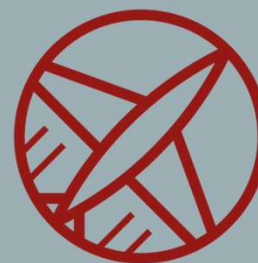




**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



**WYDZIAŁ
BUDOWY MASZYN
I LOTNICTWA**
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

SILNIK TURBOWENTYLATOROWY PRZEGLĄD KONSTRUKCJI I ZASADA DZIAŁANIA

Dr inż. Robert Jakubowski

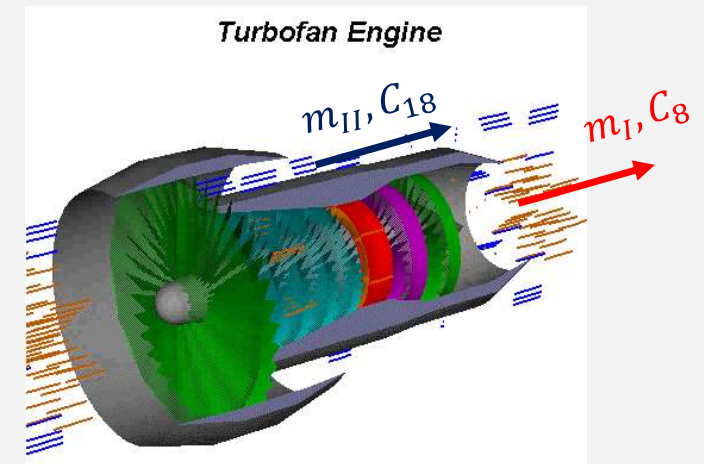
Katedra Inżynierii Lotniczej i Kosmicznej

www: <https://robert-jakubowski.v.prz.edu.pl/>

SILNIKI TURBOWENTYLATOROWE – PRZEGLĄD KONSTRUKCJI

- **Silnik turbowentylatorowy oddzielnymi dyszami wylotowymi**

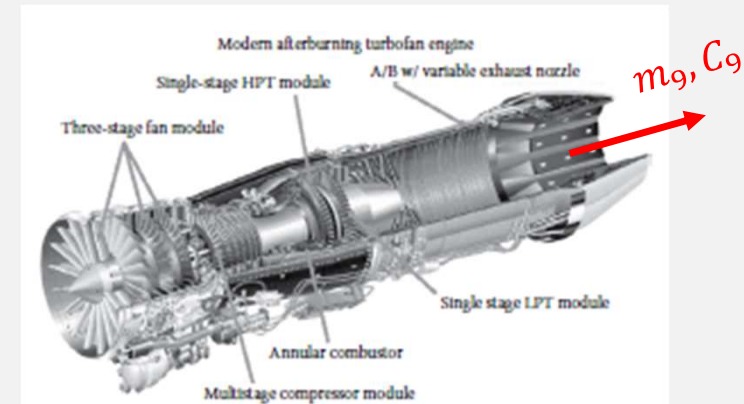
- Ciąg jest wytwarzany przez dwa kanały silnika
 - Kanał zewnętrzny: $T_{II} = m_{II} C_{18}$
 - Kanał wewnętrzny: $T_I = m_I C_8$
 - W silnikach o dużym stopniu dwuprzepływowości 80-90% ciągu wytwarza kanał zewnętrzny



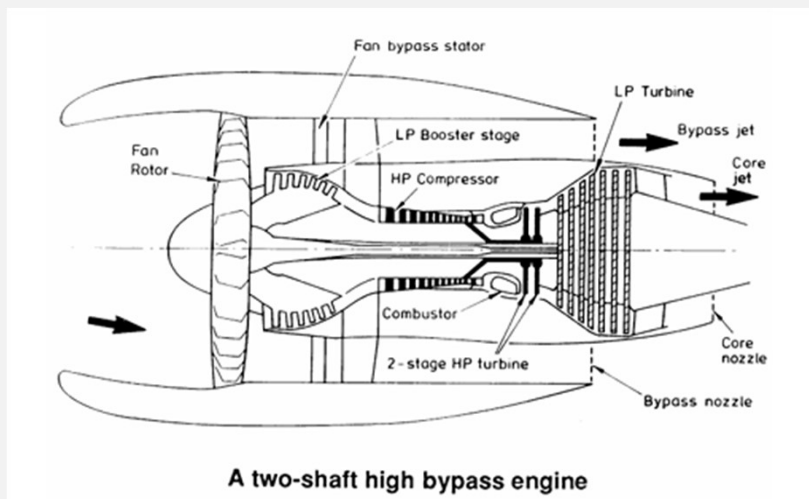
- **Silnik turbowentylatorowy z mieszalnikiem strumieni**

- Ciąg jest wytwarzany przez wspólną dyszę wylotową

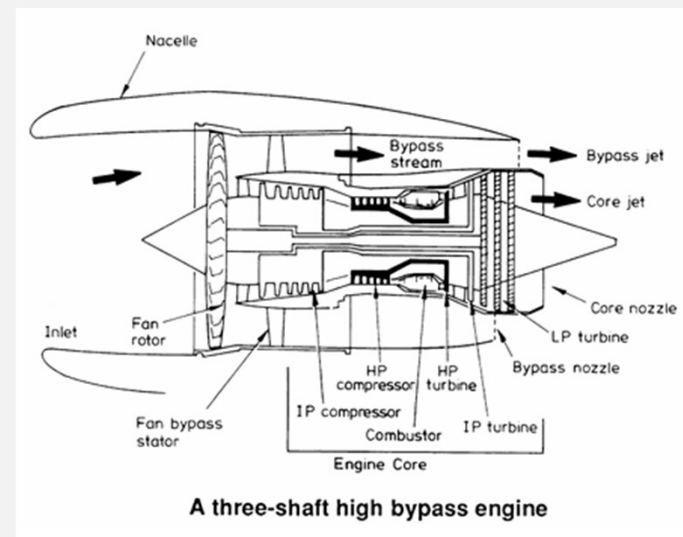
$$T_I = m_9 C_9$$



SILNIKI TURBOWENTYLATOROWE O DUŻYM STOPNIU DWUPRZEPLYWOWOŚCI



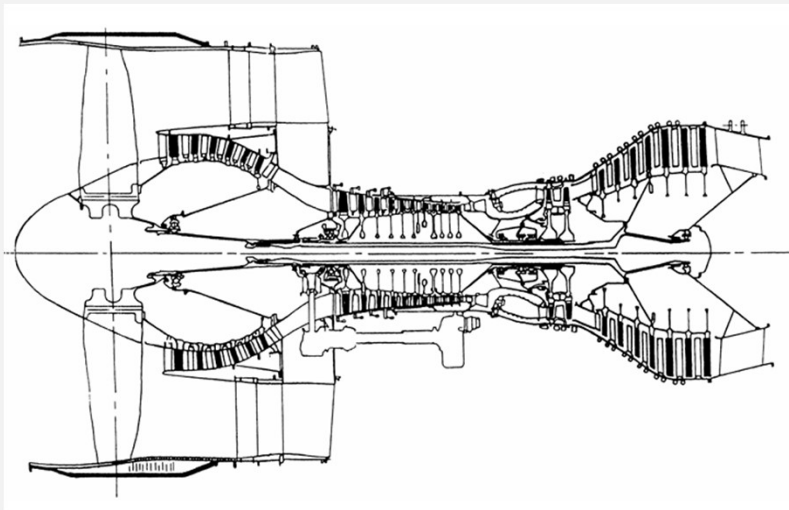
Silnik turbowentylatorowy dwuwirnikowy



Silnik turbowentylatorowy trójwirnikowy

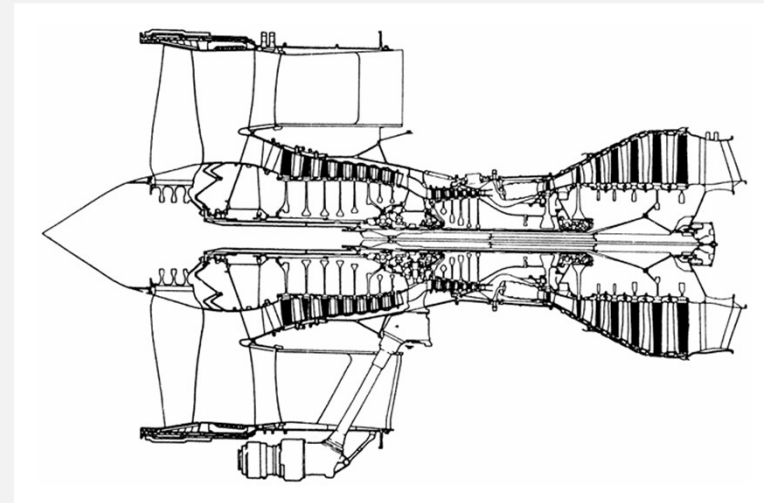
Silnik trójwirnikowy ma dodatkowy trzeci wirnik, który poprawia aerodynamikę pracy zespołów silnika, Konstrukcja silnika jest bardziej skomplikowana – wymaga m.in. większej ilości łożysk.

SILNIK DWUWIRNIKOWY I TRÓJWIRNIKOWY



Pratt and Whitney 4084 (silnik dwuwirnikowy)

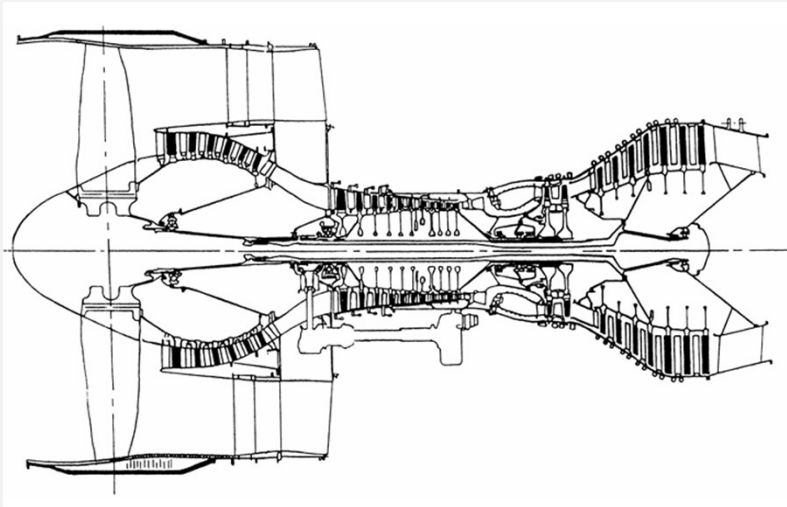
Typowy spręż wentylatora i bustera ok. 2.5, a HPC to 16-24,
Buster i LPT są wysunięte promieniowo, aby zwiększyć ich efektywność przy ograniczonej prędkości obrotowej



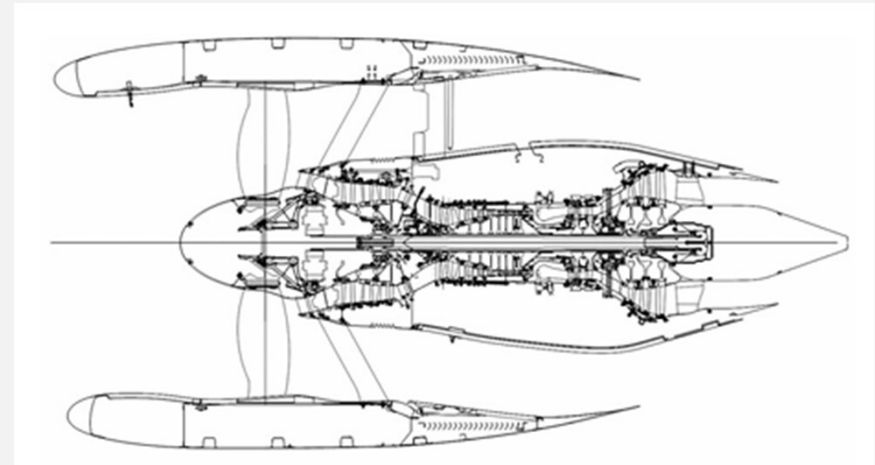
Rolls-Royce Trent 884 (silnik trójwirnikowy)

Typowy spręż wentylatora ok 1.6 oraz IPC i HPC ok 5,

SILNIK DWUWIRNIKOWY I GTF



Pratt and Whitney 4084 (silnik dwuwirnikowy)

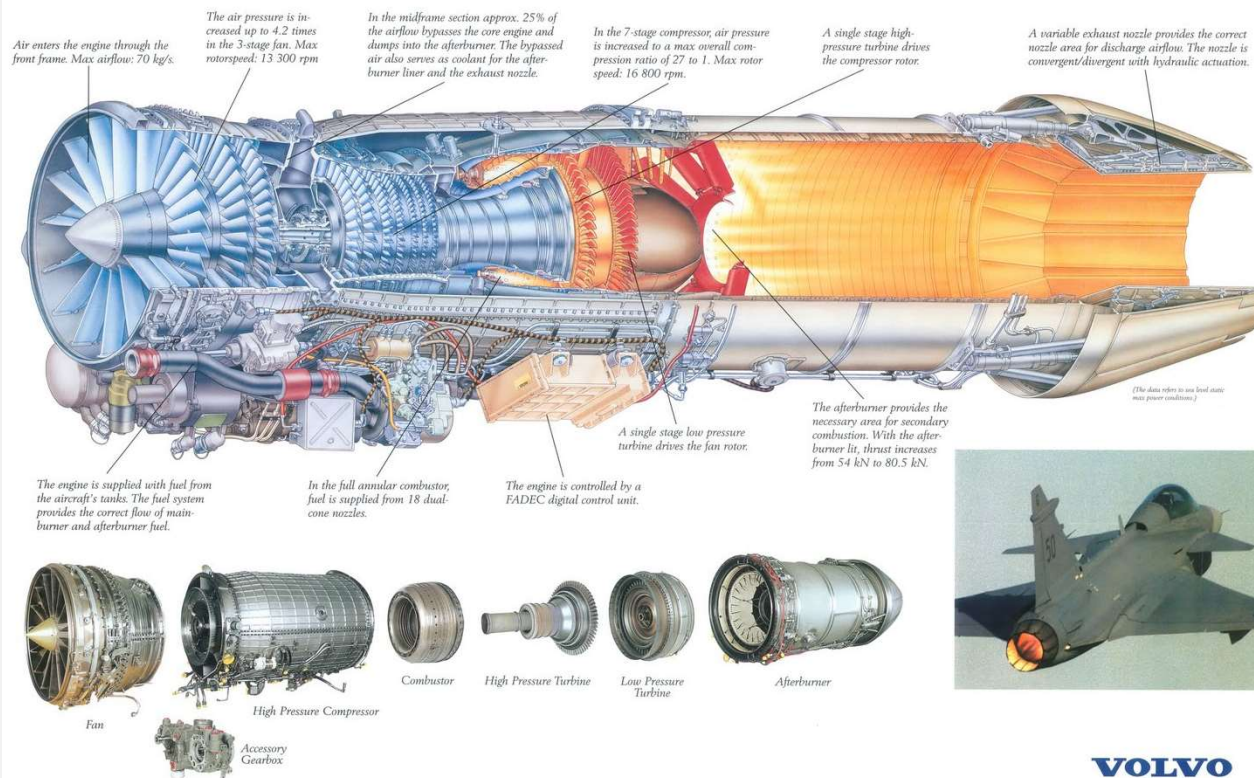


Pratt and Whitney I 100 G (silnik dwuwirnikowy z przekładnią - GTF) (Joachim Kurzke, Ian Halliwell Propulsion and Power An Exploration of Gas Turbine Performance Modeling)

