

PISTON ENGINES WITH CYLINDER AXIS PARALLEL TO DRIVE SHAFT AXIS – CLASSIFICATION AND REVIEW

P.Mazuro, **T.Rychter**, A.Teodorczyk

Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Ciepłej
ul. Nowowiejska 21/25, 00-000 Warszawa
tel: +48 22 6605277, fax: +48 22 825-02-41
e-mail: pmazuro@poczta.onet.pl, ateod@itc.pw.edu.pl

Abstract

The conventional crankshaft piston engines dominate in the automotive industry. Automotive development centers seek for innovations in the engine efficiency, ecology, fuel and air supply, control or economics but the research area mostly refers to conventional constructions.

The authors propose to come back to old and forgotten constructions called barrel engines which originate from the period between First and Second World Wars. The design and properties of barrel engines differ a lot from conventional crankshaft engines. The most characteristic feature of barrel engines is that the cylinder axis is parallel to drive shaft axis and due to multiple cylinders they have axial symmetry. Although there are not many historical applications and production experience of barrel engines, the authors believe they may offer a few really significant advantages to contemporary automotive business.

The paper presents unique classification of barrel engines specific mechanisms to convert reciprocating motion of the piston to the rotary motion of the crank shaft. The examples of historical applications of each group of mechanisms are given with comments to their mode of action.

Keywords: barrel engines, cylinder axis parallel to drive shaft axis, multiple cylinders, axial symmetry.

SILNIKI TŁOKOWE O OSI CYLINDRÓW RÓWNOLEGŁEJ DO OSI WAŁU – KLASYFIKACJA I PRZEGLĄD

Streszczenie

Przemysł motoryzacyjny jest od lat zdominowany przez silniki tłokowe wyposażone w klasyczny mechanizm korbowy. Innowacje i poszukiwania ośrodków badawczych w dużej mierze obejmują jedynie doskonalenie konwencjonalnych rozwiązań w zakresie wydajności, ekologii, zasilania, sterowania czy ekonomiki produkcji.

Autorzy artykułu powracają do zapomnianych rozwiązań, opracowywanych i stosowanych w okresie międzywojennym XX w., tzw. silników rewolwerowych zwanych też bezkorbowymi (inaczej beczkowych, ang. barrel engines) o budowie zupełnie innej od klasycznego silnika tłokowego. Wspólnymi cechami silników rewolwerowych były: równoległość osi cylindra do osi wału głównego, wielocylindrowość oraz, wynikająca z nich, osiowa symetria silnika. Silniki te chociaż mało zbadane i krótko stosowane w produkcji seryjnej potencjalnie mogą zaoferować wiele korzystnych parametrów i rozwiązać trudności, na które skazane są z racji swojej budowy tradycyjne silniki tłokowe z klasycznym mechanizmem korbowym.

W artykule zaproponowano klasyfikację mechanizmów zamiany ruchu posuwisto-zwrotnego tłoka na ruch obrotowy występujących w silnikach rewolwerowych, przedstawiono historyczne przykłady wdrożeń wraz z komentarzami dotyczącymi ich działania.

Słowa kluczowe: silniki rewolwerowe, równoległość osi cylindra do osi wału głównego, wielocylindrowość, osiowa symetria silnika

