

WLOTY I SPRĘŻARKI SILNIKÓW TURBINOWYCH

Dr inż. Robert Jakubowski

Literatura

Literatura:

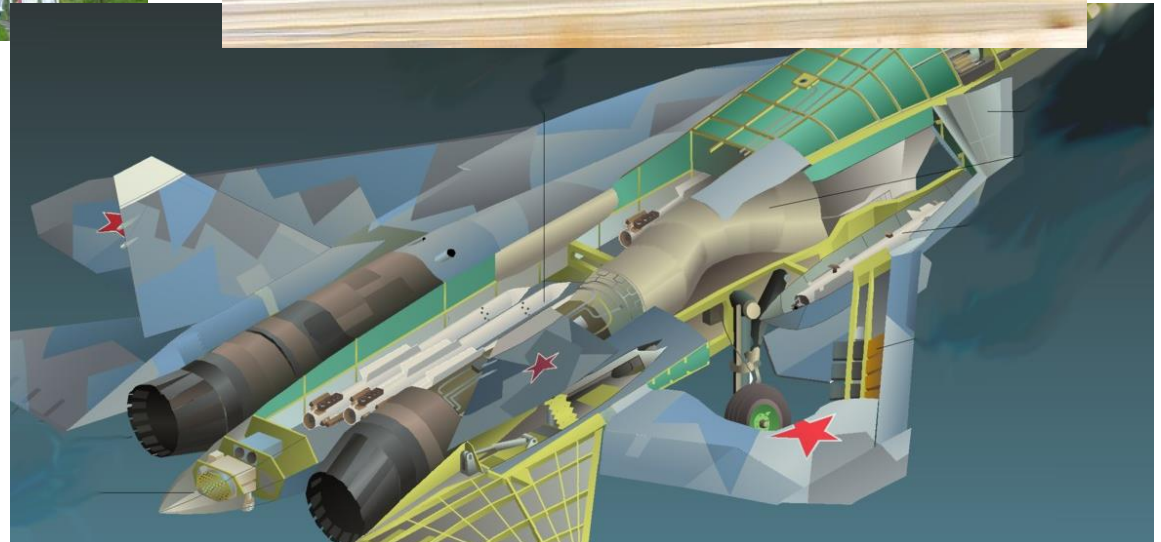
- [1] Balicki W. i in. Lotnicze silniki turbinowe, Konstrukcja – eksploatacja – diagnostyka, BNIL nr 30 n, 2010
- [2] Dzierżanowski P. i in., Turbinowe silniki odrzutowe, WKŁ 1983 [rozd. 2]
- [2] Gajewski , Lesikiewicz, Szymanik , Przepływowe silniki odrzutowe , WNT 1973
- [3] Mattingly J.D., Elements of Propulsions, Gas Turbines and Rockets

Wlot silnika

- Jest elementem integrującym silnik z płatowcem
 - Jest elementem silnika
 - Jest elementem gondoli silnikowej
 - Jest elementem płatowca

Jego zadaniem jest dostarczenie odpowiedniej ilości powietrza do silnika z możliwie małymi stratami przepływowymi, o określonym profilu prędkości, oraz w przypadku warunków przelotowych także jego wstępne sprężenie.

Wloty silników lotniczych



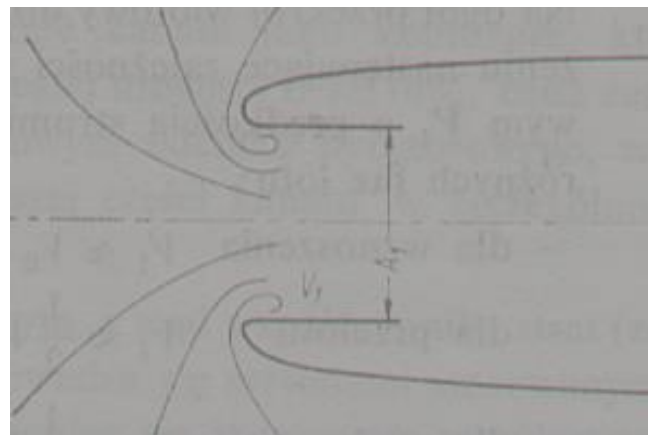
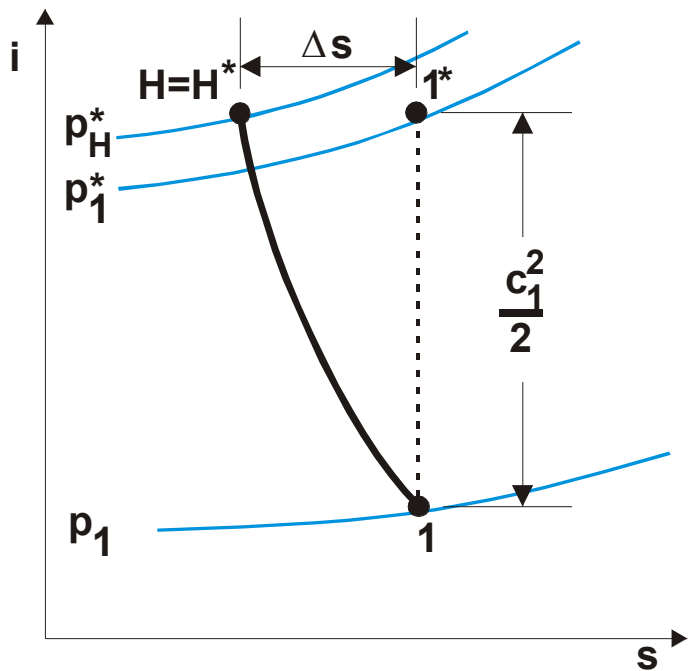
WLOT

- Ze względu na pracę wlotu można wyróżnić
 - Pracę z prędkością lotu mniejszą do prędkości strumienia powietrza w gardzieli dyszy
 - Pracę z prędkości lotu równą prędkości strumienia w dyszy
 - Pracę z prędkością lotu większą od prędkości strumienia w dyszy

Zagadnienie opracowano na podstawie [1]

Wlot - praca w warunkach statycznych

DLA PRĘDKOŚCI LOTU 0



Zmiana entalpii we wlocie

$$i_1^* = i_H^* = c_p \cdot T_H^*$$

$$T_1^* = T_H^*$$

Proces we wlocie jest
IZENTALPOWY

Współczynnik strat ciśnienia we wlocie

$$\sigma_{wl}^* = \frac{p_1^*}{p_H^*}$$

Przyrost entropii

$$\Delta s = s_1^* - s_H^* = R \ln \frac{1}{\sigma_{wl}^*}$$

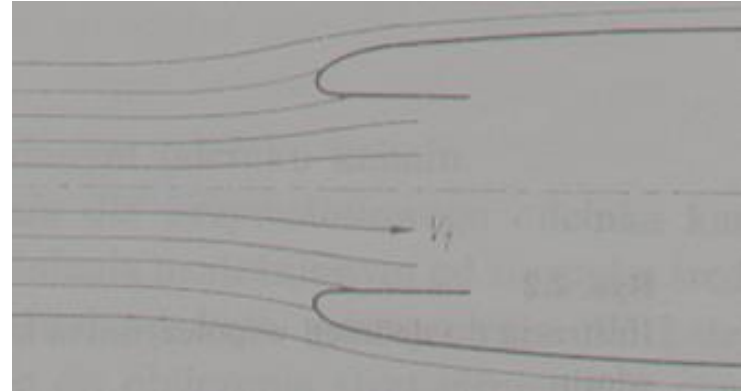
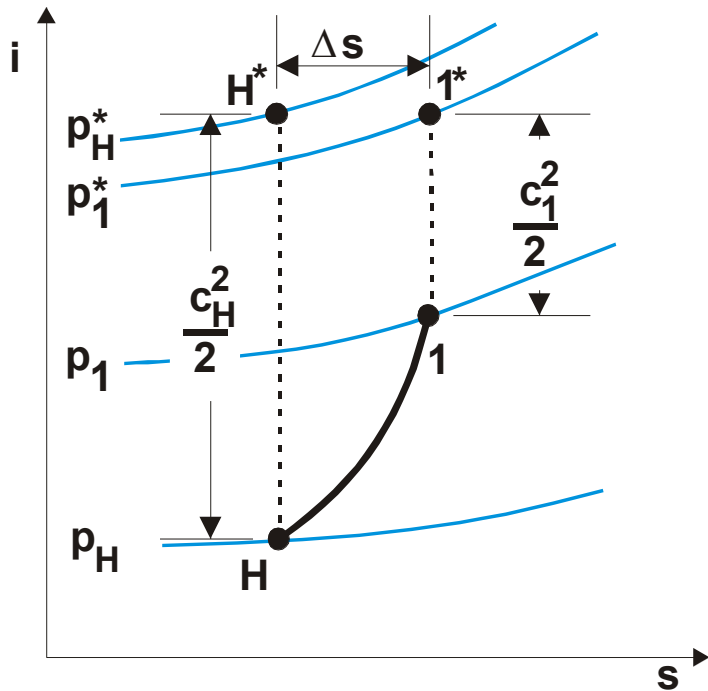
$$\Delta p^* = p_H^* - p_1^* = \sum \Delta p_{lin}^* + \sum \Delta p_{lok}^*$$

