany te wywołał szybki rozwój technologiczny, jaki nastąpił w wyniku obu wojen światowych. Studia nad silnikami z okresów od 1914 do 1918 oraz między 1939 i 1944 rokiem są równie interesujące, jak te dotyczące współczesnego projektowania nowoczesnych silników. Wówczas nie były dostępne dzisiejsze materiały konstrukcyjne, a co najważniejsze, także dzisiejsze możliwości obliczeń komputerowych. W 1960 roku czterocylindrowy silnik bez doładowania osiągał moc jednostkową mniejszą od 100 KM/dm³ (74 kW/dm³); obecnie jest to normalne dla standardowo produkowanych silników samochodowych. Jednym z ważniejszych bodźców do rozwoju wyczynowych silników spalinowych były wyścigi formuły 1, gdy w latach 60-tych pojemność została zredukowana do 1,5 dm³, a silniki były zwyczajowo doładowane. Zaczęły pojawiać się silniki wysokoobrotowe, które rozwijały prędkości obrotowe 12 000 obr/min, w których nadal występowała płaska charakterystyka średniego ciśnienia użytecznego BMEP (brake mean effective pressure) na poziomie ponad 1,1 MPa w zakresie prędkości obrotowych od 4500 do 12 000 obr/min z lokalnie występującymi wartościami ponad 1,4 MPa. Na przestrzeni minionych 45 lat objętościowy wskaźnik mocy („moc z litra”) silników wyczynowych wzrósł ze 100 KM (74 kW) do 300 KM (220 kW), co wyraźnie zwiększyło wymagania dotyczące hamowni i specjalistycznych urządzeń do badania silników.

Artykuł ma na celu prześledzenie wspomnianych kierunków zmian i omówienie urządzeń badawczych dostępnych inżynierom, a także prześledzenie postępu w rozwoju metod badawczych trwającego do dnia dzisiejszego, zwieńczonego pojawieniem się hamulców o małej bezwładności, które są zdolne do ciągłej pracy przy 30 000 obr/min oraz do wyhamowania mocy rzędu 2500 KM (ponad 1800 kW).

Słowa kluczowe: oprzyrządowanie, hamownie silnikowe, modelowanie, testy, rozwój

A century of high performance engine testing

The past century has seen significant developments in the high performance internal combustion engine.

These changes were driven in the first 50 years by accelerated technology due to two World Wars. A study of the engines in the period 1914–1918 and 1939 to 1944 is interesting in so much as many of the current designs of modern engines were in place. The materials and most importantly the computing power were simply not available. In 1960, a four cylinders normally aspirated race engine produced less than 100 BHP (74 kW) per liter capacity; today this is the norm for standard production car engines. A major thrust in the development of high performance engines came with the introduction of Formula 1 racing, as we understand it today in the early 1960's when the engine capacity was reduced to 1.5 liters and the engines were normally aspirated. This led to the onset of high revving engines that ran through to 12,000 rev/min, but still retained a flat BMEP (brake mean effective pressure) curve in excess of 1.4 MPa peak and at least 1.1 MPa from 4,500 rev/min through to 12,000 rev/min. In the course of some 45 years power per liter has risen from 100 BHP to 300 BHP (74–220 kW) and dynamometers and specialist instrument design has kept pace with this rise in efficiency.

The paper will follow these trends and discuss in some detail the instrumentation that was available to early engineers and follow progress through today, culminating in low inertia dynamometers that are capable of continuous running at 30,000 rev/min and absorbing 2,500 BHP (1,800 kW).

Key words: instrumentation, dynamometer; modelling, testing, development

1. Początki badań silników spalinowych

Badania hamowniane silników rozpoczęły się na długo zanim Nikolaus Otto spopularyzował swój wynalazek. We wczesnych latach 80-tych XIX stulecia potrzebne było urządzenie, za pomocą którego możliwy był pomiar mocy na wale silnika parowego w celu jego dalszego doskonalenia i zwiększenia zakresu zastosowań.

Jednym z pierwszych hamulców badawczych był hamulec tarcowy (przyp. red. Prony'ego), w którym drewniane klocki były dociskane do obracającego się wału za pomocą zadanego ciężaru obciążającego klocek górny (rys. 1). Powstająca siła tarcia dawała moment starający się unieść ten przeciwcieżar (F) ku górze. Znając odległość środka cięż-

1. The very beginning of IC engine testing

Dynamometer testing of engines started long before Nikolaus Otto made the internal combustion engine so popular. Engines of the early 1800's with steam powered reciprocating engines needed a means of measuring shaft power in order to further develop and improve the engine range.

One of the earliest dynamometers was the friction brake, in which wooden blocks were positioned on a rotating shaft and a known weight applied to the uppermost block (Fig. 1). The resulting friction caused the torque arm to lift its counterweight (F). Knowing the distance from the centre of the shaft to the centre of the weight it is possible to simply calculate the developed torque, and hence the power. This type

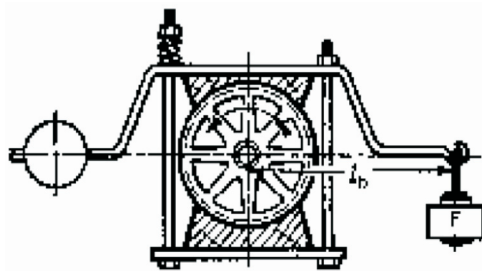
kości tego ciężaru od osi wału można było w łatwy sposób wyliczyć moment obrotowy, a stąd również moc. Tego typu pierwszy hamulec był bardzo prymitywny, np. tarcie powodowało rozgrzewanie klocków i ich ewentualne zapalenie. Zapobiegało temu polewanie wodą wału i klocków hamulca, co jednak powodowało zmniejszenie siły tarcia i zakłócenia w odczycie momentu. Mimo niedoskonałości ten typ hamulca wykorzystywany był do hamowania dużych, wolnoobrotowych silników parowych od końca wieku XVIII do połowy XIX stulecia. Warto tu wspomnieć, że obecnie gdy zachodzi potrzeba pomiaru niewielkiego momentu przy małej prędkości obrotowej (np. przy $n = 700$ obr/min i $p_e = 7$ MPa) podobne urządzenie mocowane jest na wale napędu śruby w celu uzyskania stałego oporu, co w przypadku małych silników jest warunkiem pomiaru w przypadku ULEV.

W czasie, gdy pojawiły się w miarę dokładne wagi sprężynowe, upowszechnił się typ hamulca, którego zasada działania była taka sama przez niekontrolowany pomiar tarcia (rys. 2).

Działo się tak póki słynny znany brytyjski wynalazca William Froude nie wymyślił w latach 70-tych XIX wieku swego hamulca wodnego, który pozwolił na precyzyjne określenie mocy rozwijanej przez silnik.

Froude, który współpracował ze słynnym inżynierem Isambardem Kingdomem Brunellem (rys. 3) zaprojektował swój nowy wynalazek na potrzeby Królewskiej Marynarki Wojennej, która oczekiwała by możliwe było mierzenie mocy na wale śrubowym okrętów wojennych (rys. 4).

Okręt został unieruchomiony w doku. Usunięto śrubę, a do wału napędowego podłączono hamulec wodny Froude'a. System prętów umożliwiał połączenie hamulca z nabrzeżem i wykonywanie pomiarów prędkości obrotowej. Łączniki te zamocowane były do obrotowego walca, na którym rejestrowany był wykres



Rys. 1. Hamulec cierny

Fig. 1. Friction Brake

low speeds need to be monitored (for example 700 rev/min, 10 BMEP psi) a similar device is attached to the propeller shaft in order to ensure constant resistance to rotation, this is a requirement for ULEV work with small engines.

With the advent of reasonably accurate spring balances, a more scientific friction brake became popular, but the principle was the same, uncontrolled friction measurement (Fig. 2).

It was not until the famous British Engineer; Mr William Froude introduced his innovative water brake in the 1870's that the power rating of engines could be accurately determined. Mr. Froude who worked with the world famous engineer Isambard Kingdom Brunell (Fig. 3) designed his new dynamometer for the British Navy who wished to determine the shaft power of its warships (Fig. 4)

The ship was moored in a dock. The propeller removed and the Froude dynamometer fitted to the propeller shaft. Rod links to the dockside enabled torque to be controlled and shaft speed monitored and regulated, these shafts were coupled to a rotating drum that produced a speed vs. load chart, the area under the graph being the developed torque. The dry dock was then flooded and the ships engine was run up, the speed and torque measured and thus for the first time ever developed power could be accurately monitored and calculated. An historic moment (See procedures Institute of Mechanical Engineers, 1877).

The design of this water brake utilised the shear effect of passing water over a rotating shaft which has cups attached. Situated in a casing surrounding the rotating shaft/cup assembly were position stationary cup placed around the casing directly opposite those rotating elements (Fig. 5).



Rys. 2. Podstawowa konstrukcja hamulca tarcowego wyposażona dodatkowo w wagę sprężynową

Fig. 2. Spring balance added to base friction brake



Rys. 3. William Froude (1810-1872), asystent Isambarda Kingdoma Brunella

Fig. 3. William Froude 1810-1872 Assistant to Isambard Kingdom Brunell



Rys. 4. Hamulec Williama Froude'a zainstalowany na wale okrętu HMS Conquest

Fig. 4. William Froude Dynamometer fitted to HMS Conquest

zmian prędkości w funkcji obciążenia. Pole pod krzywą oznaczało rozwijany moment obrotowy. Następnie suchy dok był wypełniany wodą, a silnik okrętu był uruchamiany w celu pomiaru prędkości i momentu. W ten sposób po raz pierwszy mogła być mierzona i kontrolowana moc rozwijana przez silnik. Był to niewątpliwie moment historyczny (*patrz: Procedures Institute of Mechanical Engineers, 1877*).

Takie rozwiązanie hamulca wodnego wykorzystywało zjawisko tarcia w warstwie wody przepływającej wokół wirującego wału z doczepionymi miseczkami. W obudowie znajdowały się nieruchome zagłębienia umieszczone na przeciwko i współpracujące z wirującymi miseczkami (rys. 5).