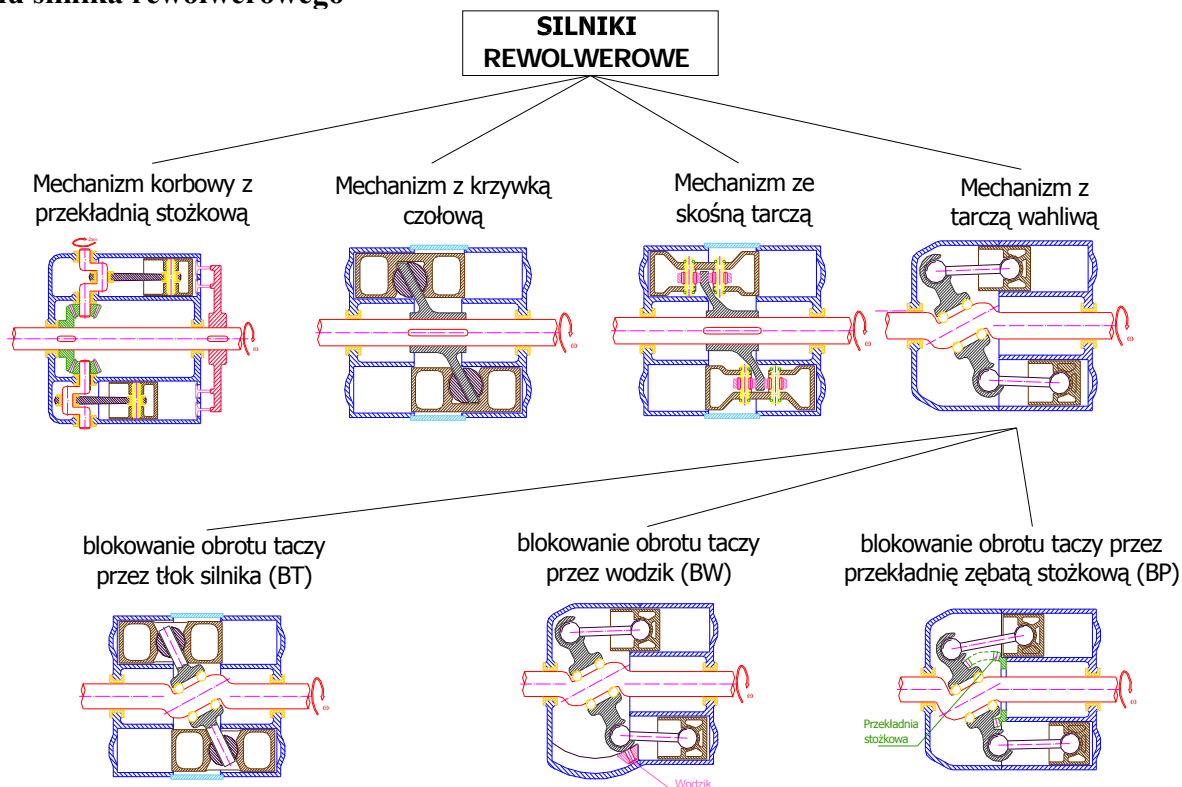
1. Wstęp

Silniki rewolwerowe to silniki z posuwisto-zwrotnym ruchem tłoków w cylindrach ułożonych równolegle wokół wału głównego. Prace nad silnikami tego typu były wyrazem nasilonych w okresie międzywojennym, wielokierunkowych badań i poszukiwań w przemyśle lotniczym. Konstrukcja silników rewolwerowych stwarzała interesujące perspektywy ich zastosowań, gdyż umożliwiała zmniejszenie powierzchni czołowej oraz masy jednostkowej silnika. Wspólnymi cechami silników rewolwerowych były: równoległość osi cylindra do osi wału głównego, wielocylindrowość oraz, wynikająca z nich, osiowa symetria silnika. Prawdopodobnie ze względu na charakterystyczny, zbliżony do bębna rewolweru kształt, nadano tej grupie wspólną nazwę „silniki rewolwerowe”. Po II wojnie światowej konstrukcje tego typu pojawiały się sporadycznie. Gwałtowny rozwój przemysłu motoryzacyjnego i duże zapotrzebowanie na nieskomplikowany układ napędowy wymusiły skupienie się na silniku z klasycznym mechanizmem korbowym, ponieważ jego prosta konstrukcja, łatwa do analizy kinematyka i dynamika oraz duże doświadczenie w masowej produkcji i użytkowaniu wygrywały z nowatorską, wymagającą wielu udoskonaleń wizją silnika. Przez lata utrzymała się obiegowa opinia o dużych stratach mechanicznych oraz trudnej technologii silników rewolwerowych, co przekreśliło szanse na ich dalszy rozwój.

Poniżej podano niektóre przykłady historycznych konstrukcji silników rewolwerowych. Pomimo pozornego podobieństwa wielu z nich, należy je podzielić na kilka grup (Rys.1):

- mechanizmy korbowe sprzęgnięte przekładnią stożkową,
- mechanizmy z ukośną tarczą zaklinowaną na wale (skośna tarcza),
- mechanizmy krzywkowe,
- mechanizmy z ukośną tarczą łożyskowaną na wale (tarczą wahliwą).

2. Klasyfikacja mechanizmów zamiany ruchu posuwisto-zwrotnego tłoka na ruch obrotowy wału silnika rewolwerowego

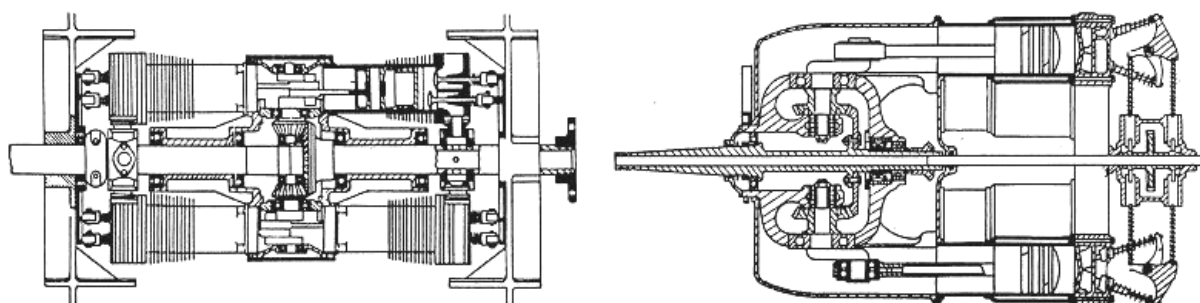


Rys. 1. Schemat podziału silników rewolwerowych ze względu na ich budowę
Fig. 1. Classification of barrel engines with respect to their design