Lepsze dopasowanie aerodynamiczne pracy zespołów wirnika niskiego ciśnienia pozwala na zwiększenie sprężu bustera i zmniejszenie ilości stopni HPT

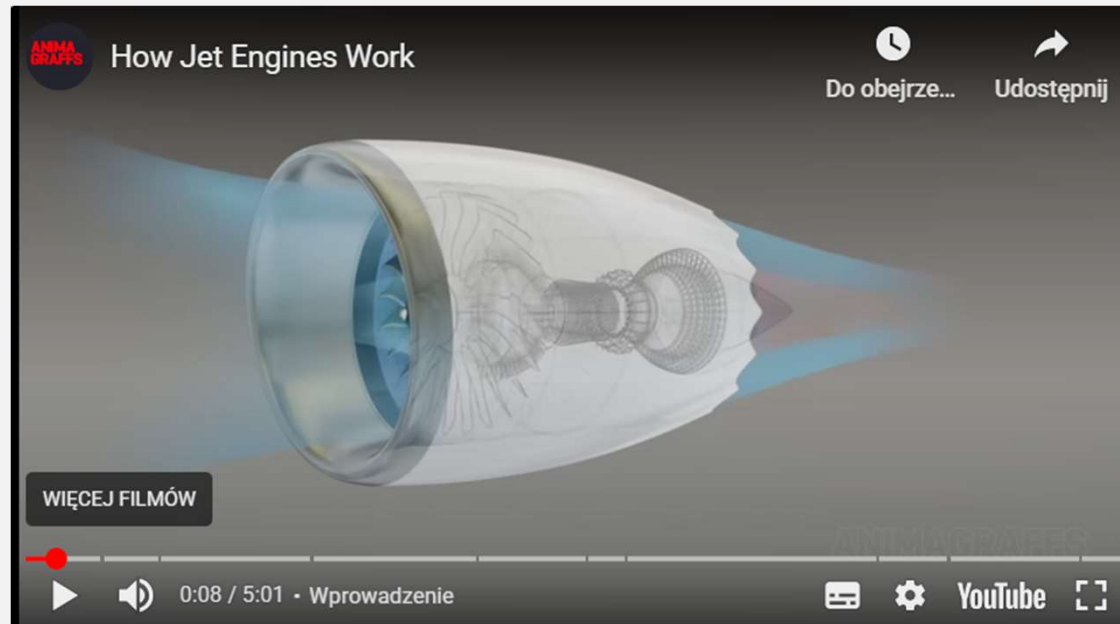
SILNIK TURBOWENTYLATOROWY O MAŁYM STOPNIU DWUPRZEPLYWOWOŚCI

Volvo RM12 – Powering the Gripen Aircraft



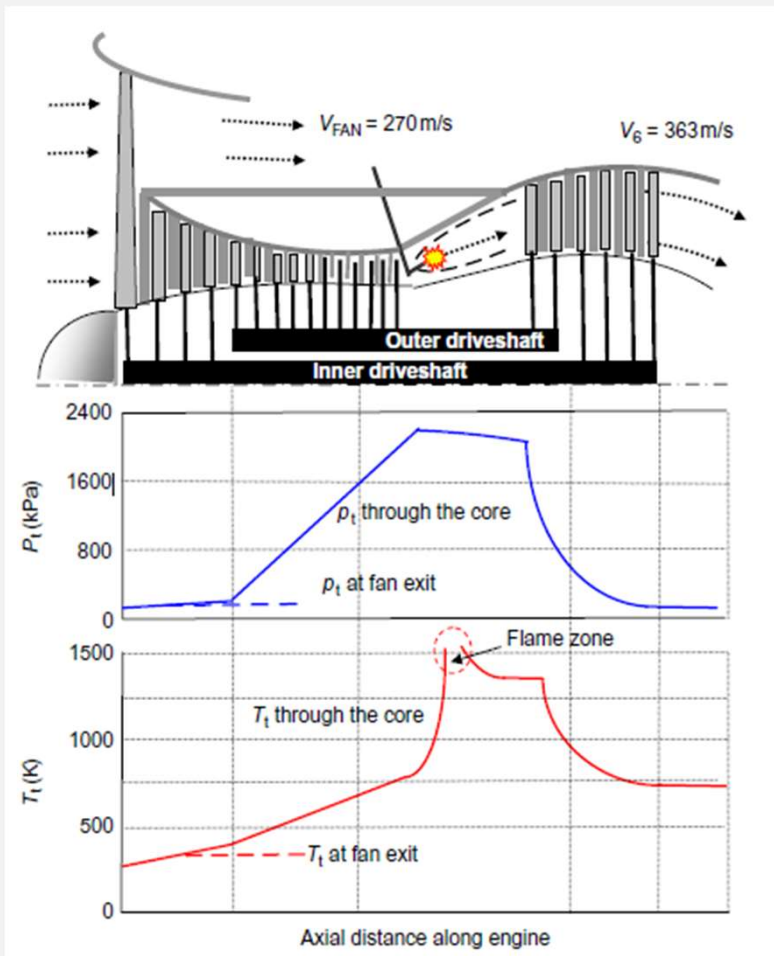
- **Wentylator** - 3 stopnie przyrost ciśnienia ok. 4
- **Sprężarki** – dalszy przyrost ciśnienia (OPR =27)
- **Komora spalania** – wzrost temperatury do ok 1900 K przy nienaznaczonym spadku ciśnienia
- **Turbiny** - jednostopniowe wytwarzają moc do napędu sprężarek, wentylatora i innych urządzeń stowarzyszonych (auxiliary)
- **Mieszalnik z dopalaczem i dyszą wylotową** – zapewnia zmieszanie strumieni oraz dodatkowe spalanie w celu zwiększenia energii gazów wylotowych (zwiększenie ciągu)

PROCES WEWNĘTRZNY W SILNIKU



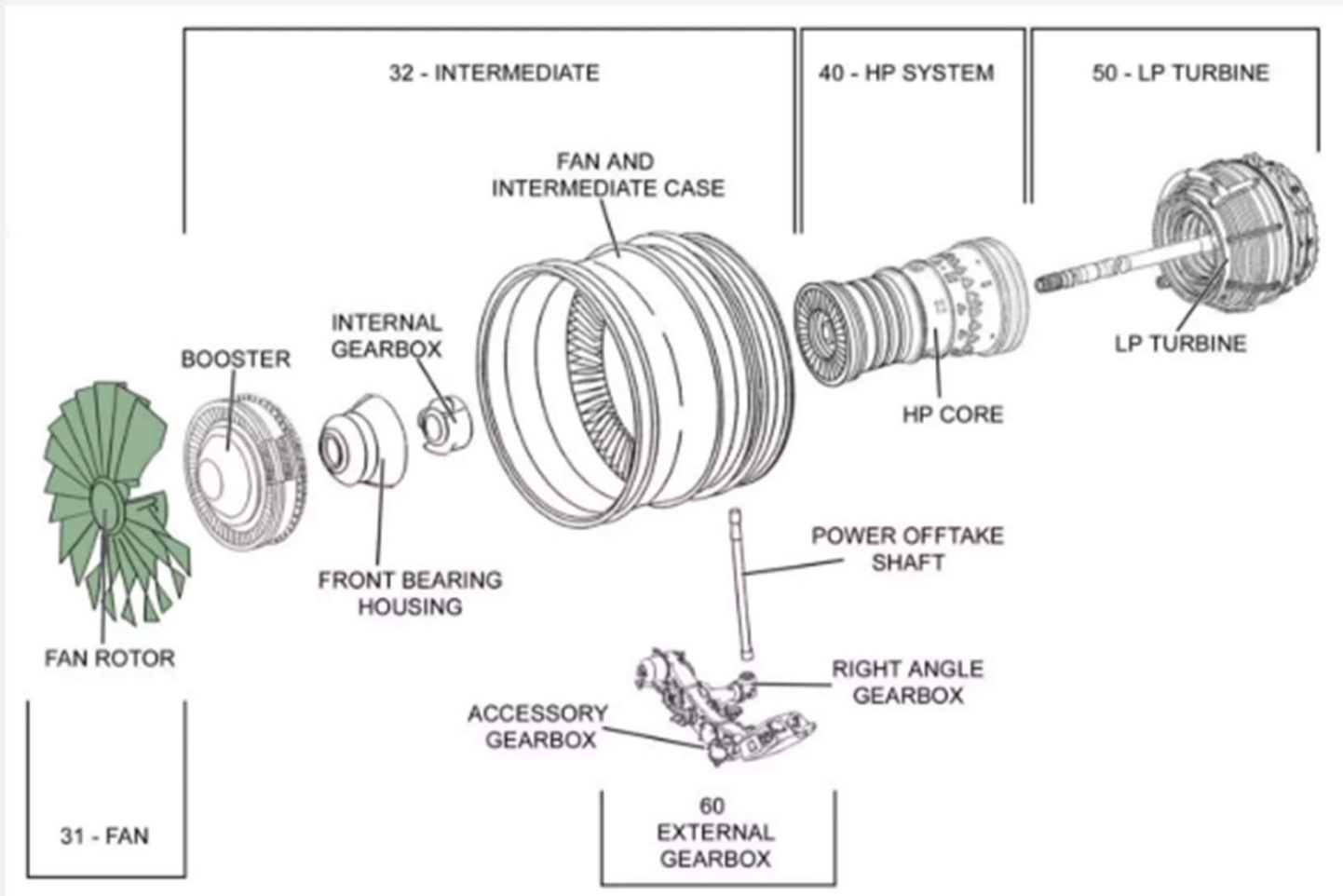
- <https://www.bing.com/videos/search?q=How+Jet+Engines+Work&&view=detail&mid=52F4F6B5EDBE48EDDCE852F4F6B5EDBE48EDDCE8&FORM=VRDGAR>

SILNIKI TURBOWENTYLATOROWE – PROCES WEWNĘTRZNY

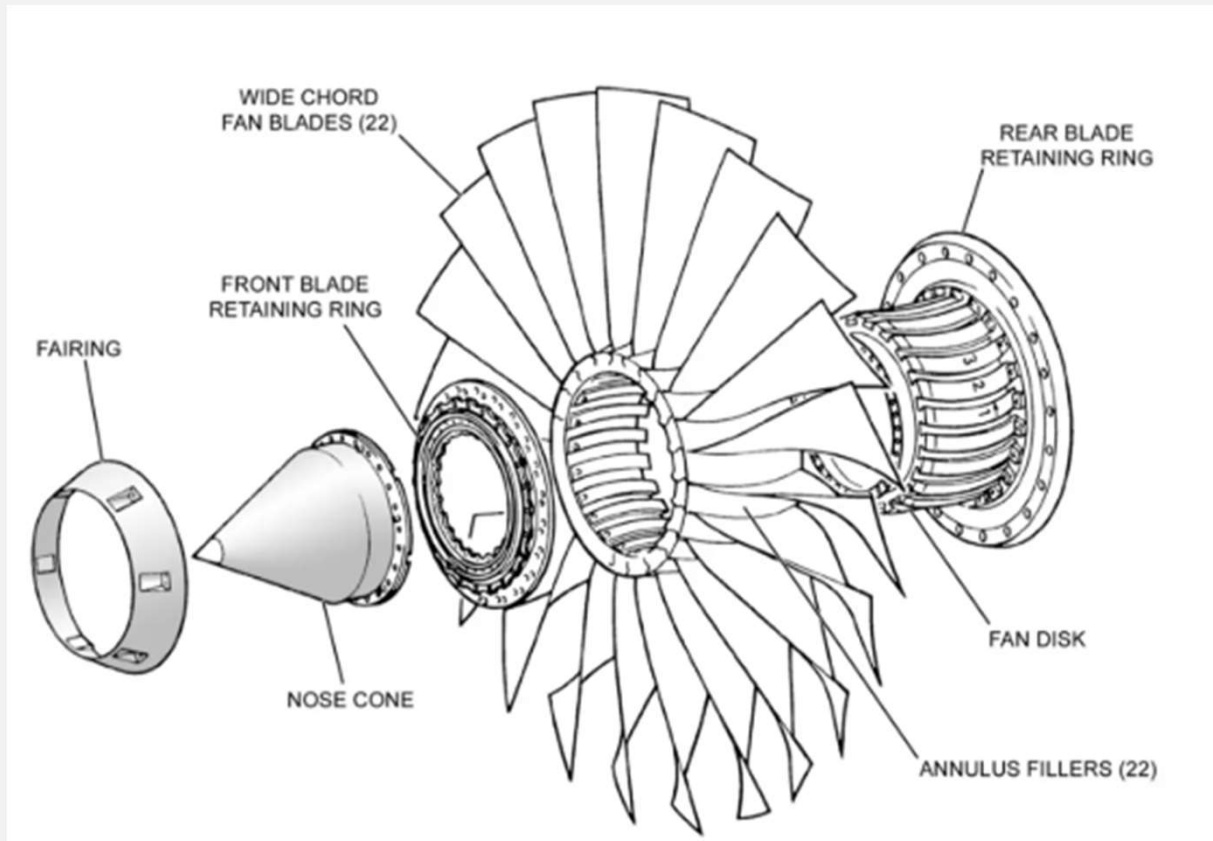


- **Wentylator** - jeden stopień - nieznaczny przyrost ciśnienia (ok. 1.6-1.7)
- **Spreżarki** – istotny przyrost ciśnienia nawet do ok. 50-60 razy, i wzrost temperatury nawet do 1000 K
- **Komora spalania** – wzrost temperatury do ok 1900 K przy nieznacznym spadku ciśnienia
- **Turbiny** - wytwarzają moc do napędu sprężarek, wentylatora i innych urządzeń stowarzyszonych. Towarzyszy temu spadek ciśnienia i spadek temperatury
- **Dysze wylotowe** – przyspieszają strumień gazu – kosztem spadku ciśnienia statycznego następuje wzrost prędkości gazów wylotowych z silnika