$\sum \Delta p_{lin}^*$ - suma strat liniowych

$\sum \Delta p_{lok}^*$ - suma strat lokalnych

Wlot - praca w warunkach przelotowych

DLA WARUNKÓW PRZELOTOWYCH

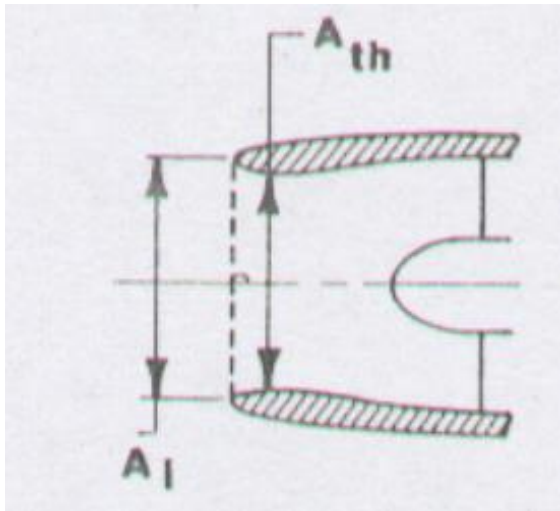


Spręż dynamiczny

$$\pi_{dyn} = \frac{p_H^*}{p_H} = \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma^2 \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

Podział wlotów ze względu na prędkość przelotową silników

WLOTY PODDŹWIĘKOWE



Pole powierzchni wlotu - równanie ciągłości

$$A = \frac{\dot{m}}{\rho c}$$

A - Pole powierzchni wlotu

\dot{m} - Wydatek masowy powietrza we wlocie

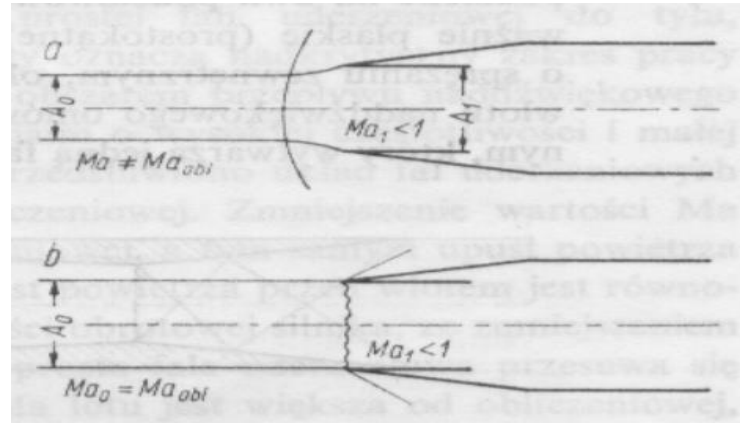
ρ - Gęstość powietrza we wlocie

c - Prędkość powietrza we wlocie



Wloty naddźwiękowe

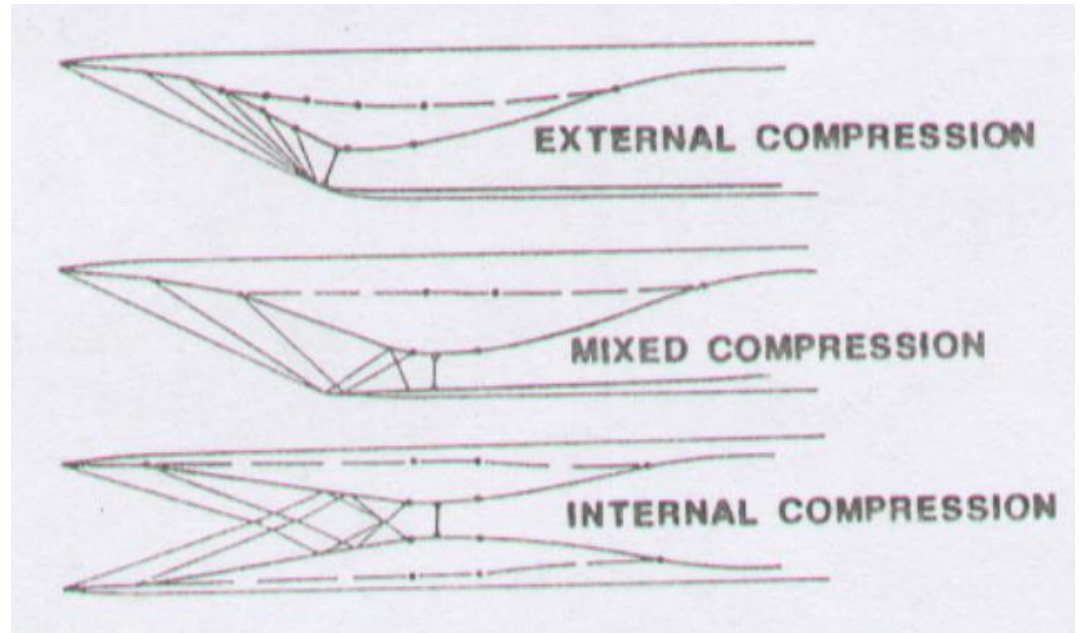
W zakresie niedużych prędkości naddźwiękowych