Zjawisko ścinania w warstwie wody między ruchomymi i nieruchomymi zagłębieniami było źródłem momentu hamującego, znanego z rozwiązań współczesnych. Tego typu hamulec zrewolucjonizował rozwój zarówno silników parowych, jak i spalinowych, i ustanowił na wiele lat standard badań hamownianych. Froude stwierdził, że w celu obliczenia mocy konieczny jest pomiar jedynie dwóch wielkości: prędkości obrotowej hamulca i siły netto na ramieniu pomiaru momentu obrotowego.

Jeśli Q jest całkowitym rozwijanym momentem, a n oznacza prędkość obrotową [obr/min], wówczas moc wyrażona w KM równa się $2 \cdot p \cdot n \cdot Q / 33\,000$.

Jeśli r jest czynnym ramieniem hamulca [stopa], a W obciążeniem wyrażonym w funtach, wówczas:

$$Q = W \cdot r$$

a moc = $2 \cdot p \cdot n \cdot W \cdot r / 33\,000$;

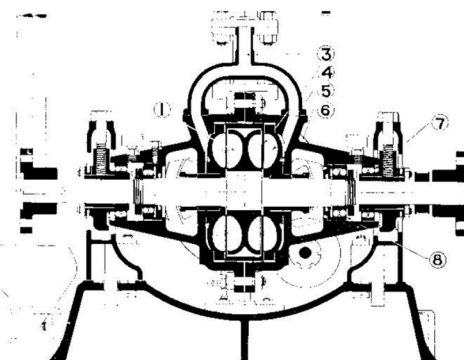
stąd moc BHP = $n \cdot W / K$ (gdzie K jest stałą).

Przyjmując odpowiednią wartość r , np. $r = 5,252$ stóp, wtedy $K = 1000$.

W ten sposób stały się dostępne hamulce silnikowe i rzeczywiście, w okresie między rokiem 1918 a 1939 powstało wiele konstrukcji w dziedzinie hamulców, jak np. hamulec elektryczny Heenan, czy elektrohydrauliczny hamulec Froude do hamowania silników o mocy do 1500 KM. Hamulec powietrzny Heenan-Fell używany był w początkach rozwoju silników lotniczych; urządzenie to wykorzystywało sterowany przepływ powietrza wokół wirnika i kwadratową zależność momentu oporowego od prędkości przepływu powietrza w osrodkowym wirniku dmuchawy z obciążeniem sterowanym poprzez dławienie przepływu przez dmuchawę. Pomimo dostępności hamulców silnikowych, niewiele jest danych na temat badań silników o zapłonie iskrowym, do których wykorzystywany byłby hamulec Froude'a przed rokiem 1914. Silniki do pojazdów we wczesnym okresie swojej historii nie były specjalnie badane a testem pozosta-

The shearing effect of the water in the rotating cups against the stationary cups gave the torque absorption characteristics so well known today. This dynamometer design revolutionised engine development both steam, Diesel and gasoline and set the standard for many years to come. In the calculation of BHP from observations, Mr Froude noted that it was necessary to make only two observations: rotational speed of the dynamometer, and the net load on the torque arm.

If $Q = \text{total torque exerted}$ and $n = \text{rev/min [rpm]}$, then: the BHP = $2 \cdot p \cdot n \cdot Q / 33,000$.



Rys. 5. Przekrój poprzeczny hamulca typu Froude DPX (1914)

Fig. 5. Cross-sectional arrangement of Froude Dynamometer type DPX (1914)



Rys. 6. Samochód Mors z 1901 roku

Fig. 6. Automobile Mors from 1901

If r is the effective radius in feet of the dynamometer arm and W the net load in lbs, then:

$$Q = W \cdot r$$

Thus BHP = $2 \cdot p \cdot n \cdot W \cdot r / 33,000$; thus BHP = $n \cdot W / K$ (where K is a constant).

By making r a convenient figure e.g. $r = 5.252$ feet, then $K = 1000$.

Thus dynamometers were available, and indeed in the period between 1918 and 1939 many dynamometer developments took place, for example the Heenan Electro-dynamometer and the combined Froude Electro-hydraulic dynamometer for powers up to 1,500 BHP. The Heenan-Fell Air Brake Dynamometer was used for early aircraft engine development; it was a square law device with a centrifugal fan impeller with the load being controlled by limiting the air-flow across the device. Whilst dynamometers were available, there where little evidence of any spark ignited internal combustion engines being developed utilizing dynamometer tests prior to 1914, early vehicle engine development tended to rely upon actual road testing conditions, would the vehicle for example ascend a steep hill with a full complement of passengers? (Fig. 6).

The Targa Florio was first raced in 1906, following a bet by Vincenzo Florio that cars could never race around the terrible mountainous roads around Sicilly (Fig. 7).

The engines from 1914 to 1940 changed very little in design concept and were by to day's standards very basic units though new materials and machining processes all had

wała odpowiedź na pytanie, czy dadzą sobie radę w rzeczywistych warunkach drogowych, czyli np. czy samochód wypełniony pasażerami pokona określone wzniesienie? (rys. 6).



Rys. 7. Wyścig Targa Florio; pojazdy sprawdzają się na drodze

Fig. 7. The Race Targa Florio; vehicle developed on the open road

Wyścig Targa Florio odbył się po raz pierwszy w roku 1906, jako wynik załóżdź Vincenza Florio, który był zdania, że samochody wyścigowe nigdy nie pokonają górzystych dróg wokół Sycylii (rys. 7).

W okresie od 1914 do 1940 roku silniki zmieniły się niewiele pod względem konstrukcyjnym i z dzisiejszego punktu widzenia w owych czasach stanowiły konstrukcję bardzo podstawową (rys. 8). Ulepszono natomiast materiały i sposoby obróbki, dzięki czemu uzyskano znaczący wzrost sprawności. Popularne były wałki rozrządu w głowicy a Bentley miał już w 1919 roku 4 zawory na cylinder. Spotykało się układ z wałkiem wyrównowazającym Lanchester i prowadzono badania nad systemami wtrysku paliwa. Podstawowe rozwiązanie ciągłego wtrysku paliwa opracowano w USA w roku 1935, a w Wielkiej Brytanii firma SU wytwarzała skomplikowany układ wtrysku hydromechanicznego stosowanego do zasilania silników Rolls Royce Merlin wykorzystywanych w myśliwcach Spitfire i niektórych bombowcach w latach 1940-1948.

W tych latach działało wielu znanych inżynierów-silnikowców; w Wielkiej Brytanii byli to: Sir Harry Ricardo, Harry Weslake i Walter Hassan. Sam, jako młody chłopak, miałem zaszczyt pracować zarówno z Wally Hassanem jak i z Harrym Weslakem. Ci dwaj z krwi i kości inżynierowie łączyli swą ogromną wiedzę praktyczną z doskonałością naukową.

Hamulec wodny Froude wykorzystywany przez marynarkę wkrótce przekształcony został w model Froude DPX, który jest wykorzystywany i produkowany w wielu częściach świata po dziś dzień, rys. 9.

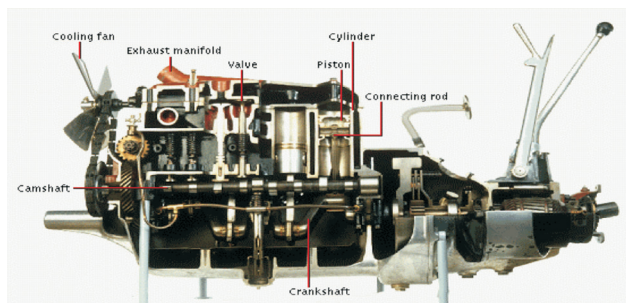
2. Silniki wyczynowe w okresie międzywojennym

Aż do 1918 roku technika hamowania silników stosowana była głównie do dużych silników okrętowych i kolejowych. W okresie międzywojennym w Europie i Ameryce Płn bardzo popularne stały się wyścigi samochodowe. Rozwój silników bardzo przyspieszył tuż przed II wojną światową; pojawiły się sprężarki o dużym stopniu doładowania a także paliwa wyczy-



Rys. 10. Wczesny samochód Alfa Romeo

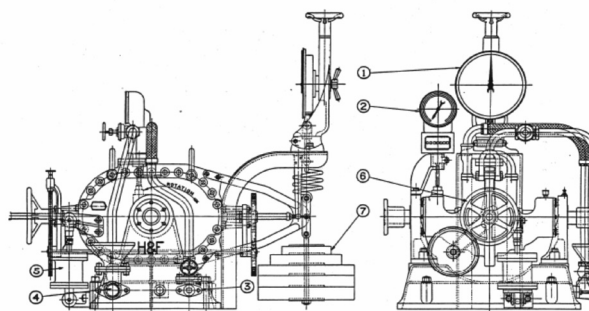
Fig. 10. An early Alfa Romeo



Rys. 8. Typowa konstrukcja silnika z lat 40-tych XX w.

Fig. 8. A basic engine of this period

a significant effect upon engine efficiency (Fig. 8). Overhead camshafts were common and Bentley had 4 valve cylinder heads in 1919, the Lanchester balancer shaft system is once more popular and some "spit and point" fuel injection systems were being investigated. A basic continuous injection system was being developed in the USA in 1935 and in the UK, SU produced a complex hydro-mechanical fuel injection system that carburetted some of the Rolls Royce Merlin engines as used in the Spitfire fighter and assorted heavy bomber military aircraft in the period 1940-1948.



Rys. 9. Klasyczny hamulec wodny Froude DPX

Fig. 9. The classical Froude DPX dynamometer

There were of course many innovative automotive engineers in this period. In the UK we had Sir Harry Ricardo, Harry Weslake and Walter Hassan, I feel privileged to have worked as a young man for both Wally Hassan and Harry Weslake. Both true knife and fork engineers with a great depth of practical knowledge coupled with academic excellence.

The Froude marine water brake soon evolved into the Froude DPX water brake that is still in operation and indeed is manufactured in many parts of the world to this day, Fig. 9.

2. Race engines between the wars

Up until 1918 dynamometer technology was used primarily for large marine engines and locomotives. In the period between the two World wars, 1918 to 1939 motor sport became increasingly popular in Europe and North America. As Europe moved closer to the Second World War, the rate of development increased dramatically, with high-pres-

nowe. Kierunek rozwoju wytyczały silniki lotnicze, a standardowym wyposażeniem hamowni silnikowych czolowych producentów silników pozostawał hamulec typu Froude DPX.