2.1. Mechanizmy korbowe sprzężone przekładnią stożkową

W silnikach wyposażonych w układy korbowe sprzężone przekładnią stożkową, napęd na wał główny przenoszony jest poprzez przekładnię stożkową o kącie działania 90° i przełożeniu 1:2. Największą zaletą zastosowania przekładni stożkowej jest dwukrotne zmniejszenie prędkości obrotowej wału silnika. Dzięki temu uzyskano możliwość bezpośredniego napędzania rozrządu, oraz lepszą współpracę silnik/śmigło. Główną ich wadę stanowi fakt, iż są one sprzężeniem kilku, jedno- lub dwucylindrowych silników, co przyczynia się do multiplikacji drgań i uniemożliwia prawidłowe wyrównoważenie silnika. W klasycznym silniku wielocylindrowym większość sił zamyka się w wale korbowym, a na zewnątrz oddziałuje ich siła wypadkowa. W opisywanym mechanizmie, przekładnia stożkowa posiada pewien luz a więc nie działa jak sztywny wał. Ponadto każdy z wałów korbowych tego silnika jest na przemian elementem napędzanym i napędzającym. W związku z tym zmienia się „strona” przylegania kół zębatach, co objawia się poważnymi drganiami, hałasem i niską trwałością przekładni. Wydaje się, że z tych powodów silniki te nie doczekały się kontynuacji.

Przykładem zastosowania układu korbowego z przekładnią stożkową jest 4-cylindrowy rotacyjny silnik firmy Wherry pochodzący z 1916 r., (rys. 2). Sterowanie rozrządu silnika odbywało się poprzez tarcze krzywkowe związane z nieruchomym wałem silnika, po których obracały się rolki umieszczone na trzonkach zaworów [1].



Rys. 2. Z lewej: 4 – cylindrowy silnik firmy Wherry [1], z prawej: 6 – cylindrowy silnik firmy Cleveland [17]
Fig. 2. Left – 4-cylinder Wherry engine [1]; Right – 6-cylinder Cleveland engine [17]

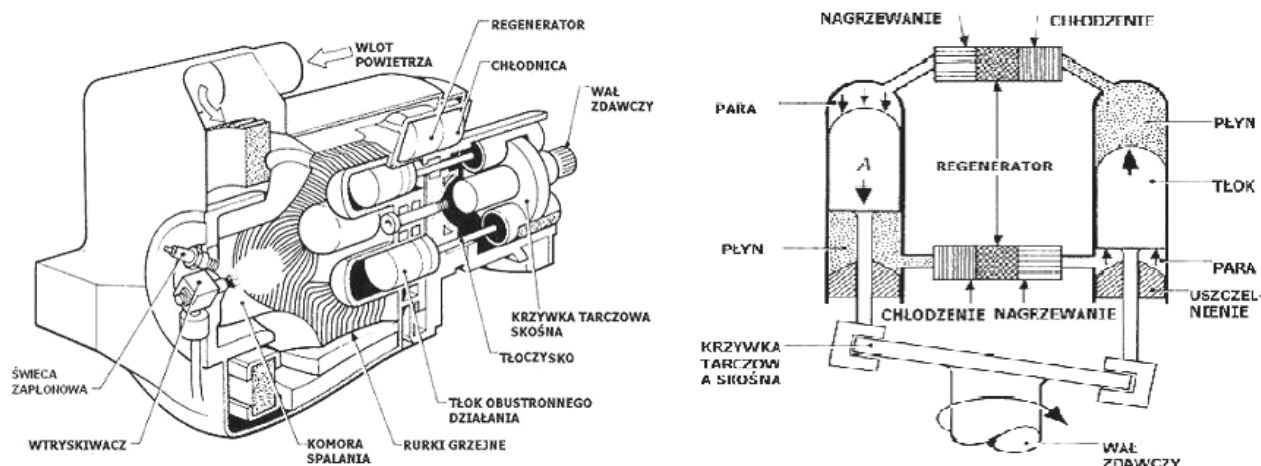
W latach I wojny światowej firma Cleveland wyprodukowała 6-cylindrowy, chłodzony wodą silnik rewolwerowy (rys. 2). Zawory były sterowane tarczami krzywkowymi poprzez dźwigienki zaworowe z głównego wału silnika. Silnik posiadał aluminiowe tłoki uszczelnione trzema pierścieniami, suchą miskę olejową, oraz zdwojony układ zapłonowy. Pompa olejowa tłoczyła olej do centralnie położonego wału. Smarowanie rozbryzgowo było całkowicie wystarczające ze względu na powszechne zastosowanie w tym silniku łożysk tocznych.