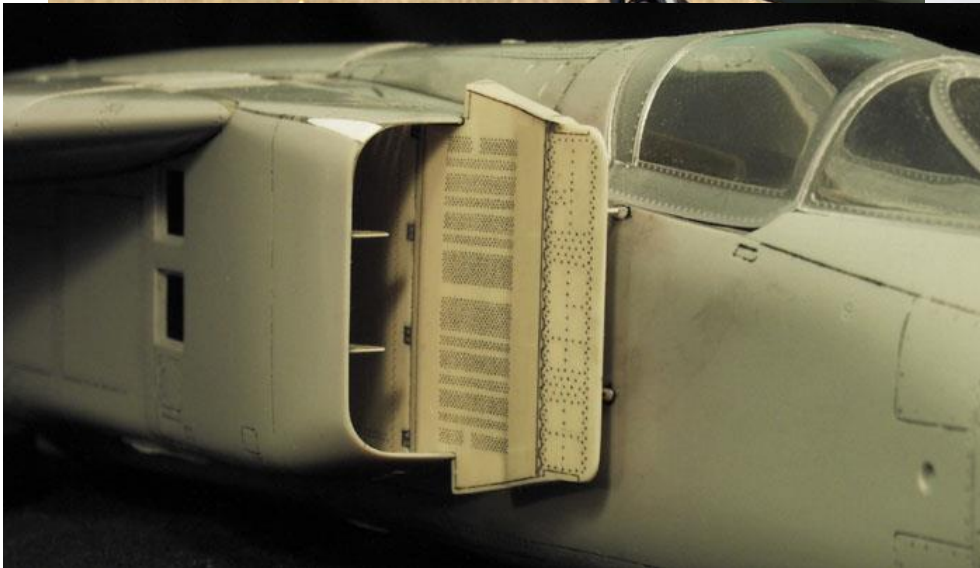
O sprężaniu zewnętrznym

O sprężaniu mieszanym

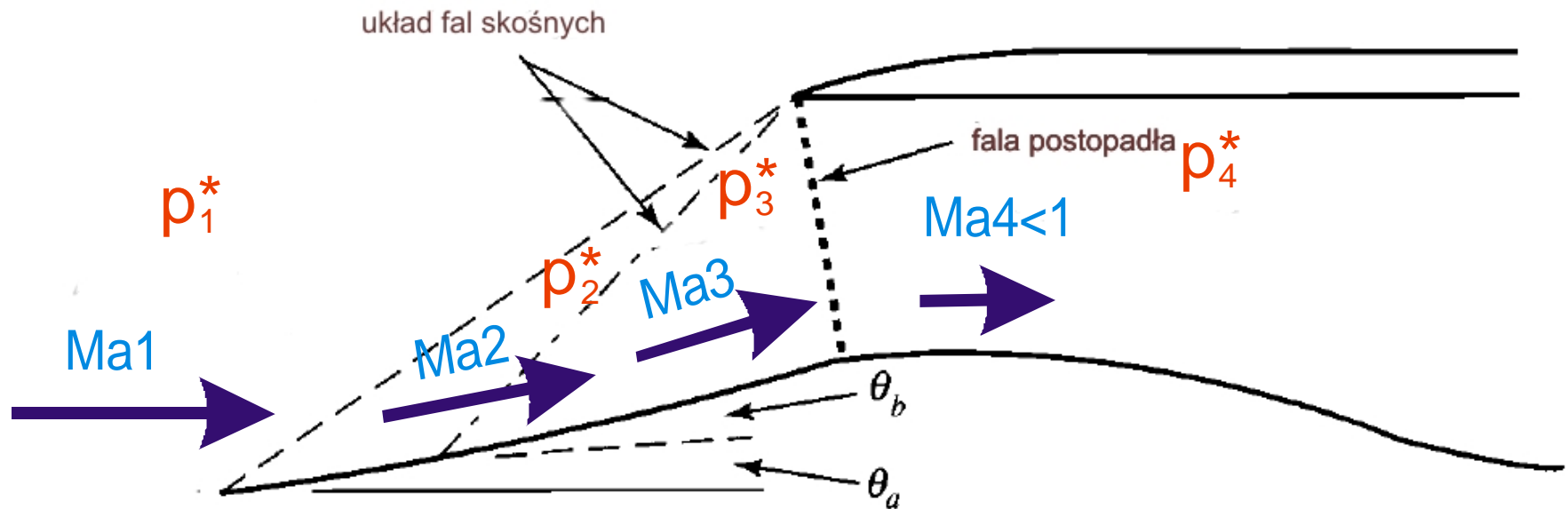
O sprężaniu wewnętrznym



Przykłady wlotów naddźwiękowych



Zasada pracy wlotu naddźwiękowego



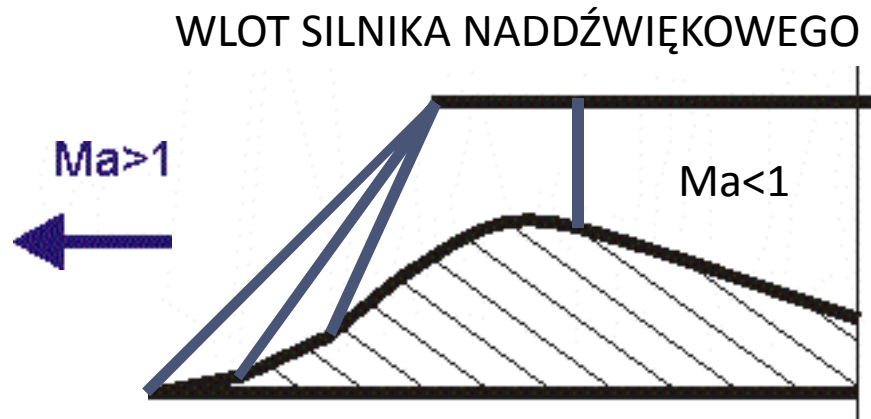
$$p_1^* = p_H \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma_1^2\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$Ma_1 > Ma_2 > Ma_3 > 1 > Ma_4$ - wyhamowanie strumienia w układzie fal uderzeniowych

$p_1^* > p_2^* > p_3^* > p_4^*$ - straty ciśnienia całkowitego na falach

$p_1 < p_2 < p_3 < p_4$ - przyrost ciśnienia statycznego

Praca wlotu przy dużej prędkości nadźwiękowej



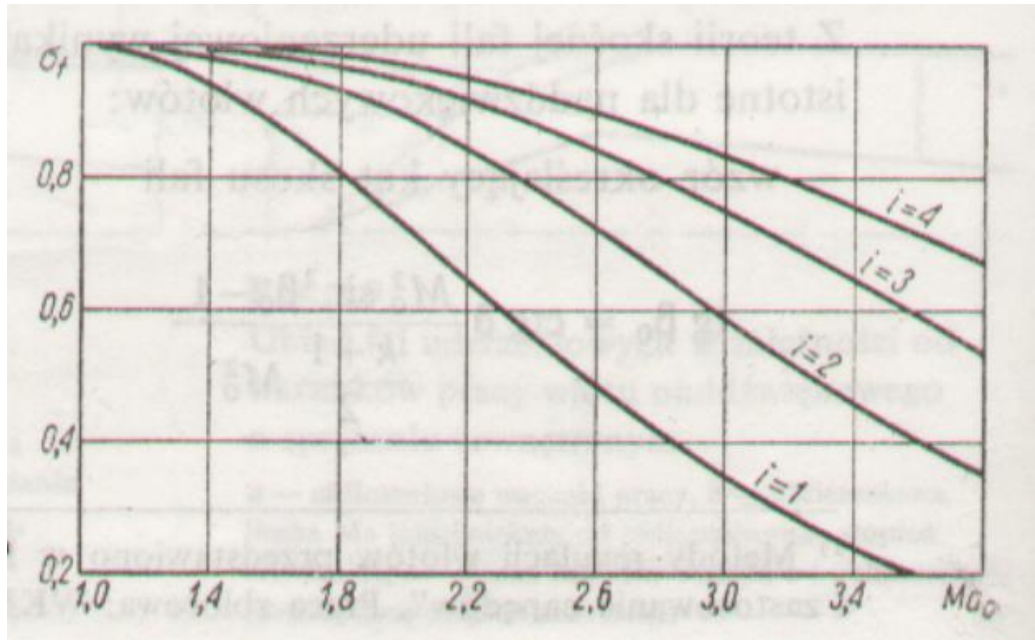
Spręż dynamiczny idealny

$$\pi_{dyn} = \frac{p_H^*}{p_H} = \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma^2\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

Przyrost ciśnienia we wlocie

$$\frac{p_1^*}{p_H} = \sigma_{WL}^* \cdot \pi_{dyn} = \sigma_{KAN_WL}^* \cdot \sigma_{fal}^* \cdot \pi_{dyn} \quad \sigma_{fal}^* = f(M_2 / M_1, \Theta)$$

Wpływ prędkości lotu na starty we wlocie

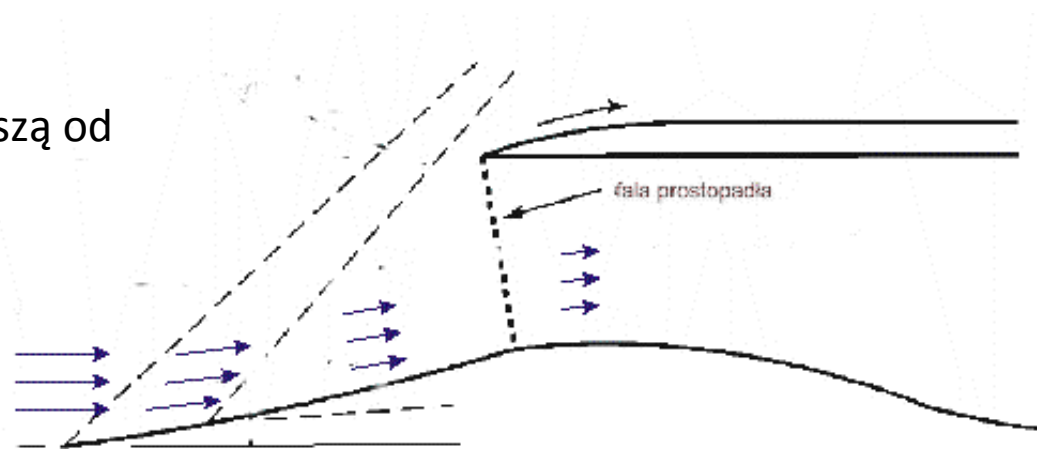


Prędkość lotu Ma	Spręż dynamiczny		
	idealny	i=1	i=3
1	1,89	1,89	1,89
1,5	3,67	3,41	3,63
2	7,82	5,47	7,43
2,5	17,09	8,55	15,04
3	36,73	12,86	27,55