Popularność sportów motorowych rosła i jak można zauważyć, coraz częściej stawały się one obszarem współzawodnictwa między kobietami a mężczyznami. Częstoymi zwycięzcami trwających 4 do 6 godzin wyścigów Brooklands były właśnie kobiety. Samochody wyścigowe z tych lat miały silniki o 8 do 12 dm³ pojemności, umieszczone z przodu wzdłuż pojazdu, wolnoobrotowe z dużym momentem obrotowym, rys. 10. Były to silniki zarówno wolnossące, jak i doładowane (za pomocą dmuchaw napędzanych mechanicznie). Tor w Brooklands odległy o 25 km od Londynu został specjalnie zbudowany do wyścigów i z czasem stał się Mekką sportu motorowego i centrum rozwoju lekkich samolotów wyczynowych (rys. 11).

Sporty motorowe były rozrywką ludzi zamożnych, były także okazją do rywalizacji bogatych kobiet z mężczyznami, jak to można zauważyć na fotografii z roku 1921 (rys. 12, 13). Przez cztery lata, między 1927 a 1929, pisarka i działaczka społeczna Barbara Cartland dzierżyła rekord jednego okrążenia ustanowiony na doładowanym Bentley'u.

Boksy obsługi technicznej w tych latach były miejscem bardzo niebezpiecznym, jak to widać na fotografii z roku

sure superchargers and complex high-energy fuel chemistry. Aircraft engines led the way and dynamometers all based upon the Froude DPX base design were the standard equipment used by all engine manufactures.

The popularity of Motor-sport grew and as can be seen, it proved to be an area where in women could compete on a level playing field with men. Women frequently won the Brooklands reliability trials that were an out and out race over 4 to 6 hours. The race cars of this era, tended to have engines of 8 to 12 litres capacity, they were front engined, inline, slow revving high torque units, Fig. 10. Both normally aspirated and supercharged (Blowers). The Brooklands purpose built high speed banked circuit and airfield situated some 15 miles due south from the centre of London became a Mecca for motor-sport and the development of high performance light aircraft (Fig. 11).

Motor-sport was a rich mans sport, but it gave an outlet for rich young ladies to compete with men as can be seen from this 1921 photograph of a 4 hour reliability trial (Fig. 12, 13). For two years 1927 to 1929, the lady novelist and socialite Barbara Cartland held the outright lap speed record in a blower Bentley.

The pit area in this era were very dangerous places to work as this photograph of a 1930 Maserati shows, note the



Rys. 11. Henry Seagrave, 1921 r.

Fig. 11. Henry Seagrave, 1921



Rys. 13. Wielogodzinny wyścig w Brooklands, 1921 r.

Fig. 13. Reliability trial Brooklands 1921



Rys. 12. Odprawa kierowców, Brooklands, 1921 r.

Fig. 12. Drivers briefing at Brooklands 1921



Rys. 14. Brooklands, 1930 r.

Fig. 14. Brooklands, 1930

1930, na której Maserati napełniane jest paliwem z kanistra a okolice oblegane są przez atrakcyjne młode damy (rys. 16).

Badania silników były traktowane coraz poważniej, a dla wielu krajów zwycięstwo w wyścigach było przedmiotem narodowej dumy. Hamulec konstrukcji Froude'a, lub podobne, wykorzystywane były coraz szerzej przez współzawodniczące zespoły. Należy tu pamiętać, że był to okres szybkiego rozwoju silników spalinowych: od roku 1924 powszechnie stosowano podwójne wałki rozrządu w głowicy i półkulistą komorę spalania, a niezawodne sprężarki dostarczały ładunek pod ciśnieniem 2 do 3 atmosfer (ok. 2-3 bar, przyp. red., rys. 18). Doładowany samochód wyścigowy Austin 7 (712 cm³) Freddiego Dixona przez krótki okres był najlepszy w świecie (rys. 19).

Jakich narzędzi używali inżynierowie w tych czasach do ulepszania swych konstrukcji?

– Wskaźnik Bourdona (rys. 20) do pomiaru temperatury.

Jeden koniec rurki miedzianej o średnicy zewnętrznej 4 mm przymocowany jest do zbiornika wypełnionego woskiem a drugi współpracuje ze wskaźnikiem. Ze wzrostem temperatury, wosk się rozszerza, co powoduje wzrost ciśnienia w rurce. Za pomocą dźwigni odkształcenie rurki zamieniane jest na obrót zębatego i wskazówki na tle skali.



Rys. 16. Maserati z roku 1930

Fig. 16. 1930 Maserati

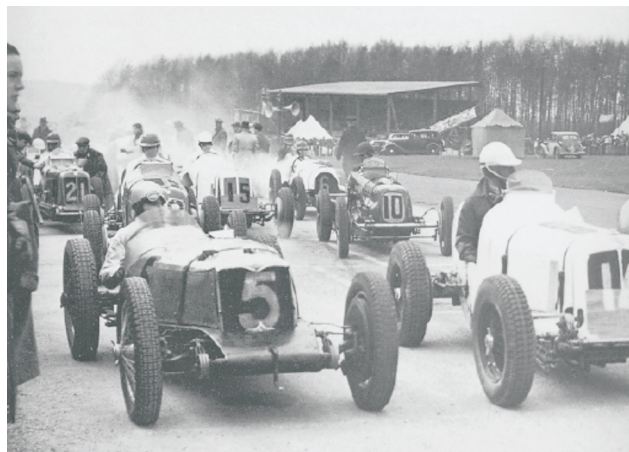


Rys. 18. Tim Birkin w doładowanym Bentley'u

Fig. 18. Tim Birkin in Supercharged Bentley

fuel filling system and of course the glamorous young ladies on the pit wall (Fig. 16).

Engine testing began to be taken more seriously and for many countries winning became a case of national pride, the Froude dynamometer, or near copies of it were being used extensively by the more competitive teams. One must never forget that this was a period of rapid engine development, twin overhead camshaft high performance hemispher-



Rys. 15. Freddie Dixon za kierownicą Riley'a (No 5), ERA (No 14)

Fig. 15. No 5 Riley with Freddie Dixon, No 14 ERA



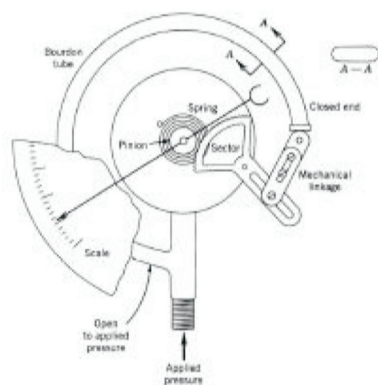
Rys. 17. Earl Howe na Bugatti a za nim Bernato-Hassan

Fig. 17. Earl Howe Bugatti followed by Bernato-Hassan



Rys. 19. Dixon w Austinie 7

Fig. 19. Dixon in an Austin 7



Rys. 20. Wskaźnik Bourdona

Fig. 20. Bourdon Gauge

– Pomiar ciśnienia.

Odbywa się zgodnie z tą samą zasadą, lecz ciśnienie oleju we wskaźniku pochodzi bezpośrednio z magistrali olejowej. W przypadku obu tych pomiarów dokładność jest wątpliwa, a opóźnienie osiągnięcia pełnego zakresu jest istotne.

Używając hamulca wodnego można było mierzyć moment obrotowy po stronie koła zamachowego, lecz odbywało się to za pośrednictwem wagi sprężynowej, która miała skłonność do wahań o znacznej amplitudzie. Prędkość obrotową mierzono za pośrednictwem linki lub pasa od hamulca, z dokładnością ± 25 obr/min, gdy się miało szczęście. Ciśnienia były mierzone poprzez naczynie próżniowe a temperatury przy pomocy termometrów rtęciowych (rys. 21) lub naczynia wypełnionego woskiem, które wykazywały kilkuminutową histerezę.

Zgodnie ze współczesnymi standardami były to urządzenia prymitywne, lecz gdy ktoś poświęcił nieco czasu na stabilizację, możliwe było uzyskanie powtarzalnych wyników.

Do pomiarów bardzo małych ciśnień używano manometrów pochylonych, zwykle wypełnionych zabarwioną wodą z domieszką barwnika fluorescencyjnego.

Maserati TF kierowane przez Mike'a Hawthorne'a widoczne na rysunku 22 to typowy obrazek z wyścigów w latach 1938/1939, kiedy na torach wyścigowych były niepokonane włoskie Maserati i niemieckie Mercedesy oraz samochody Auto-Union. Okres powojenny od 1945 do 1958 roku był okresem wyrzeczeń a – podczas gdy w Europie i Ameryce Płn. tłumy chodziły, aby obserwować zmagania kierowców – samochody zasadniczo pochodziły z okresu przedwojennego. Wyścigi prowadzono w przedwojennych samochodach wyposażonych w ogromne silniki wolnossące i doładowane.

3. Czasy silników Cooper i BRM

W Wielkiej Brytanii stowarzyszenie ERA (Angielski Związek Wyścigowy, poprzednik BRM kierowany przez Raymonda Mayesa) rozpoczynało działalność i próbowało rozwijać przedwojenne silniki, czego przykładem jest Alta. Inżynier i przemysłowiec G.A (Tony) Vandervel wyprodukował w 1935 roku cynowo-olowiową panewkę cienkościenną; wcześniej łożyska wszystkich silników były odlewane w kadłubie i pokrywach, po czym w wielu przy-



Rys. 21. Termometr rtęciowy

Fig. 21. Mercury thermometer

tical combustion chambers were universally used from 1924, and superchargers were being developed that gave 2 to 3 atmospheres boost with reliability, Fig. 18. The Freddie Dixon Austin 7 (712 cc) blown Racecar was for a short period a world-beater, Fig. 19.

What were the race engine development engineer's tools at this time?

– The Bourdon Gauge (Fig. 20) for temperature measurement.

One end of a 4 mm outside diameter copper tube was coupled to a capsule filled with wax and the other to The Bourdon tube in the gauge. As the temperature increased, the wax began to expand and the pressure in the tube increased. By means of a basic linkage, a pinion is rotated and a reading indicated on the dial.

– Pressure measurement.