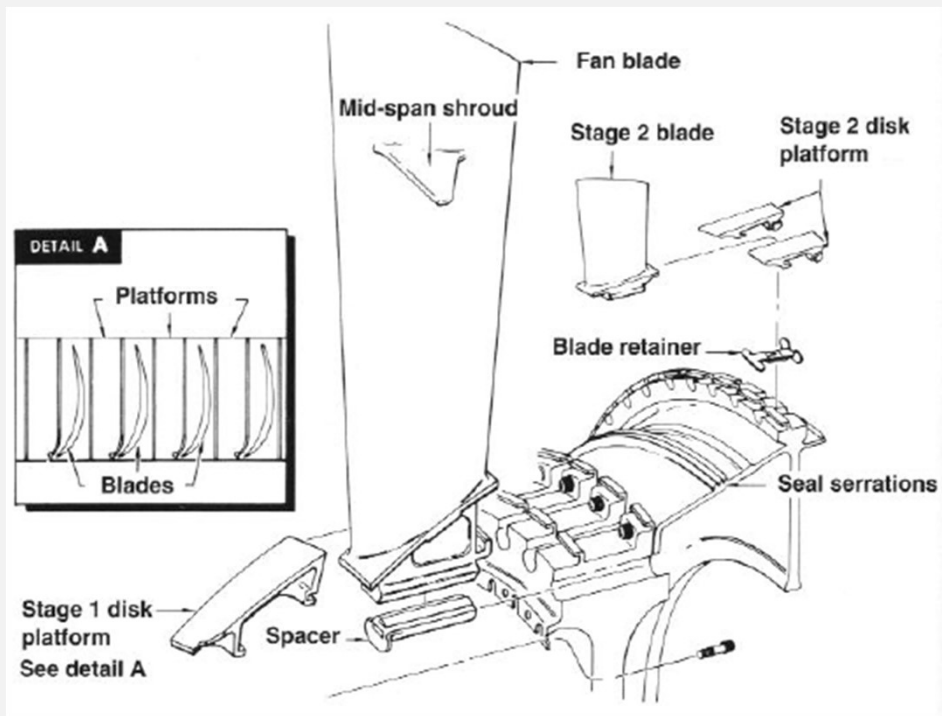
MODUŁY SILNIKA (SILNIK DWUWIRNIKOWY)



FAN



MOCOWANIE ŁOPAT WENTYLATORA



Nowoczesne łopaty wentylatora:
Szerokociętywowe o strukturze kompozytowej wzmocnione tytanowymi okuciami na krawędzi natarcia

WENTYLATOR (FAN)



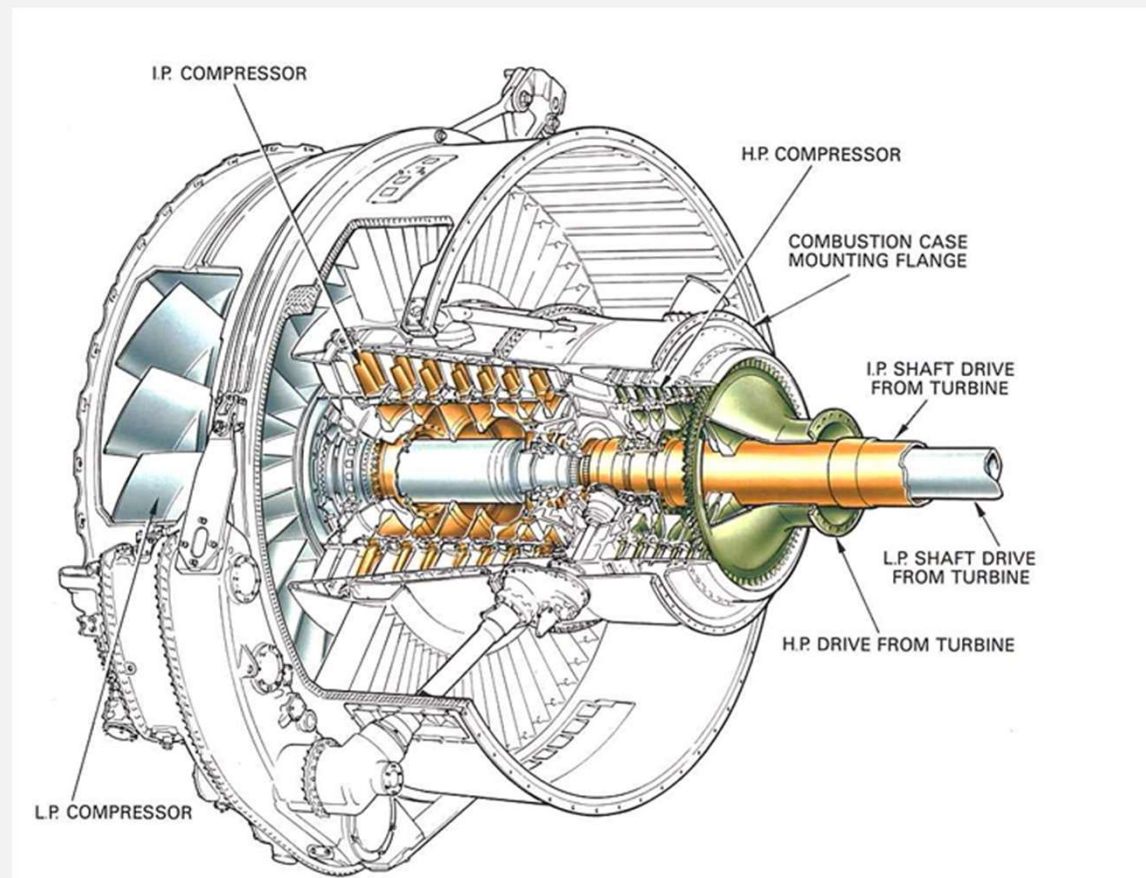
Wirnik wentylatora z łopatkami



Rozdzielacz strumienia z kierownicami dla kanału zewnętrznego

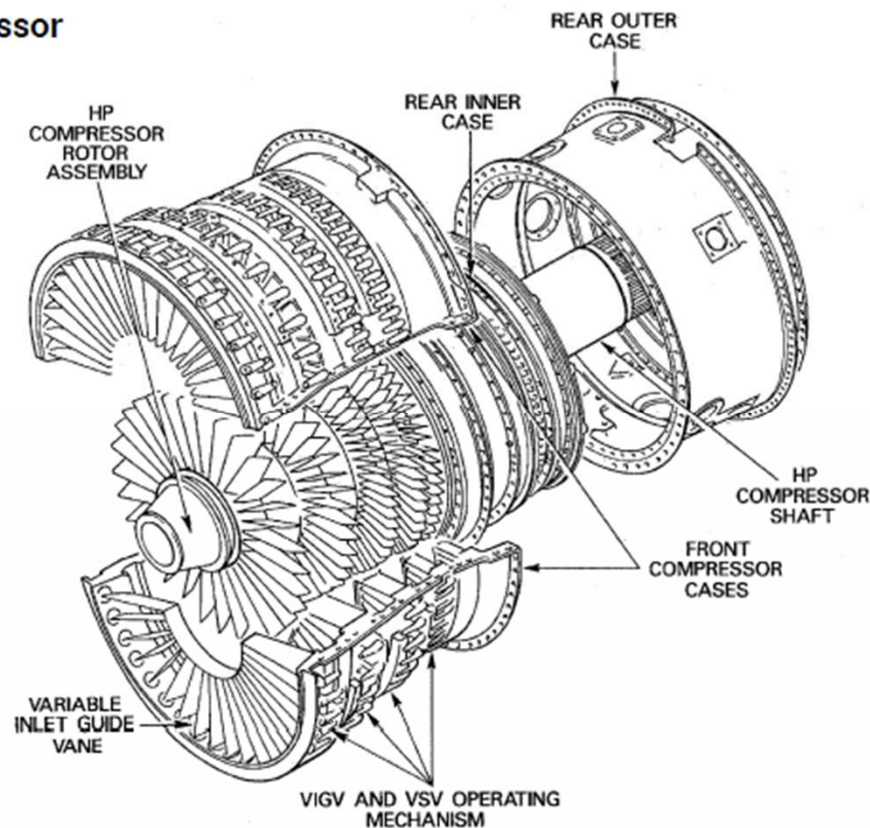
ZESPÓŁ KOMPRESORÓW W UKŁADZIE TRÓJWIRNIKOWYM

- IP Compressor – sprężarka średniego ciśnienia
- HP Compressor – sprężarka wysokiego ciśnienia



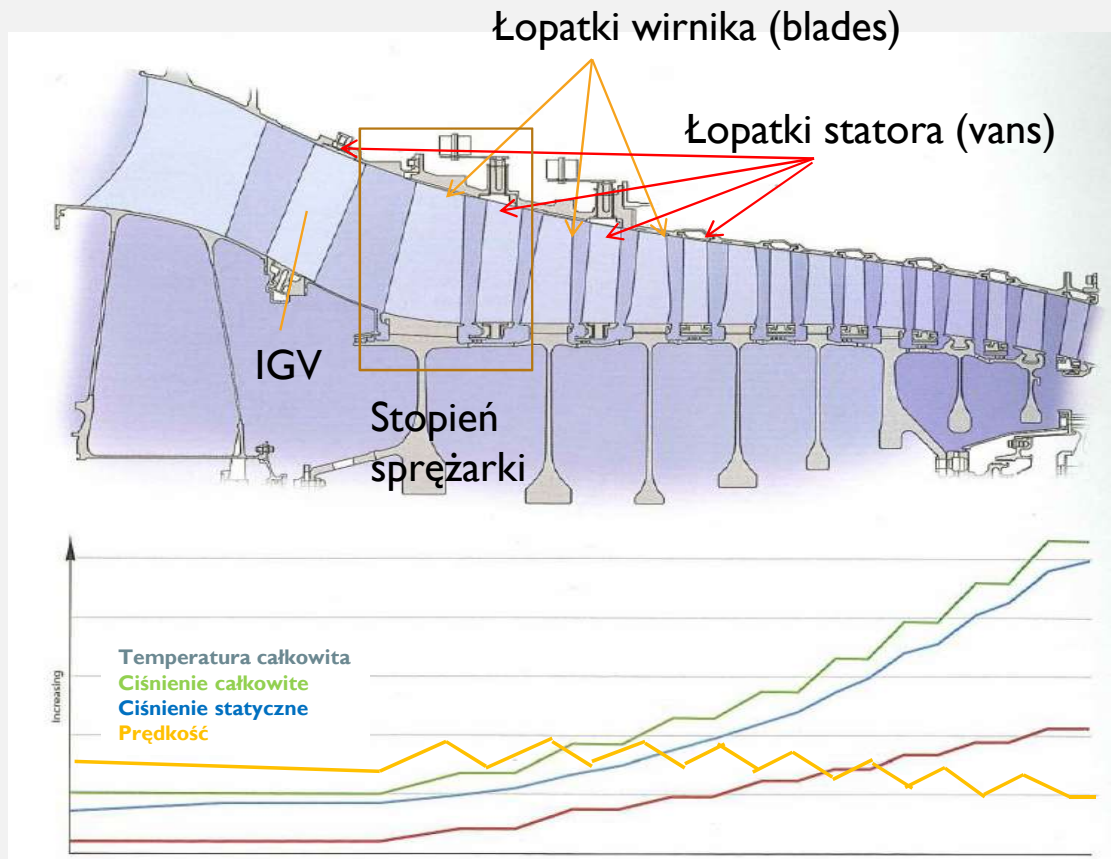
HPC – SPREŻARKA WYSOKIEGO CIŚNIENIA

H.P. Compressor



Zewnętrzna obudowa sprężarki –
dzielona wzdłuż osi silnika
Zamocowane są do niej łopatki aparatów
dyszowych (kierownice – Vanes) i
mechanizmy sterowania łopatkami w
przypadku nastawnych wieńców
kierownic (VGV – Variable guide vanes)

HIGH PRESSURE COMPRESSOR (AXIAL COMPRESSOR)



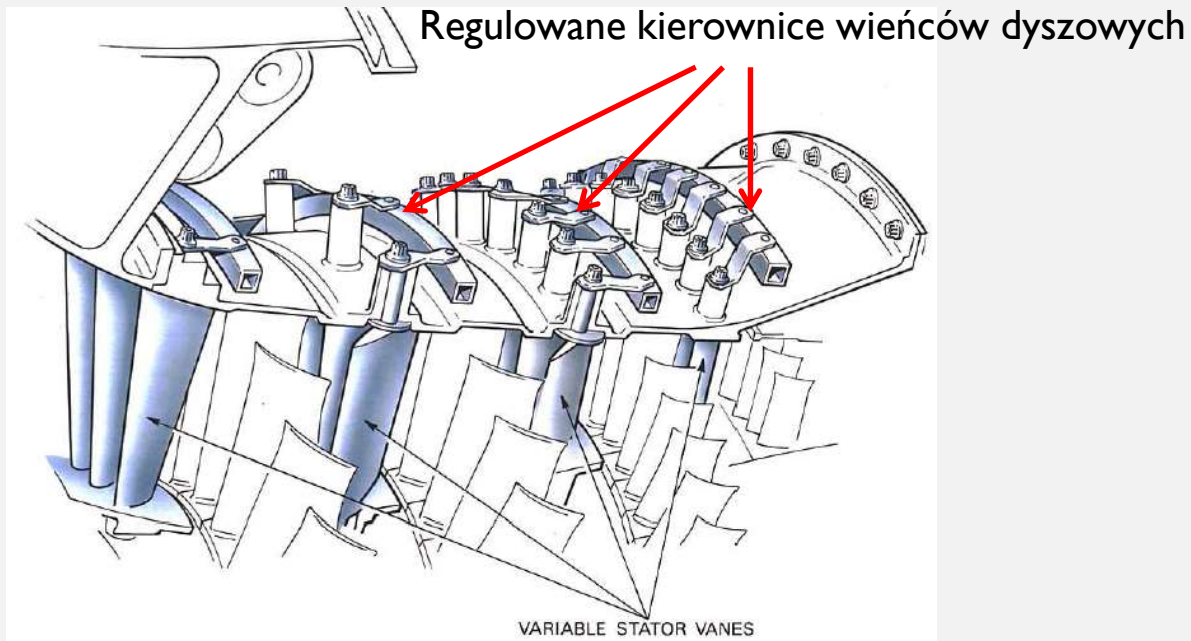
Nastawne kierownice pierwszych trzech stopni sprężarki (VGV)
Przed pierwszym stopniem występuje nastawna kierownica wlotowa (IGV)