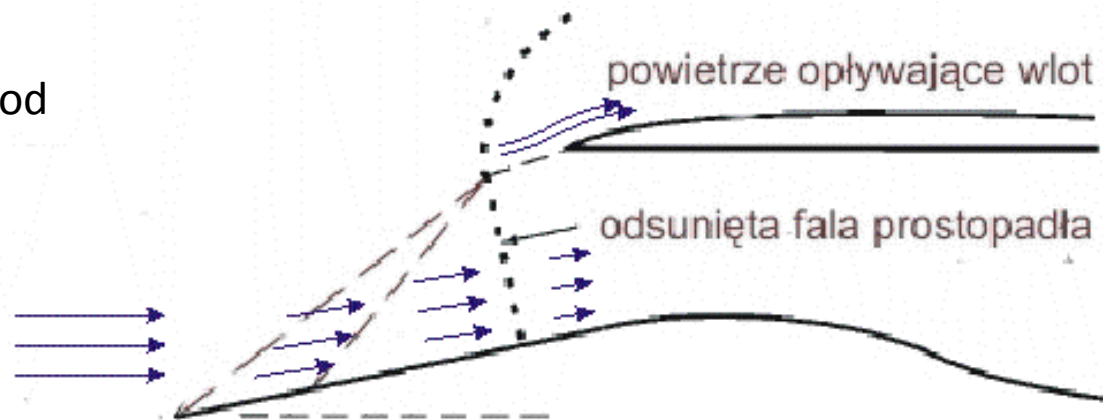
Zależność współczynnika strat falowych od prędkości lotu i liczby fal uderzeniowych i prędkości lotu [1]

Praca wlotu w warunkach pozaobliczeniowych

Praca z prędkością lotu naddźwiękową, ale mniejszą od wartości obliczeniowej



Praca z prędkością lotu naddźwiękową większą od wartości obliczeniowej



Parametry charakteryzujące pracę wlotu

Współczynnik siły oporu dodatkowego wlotu:

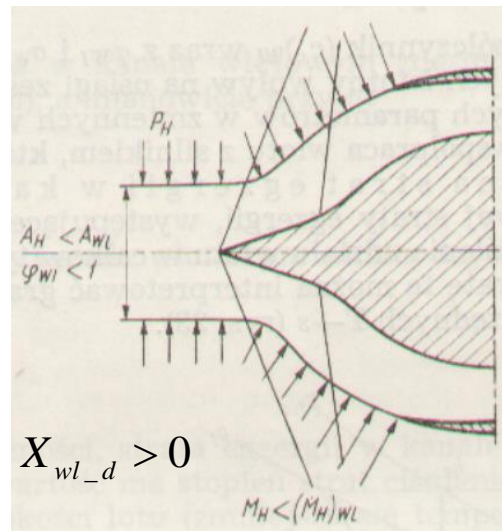
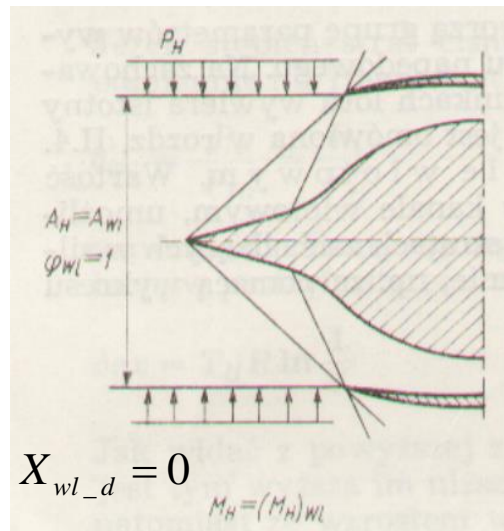
$$C_{X_{wl_d}} = \frac{2X_{wl_d}}{\rho_H A_{wl} V_H^2}$$

$$X_{wl_d} = \int_{A_H}^{A_{wl}} (p - p_H) dA$$

Siła oporów tarcia gondoli: X_T

Ciąg efektywny:

$$K_e = K - X_{wl_d} - X_T$$



Stopień przewężenia strumienia we wlocie:

$$\phi_{wl_d} = A_{wl} / A_H$$

$$\phi_{wl_d} \leq 1 \Rightarrow C_{X_{wl_d}} = 0$$

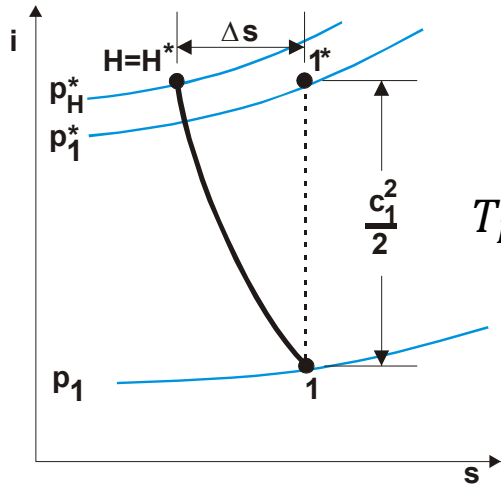
$$\phi_{wl_d} > 1 \Rightarrow C_{X_{wl_d}} > 0$$

Spręż dynamiczny wlotu:

$$\pi_{wl_dyn}^* = p_1^* / p_H$$

Problemy oblodzenia wlotu śmigłowca

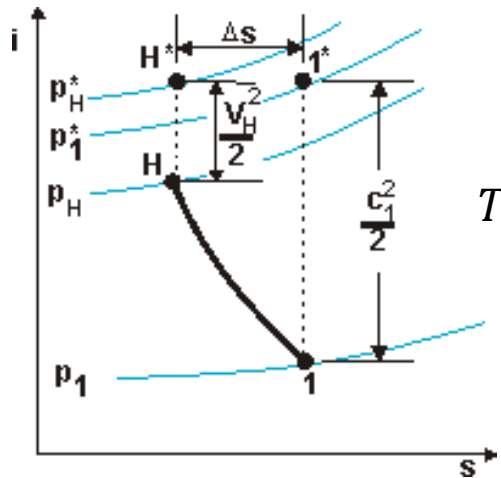
DLA PRĘDKOŚCI LOTU 0



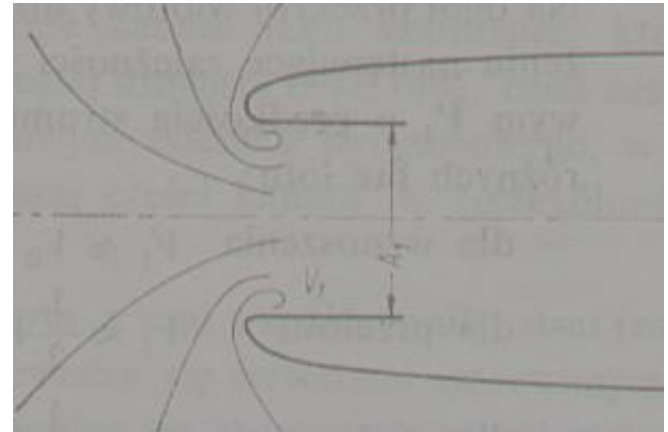
$$T_H = T_1 + \frac{c_1^2}{2 c_p}$$



DLA PRĘDKOŚCI LOTU WIĘKSZEJ OD 0



$$T_H + \frac{V_H^2}{2 c_p} = T_1 + \frac{c_1^2}{2 c_p}$$



Przykład obliczeniowy

Temperatura otoczenia wynosi 8C (281 K). Obliczyć jaka temperatura będzie we wlocie gdy strumień powietrza ma we wlocie ma prędkość 180 m/c, zaś śmigłowiec a) nie porusza się, b) porusza się z prędkością 150 km/h

a)

$$T_1 = T_H - \frac{c_1^2}{2 c_p} = 281 - \frac{180^2}{2 * 1000} = 265 K = -8 C$$