This follows the same principle, but the oil pressure feed to the gauge is connected directly to the main oil gallery via a similar length of copper tubing. With both these applications, the accuracy was suspect, and the time delay to full deflection significant.

With his water brake, the engineer could measure torque at the flywheel, but this was via a spring balance device that tended to oscillate widely. Engine revolutions were measured via a cable or belt driven device off the dynamometer, accuracy ± 25 rev/min if one was lucky! Pressures were measured via capsule device and temperatures via either a glass bulb thermometer (Fig. 21) or a wax capsule device, which entailed a hysteresis of many minutes. These devices were by to days standards very primitive, but if one were to take time and allow for stabilization, it was possible to obtain repeatable results.

For very small pressure measurements, an inclined manometer was used, normally filled with water and a trace of wetting agent and fluorescent dye.

The TF Maserati that Mike Hawthorne is seen driving in Fig. 22 is typical of the 1938/1939 period when Italy with Maserati and Germany with Auto Union and Mercedes Benz were unbeatable. The post war period 1945 to 1958 was one of great austerity, and whilst across Europe and North America the public flocked to witness motor sport events, in the



Rys. 22. Samochód Maserati TF prowadzony przez Mike'a Hawthorne'a

Fig. 22. Maserati Type TF with Mike Hawthorne driving

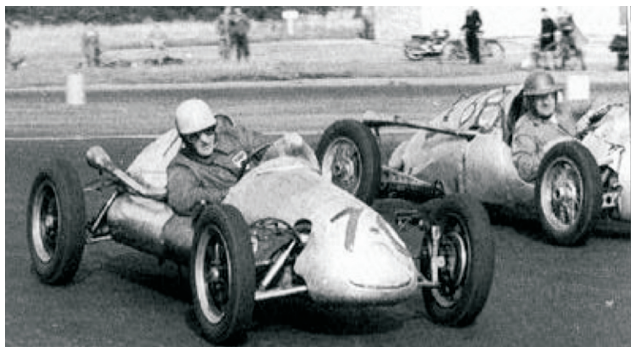
padkach po nieodzwonnej obróbce mechanicznej następowało ręczne skrobanie by osiągnąć możliwie korzystne tolerancje robocze. Aby spopularyzować i rozpowszechnić to rozwiązanie spowodował powstanie słynnego specjalnego samochodu wyścigowego Vanwall.

W roku 1949 eksperymentował z włóknem szklanym i miał swój udział w przygotowaniu samochodu wyścigowego napędzanego silnikiem Ferrari z cienkościennymi panewkami. W roku 1954 zlecił Colinowi Chapmanowi i Mike'owi Costinowi zaprojektowanie własnego samochodu wyścigowego typu T16. W silniku wykorzystano blok cylindrowy silnika Rolls-Royce i głowice silnika motocyklowego Norton. Zrobiono tak, by wyprodukować brytyjski samochód wyścigowy i promować nowy typ łożysk. W międzyczasie BRM (*British Racing Motors*) powołał zespół przemysłowców brytyjskich by zaprojektować i wykonać samochód wyścigowy Formuły 1 mogący konkurować ze światowymi konstrukcjami.

W całym tym okresie przemysł zmagał się ze starą konstrukcją samochodu z silnikiem z przodu. Typowym obrazkiem z tych lat jest młody, lecz obiecujący Stirling Moss za kierownicą samochodu Cooper-Alta z silnikiem umieszczonym z przodu, rys. 23.

Podczas gdy w Europie miały miejsce opisywane zdarzenia, w Stanach Zjednoczonych obok specjalnie konstruowanych samochodów wyścigowych wyposażonych w ogromne silniki i przeznaczonych jedynie do jazdy wokół wyposażonego w bandy toru w Indianapolis, rosnącym zainteresowaniem cieszyły się wyścigi małych samochodów, popularne także w Australii. Tymczasem w Wielkiej Brytanii syn właściciela garażu z Surbiton (koło Londynu) zaczął budować silniki JAP o pojemności 500 cm³ i montować je z tyłu małych samochodów wyścigowych.

Samochody te cieszyły się sławą łatwo prowadzących się i charakteryzujących się dobrymi osiąganiami. Konstrukctorem tym był sławny John Cooper, rys. 25. Silnik JAP 500 cm³ o mocy 45 KM miał jeden cylinder i pozwalał osiągnąć prędkość 180 km/godz. Całkowita masa samochodu wynosiła tylko 200 kg. Wykorzystano elementy zawieszenia samochodu Fiat i napęd tylnej osi za pomocą przekładni łańcuchowej. Była to konstrukcja prymitywna, ale bardzo efektywna. Wkrótce zaczął budować większe samochody, również z silnikiem umieszczonym z tyłu, co było konstrukcją na tyle udaną, że stworzyła standard na wiele lat, rys. 26.



Rys. 23. Stirling Moss kierujący Cooperem – Alta, rok 1953

Fig. 23. Cooper – Alta 1953 Stirling Moss driving

main, the cars raced were those of the pre-war era. Racing initially was made up of pre war large engined vehicles, both aspirated and supercharged.

3. The times of Cooper and BRM engines

In the UK ERA (English Racing Associates and the fore runner of BRM with Raymond Mayes at the helm) flew the flag for Britain and attempted to further develop early pre-war engines, typically Alta. G. A. (Tony) Vandervel, a engineer and entrepreneur who produced a lead tin replacement bearing system in 1935; prior to this all engine used white metal that was melted, and poured into moulds in the engine block and bearing caps, after which in many cases after rudimentary machining it was hand scraped to tight running tolerances. To popularise and disseminate this solution he initialised the creation of the famous, special racing car Vanwall.

In 1949 he experimented with fibreglass and produced his thin wall special Ferrari powered racing cars. In 1954 he commissioned Colin Chapman and Mike Costin to design his own type T16 racecar. The engine used a Rolls Royce bottom end coupled to Norton motorcycle cylinder heads. This work was done to produce a British racing car and to promote his new bearings. Mean while BRM (British Racing Motors) brought together a team of British Industrialists to fund the design and manufacture of a world beating Formula 1 racing car.

Through out this period, while the industry struggled on with front engined old engine designed cars. The picture of a young but forceful Stirling Moss in a front engined Cooper-Alta is a typical example, Fig. 23.

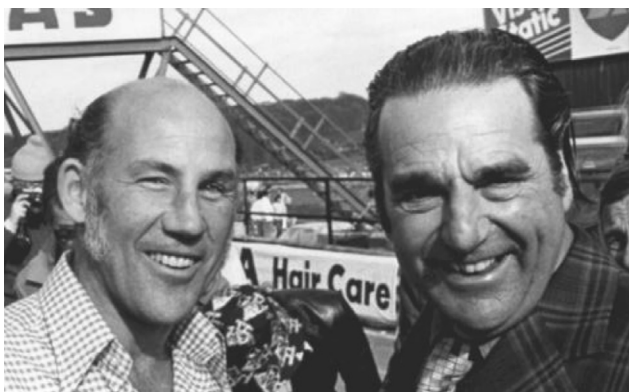
Whilst these developments were taking place in Europe, in the USA in addition to the very large engined specialist race cars designed solely to run round a banked circuit at Indianapolis, a growing popular form of racing was midget car racing which was also very popular in Australia. In the UK at this time, a garage owner's son from Surbiton (London) was building 500 cc JAP engines and fitting them into the rear of midget cars.

These cars were renown for there great handling and all round performance. The instigator was the famous John Cooper, Fig. 25. A JAP 500 cc 45 BHP single cylinder engine gave a top speed of 180 km/h. The total weight of the car was 200 kg. Fiat suspension components were used with a solid chain driven rear axel. Primitive in the extreme but very



Rys. 24. Samochód Cooper 500 cm³ z silnikiem umieszczonym z tyłu

Fig. 24. Rear engined Cooper 500cc

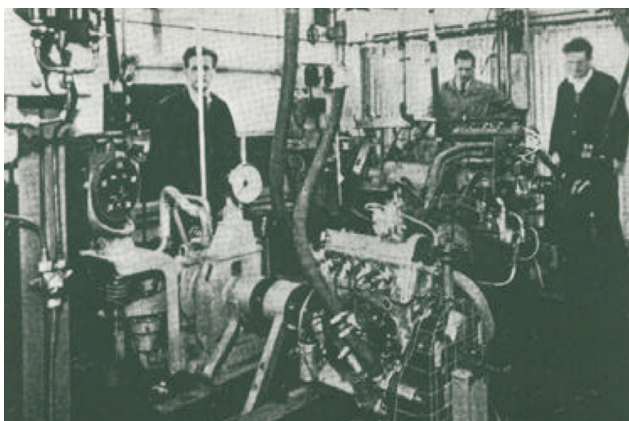


Rys. 25. Stirling Moss i John Cooper (po prawej)

Fig. 25. Stirling Moss and the late John Cooper (at the right)

W ciągu tych lat badania silników były zajęciem niebezpiecznym a hamulce wodne typu Froude DPX stanowiły rozwiązanie powszechne. W placówkach zatrudniających więcej pracowników mogło się zdarzyć, że o określonych porach dnia, kiedy np. pracownicy myli ręce, ciśnienie wody spadało a silniki zaczynały pracować z większą prędkością, co prowadziło do ich rozbiegania się.

Jak można sobie wyobrazić, zdejmowanie charakterystyki pełnej mocy czy jakiegokolwiek inne badanie nad rozwojem silników było bardzo pracochłonne i często bardzo

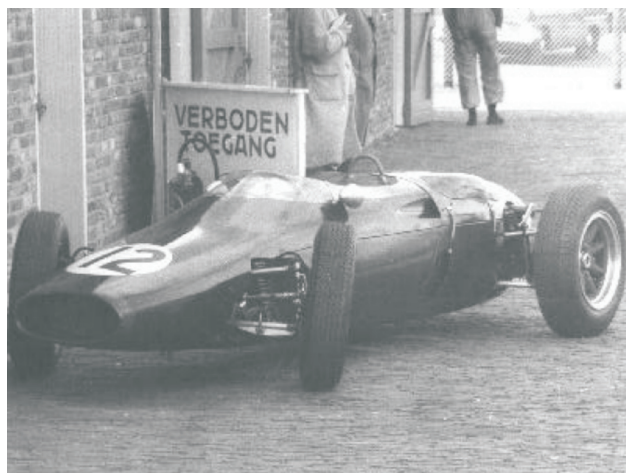


Rys. 27. Silnik wyścigowy Coventry Climax; stanowisko badawcze niezmienione od 1925 do 1960 roku

Fig. 27. The Coventry Climax Race engine; test shop unchanged from 1925 to 1960

niebezpieczne w nieosłoniętych stanowiskach badawczych, oczywiście było wykonywane wyłącznie ręcznie i przez zahartowany w boju personel. Wszystkie odczyty rejestrowane były ręcznie na specjalnych formularzach, gdzie zapisywano ciśnienia, temperatury, prędkość i obciążenie. Na zdjęciu z rys. 27 można zauważyć, że jednocześnie badano wiele silników w jednym pomieszczeniu. Hałas był nie do zniesienia.