Wartość temperatury za sprężarkami przy OPR dla wysokości 0 m

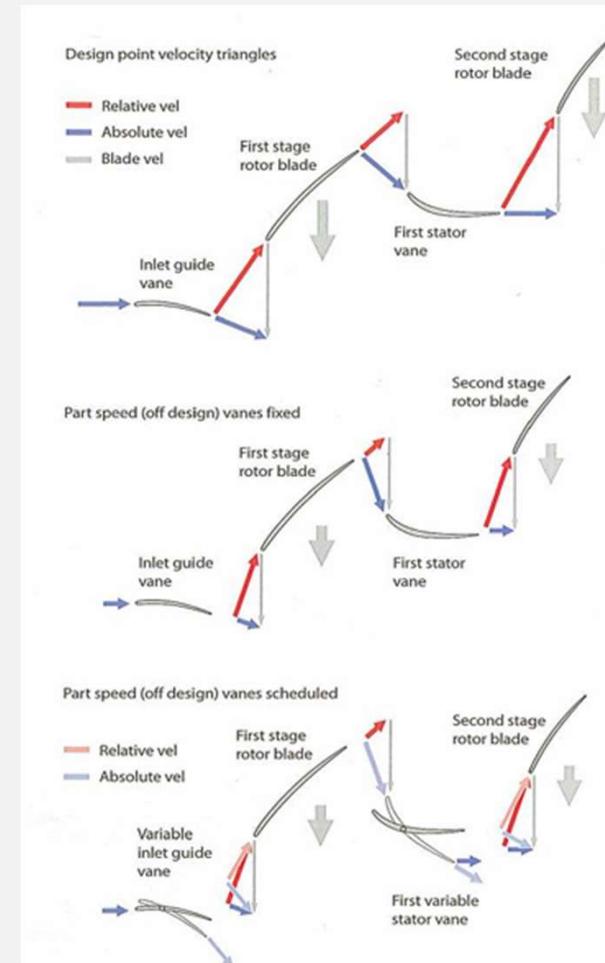
OPR (Overall pressure Ratio)	Krotność zwiększenia temp.	Temp za spręż K
10	2	600
20	2,6	750
30	2,9	850
40	3,2	930
50	3,5	1000

Zmiany ciśnienia, temperatury i prędkości w sprężarce osiowej

SPRĘŻARKA Z REGULOWANYMI KIEROWNICAMI - VGV

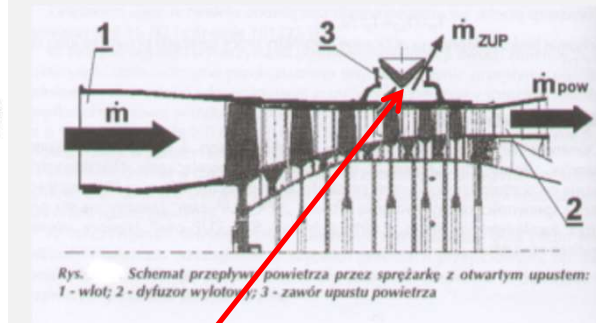
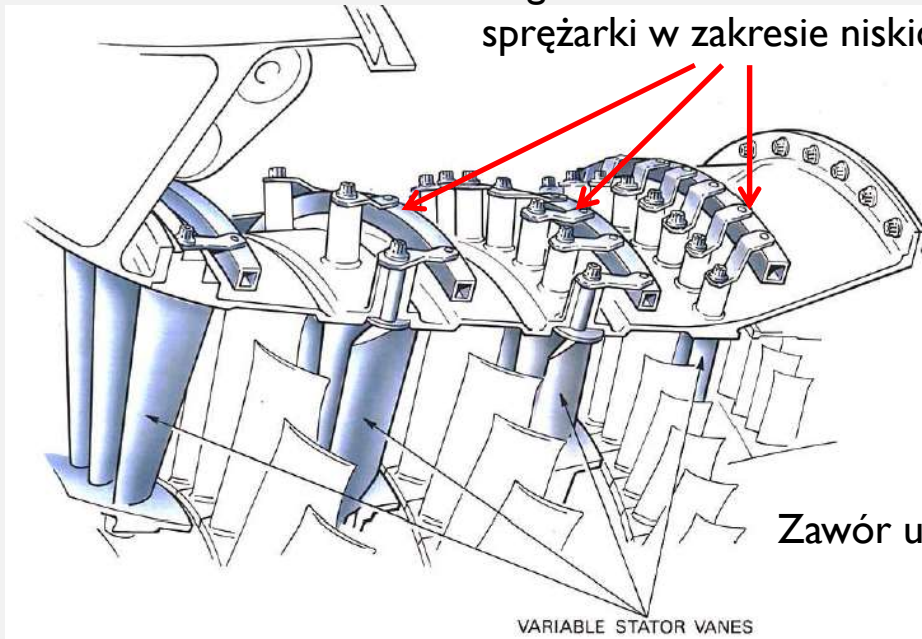


- Zapewnia wyższą sprawność przy różnych prędkościach obrotowych
- Zapewnia wyższą stabilność przepływu w całym zakresie prędkości pracy – zapobiega pompażowi

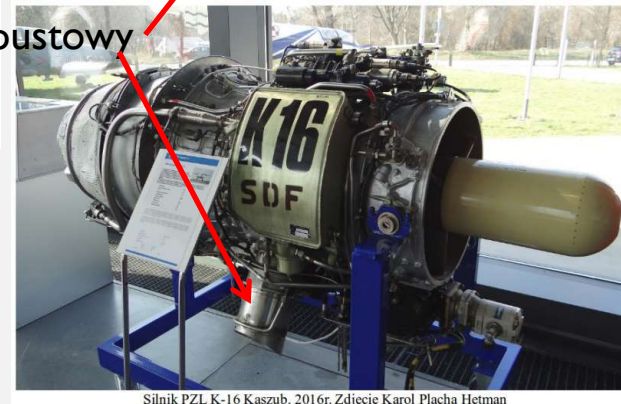


METODY ZAPOBIEGANIA NIESTATECZNEJ PRACY SPRĘŻARKI

Regulowane kierownice wieńców dyszowych podnoszą sprawność sprężarki w zakresie niskich prędkości obrotowych



Zawór upustowy

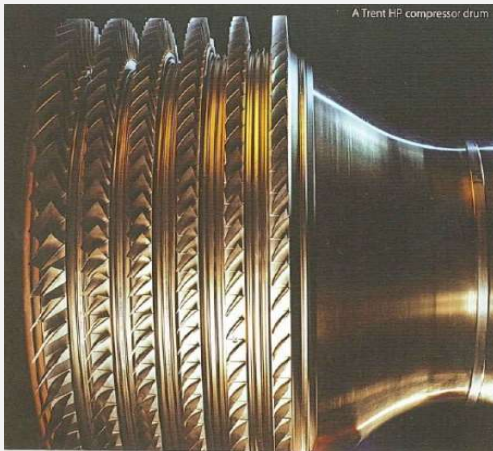


- Regulowane wieńce kierownic
- Zawór upustowy
- Podział sprężarki na dwa wirniki

ELEMENTY SPRĘŻARKI

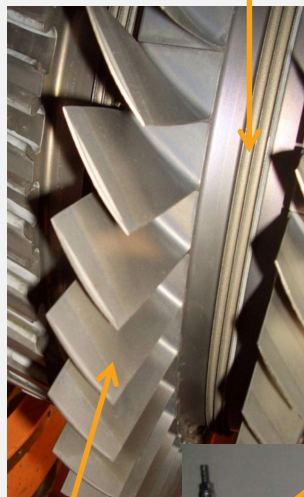


Tarcza sprężarki z łopatkami



Bęben sprężarki z łopatkami

Labirynty uszczelniający



Łopatkami



Obudowa zewnętrzna sprężarki z łopatkami

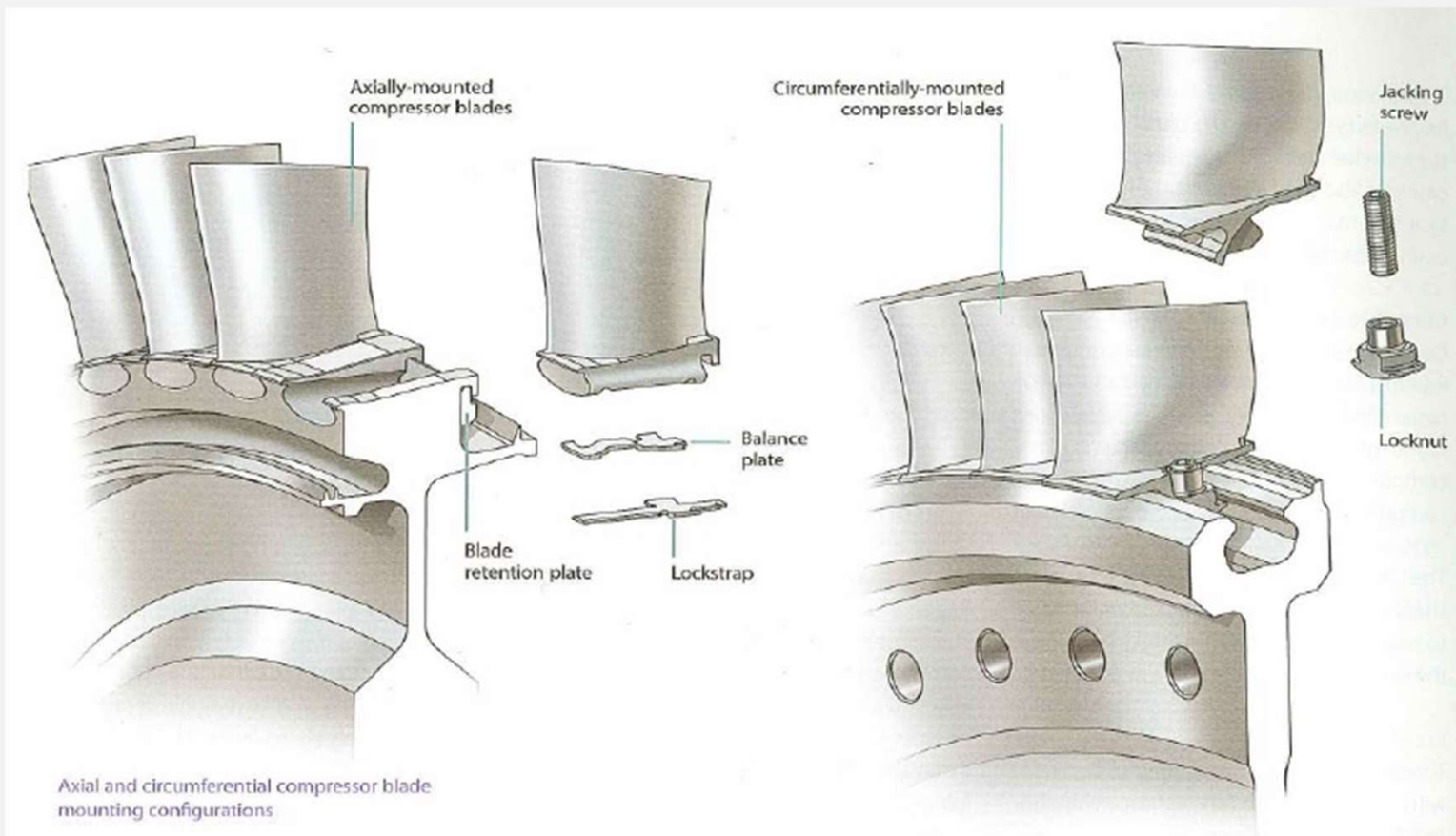
Łopatkami statora regulowane

Łopatkami statora stałe



Łopatkami wirnika

SPOSOBY MOCOWANIA ŁOPATEK SPRĘŻARKI

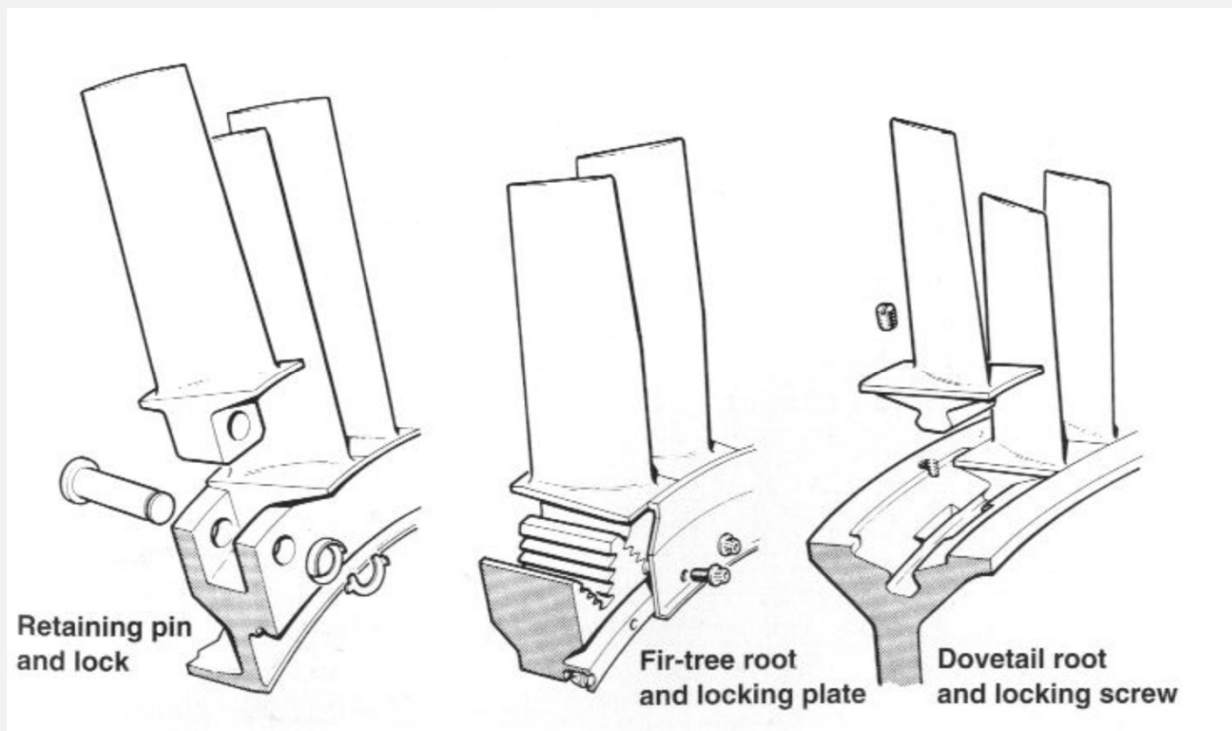


Osiowy system montażu:

Łopaki typowo z zamkiem w stylu jaskółczy ogon (dovetail), lub jodełkowy (fir-tree) dodatkowo wyposażone w podkładkę i zawleczkę