2.2. Mechanizm krzywkowy z ukośną tarczą zaklinowaną na wale (swash plate)

Charakterystycznym elementem mechanizmu *swash plate* jest płaska tarcza skośnie osadzona na wale głównym silnika. Tłoki częściowo nachodzą na tarczę a cylindry posiadają wycięcia, dzięki którym nie kolidują z tarczą podczas jej obrotu. W tłokach umieszczone są specjalne przeguby w kształcie kuli z wyciętym ze środka plasterkiem o grubości równej grubości tarczy. Zadaniem przegubów jest dopasowywanie płaszczyzny przylgowej w tłokach do płaszczyzny tarczy wynikającej z bieżącego położenia wału. Przegub kulowy względem tłoka wykonuje jedynie przestrzenny ruch wahadłowy (złożenie dwóch obrotów), a jego wewnętrzne płaszczyzny są płaszczyznami kontaktu z tarczą. Tam też następuje poślizg podczas obrotu tarczy.

Główną zaletą tych mechanizmów jest prostota, zwartość, możliwość stosowania tłoków dwustronnego działania, oraz tania, łatwa do wykonania konstrukcja. Mechanizm ten nie nadaje się do silników o spalaniu wewnętrznym ze względu na duże straty mechaniczne. Pomimo to są chętnie stosowane w silnikach Stirlinga dzięki łatwości uzyskania tłoków dwustronnego działania.

Dzięki ciągłemu procesowi spalania zewnętrznego, silniki Stirlinga charakteryzują się bardzo cichą pracą. Dlatego też, pomimo niższej sprawności ogólnej w stosunku do silników o spalaniu wewnętrznym, są bardzo chętnie wykorzystywane przez przemysł obronny do napędów łodzi podwodnych oraz generatorów polowych. Na rysunku 3 przedstawiono przekrój i schemat silnika.



Rys. 3. Przekrój i schemat silnika Stirlinga [3]
Fig. 3. Cross-section and schematic of Stirling engine [3]

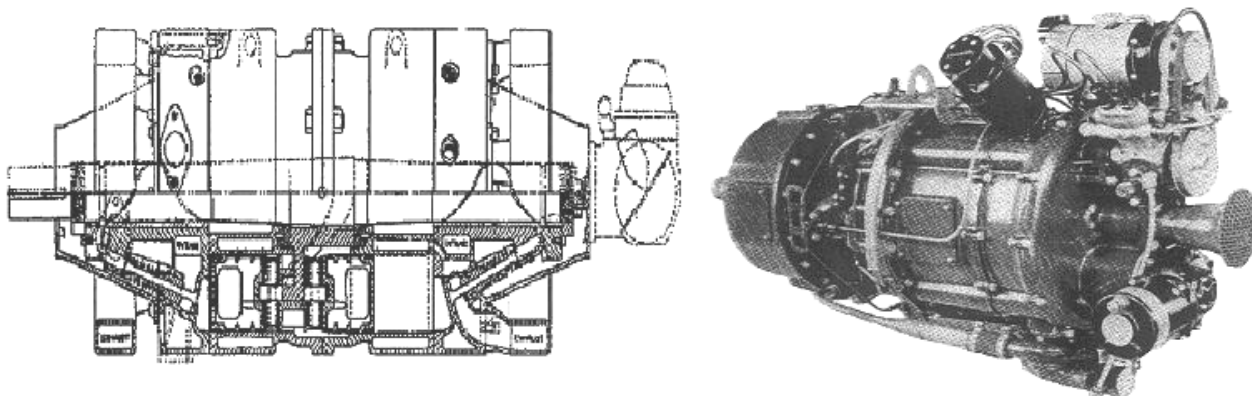
2.3. Mechanizm z krzywką czołową

Mechanizm krzywkowy ma wiele cech wspólnych z mechanizmem z tarczą skośną. W obu układach tarcza jest na stałe sprzężona z wałem silnika, a cylindry silników z mechanizmem krzywkowym posiadają wcięcia, których zadaniem jest umożliwienie swobodnego obrotu wału. W odróżnieniu od układu z tarczą skośną, tarcza mechanizmu krzywkowego nie jest płaska. Występują w niej natomiast dwie klasyczne powierzchnie krzywki osiowej dobrane tak, aby tworzące krzywki w każdym punkcie były prostopadłe do osi wału i mogły pracować bezluzowo. W tłokach dwustronnego działania zamiast przegubów kulowych zastosowano łożyska igielkowe, których bieżnia zewnętrzna toczy się po krzywce osiowej. Bezsporną zaletą mechanizmu krzywkowego jest możliwość dowolnego kształtowania kinematyki ruchu tłoka np. wolnego suwu sprężania i szybkiego suwu rozprężania lub odwrotnie. Mechanizm krzywkowy jest dużo lepiej wykorzystanym elementem odbioru napędu niż układ korbowy, ponieważ przejmuje obciążenie od kolejnych tłoków (pracuje np. 6 razy na obrót), podczas gdy klasyczne wykorbienie pracuje jedynie raz na dwa obroty.