Niektóre laboratoria były jeszcze gorsze i bardzo niewygodne. W laboratorium badawczym BRM w Bourne podstawowe stanowisko hamulcowe znajdowało się w blaszanej hali pozbawionej ścian szczytowych, która była pozostałością po wojskach amerykańskich. Na tyłach hali umieszczo-



Rys. 26. Cooper Climax z roku 1961

Fig. 26. 1961 Cooper Climax

effective. He soon built a larger car also rear engine and it was so successful that the trend was set for all time, Fig. 26.

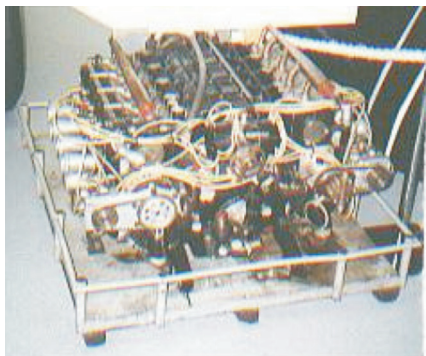
Through out this period, engine testing was a hazardous exercise; the Froude DPX style water brakes were virtually a universal choice. In organisations with a large staff, at certain key times of the day the water pressure would fall rapidly when the staff were washing their hands, and the engine run away and over rev.

As can be imagined, completing a power curve or indeed undertaking any development work was very labour intensive and was often a dangerous job working in open shops beside the engine, certainly hands on and not a job for the faint hearted. All readings taken by hand written down on a test sheet, pressures, gauge and manometer, temperature, speed and load all to be noted. It can be seen from the Fig. 27 that a number of engines were all being worked upon at the same time. The noise was mind numbing.

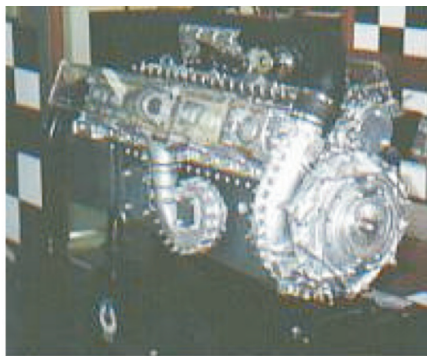
Some test facilities were worse than this and were very uncomfortable. At the BRM facility in Bourne UK the primary dynamometer test shop was an iron sheeted ex USA military building with out walls to the front and rear. At the rear of the building was a large engine driving through a pulley and widely flapping drive belt system, an aircraft propeller, this forced air through the building over the engine and of course the engineer and test technicians. In the winter this was less than ideal.

BRM produced two highly complex units the H16 and the V16, Fig. 28. The materials and indeed the machining capability were not able to produce the designed power and reliability.

They were highly complex power units but with only very primitive test instrumentation to develop them. A more simple reliable power unit was required. The Late Walter Hassan and Harry Mundy designed a 2.5 litre 4 cylinder engine with double overhead camshafts and a hemispherical combustion chamber; this intrinsically simple design went on to win many Grand Prix races, initially the maximum power of these engines was far inferior that claimed by the opposition but they had a very strong torque curve. These



a



b

Rys. 28. Silniki BRM: a) H16; b) V16

Fig. 28. The BRM engines: a) H16; b) V16

no wielki silnik napędzający śmigło lotnicze za pośrednictwem systemu pasów wywołujące intensywny przepływ powietrza zarówno wokół silników jak i obsługi, co szczególnie w zimie nie było rozwiązaniem komfortowym.

BRM wyprodukowało dwie bardzo zaawansowane jednostki: H16 i V16, rys. 28. Jednak materiały i możliwości obróbki nie były w stanie zapewnić zakładanej mocy i niezawodności. Były to bardzo złożone konstrukcje, ale do ich rozwoju dysponowano jedynie bardzo prymitywnym wyposażeniem stanowisk badawczych. W związku z tym potrzebna była jednostka dużo prostsza. Walter Hassan i Harry Mundy zaprojektowali 2,5 litrowy, 4-cylindrowy silnik z dwoma wałkami rozrządu w głowicy i półkulistą komorą spalania; ta genialnie prosta konstrukcja zaczęła wygrywać wiele wyścigów Grand Prix a choć początkowo maksymalna moc była dużo mniejsza niż u konkurencji, jednak charakteryzowała się korzystnym przebiegiem krzywej momentu obrotowego. Silniki te montowane były z tyłu samochodów Cooper i pozwoliły na wiele zwycięstw późniejszych kierowców stajni Cooper: Jacka Brabhama i Bruce McLaren (rys. 29).

4. Początki silników Formuły 1

Gdy wprowadzono nowe przepisy Formuły 1: 1,5-litrowy silnik bez doładowania spalający standardowe paliwo, pojawiła się potrzeba skonstruowania nowego silnika. Coventry Climax wyprodukował na potrzeby badawcze 4-cylindrowy silnik o pojemności 750 cm³ do badań jako 50% silnika V8, rys. 30.

Silnik ten okazał się fantastyczną jednostką badawczą, w którym szeroko eksperymentowano z zasilaniem gaźnikami Amal, Weber i wtryskiem paliwa systemu Tecalemit. Pomiar zużycia paliwa odbywał się za pomocą miernicy szklanej i stopera, a we współpracy z Amalem zaczęto wprowadzać pierwsze rozwiązania pomiaru elektronicznego. Do badań kolektorów dolotowych i wydechowych stosowano manometry z falowymi kształtami naczynia pomiarowego. Silnik rozwijał moc 765 KM (powy-

engines fitted to the rear engine Cooper produced a winning combination for the then Cooper drivers: Jack Brabham and Bruce McLaren, Fig. 29.



Rys. 29. Młodzietki Bruce McLaren i Jack Brabham obok Coopera z silnikiem FPF Climax

Fig. 29. A very young Bruce McLaren and Jack Brabham with a FPF Climax engine Cooper

4. The beginning of Formula 1 engines

When the new Formula 1 regulations came into being: 1.5 litre normally aspirated, running on standard pump grade petrol, a new generation of engines was required. Coventry Climax produced an experimental 750 cc 4 cylinder to test as 50% of a V8, Fig. 30.

This engine proved to be a fantastic test vehicle where in many aspects of carburetion were experimented with Amal Carburetors, Weber Carburetor and Tecalemit petrol injection equipment. Fuel measurement was via glass burettes and a stopwatch, and in conjunction with Amal some rudimentary electronic measuring was undertaken. Waveform manometers were used for the induction and exhaust manifold development. The engine produced 765 BHP (over the magic 100 BHP/litre which the earlier FPF 1.5 litre version had just achieved) and the decision was made to produce a V8 1.5 litre version, Fig. 31.

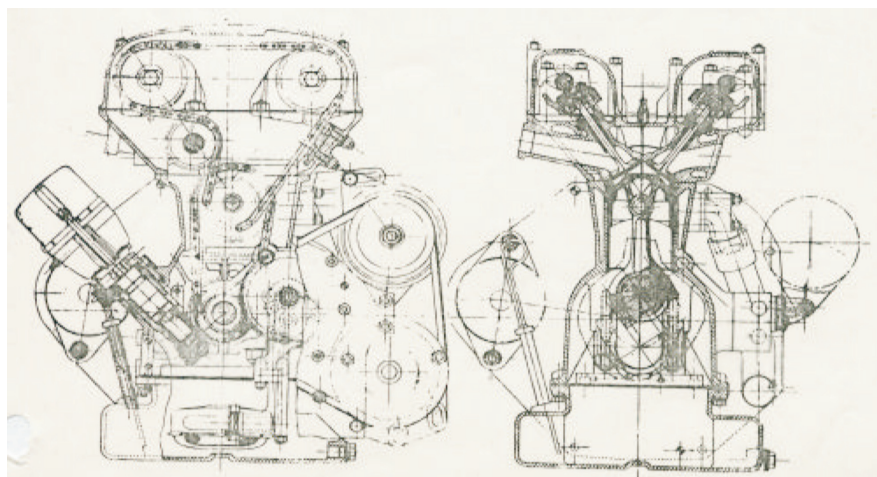
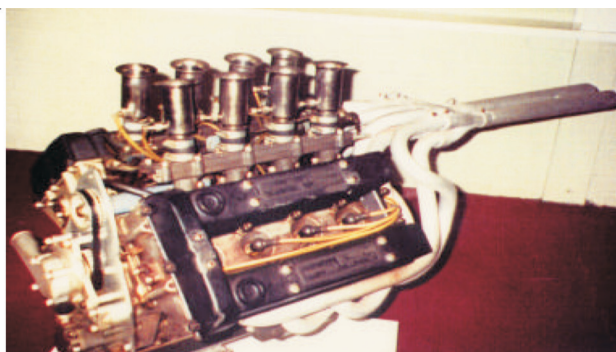
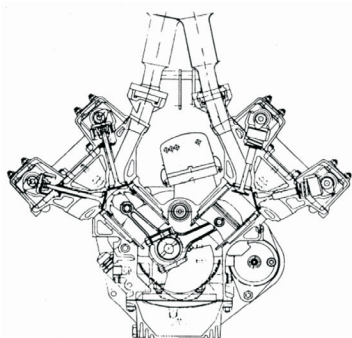
Rys. 30. Silnik Coventry Climax FWMC o pojemności 742 cm³