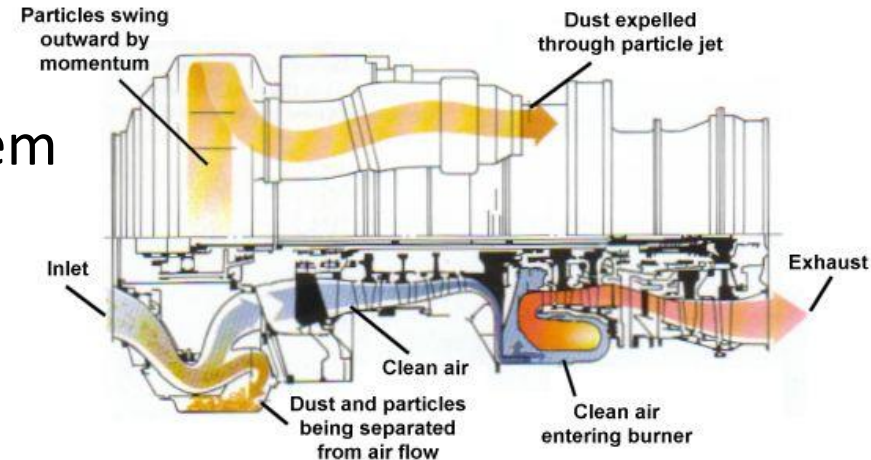
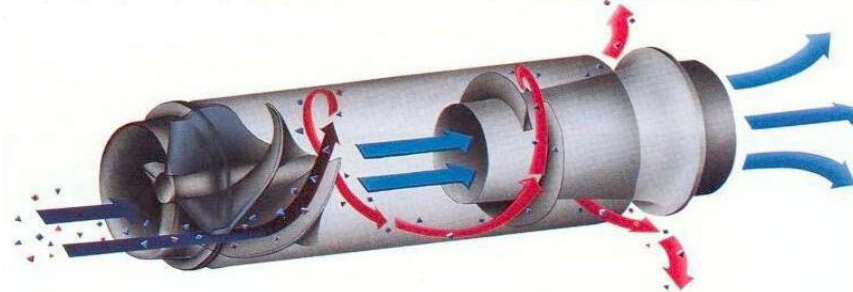
b)

$$V_H = 150 \frac{km}{h} = 41,67 m/s$$

$$T_1 = T_H + \frac{V_H^2}{2 c_p} - \frac{c_1^2}{2 c_p} = 281 + \frac{41,67^2}{2 * 1000} - \frac{180^2}{2 * 1000} = 266 K = -8 C$$

Dodatkowe zadania wlotu

- Ochrona silnika przed pyłem i kurzem

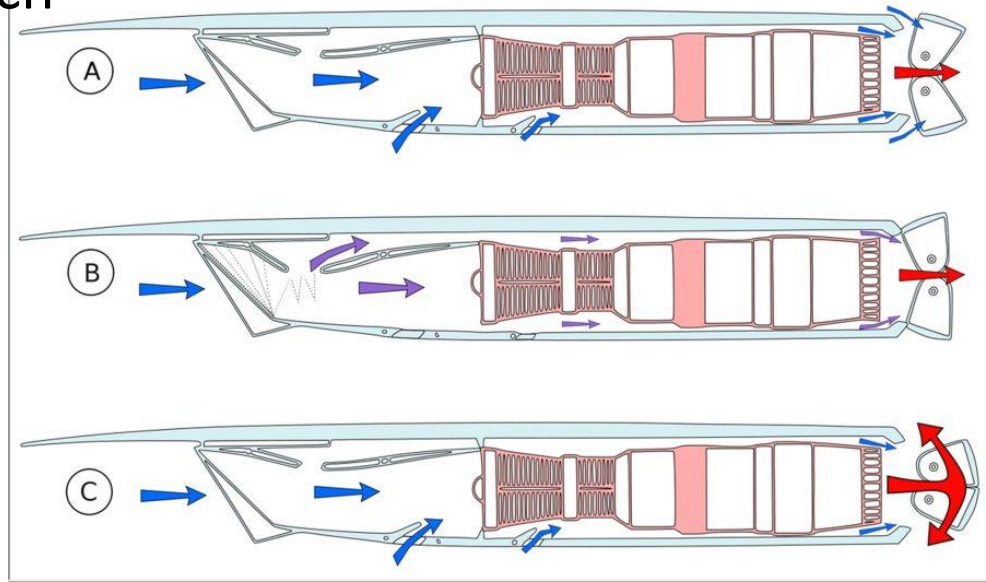


- Ustatecznianie pracy silnika dla różnych warunków lotu

a) Dla warunków startowych

b) Dla warunków lotu z dużymi prędkościami

c) Dla pracy z włączonym odwracaczem ciągu

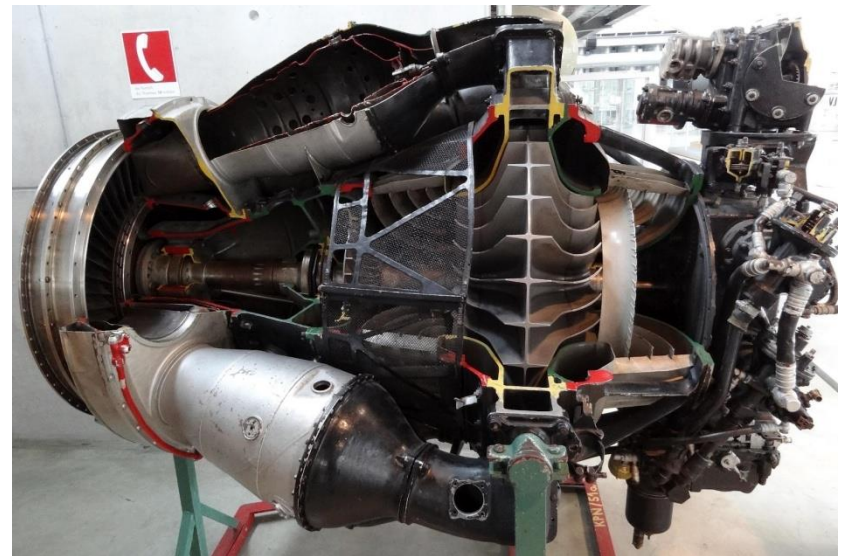
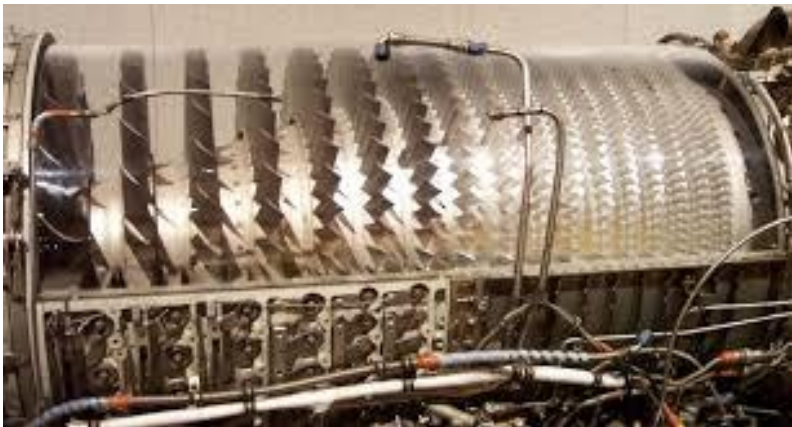