Przykładowym silnikiem, w którym zastosowano tarczę z krzywką czołową, był 6-cylindrowy silnik Hermanna i Halla z 1938 r (rys. 4). Miał on prostą i zwartą konstrukcję, a dzięki krzywce, każdy tłok wykonywał 4 suwy podczas jednego obrotu wału (jeden suw pracy). Dawało to również możliwość bezpośredniego napędu zaworów od wału silnika. Dzięki zastosowaniu tłoków dwustronnego działania, tłoki wykonywały 12 suwów pracy na jeden obrót wału korbowego. Jest to silnik o najlepszym, znanym autorowi, wskaźniku objętościowym ($V_{\text{cylindra}}/V_{\text{silnika}}$).

Kolejnym przykładem zastosowania mechanizmu z krzywką czołową jest 4-cylindrowy, chłodzony wodą, silnik rewolwerowy Alfaro 167 (rys. 4). W silniku zastosowano bezpośredni wtrysk paliwa i rozrusznik elektryczny. Silnik miał następujące dane: długość 1,133 m, średnica

zewnętrzna 0,394 m, masa 109 kg (masa jednostkowa 0,95 kg/KM), średnica cylindra 71 mm, skok tłoka 86 mm, stopień sprężania 9,5:1. Jednostkowe zużycie paliwa wynosiło 225 g/KM·godz. Silnik miał moc startową 115 KM przy 2000 obr./min., a moc przelotową 80 KM przy 1450 obr./min. [17].



*Rys. 4. Z lewej: 12-cylindrowy silnik Hermanna i Halla [5], z prawej: Silnik Alfaro 167 [17]
Fig. 4. Left – 12-cylinder Hermann and Hall engine [5]; Right – Alfaro 167 engine [17]*

2.4. Mechanizm z tarczą wahliwą łożyskowaną obrotowo na wale

Silniki z tarczą, która wykonywała jedynie ruch wahliwy (kolebiący), nazywano w języku angielskim „wobble plate”. Główną zaletą stosowania takiego układu było wyeliminowanie dużej prędkości poślizgu w łożysku tłokowym. Ponieważ tarcza nie była już integralną częścią wału (miała jedynie wykonywać ruch kolebiący), pojawił się problem uniemożliwienia jej obrotu. Konstrukcje tego typu podzielono właśnie ze względu na sposób blokowania tarczy, gdyż ma to istotny wpływ na kinematykę oraz dynamikę tych mechanizmów. W mechanizmie wahliwej tarczy, tarcza jest obrotowo łożyskowana na wygięciu wału silnika. Dzięki odpowiedniemu ułożyskowaniu względem wału, oś pozornego obrotu tarczy jest odchylona od osi wału o kąt θ . Tarcza wykonuje pozorny ruch wahliwy. W rzeczywistości jest to ruch o skomplikowanej trajektorii, gdyż wynika on ze złożenia trzech przestrzennych obrotów względem różnych osi.

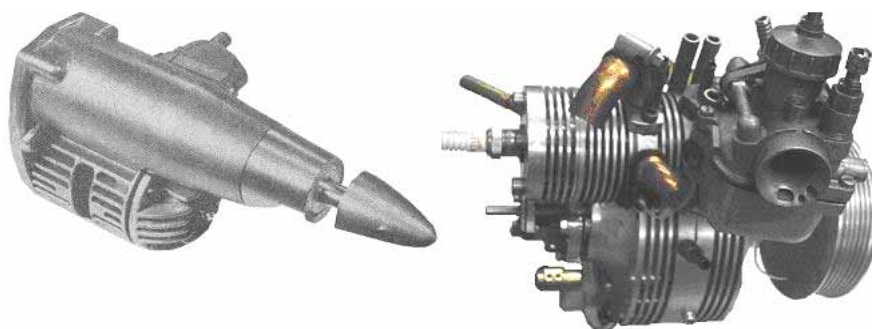
W mechanizmie z tarczą wahliwą tłoki wykonują ruch posuwisto-zwrotny, a punkty tarczy – złożony ruch przestrzenny, dlatego też, pomiędzy tłokami a tarczą znajdują się łączniki zakończone ślizgowymi łożyskami sferycznymi, których zadaniem jest kompensacja odchyleń tarczy od osi cylindrów. Niestety użycie tłoków dwustronnego działania stało się bardzo utrudnione i nie było stosowane.

2.4.1. Mechanizm z tarczą wahliwą i blokowanie jej obrotu przez tłok silnika

Prawdopodobnie pomysłodawcą tego rozwiązania był inż. Tański, który w okresie międzywojennym naszkicował kilka silników tego typu. Niestety szkic nie zawierał istotnych szczegółów konstrukcyjnych. Zaletą takiego rozwiązania jest łatwość zastosowania tłoków dwustronnego działania, oraz brak specjalnego mechanizmu do blokowania tarczy, którego funkcję przejmuje powierzchnia boczna tłoka.