Fig. 30. Coventry Climax FWMC 742 cc



Rys. 31. 1,5-litrowy silnik V8 Coventry Climax FWMV przez 4 lata zdobywca tytułu Mistrza Świata
 Fig. 31. The Coventry Climax FWMV 1.5 Litre V8 – World Champion engine winning for 4 years

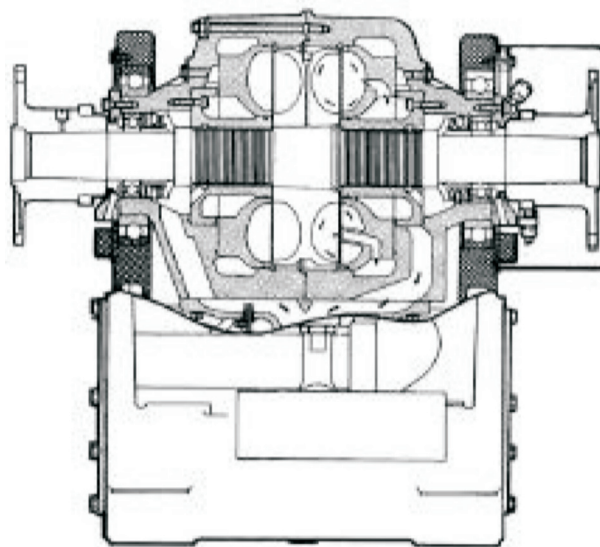
żej magicznej granicy 100 KM/dm³, osiągniętej przez wcześniejszą wersję 1,5 litrowego silnika FPF) i zdecydowano o produkcji silnika V8 w wersji 1,5 dm³, rys. 31.

By sprostać wymaganiom tego silnika potrzebny był nowy hamulec o mniejszej bezwładności i szybszej odpowiedzi na zadane warunki pracy: wybrano do tego celu model U 16 h firmy Schenck, rys. 32.

W procesie rozwoju tego silnika liczba zaworów przypadających na cylinder wzrosła z 2 do 4 (jak w Bentley'u z roku 1919 opracowanym przez Hassana). Bez osiągnięć dzisiejszej techniki przyjęto wiele błędnych założeń dotyczących rozchodzenia się płomienia. Daszkowa komora spalania wymagała dużego wyprzedzenia zapłonu, czego wówczas nie znano, około 48° przed GMP dla wszystkich prędkości ponad 8500 obr/min. Ostateczną konstrukcją z tej rodziny silników F1 był 16 cylindrowy silnik leżący.

W okresie między rokiem 1961 a 1965 prędkość obrotowa silników wzrosła z 8500 obr/min do 12 000 obr/min, co stało się źródłem szeregu problemów dla konstruktorów, rys. 33.

Tribologia: smarowanie powierzchni roboczych łożysk stanowiło istotny problem w związku z dużymi siłami bezwładności działającymi w suwach pozbawionych zapłonu. Aż do lat 60-tych prędkości obrotowe silników rzadko prze-

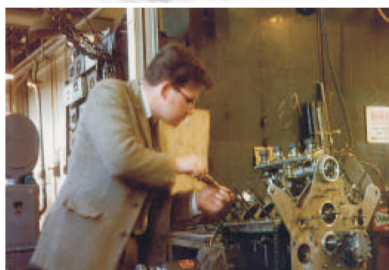
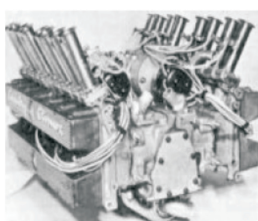


Rys. 32. Hamulec U16h firmy Schenck
 Fig. 32. Schenck U16h dynamometer

worked on). Without the advantage of the technology that we have today many incorrect assumptions were made with regard to flame propagation. The pent-house combustion chamber required a significant degree of ignition advance that was unknown before, some 48° crankshaft of ignition advance at all speeds over 8,500 rev/min. The final F1 engine in this family was a 16 cylinder flat engine.

In the period 1961 to 1965 the rotational speed of the engines increased from 8,500 rev/min to 12,000 rev/min, and this caused a number of problems for the development engineer, Fig. 33.

Tribology: lubrication of the bearing surfaces due to the high inertia of the non firing stroke became a problem, and up until the 1960's engine speed rarely exceeded 7,000 rev/min, at this speed there was a lot of time for mixing and



Rys. 33. Niektóre z silników wyścigowych Coventry Climax z lat 1961-1965 oraz autor przy silniku FWMV w 1961 r.; otwarta przestrzeń hamowni z hamulcem w tle

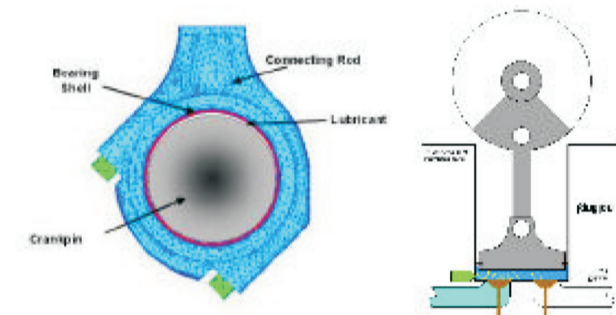
Fig. 33. Some Coventry Climax Race Engines 1961 to 1965 with the author working on FWMV engine in 1961, note the open test cell with the dynamometer in the background

kraczały 7000 obr/min, co pozostawiało odpowiednio dużo czasu na wymieszanie i spalanie mieszanki. Ze wzrostem prędkości gęsta mgła olejowa w skrzyni korbowej zaczęła stanowić przeszkodę, na pokonanie której potrzebna była odpowiednio duża siła by obrócić wał korbowy z korbowadami. Bez oprzyrządowania i wiedzy, jaką dysponujemy obecnie, konstruktorzy mieli związane ręce. Kiedy Cooper Climax zniknął z horyzontu, jego miejsce zajęły inne silniki. Harry Weslake i Tim Wall – główny mechanik zakładów Dana Gurneya, rys. 34 – skonstruowali bardzo nowoczesny silnik Gurney Weslake, rys. 35. Silnik ten po raz pierwszy testowano w laboratoriach Tecalemit w Plymouth w 1966 roku. Proszę zauważyć, że ciągle nie było termopar, czujników ciśnienia czy automatycznej rejestracji danych – fascynujące czasy.

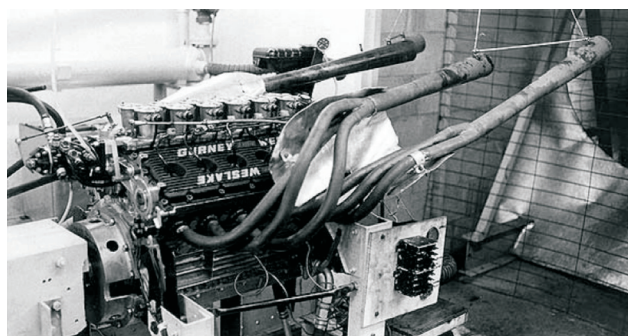
Przepisy Formuły 1 się zmieniły i dopuszczaly udział 3 litrowych silników wolnossących i 1,5 litrowych silników doładowanych.



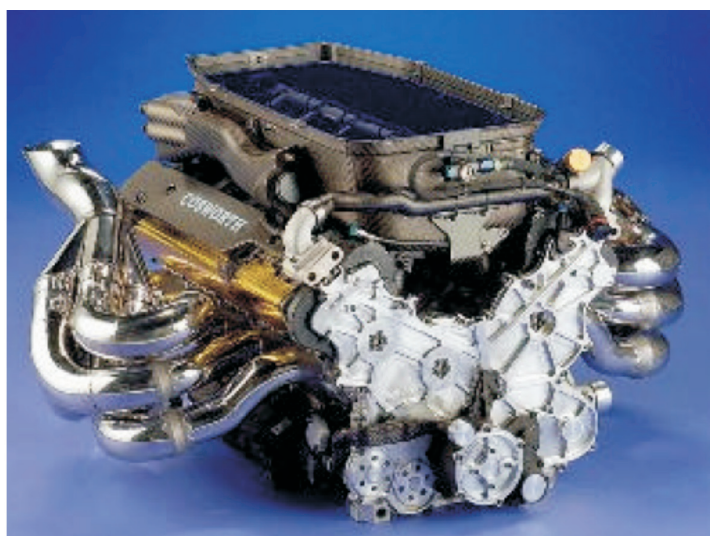
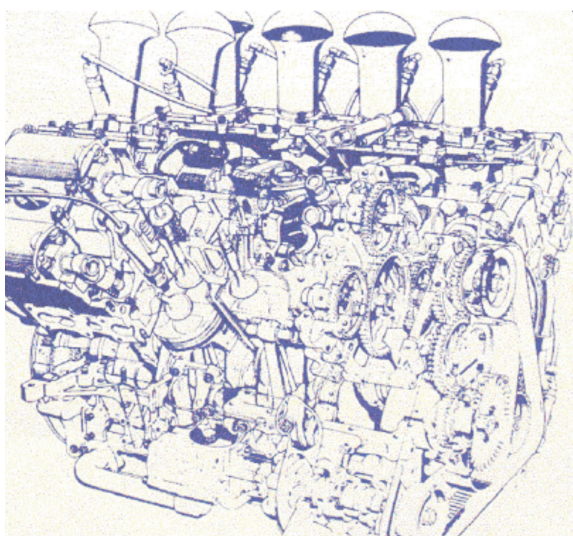
Rys. 34. Dan Gurney w swoim „orle”
Fig. 34. Dan Gurney in his eagle