SPRĘŻARKA

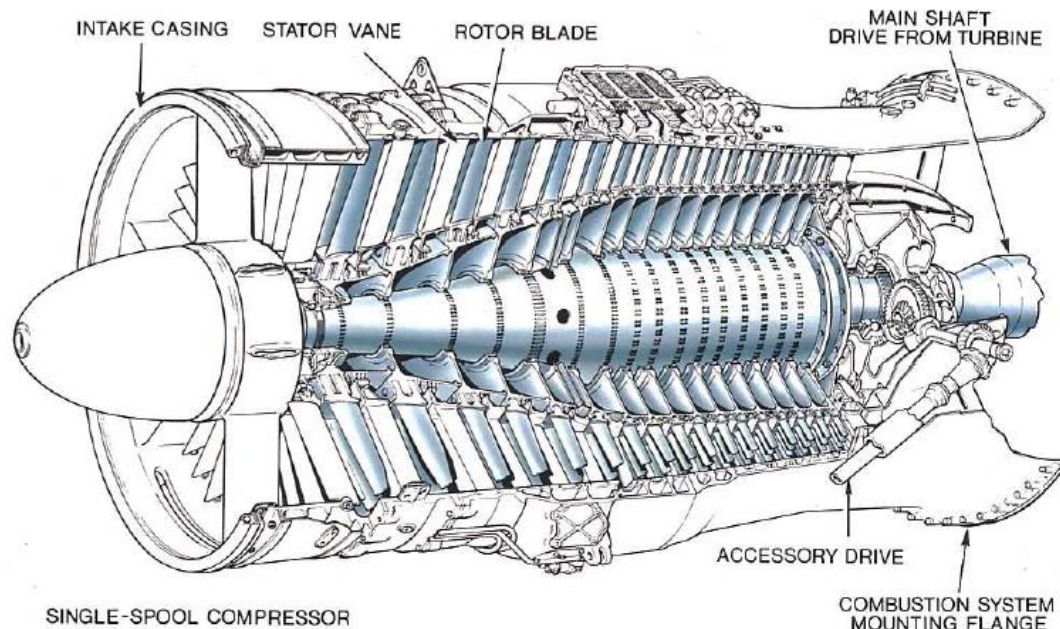
Ma zadanie zwiększyć ciśnienie strumienia powietrza przepływającego w silniku z możliwie jak najwyższą sprawnością, przy zachowaniu stateczności procesu w szerokim zakresie zmian prędkości wirowania wirnika sprężarki i prędkości lotu

Podział sprężarek

- Sprężarki osiowe
- Sprężarki promieniowe/odśrodkowe
- Sprężarki osiowo-odśrodkowe



Podział sprężarek – sprężarka osiowa



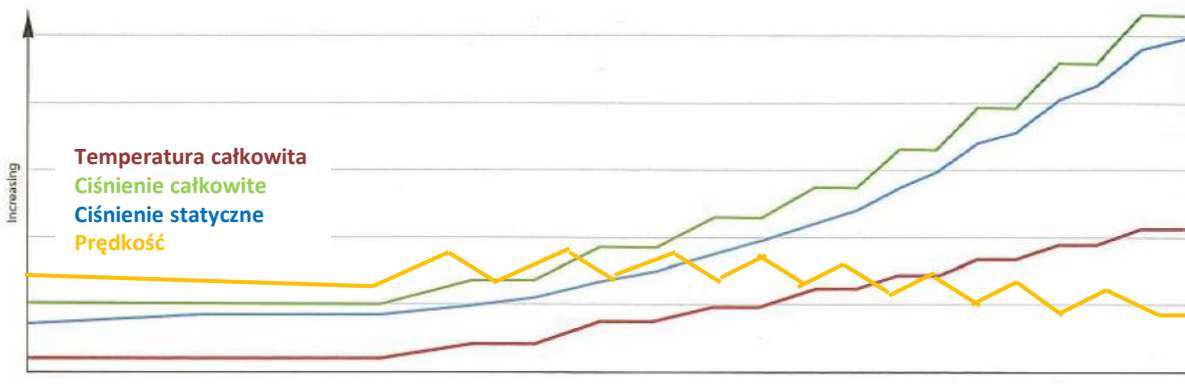
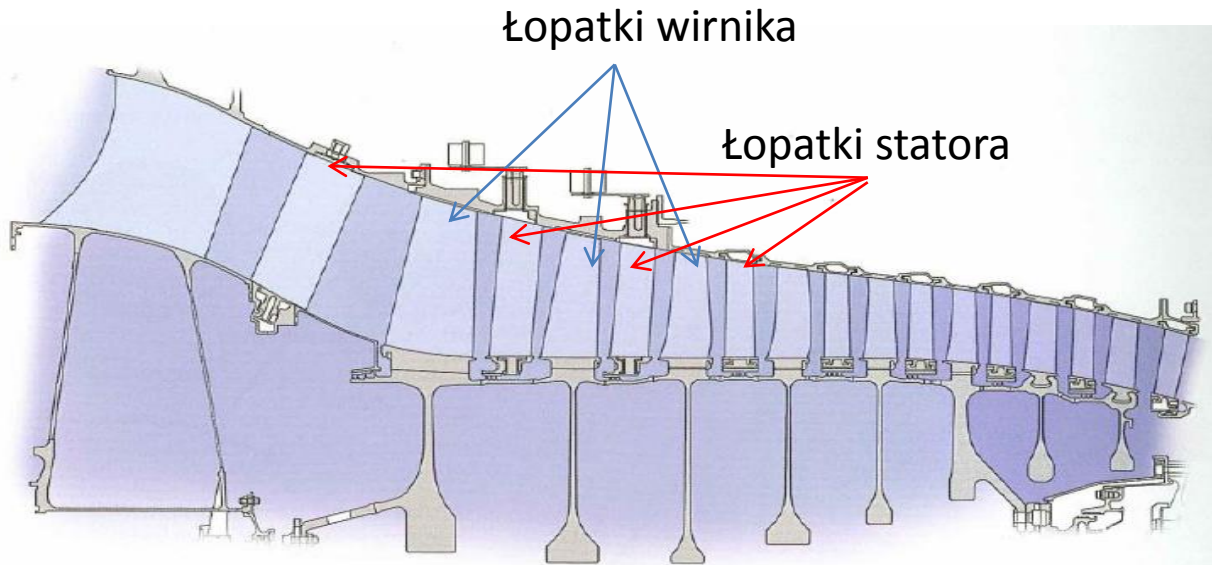
Zalety:

- możliwość uzyskania wysokiego sprężu sumarycznego
- duże przepływy powietrza

Wady:

- niski spręż na pojedynczym stopniu
- mała sprawność krótkich łopatek

Zmiany ciśnienia i prędkości w sprężarce osiowej



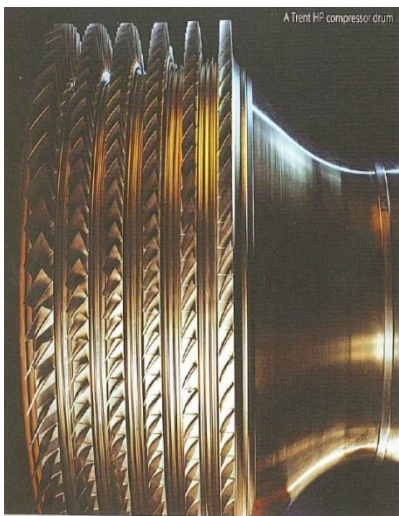
Wartość temperatury za sprężarką dla wysokości 0 m