Firma Aero Research zbudowała jednocylindrowy, dwusuwowy silnik modelarski z zapłonem żarowym, chłodzony powietrzem, przeznaczony do modeli redukcyjnych o małych gabarytach czołowych (rys. 5). Zastosowano w nim płukanie poprzeczne, sterowanie napływu mieszanki do skrzyni wstępnego sprężania było asymetryczne i odbywało się przy pomocy wycięcia w wale głównym silnika. Silnik ważył 280 g, cylinder miał średnicę 20,7 mm a skok tłoka wynosił 17,3 mm. Silnik miał moc ok. 0,42 KM przy 11500 obr./min. Osiągi opisywanego silnika były gorsze

od klasycznego, co wynikało głównie ze zwiększenia liczby łożysk na drodze od wału do tłoka. Do zalet należy zaliczyć małe wymiary, pozwalające na ukrycie silnika w małej obudowie, zwartą konstrukcję oraz spokojniejszą pracę i zmniejszony poziom drgań w porównaniu z silnikami klasycznymi.



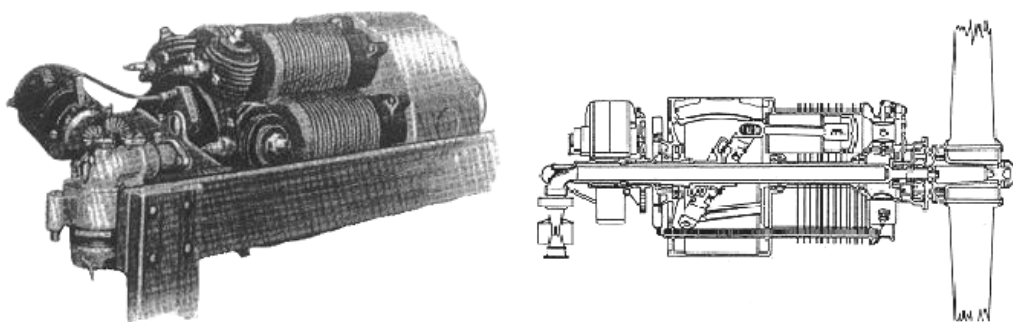
Rys. 5. Z lewej: Silnik AERO 35 [15], z prawej: silnik z blokowaniem tarczy przez powierzchnię boczną tłoka
 Fig. 5. Left - AERO 35 Engine [15]; right – engine with plate blocking by side piston surface

Innym przykładem silnika tego typu jest prototyp dwusuwu z suchą miską olejową, oraz tłokiem dwustronnego działania (rys. 5). Prototyp został zbudowany w celu rozpoznania słabych stron konstrukcji tego typu oraz tkwiących w niej „pułapek”. Tłok ma średnicę 32 mm, a skok wynosi 36 mm. Jedną stronę tłoka wykorzystywano jako pompę ładującą, druga zaś stanowiła ściankę komory spalania. Koło zamachowe jest jednocześnie kołem napędowym dla paska wieloklinowego, przez który realizowany jest odbiór mocy przez hamulec.

2.4.2. Mechanizm z tarczą wahliwą i blokowaniem jej obrotów przez wozzik

W mechanizmie z tarczą wahliwą blokowaną wozzikiem tarcza posiada wystający sworzeń, na którym zamocowana jest obrotowo kostka. Dopasowuje ona swoje położenie do prowadnicy, w której może wykonywać ruch ściśle wahadłowy. Jest to rozwiązanie analogiczne do okrętowych, silników wozzikowych, gdzie stopa trzonu tłokowego jest prowadzona przez wozzik i może wykonywać jedynie ruch posuwisto-zwrotny. Z powodu braku odpowiedniej nomenklatury i podobieństwo budowy, grupę tych mechanizmów nazwano mechanizmami wozzikowymi z tarczą wahliwą. W silnikach tych wozzik przejmuje wszystkie reakcje powstałe podczas pracy silnika (chęć obracania tarczy). Przedstawione rozwiązanie jest dość proste technologicznie. Wymaga jedynie, aby oś kostki wozzika leżała w płaszczyźnie obojętnej tarczy.

Firma Trebert skonstruowała w 1912 roku silnik rewolwerowy chłodzony powietrzem, o mocy znamionowej 60 KM (rys. 6). Silnik posiadał 6 żeliwnych cylindrów o średnicy 95 mm a skok tłoka wynosił 108 mm. Rozrząd realizowany był przy użyciu zaworów obrotowych. Całkowicie wyposażony silnik o długości 560 mm i średnicy zewnętrznej 395 mm, ważył 105 kg [17].