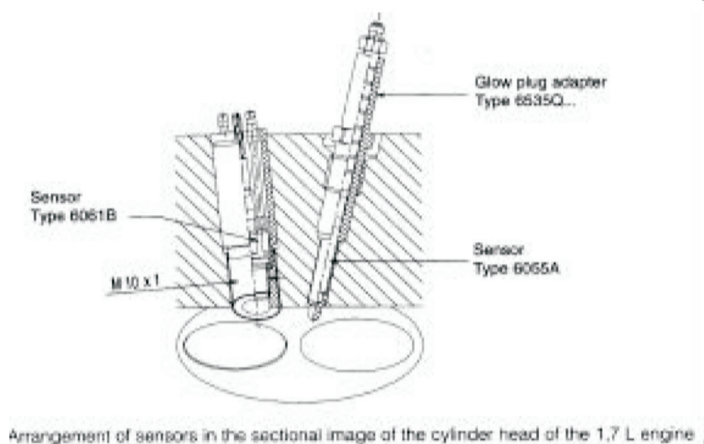
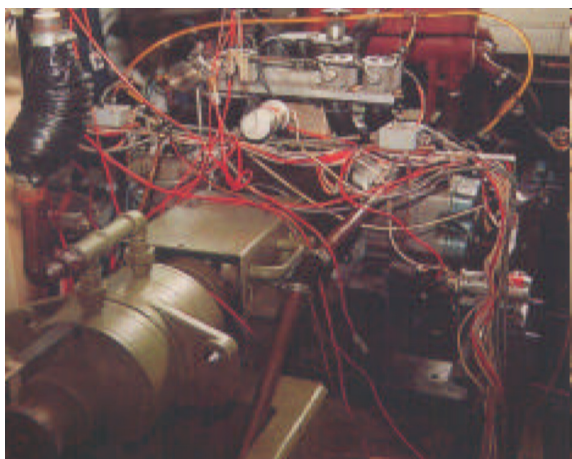
burning of the mixture. As engine speeds increased, the oil mist within the crankcase became a problem and the power required to push the crankshaft and rods through a dense oil mist was significant. With out the instrumentation and the knowledge we have to day, the development engineer’s hands were tied. As Coventry Climax dropped out of the picture others moved up. A very innovative engine was the Gurney Weslake (Fig. 34) designed by Harry Weslake and Tim Wall, Dan Gurneys chief mechanic. This engine was first run at the Tecalemit facility in Plymouth in 1966. Note there were still no thermocouples, no pressure transducers and no automatic data logging, exciting times.



Rys. 35. Silnik Gurney Weslake
Fig. 35. Gurney Weslake engine



Rys. 36. Silnik serii Cosworth DFV
Fig. 36. The Cosworth DFV series engine



Rys. 37. Termopary i czujniki ciśnienia pozostają w dyspozycji konstruktorów
 Fig. 37. Thermocouples and pressure transducers are now available to the engineer

Większość producentów poświęciła wiele czasu i wysiłku na doładowanie dotychczas używanych silników 1,5 litrowych natomiast Keith Duckworth i Mike Costin zwrócili się do firmy Ford z prośbą o finansowanie nowego projektu silnika 3 litrowego, oznaczonego później jako DFV, rys. 36. Stał się on jedną z najlepszych konstrukcji w historii F1.

W tych czasach inżynier zajmujący się rozwojem konstrukcji dysponował wieloma udogodnieniami, które były mu wielce pomocne. Powszechnie dostępne były już termopary, produkowano także przetworniki do pomiaru ciśnienia w cylindrze, a najważniejsze, że pojawił się komputer i zajął swoje miejsce w sterowni hamowni silnikowej. W ten sposób inżynierowie dysponowali podstawowym zestawem przyrządów do rejestracji danych i pewnego rodzaju sterowania silnikiem, rys. 37.

5. Współczesne badania silników wyczynowych

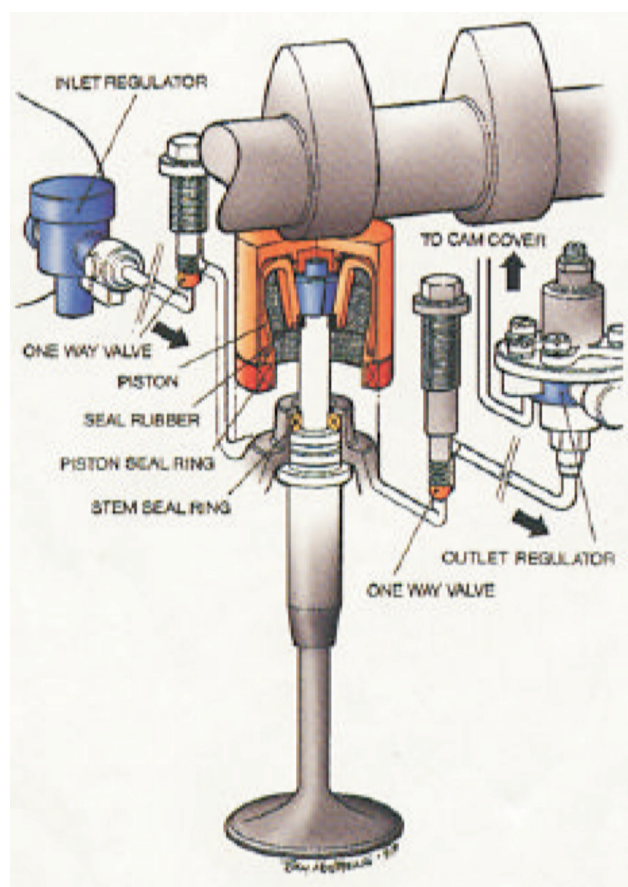
Czy dzisiejsze silniki rozwijające moc 900 KM i pracujące z prędkością 20000 obr/min są rzeczywiście tak dobre? Maksymalną moc tego rzędu rozwijał silnik DFV z roku 1967. Obserwowana jest prawidłowość, że mierzone średnie ciśnienie użyteczne spada wraz ze skróceniem okresu przeznaczanego na spalanie. Wewnętrzne straty wzrastają czterokrotnie z podwojeniem prędkości obrotowej. Wentylacyjne straty mocy są tak duże, że w celu zmniejszenia oporów spowodowanych mgłą olejową skrzynię korbową dzieli się na dwie oddzielne przestrzenie. Przy prędkości 12 000 obr/min pojawia się siła 7 ton działająca wzdłuż korbowodu i podobna podczas ruchu tłoka w przeciwnym kierunku. Jak zawory mogą działać przy takiej prędkości, rys. 38?

Hamulce służące do obciążania silników musiały nadążać za tak znacznym wzrostem prędkości obrotowych. Obecnie Froude dysponuje konstrukcją zdolną pochłonąć moc 2500 KM przy prędkości 30 000 obr/min z dokładnością określenia momentu obrotowego 0,25%, rys. 39.

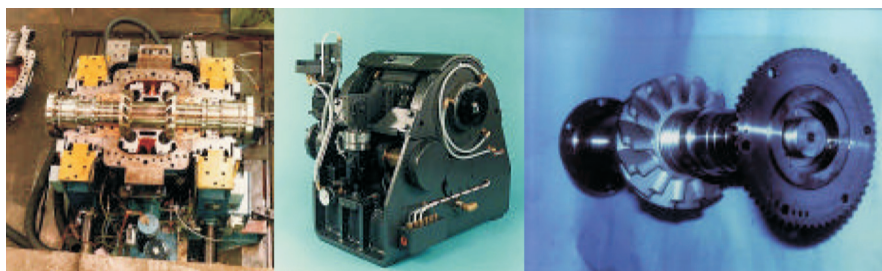
Chemiczny skład paliwa może powodować istotne różnice w rozwijanej mocy i – aby zapewnić jednakowe warunki pomiaru – został opracowany spektrometr do analizy składu paliw i olejów, rys. 40.

The regulations changed for Formula 1 and now requirement was for a 3 litre normally aspirated engine or a 1.5 litre engine supercharged/turbocharged.

Most manufacturers spent much time and effort trying to supercharge last years 1.5 litre engines, but Keith Duckworth and Mike Costin went to Ford and asked for financial backing for a new design 3 litre engine, the DFV, Fig. 36. This become the most successful engine in F1 history.



Rys. 38. Pneumatyczny system napędu zaworów
 Fig. 38. Pneumatic valve system



Rys. 39. Hamulec wodny typu Froude HS125 zdolny wyhamować silnik o mocy 1865 kW, momencie obrotowym 895 N·m i prędkości obrotowej 30 000 obr/min

Fig. 39. Froude HS125 Water Brake 1,865 kW 895 N·m @ 30,000 rev/min

At this time the Automotive Research engineer had a number of developments that helped enormously, Thermocouples became readily available, in cylinder pressure transducers were being produced and most importantly the computer had arrived and was sitting in the dynamometer control room. The engineer had rudimentary data acquisition for the first time and some sort of control, Fig. 37.

Ponieważ pomiar zużycia paliwa wykonywany na bieżąco podczas badań silnika ma pierwszorzędne znaczenie, wykorzystano układ wykorzystujący do tego celu efekt drgających rurek Coriolisa, rys. 41.

Pomiar ciśnienia w cylindrze oraz odczyty wartości prędkości obrotowej umożliwiają inżynierom odtworzenie warunków pracy silnika na torze wyścigowym w warunkach hamownianych, szczególnie jeśli chodzi o zmienność kolejnych cykli i prędkość spalania przy szybkościach obrotowych rzędu 18 000 obr/min (silniki samochodów F1 obecnie mają 10 cylindrów). Wykorzystanie lasera do badań przezroczystych modeli wydatnie przyczyniło się do pogłębienia wiedzy na temat tworzenia mieszanki i spalania a obserwacja szybkiego wypływu spalin umożliwia zauważenie różnic pomiędzy cylindrami.

Do badań współczesnego silnika samochodu rajdowego WRC hamulec powinien charakteryzować się następującymi parametrami:

- Maksymalna prędkość obrotowa 10 000 obr/min;
- Maksymalny moment 1000 N·m;
- Gradient prędkości: 10 000 obr/s;



Rys. 40. F1 Perkin Elmer – spektrometr do paliwa i olejów smarujących

Fig. 40. F1 Perkin Elmer fuel and oil spectrometer

5. Today race engine testing procedures

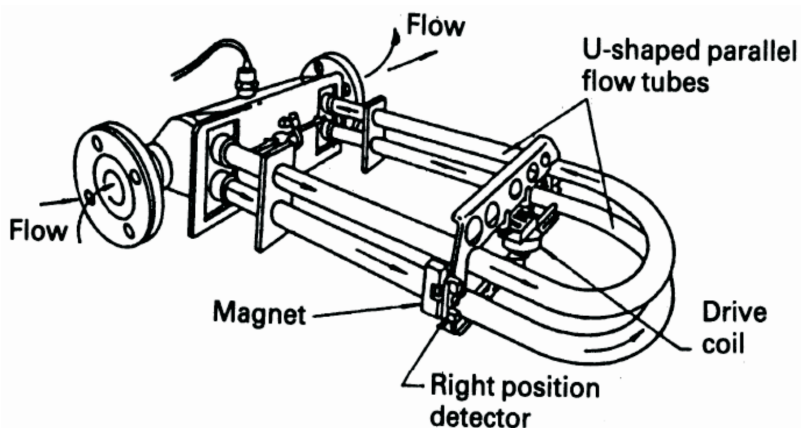
Which nearly brings us up to date, are the 900 BHP engines running at 20,000 rev/min really so good? Its peak power bmep is roughly equal to that of the 1967 DFV. The trend is that bmep falls as the combustion event has a correspondingly short time to take place. Internal losses quadruple with the doubling of the running speed. Windage is such a problem that the crankcase is divided into separate chambers to reduce the total oil mist. At 12,000 rev/min there are 7 tons force going up the con rod with a similar sum on the return stroke. How do the valves operate at this speed, Fig. 38?