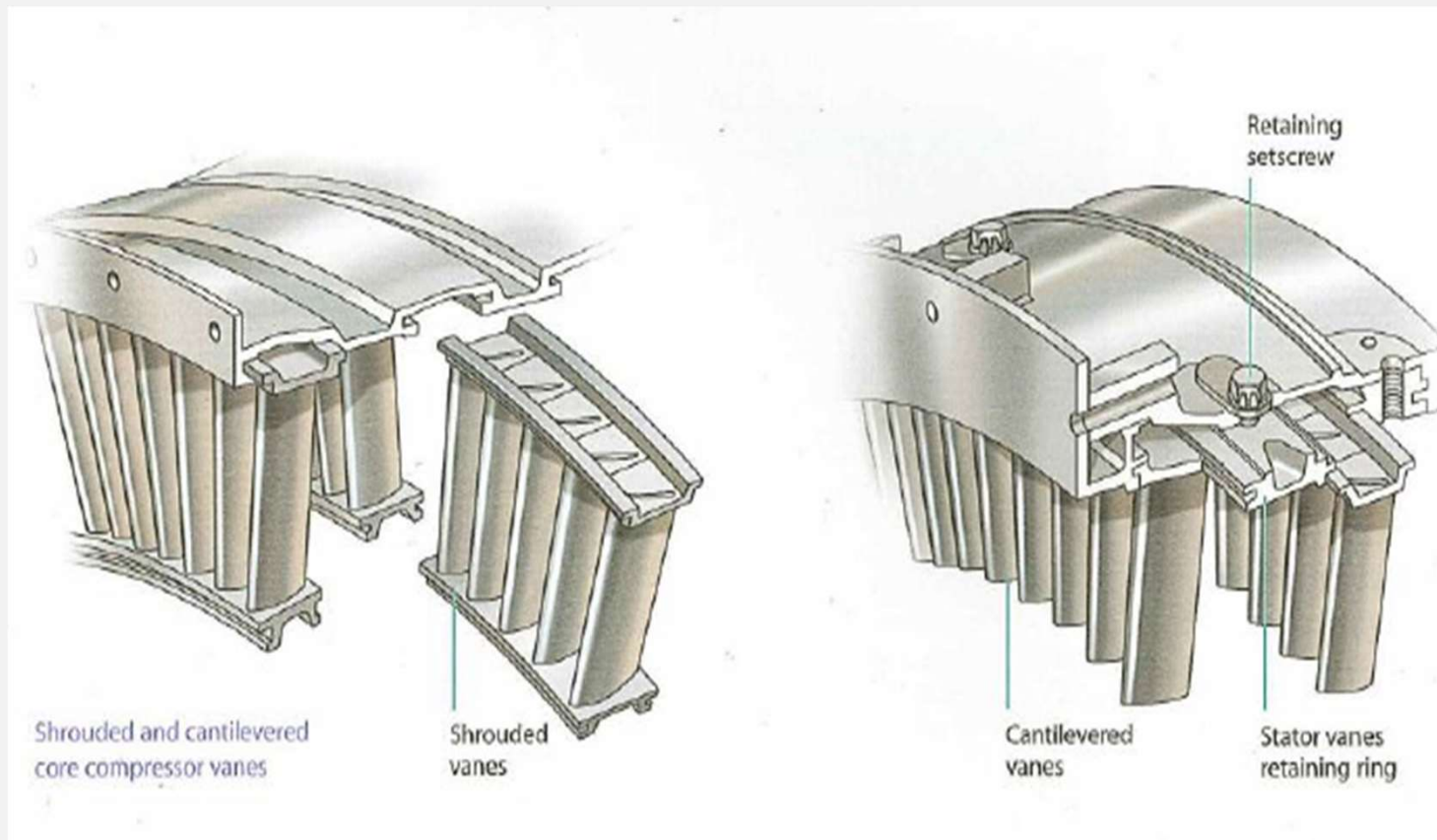
Obwodowy system montażu - typowy dla sprzarek o konstrukcji bębnowej rozwiązanie stosowane częściej dla sprężarek wysokiego ciśnienia.

PRZYKŁADY MONTOWANIA ŁOPATEK DO TARCZY TURBINY



Montaż łopatki za pomocą sworznia mocującego stosowane w starszych rozwiązaniach montażu łopat wentylatora lub pierwszych stopni sprężarki
Montaż za pomocą zamka jodełkowego (osiowy)
Montaż z wykorzystaniem rowka obwodowego i mocowania typu jaskółczy ogon.

SPOSOBY MOCOWANIA KIEROWNIC

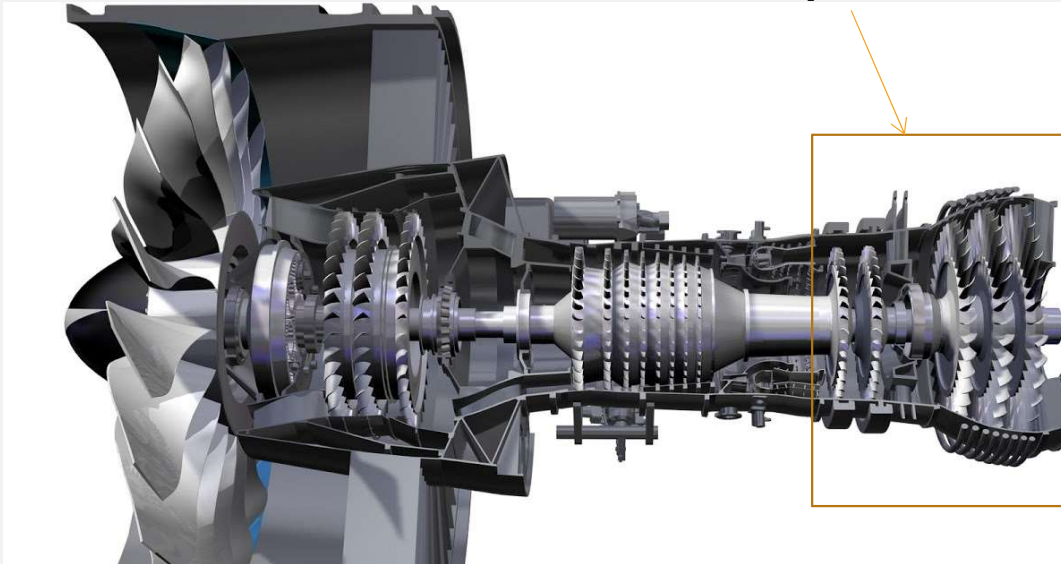


TURBINY

Przekształcają energię strumienia gazów (spalin) w silniku w moc mechaniczną niezbędną do napędu sprężarek, wentylatora, urządzeń występujących na silniku (pompy olejowe, paliwowe, generatory prądu), a w przypadku silników śmigłowych i śmigłowcowych wytwarzają moc niezbędną do wytworzenia siły ciągu

TURBINY W SILNIKU LOTNICZYM

Zespół turbin



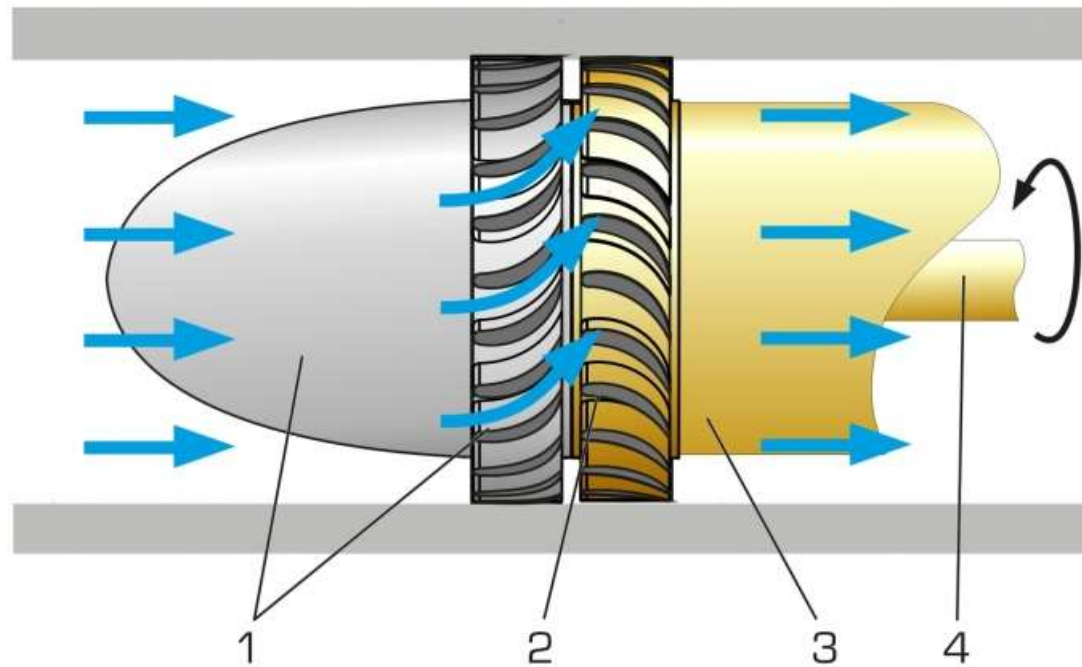
Wieniec wirnika łopatek turbiny

W silniku występuje od jednego do maksymalnie trzech zespołów turbin, z których każdy w zależności od wytwarzanej mocy może składać się z jednego kilku stopni (wieńców łopatek dyszowych i wirnikowych)

Maksymalne moce produkowane przez turbinę osiągają dla dużych silników dwuprzepływowych 30-50 MW. Pojedyncza łopatką wytwarza moc równą mocy silnika auta sportowego. Temperatura gazów na wejściu do turbiny wysokiego ciśnienia przekracza 1800 K

DZIAŁANIE TURBINY

- 1 – stator (stator vans)
- 2 – rotor blades
- 3 – rotor cowl
- 4 – spool

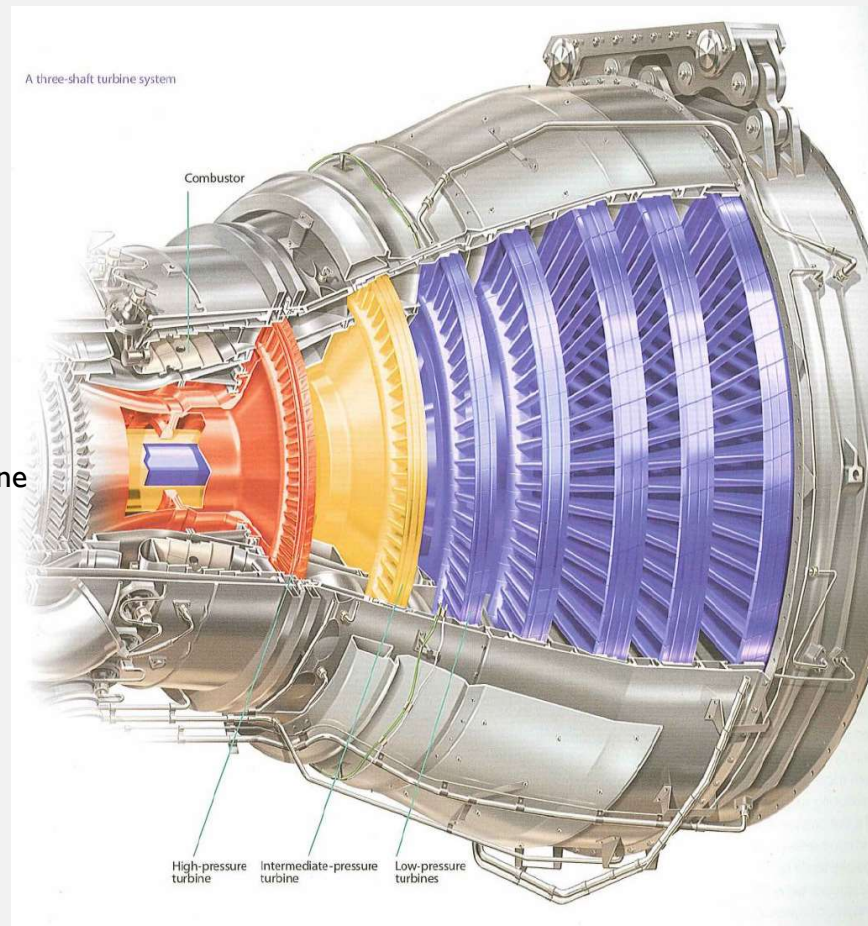


PRZYKŁAD TURBINY Z SILNIKA TRÓJWIRNIKOWEGO RR

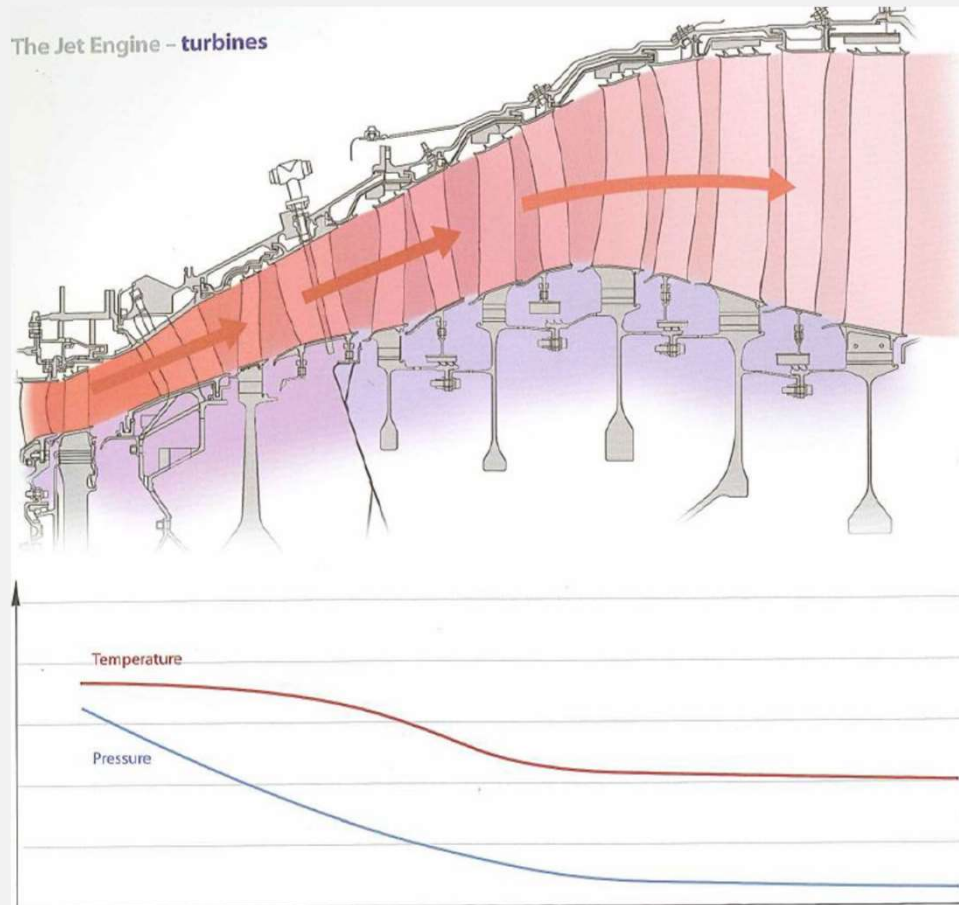
Turbina wysokiego ciśnienia
HPT – High Pressure turbine