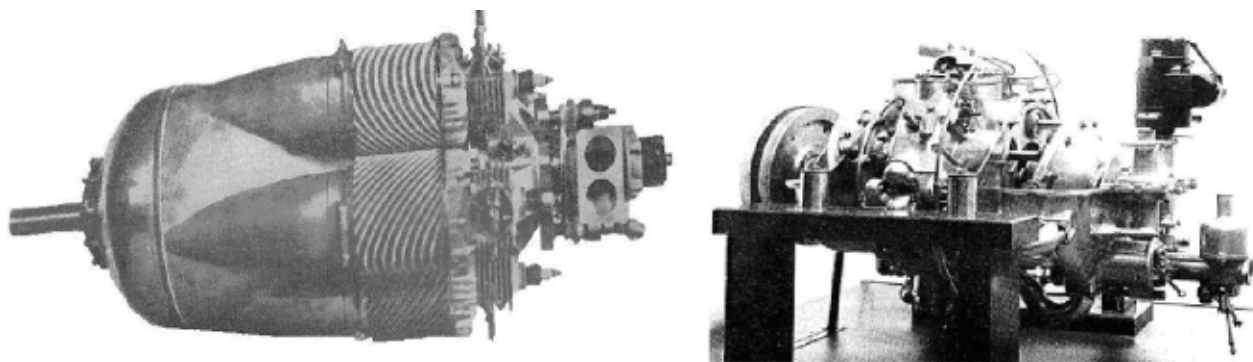
Rys. 6. Z lewej: 6-cylindrowy silnik firmy Trebert [17], z prawej: 5-cylindrowy silnik firmy Statax [17]
 Fig. 6. Left – 6-cylinder Trebert engine [17]; Right – 5-cylinder Statax engine [17]

Firma Statax w 1914 r. skonstruowała silnik rotacyjny 5-cylindrowy, chłodzony powietrzem – 40 KM przy 1200 obr/min., średnica cylindra 100 mm, skok 120, masa 91 kg (2,2 kg/KM) (rys. 6). Ułożyskowana tocznie tarcza prowadzona była w prowadnicy typu V związanej z korpusem silnika. Silnik wirujący wokół głównej osi powodował obrót pochylonej tarczy wywołując ruch posuwisto-zwrotny tłoków w cylindrach. Z powodu trudności technologicznych zamiast zastosowania przegubów kulowych, w więzach kinematycznych zastosowano przeguby Kardana. Wirujący korpus z cylindrami przekazuje napęd na śmigło poprzez reduktor planetarny o przełożeniu 1:2 znajdujący się wewnątrz piasty śmigła. Dzięki temu napęd rozrządu następował bezpośrednio z krzywek znajdujących się na zewnętrznym pierścieniu przekładni planetarnej. Zawory ssące umieszczone bliżej osi silnika sterowane były bezpośrednio krzywką z zastosowaniem układu równoważącego siłę odśrodkową wynikającą z wirowania silnika. Kanał ssący połączono z gaźnikiem poprzez drażony główny wał silnika. Zawory wydechowe, które siła odśrodkowa dociskała do gniazd, umieszczone blisko zewnętrznego obwodu silnika, sterowane były za pośrednictwem popychaczy i dźwigni z zaworowych [17].

2.4.3. Mechanizm z tarczą wahliwą blokowaną przez przekładnię zębatą

Mechanizm z tarczą wahliwą blokowaną przez przekładnię zębatą jest bez wątpienia najciekawszym i najbardziej skomplikowanym z opisywanych mechanizmów. Do zablokowania obrotu tarczy wykorzystywana jest nietypowa przekładnia stożkowa. Jej koła przytwierdzone są do karterów oraz do tarczy w ten sposób, że osie stożków tworzących koła podziałowe przecinają się w jednym punkcie należącym do osi silnika. Podczas ruchu mechanizmu następuje jedynie obrotowanie jednego koła po drugim. W przeciwieństwie do układów wodzikowych silnik posiada pełną osiową symetrię. Ze względu na bardzo dużą sprawność przekładni zębatej, która w dużym stopniu przejmuje na siebie reakcje z tarczy, sprawność mechanizmów tego typu jest wysoka.

W latach 1927-29 powstały dwa prototypy 5-cylindrowego silnika birotacyjny projektu inż. Henryka Brzeskiego, o mocach 125 KM i 137 KM. Wał napędzany był za pośrednictwem 5-ramiennego pająka. Zdaniem inżyniera Brzeskiego do zalet konstrukcji należy zaliczyć: dużą sprawność mechaniczną (94%), czterokrotne zmniejszenie zewnętrznych sił reakcji od silnika dzięki birotacji, dwukrotne zmniejszenie liczby obrotów wału śmigła w stosunku do wału silnika, wysoki wskaźnik mocy z litra pojemności skokowej – do 30 KM/l, bardzo małą masę silnika – 36 kg, dobre smarowanie ruchomych części silnika dzięki szerokiemu zastosowaniu łożyskowania tocznego. Poważną wadą silnika było niewystarczające chłodzenie, wymagał on też licznych udoskonaleń. Silnik miał być wdrożony do produkcji seryjnej na potrzeby polskiego lotnictwa wojskowego [1].