Engine dynamometers have to keep pace with this huge increase in speed, and now Froude have a machine that will absorb 2,500 BHP at a rated speed of 30,000 rev/min. with torque accuracy of 0.25%, Fig. 39.

The chemical composition of the fuel made a significant difference to the power developed, and to ensure that all entries had the same fuel specification a fuel and oil spectrometer was developed, Fig. 40.

The measurement of fuel used whilst under test with in the test cell became of crucial importance and a system utilising the “Coriolis” effect of vibrating tubes was adopted, Fig. 41.

In cylinder pressure measurement, and high speed data logging has enabled the engineer to replicate on circuit conditions on the test bed, cyclic variability and burn rate measured for each cylinder at speeds up to 18,000 rev/min (F1



Rys. 41. Pomiar zużycia paliwa wykorzystujący efekt Coriolisa

Fig. 41. Coriolis fuel measuring

Symulacja cyklu do 10 Hz;

Standardowy zestaw do zbierania danych: 96 kanałów o częstotliwości 50 Hz;

Dodatkowy zestaw do szybkiego zbierania danych: 16 kanałów o częstotliwości 10 GHz;

Indykowanie ciśnienia w cylindrze: co 0,05° OWK.

Pomieszczenie hamulca zwykle ma wymiary 3,8 m szerokości, 6 m długości oraz 4,5 m wysokości oraz jest akustycznie i mechanicznie odizolowane od pomieszczenia hamowni, rys. 42.

Ze względu na poziom obciążeń i ograniczoną żywotność dzisiejszych silników F1, konieczne jest opracowanie specjalnych programów wykonywania charakterystyk, a typowe badanie może przebiegać jak podano w tablicy 1.

Następnym krokiem po procesie docierania jest wykonanie charakterystyki pełnej mocy, która jednak kończy się przed osiągnięciem maksymalnej prędkości. Wykorzystuje się ją do regulacji współczynnika nadmiaru powietrza, wyprzedzenia zapłonu, kontroli ciśnienia oleju itd. Czas poświęcony na tego typu badania należy ograniczyć do minimum by jedynie uzyskać dynamiczną stabilizację rejestrowanych parametrów.

Następnie wykonuje się znowu charakterystykę zewnętrzną, tym razem osiągając prędkość maksymalną. Otrzymuje się w ten sposób krzywą charakterystyczną dla określonego silnika zanim zostanie dobrana do konkretnego toru wyścigowego. Zarejestrowane wartości parametrów mechanicznych i elektrycznych zostają uporządkowane i przypisane do danego silnika.

Wykresy zmian dawki paliwa i kąta zapłonu zwykle oparte są na mapie gęstości prędkości, w której ustawienia zapłonu i dawki paliwa wynikają z prędkości i otwarcia przepustnicy. Dane pochodzące z wzorcowania przedstawia się zwykle w postaci wykresów trójwymiarowych. Typowa mapa uwzględniająca dane nt. prędkości i położenia przepustnicy podzielona jest siatką 24x24 punktów pomiarowych (w sumie 576 punktów). Dla każdego z tych punktów odpowiednio dopasowywane są wartości współczynnika nadmiaru powietrza i kąta wyprzedzenia zapłonu zapewniające możliwie najlepszy przebieg krzywej momentu i płynną pracę.

Przy dużych prędkościach silnika straty wentylacyjne w skrzyni korbowej mogą być znaczne. Duże przyspieszenia (rzędu 3,5 g) zmuszają do stosowania systemu suchej miski

engines to day have 10 cylinders). Laser work with transparent engines greatly adds to the knowledge of combustion and fuel air mixing, and high speed gas emission monitoring enables one to differentiate between cylinders.

Tablica 1. Przykładowy program rozgrzewania i badań charakterystyk silnika F1

Table 1. Specific program for run in and power curves for F1 engine

Prędkość obrotowa, obr/min/ Speed, rev/min	Moment obrotowy, N·m/ Torque, Nm	Czas pracy, min/ Time, minutes
3500	60	10
5000	80	10
6500	100	10
8000	150	7
9500	250	5
11000	300	5
15000	500	2

When testing a current World Rally Championship engine, the dynamometer specification is significant:

Maximum speed 10,000 rev/min;

Maximum Torque 1,000 Nm;

Speed gradient 10,000 rev/sec;

Cycle simulation to 10 Hz;

Standard data acquisition 96 channels at 50 Hz;

Additional high speed data acquisition 16 channels at 10 GHz;

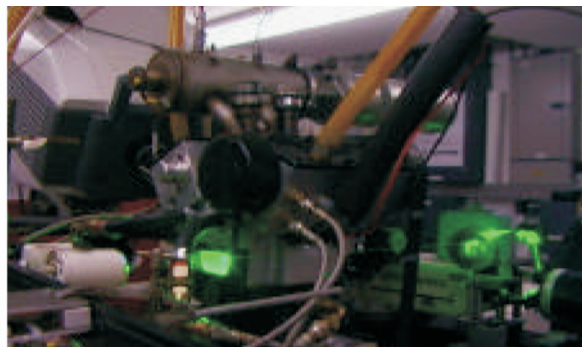
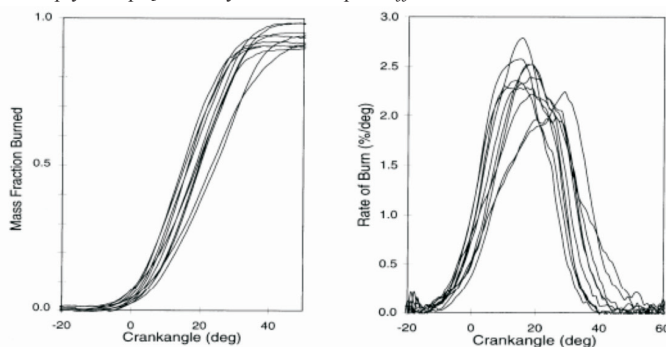
Cylinder pressure indication 0.05 degree crankshaft angle.

The dynamometer cells tend to be in the region of 3.8 metre wide, 6 metre long and 4.5 metre high, they are acoustically and mechanically isolated from the control room, Fig. 42.

Due to the high stress levels and limited life of a F1 engine today, they require specific programs for run in and power curves, a typical break in cycle would be, as shown in Table 1.

The break in would be followed by a preparatory power curve, this is terminated below maximum speed. It is used to enable adjustment of fuel/air ratio, spark advance, oil pressure check etc. The time spent on this test is kept to a minimum, just sufficient to guarantee dynamic stabilisation of

Wpływ na prędkość wydzielania ciepła / Effect on Burn Rate





Rys. 42. Kilka przykładów stanowisk do badania silników wyczynowych
 Fig. 42. Some examples of high performance test cells

olejowej. Z tego względu smarowanie i przedmuchy do skrzyni korbowej muszą być wnikliwie analizowane.

Bardzo istotną rolę w pracach nad wysiłonymi silnikami odgrywa modelowanie matematyczne. Należy jednak pamiętać, że równie istotna jest pamięć na temat wcześniejszych konstrukcji, które z nich były udane, a które poniosły całkowitą klęskę. Warto również porównać wartości średniego ciśnienia użytecznego silników Formuły 1 z roku 1965 i 2005. Okazuje się, że silnik z roku 2005 charakteryzuje się średnim ciśnieniem użytecznym większym o 10%.

Artykuł recenzowany

the monitored parameters. A full power check then takes place and the engine is run up to its maximum speed. This is the official curve that characterises the engine before being released for any particular circuit. The values of the mechanical and electrical parameters are collated and attached to the engine.

Fuel and ignition mapping is usually based upon a speed density system where both the spark and fuel calibrations are based on engine speed and throttle opening. Three-dimensional look up tables are used to store the calibration data. Typically the engine speed-throttle plan is divided into a matrix of 24x24 test points (576 points). At each test point, fuel/air ratio and spark are adjusted for best torque and smooth running.

At high engine speeds, the losses due to wind age within the crankcase can be significant,

also when pulling over 3.5 g unusual things can take place with the oil in the crankcase and dry sump system. Oil management and blow-by both receive a great deal of attention.

Mathematical modelling plays a very important part in the design and development of these very highly stressed engines, it is important however to remember what was done in the past and have a basic understanding as why various designs were either successful or deemed to be a total failure. It is also worth looking back and calculating the BMEP at maximum power of a typical F1 engine of 1965 and comparing it with an engine of 2005. The 2005 engine has only a 10% increase in BMEP.

Skróty i oznaczenia / Abbreviations and Nomenclature

BHP – konie mechaniczne KM / Brake Horse Power

BMEP – średnie ciśnienie użyteczne / Brake Mean Effective Pressure

HMS – statek Jej Królewskiej Mości / Her Majesty Ship

psi – funt na cal kwadratowy / pound per square inch

ULEV – pojazd o ultraniskiej emisji / Ultra Low Emission Vehicle

* Profesor Richard Atkins – Wykładowca na Uniwersytecie Sussex, Dyrektor wykonawczy Richard D. Atkins & Associates, Hastings, East Sussex, Wielka Brytania.

Mr Richard D. Atkins CEng, FIMechE – Tutor of Sussex University, Chief executive Richard D. Atkins & Associates, Hastings, East Sussex, UK.