Turbina średniego ciśnienia
IPT – Intermediate pressure turbine

Turbina niskiego ciśnienia
LPT - Low Pressure Turbine

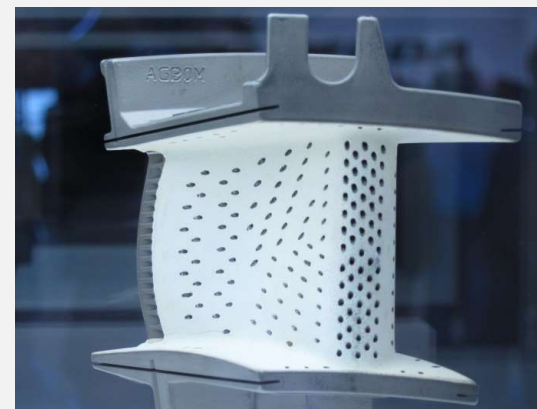
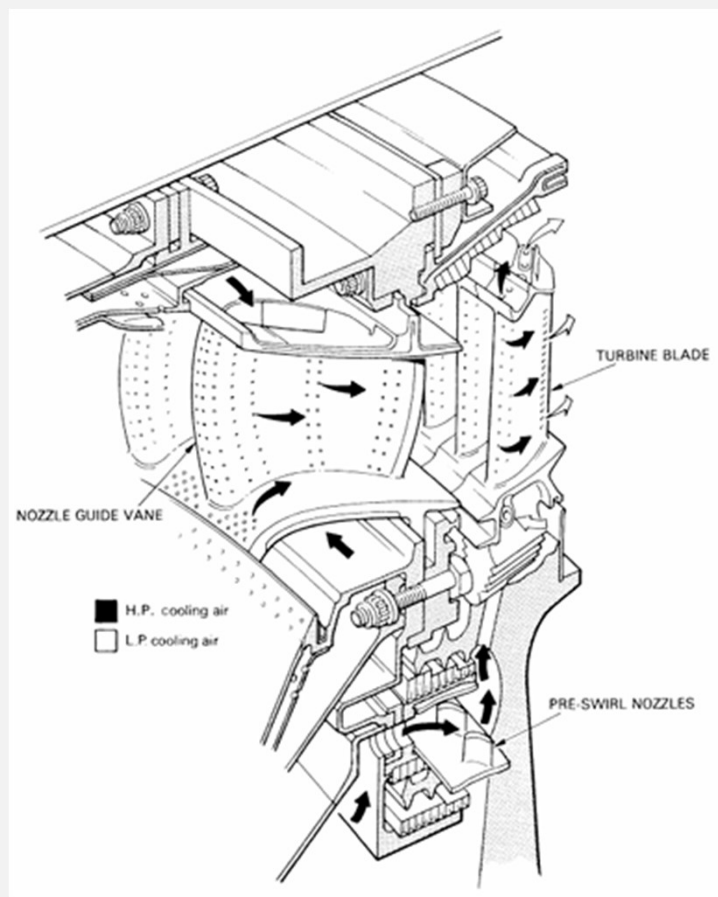


ROZKŁAD TEMPERATURY I CIŚNIENIA NA TURBINIE



Najsilniej obciążonymi cieplnie są turbiny wysokiego ciśnienia, na wirniku dodatkowo dochodzą obciążenia mechaniczne od wirowania.

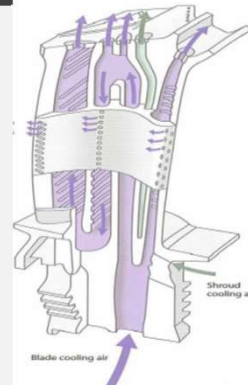
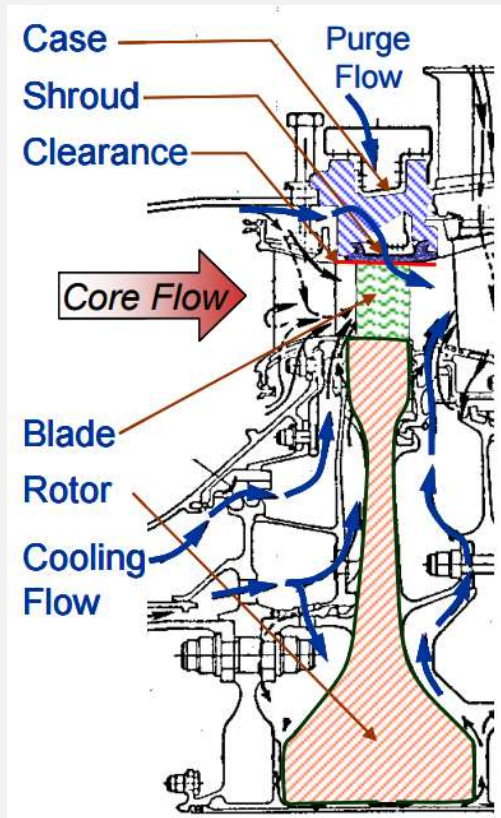
CHŁODZENIE TURBIN – KIEROWNICA WLOTOWA TURBINY



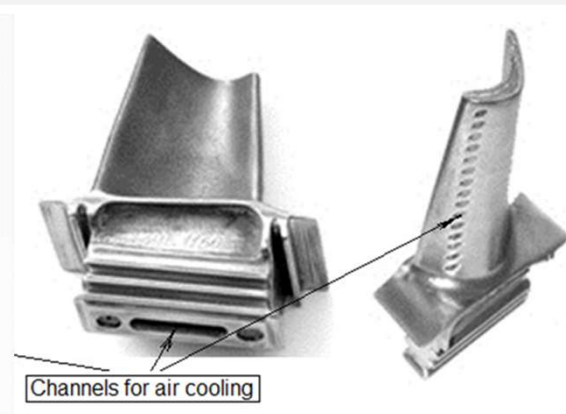
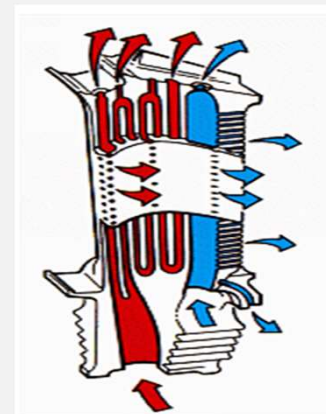
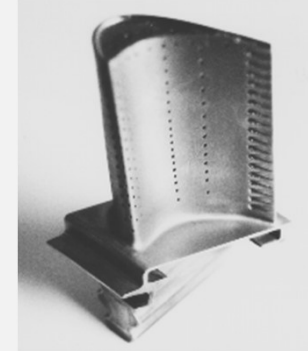
Pracuje w wysokiej temperaturze osiągającej ok. 1800 K

Wymaga bardzo intensywnego chłodzenia na całej powierzchni łopaty

CHŁODZENIE ŁOPATEK WIRNIKA

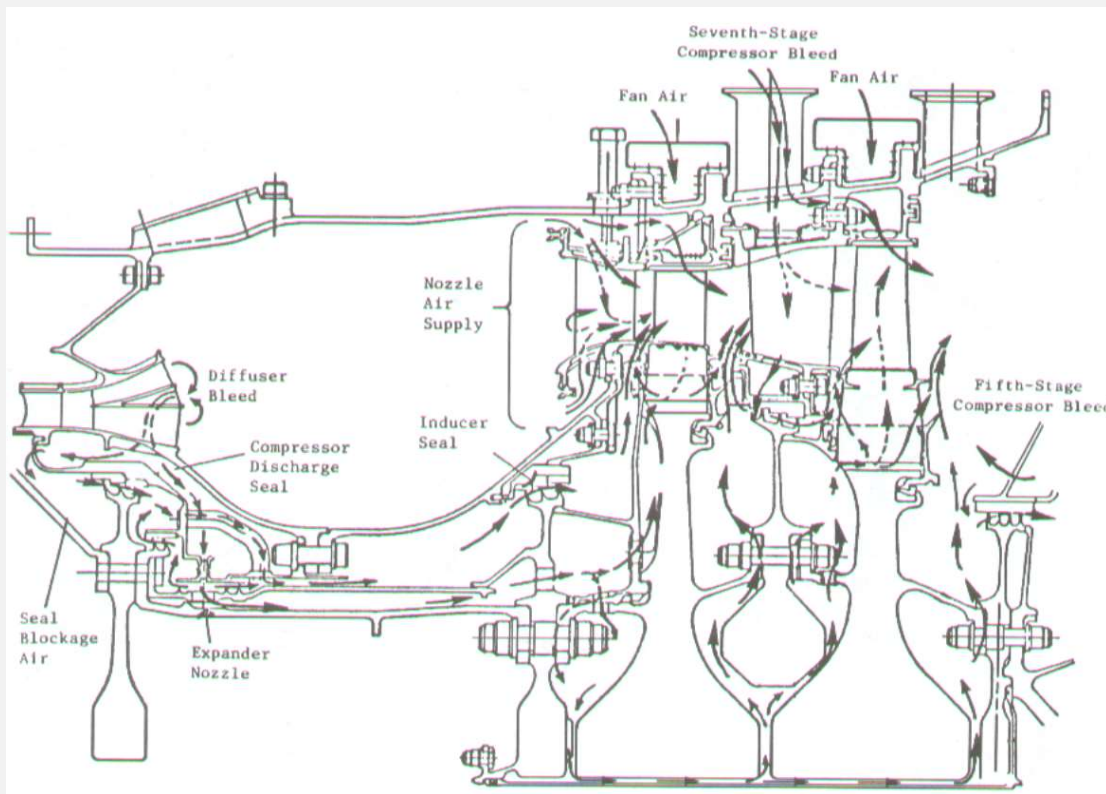


Chłodzenie zewnętrzne (konwekcyjno-błonowe)



Chłodzenie wewnętrzne (konwekcyjne)

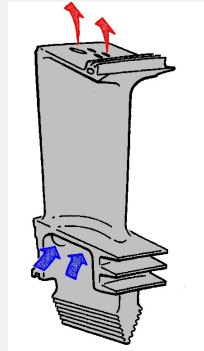
POWIETRZE DO CHŁODZENIA TURBINY



Powietrze do chłodzenia musi mieć odpowiednie ciśnienie i temperaturę

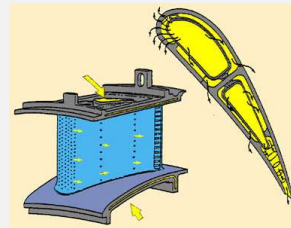
Schema of turbine cooling of NASA E3 engine (NASA CR-167955) [Je-Chin Han, Sandip Dutta, Srinath V. Ekkad: Gas turbine heat transfer and cooling technology, Taylor & Francis, New York 2001]

SYSTEMY CHŁODZENIA TURBIN



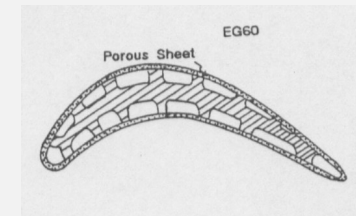
1250 K

Chłodzenie
wewnętrzne



1550 K

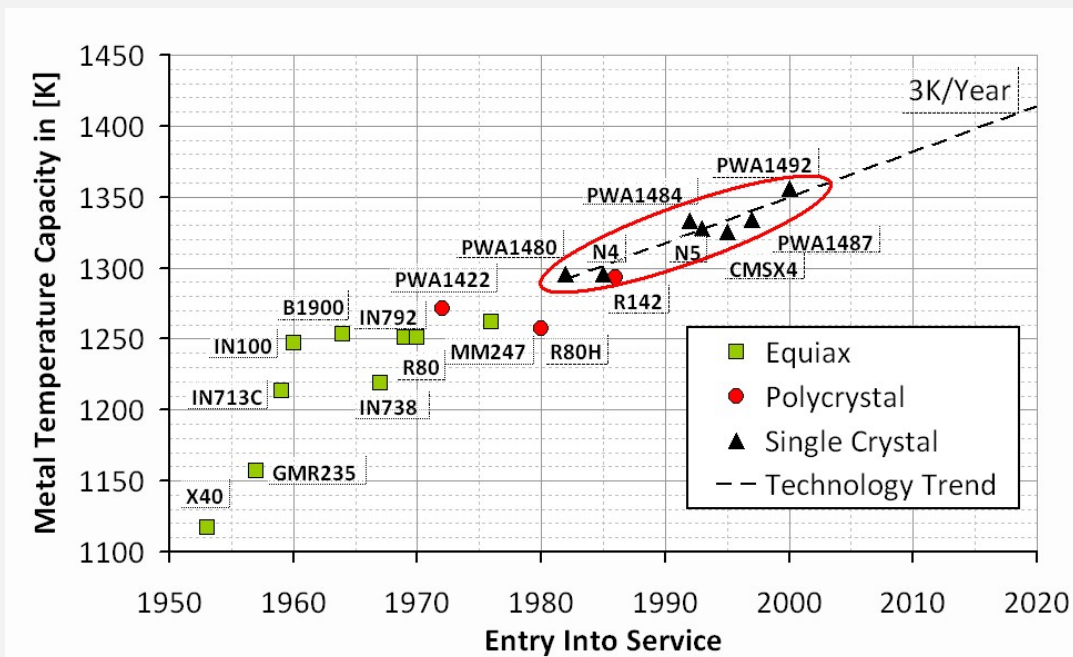
Chłodzenie
zewnętrzne



1800 K

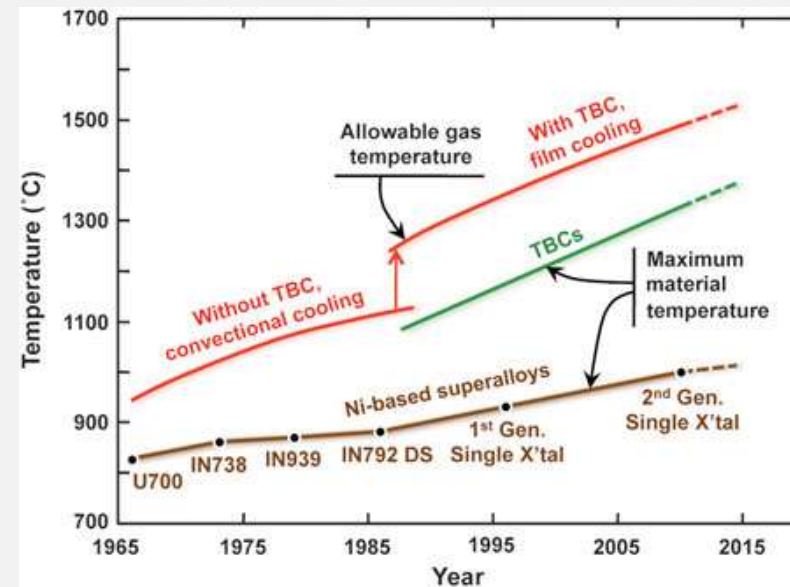
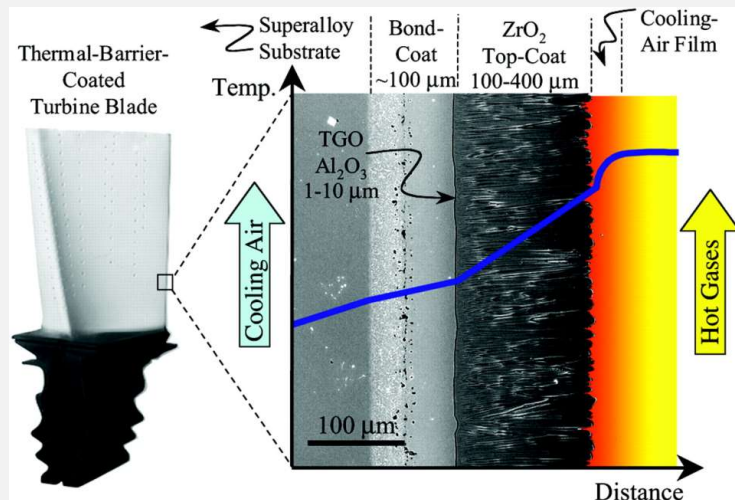
Chłodzenie
transpiracyjne

ROZWÓJ MATERIAŁÓW NA CZĘŚCI GORĄCE SILNIKA



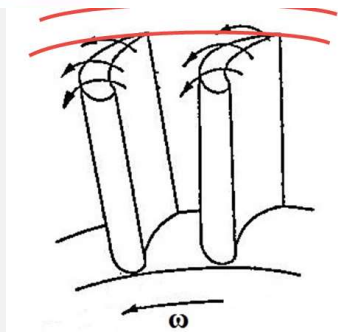
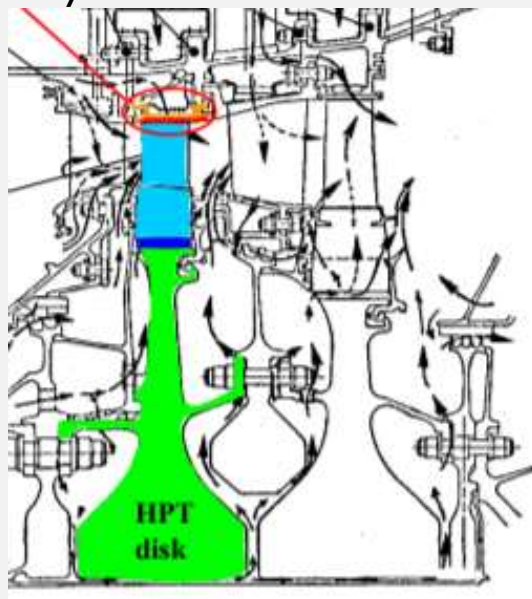
Temperatura pracy współcześnie znanych materiałów (superstopów na bazie niklu) nie jest w stanie spełnić wymagań stawianych przez silniki lotnicze.