Rys. 7. Z lewej: 5-cylindrowy silnik, inż. Brzeskiego [1], z prawej: silnik konstrukcji Johna Wooler'a [22]
Fig. 7. Left – 5-cylinder Brzeski engine [1]; Right – the engine designed by John Wooler [22]

W roku 1947 John Wooler zaprojektował 6-cylindrowy silnik zawierający dwie wahliwe tarcze, umieszczone na dwóch przeciwnych końcach wału (rys. 7). W cylindrach znajdowało się 6 umieszczonych centralnie komór spalania, oraz 12 tłoków. Tłoki działały na tarczę poprzez widoczne na rysunku łączniki tłokowe. Bardzo mały kąt pochylenia tarczy przyczyniał się do małej sprawności silnika [22].

3. Podsumowanie i wnioski

Wszystkie opisane powyżej konstrukcje stanowią dowód na to, że silniki typu rewolwerowego mogą działać. Do ich głównych zalet należy mała masa jednostkowa i mała powierzchnia czołowa. Niektóre z nich mogą wykorzystywać tłok dwustronnego działania lub też wykazywać pełną osiową symetrię budowy, oraz osiowo symetryczny tłok (bez owalizacji). Oczywiście silniki rewolwerowe nie były pozbawione wad, które czasami wręcz uniemożliwiały ich masowe stosowanie. Główną zaobserwowaną niedogodnością była konieczność stosowania ślizgowych łożysk sferycznych, co wymagało użycia trudnej i mało rozpowszechnionej technologii. Ponadto w silnikach dochodziło do dużej koncentracji mocy, co stwarzało kłopoty z chłodzeniem. Z powyższych przyczyn silniki rewolwerowe przegrały z prostym i skutecznym mechanizmem korbowym. Ze względu na wieloletnie doświadczenie konstrukcji i technologii klasycznych układów korbowych powrót silników rewolwerowych wydaje się mało prawdopodobny. W przeszłości zdarzały się jednak triumfalne powroty starych, zapomnianych rozwiązań, paradoksalnie wywołane postępowaniem technicznym n.p. powrót układów wtryskowych po 50 latach nieobecności. Mała masa jednostkowa, stanowiąca nawet 50% masy silnika z klasycznym układem korbowym, oraz mała powierzchnia czołowa sprawiają, że silniki rewolwerowe mogą być bardzo przydatne w lotnictwie, zwłaszcza w konstrukcjach samolotów i śmigłowców ultralekkich. Zysk w postaci obniżenia masy oraz znaczącego ułatwienia w budowie aerodynamicznych kadłubów, z idealnie dopasowanymi wydłużonymi i obłymi silnikami mógłby zainteresować bardzo dynamicznie rozwijający się na świecie sektor prywatnego transportu lotniczego.

Literatura

- [1] Berka, J., *Tłokowe silniki spalinowe o niekonwencjonalnych układach konstrukcyjnych*, Automobilista 1/2001.
- [2] Bernhardt, M., *Teoria silników spalinowych tłokowych*, WNT 1963.
- [3] Hillier, V.A.W., *Fundamentals of Motor Vehicle Technology*, Nelson Thornes Ltd. 2001.
- [4] Huetten, H., *Schnelle Motoren seziert und frisiert*, Motorbuch Verlag Stuttgart, 1984.
- [5] Judge, A.W., *Aircraft engines vol.*, Chapman&Hall Ltd. 1947.
- [6] Katz, H., *Der Flugmotor*, Dr. M. Matthiesen&Co./Berlin 1942.
- [7] Kozaczewski, W., *Konstrukcja złożeń tłok-cylinder silników spalinowych*, WKŁ Warszawa 1979.
- [8] Ливенцев, Ф.Л., *Двигатели со сложными кинематическими схемами*, Ленинградское Отделение, Ленинград 1973.
- [9] Maki, E.R., DeHart, A.O., *Swash-plate drive mechanisms*, SAE Technical Papers no 710829.
- [10] McLanahan, J.C., *Barrel Aircraft Engines: Historical Anomaly or Stymied Innovation*, SAE Technical Papers no 985597.
- [11] Niewiarowski, K., *Tłokowe silniki spalinowe – tom I i II*, WKŁ Warszawa 1983.
- [12] Орлин, А.С., *Двухтактные быстродные двигатели*, Государственное Научно-техническое Издательство Машиностроительной Литературы Москва 1947.
- [13] Rychter, W., *Dzieje samochodu*, WKŁ 1987.
- [14] Schier, W., *Challenge sukces RWD*, Agencja Lotnicza Altair Warszawa 2000.
- [15] Schier, W., *Miniaturowe silniki spalinowe*, WKŁ 1976.
- [16] Stine, W.B., *Energy Conversion (Stirling engines)*, CRC Press LLC 1999.
- [17] Wilkinson, P.H., *Aircraft Engines of the World*, 1941 USA.
- [18] Żmudzki, S., *Silniki Stirlinga*, Wydawnictwo Techniczne.

- [19] *Airplane Engine Encyclopedia*, The Otterbein Press First Edition Copyright 1921 Dayton Ohio.
- [20] *Przegląd samochodowy i motocyklowy*, Zeszyt 11/1928.
- [21] *SAME Unusual Engines*.
- [22] *Science Museum*, London.