WYKORZYSTANIE POWŁOK OCHRONNYCH W CELU ZWIĘKSZENIA WYTRZYMAŁOŚCI W WYSOKIEJ TEMPERATURZE

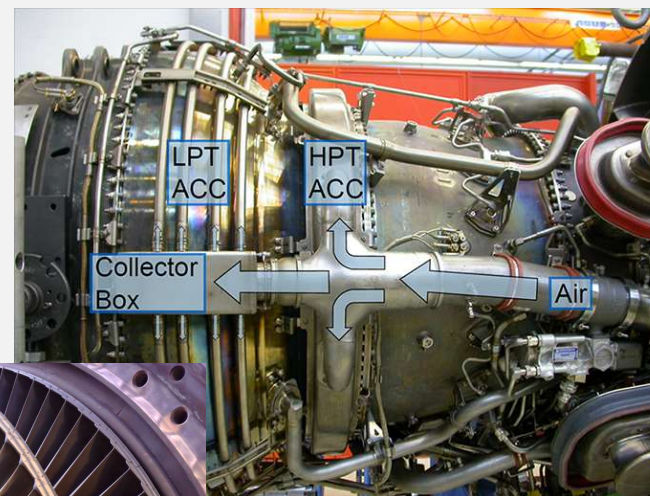


KONTROLA LUZU WIERZCHOŁKOWEGO ŁOPATEK

Luz wierzchołkowy



Wzrost luzu wierzchołkowego o 0.01 cala powoduje wzrost SFC o 1% i wzrost temperatury gazów wylotowych o 10 K oraz obniżenie sprawności



półki bandażowe
(outer shroud)

NOWOCZESNE TECHNIKI WYTWARZANIA ELEMENTÓW SPRĘŻAREK I TURBIN

Technologia bladed disk „blisk” lub integrated blade rotor (IBR)
stosowana do wytwarzania sprężarek i turbin



Turbina wykonana w klasycznej technologii, gdzie
łopatki są montowane do tarczy turbiny

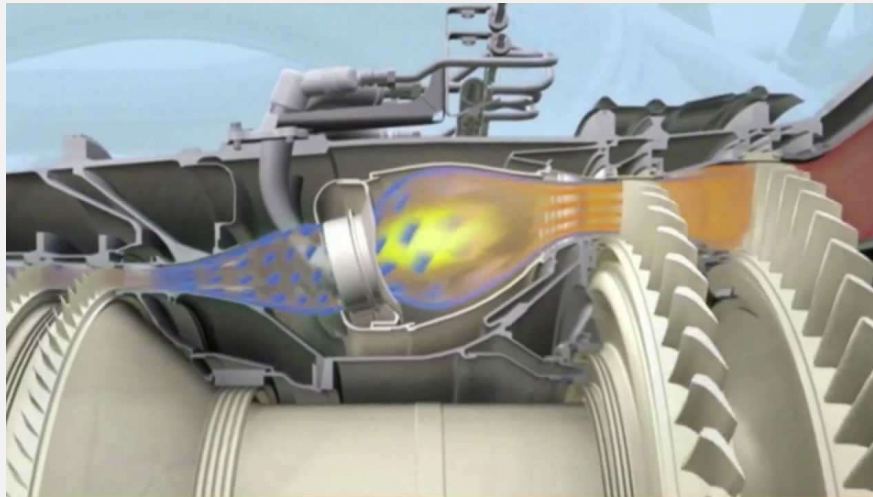
Sprężarka i turbina wykonana w technologii „blisk” – łopatki są wykonywane w całości z tarczą co powoduje:

- Większa dokładność wykonania, co podnosi sprawność zespołu,
- Brak konieczności montażu łopatek z wirnikiem – zmniejsza koszty i czasochłonność montażu silnika

KOMORA SPALANIA

Komora spalania w silniku turbinowym to element usytuowany pomiędzy sprężarką a turbiną, w którym następuje spalanie mieszanki paliwowo-powietrznej, wytwarzające gorące gazy o wysokiej energii. Jej główną rolą jest przekształcenie energii chemicznej paliwa w energię cieplną, napędzającą turbinę i dalsze elementy silnika.

KOMORA SPALANIA



Wymagania:

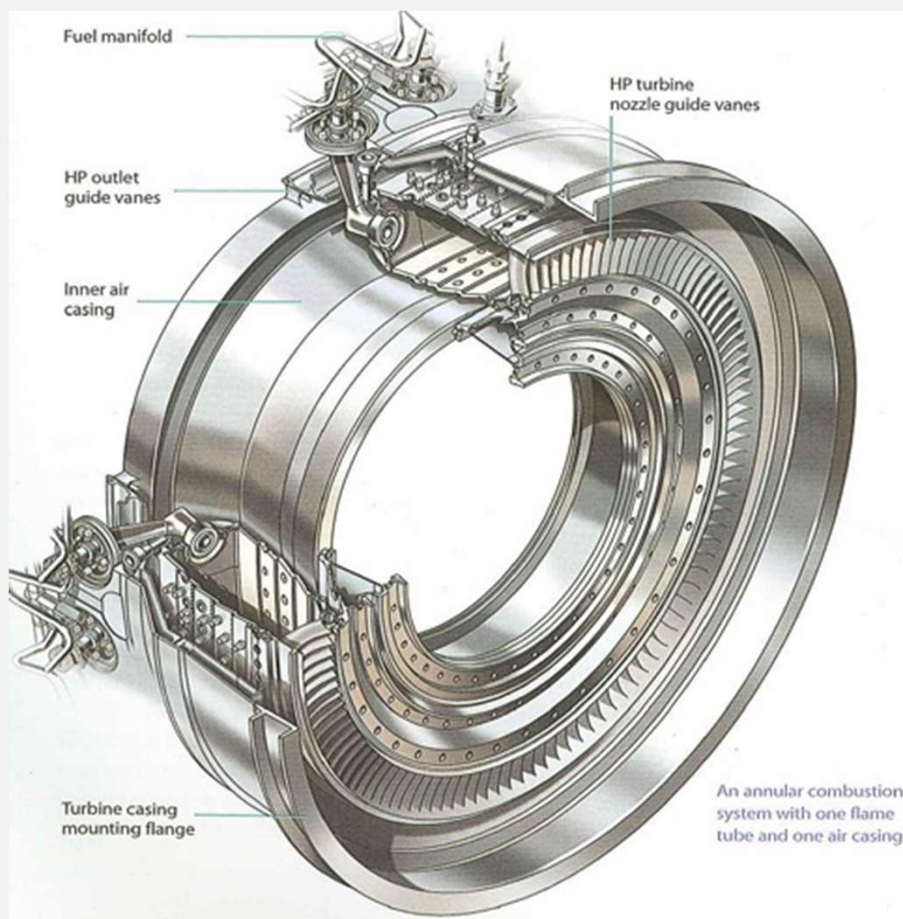
Stabilne spalanie w każdych warunkach pracy

Łatwy start dla różnych wysokości

Stabilne pole temperatury na wyjściu z KS

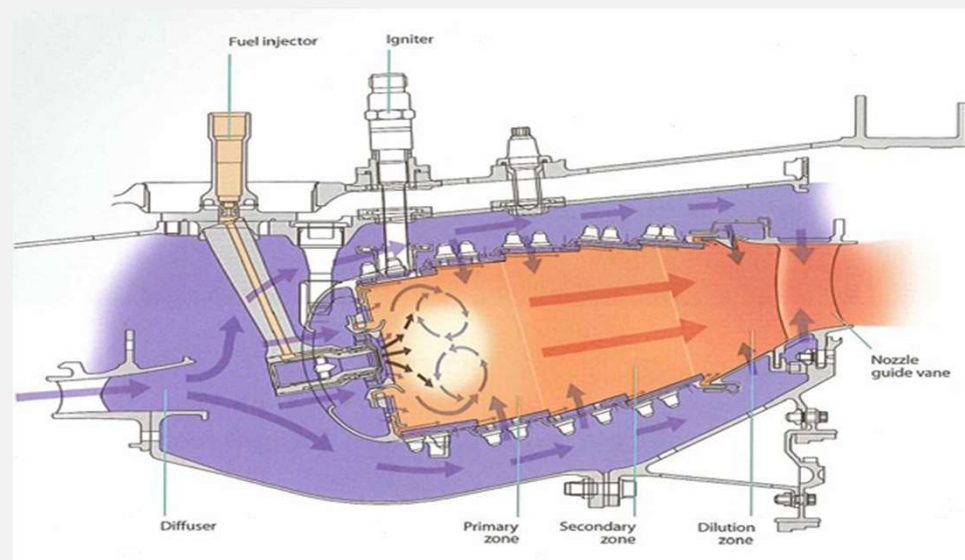
Niska emisja składników toksycznych

PIERŚCIENIOWA KOMORA SPALANIA (ANNULAR COMBUSTOR)

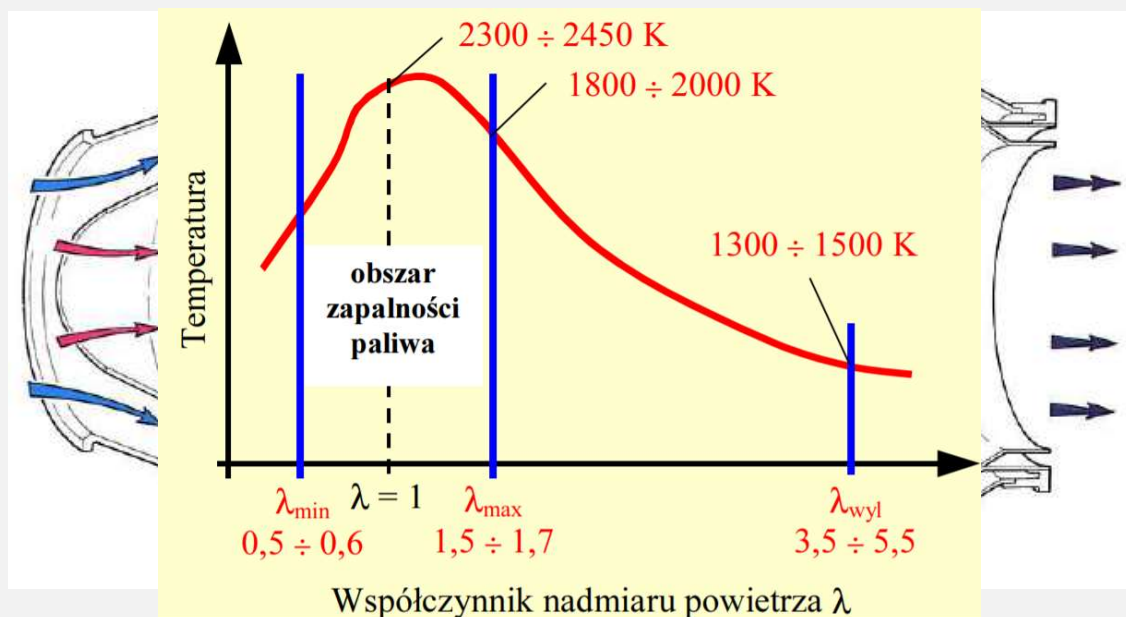
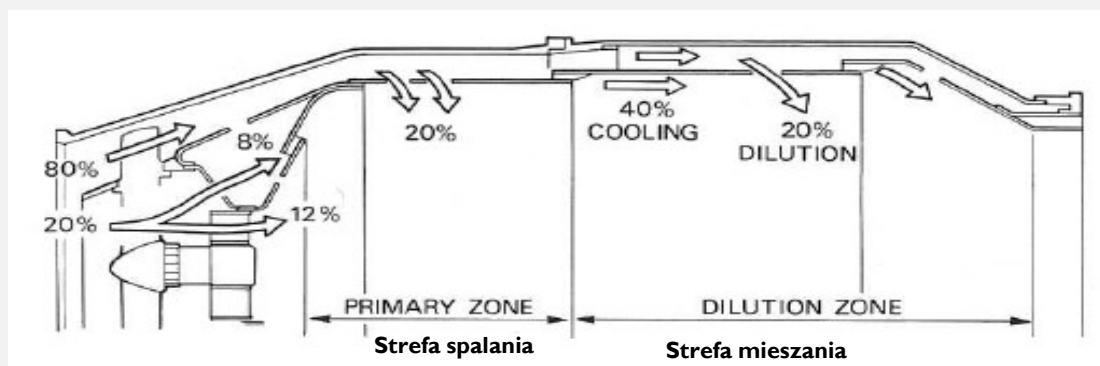


Cechy:

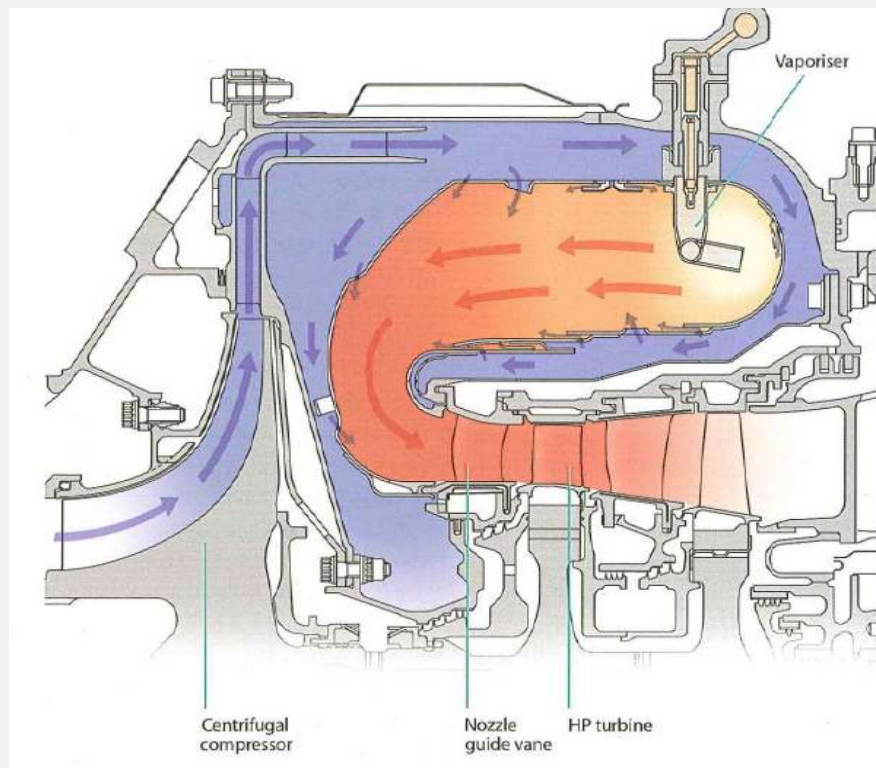
- Wysoka stateczność pracy,
- Mała masa
- Wysoka jednorodność pola temperatur na wejściu do turbiny
- Niskie opory przepływu



ZASADA DZIAŁANIA KOMORY SPALANIA



KOMORA SPALANIA O PRZEPLÝWIE ZWROTNYM



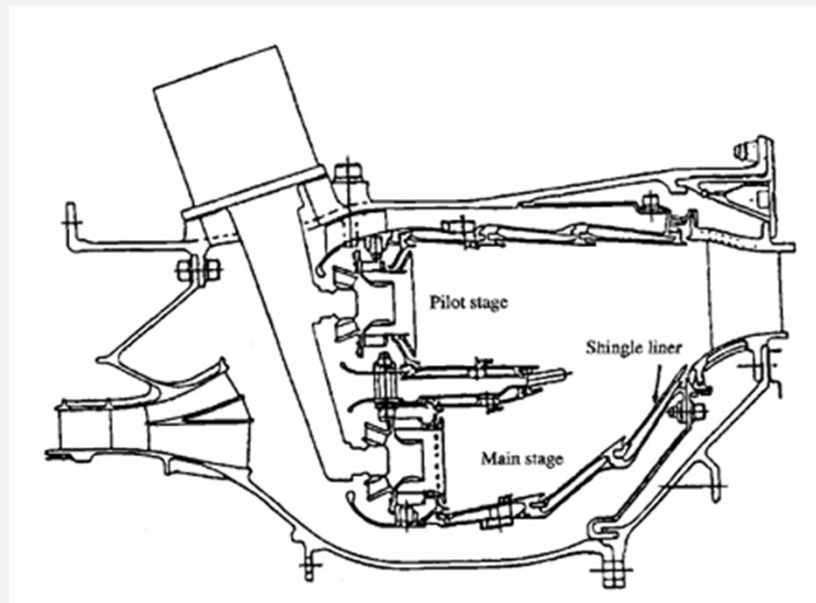
Cechy szczególne:

- Skrócenie wymiaru osiowego na rzecz rozbudowy promieniowej silnika
- Lepsze właściwości cieplne przez przeciwprądowe doprowadzenie strumienia powietrza ze sprężarki
- Większe straty przepływowe wskutek kilkukrotnej zmiany kierunku przepływu – wada

Zastosowanie: w mniejszych silnikach turbowentylatorowych, najczęściej gdy ostatni stopień sprężarki jest promieniowy.

KOMORA SPALANIA DWUSTREFOWA

- Komora zoptymalizowana na różne warunki pracy - w szerokim zakresie prędkości obrotowej
- Cechuje się obniżoną emisyjnością i wysoką sprawnością



Double-annular combustor

ZESPOŁY WYLOTOWE

W silnikach turbowentylatorowych o średnim dużym stopniu dwuprzepływowości występują dwie oddzielne dysze wylotowe dla kanału wewnętrznego (core nozzle) i zewnętrznego (bypass nozzle). Są to dysze zbieżne stałe osiowo-symetryczne. Ich rolą jest przyśpieszenie gazów wylotowych na skutek obniżania ciśnienia statycznego gazu wylotowego



TŁUMIENIE HAŁASU



Dla obniżenia emisji hałasu generowanego przez silnik na dyszy kanału zewnętrznego stosuje się specjalne ząbkowe zakończenie – shewron – do rozbijania strugi wylotowej i obniżania jej emisyjności akustycznej.

ODWRACACZE CIĄGU



Służą zmniejszeniu drogi hamowania
W dużych silnikach występują na
kanale zewnętrznym
W małych silnikach
turbowentylatorowych są stosowane
na obydwu kanałach



DYSZA ZBIEŻNO-ROZBIEŻNA REGULOWANA

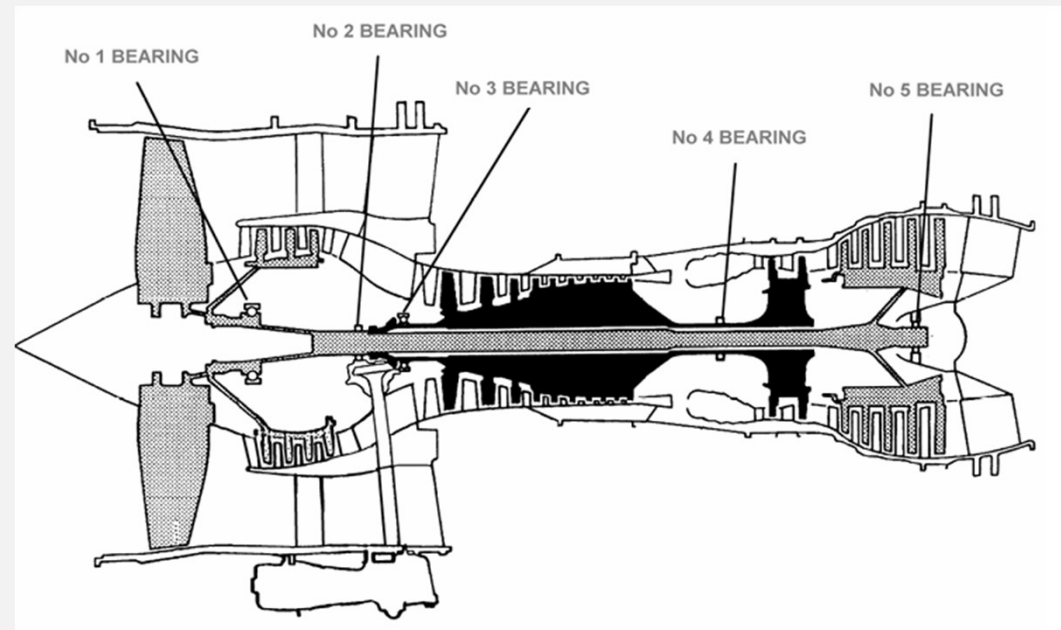
Dla silników turbowentylatorowych o małym stopniu dwuprzepływowości – do samolotów wojskowych stosuje się regulowane dysze zbieżno-rozbieżne

- Umożliwia adaptację przekrojów wylotowych do warunków pracy silnika – zmiana geometrii w zależności prędkości lotu.
- Jest wymagana w silniku z dopalaczem, żeby reagować na zmianę warunków pracy w wyniku włączenia dopalacza

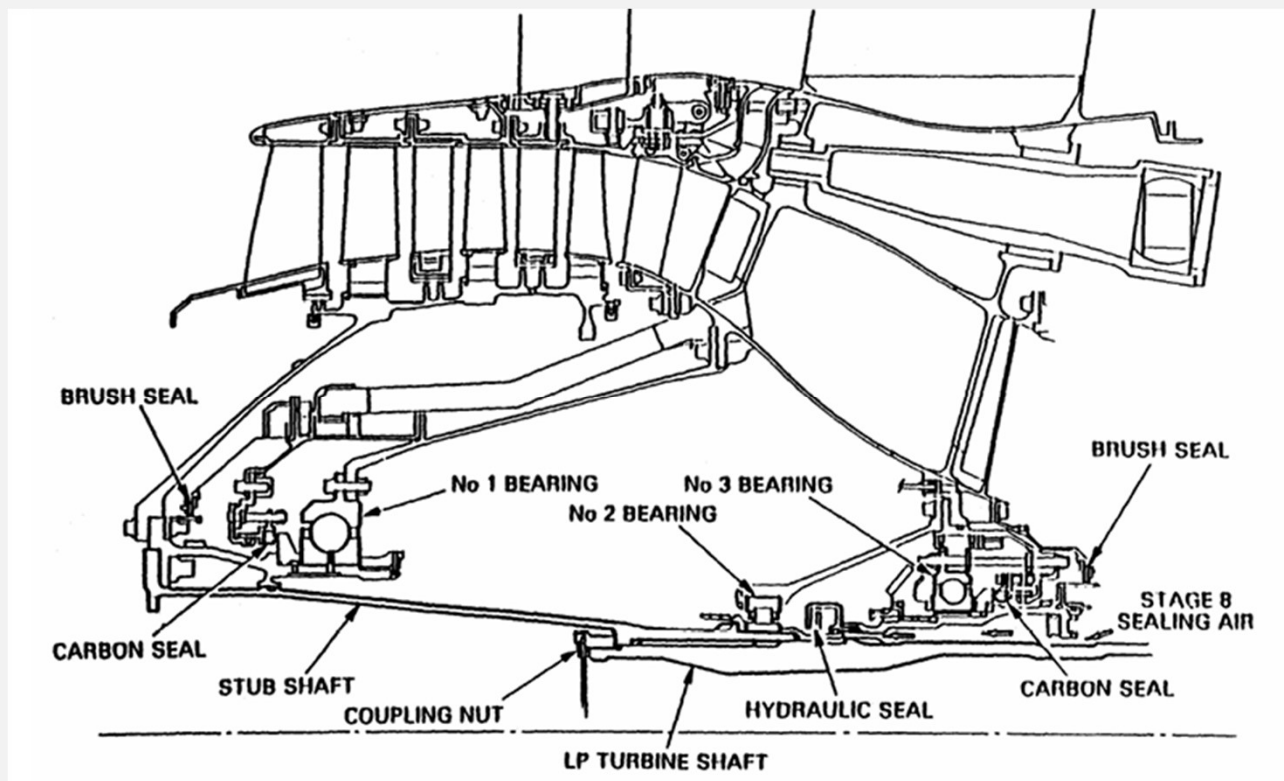


ŁOŻYSKOWANIE SILNIKA (KONSTRUKCJA DWUWIRNIKOWA)

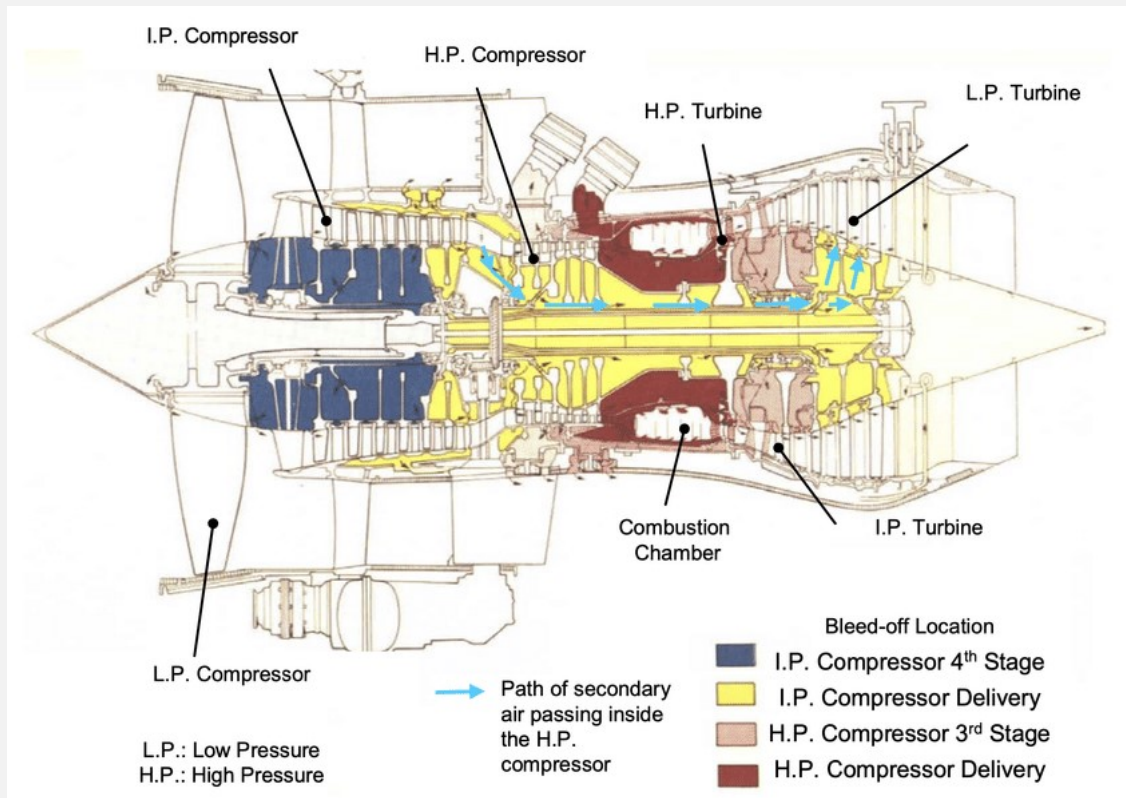
- Wał niskiego ciśnienia opiera się na łożyskach nr 1, 2 i 5
- Wał wysokiego ciśnienia opiera się na łożyskach 3 i 4
- Ilość i rodzaj łożysk robią konstrukcję statycznie wyznaczalną z punktu widzenia mechaniki: łożysko nr 1 i 3 są łożyskami oporowo-nośnymi. Pozostałe są łożyskami nośnymi (umożliwiają osiowe przemieszczanie się konstrukcji w celu kompensacji zmian wymiarowych konstrukcji w skutek zmian temperatury)



WIDOK ŁOŻYSKOWANIA PRZEDNIEJ CZĘŚCI WIRNIKA BEARING COMPARTMENT



OBIEG WTÓRNY POWIETRZA W SILNIKU SECONDARY AIR SYSTEM (SAS)



SAS Służy do:

- Uszczelniania elementów silnika
- Chłodzenia elementów silnika
- Odciążania elementów konstrukcji silnika – w tym obciążenia osiowego łożysk



**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



**WYDZIAŁ
BUDOWY MASZYN
I LOTNICTWA**
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