Spręż sprężarki	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

Elementy sprężarki



Tarcza sprężarki z łopatkami



Bęben sprężarki z łopatkami

Labirynty uszczelniający



Łopatkami



Obudowa zewnętrzna sprężarki z łopatkami

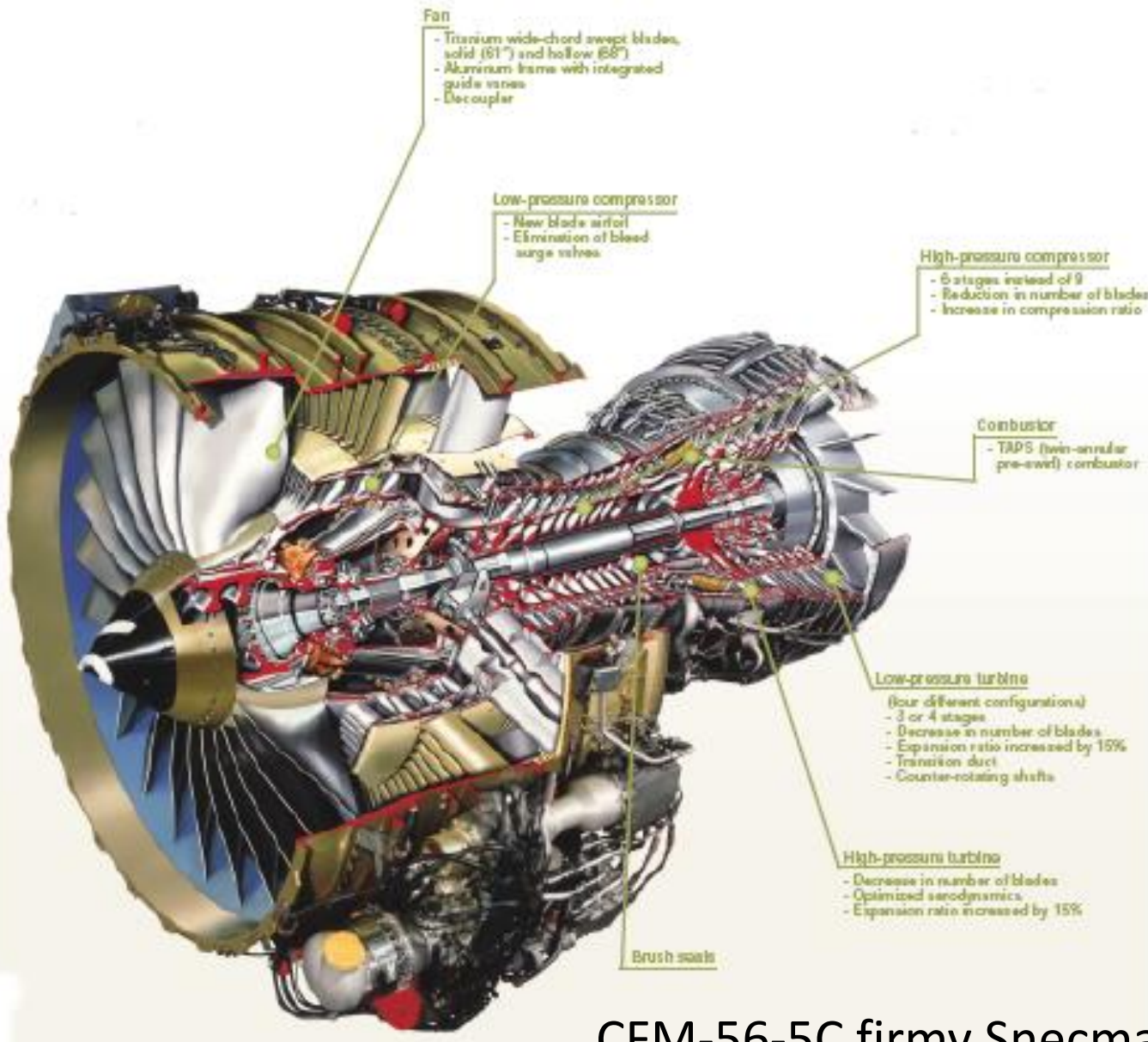


Łopatkami statora regulowane

Łopatkami statora stałe

Łopatkami wirnika

Wentylator

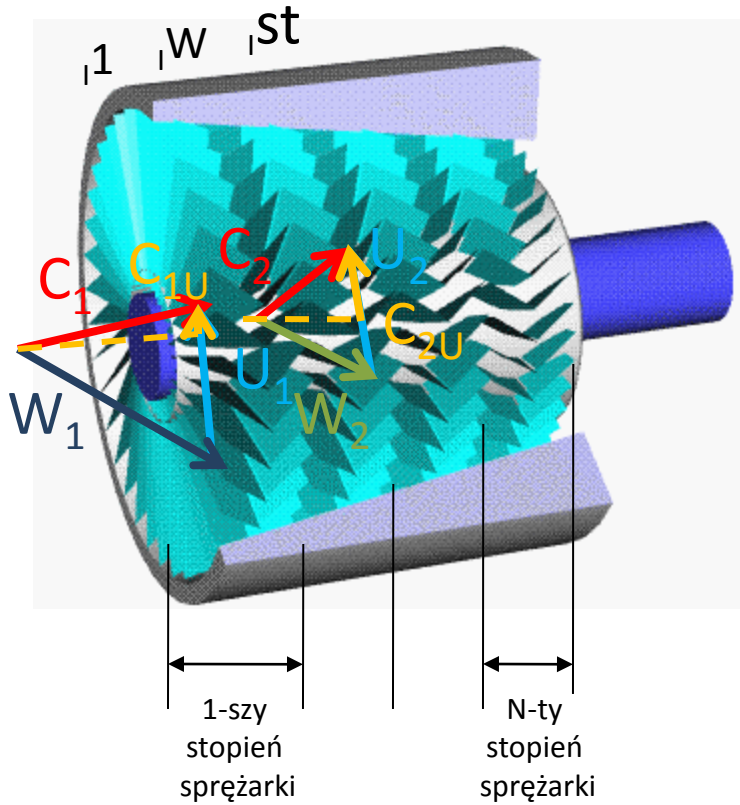


Hollow wide-chord swept blade.



CFM-56-5C firmy Snecma

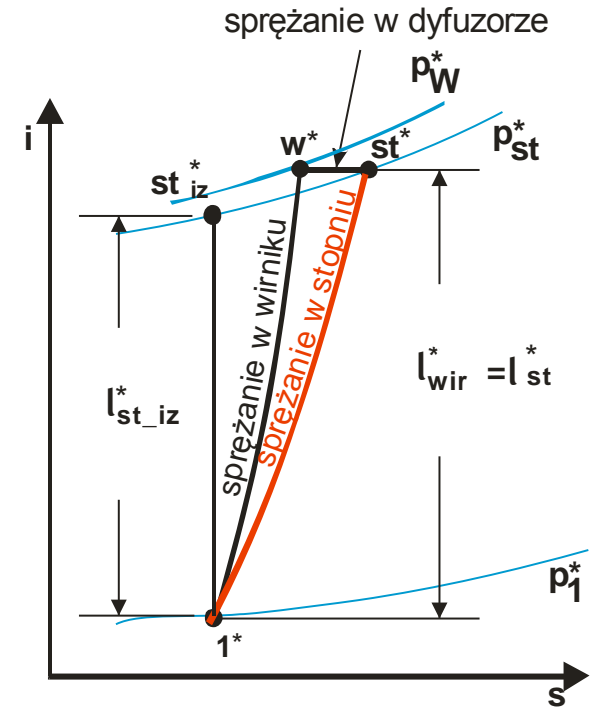
Sprężarka osiowa



Praca stopnia sprężarki:

$$l_{st}^* = c_p (T_{st}^* - T_1^*) = U (C_{2U} - C_{1U})$$

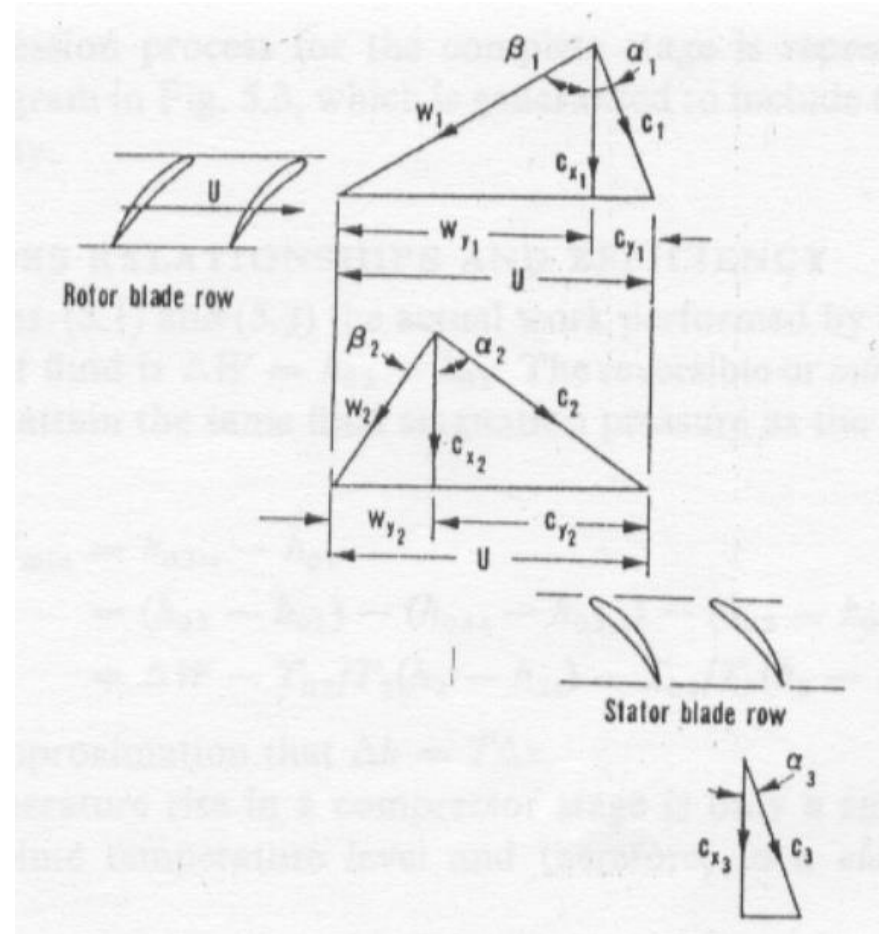
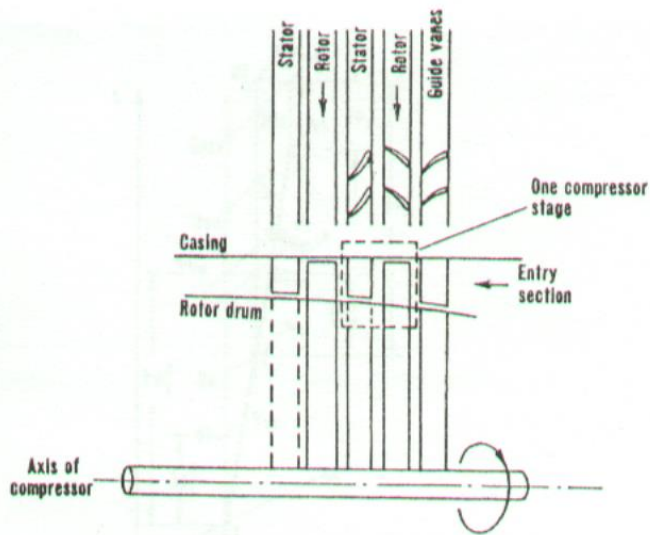
CHARAKTERYSTYKA PRACY STOPNIA SPRĘŻARKI



Sprawność stopnia sprężarki:

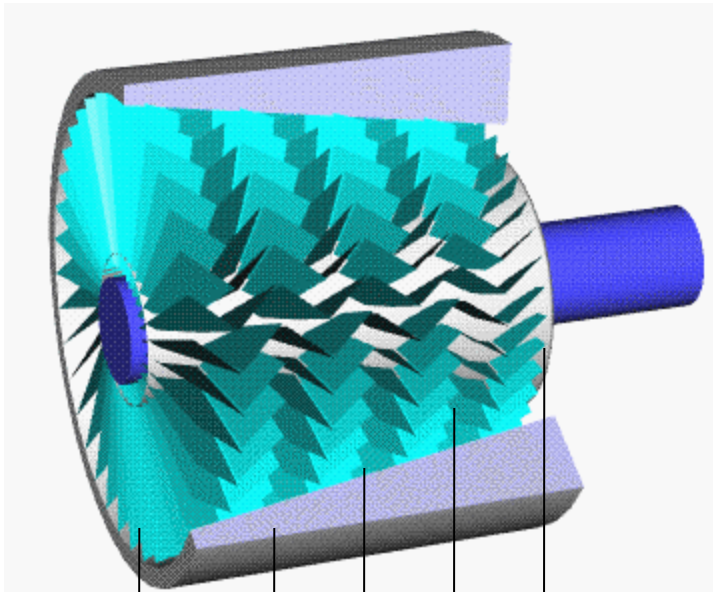
$$\eta_s^* = \frac{l_{st_iz}^*}{l_{st}^*} = \frac{i_{st_iz}^* - i_1^*}{i_{st}^* - i_1^*}$$

Przeptyw przez sprężarkę osiową



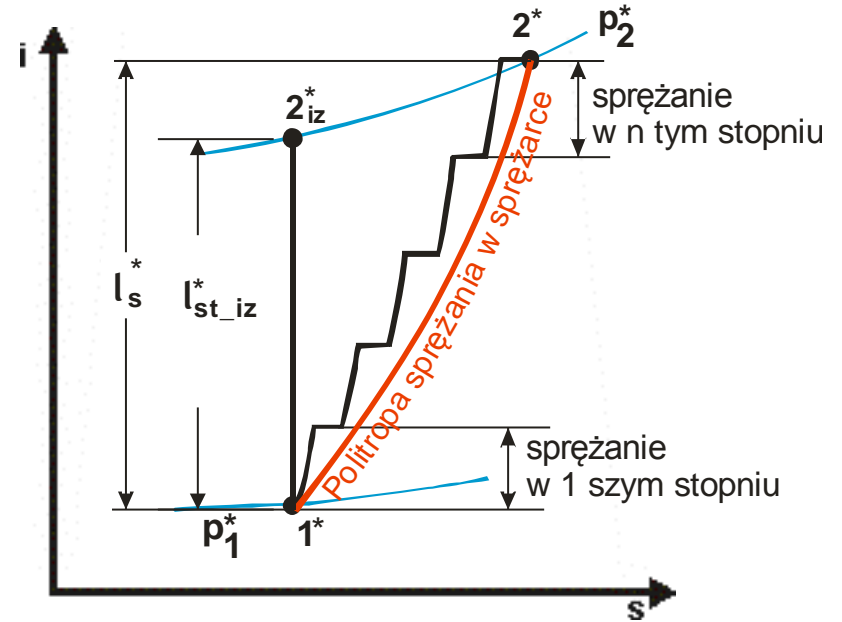
Sprężarka osiowa

CHARAKTERYSTYKA PRACY SPRĘŻARKI



1-szy stopień sprężarki

N-ty stopień sprężarki



Sprawność izentropowa sprężarki:

$$\eta_s^* = \frac{l_{s_iz}^*}{l_s^*} = \frac{i_{2_iz}^* - i_1^*}{i_2^* - i_1^*}$$

Praca sprężarki:

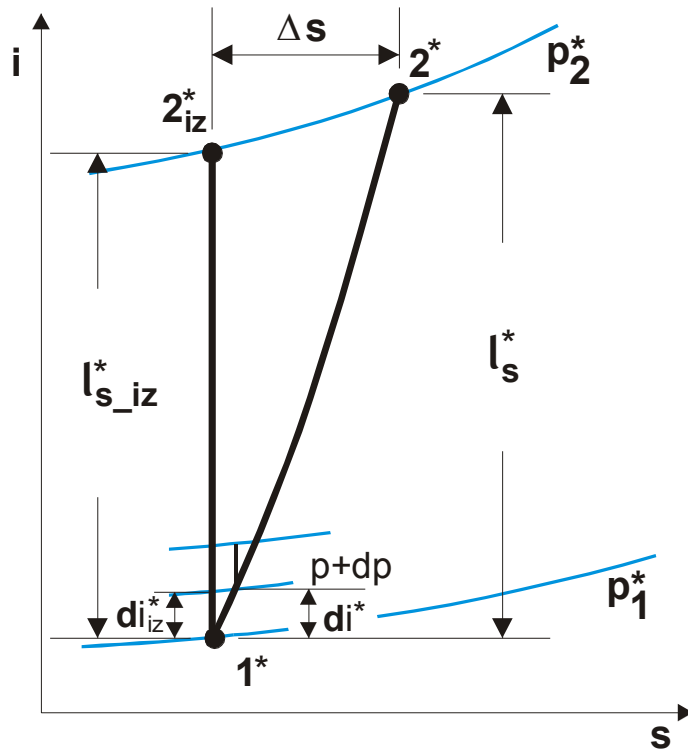
$$l_s^* = \sum_{i=1}^n l_{st}^* = c_p (T_2^* - T_1^*)$$

Spręż sprężarki:

$$\pi_s^* = \prod_{i=1}^n \pi_{st}^*$$

$$\eta_s^* = \frac{\left(\prod_{i=1}^n \pi_{st_i}^* \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^{i-1} \left(\frac{\pi_{st_j}^{*\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_{st_j}^*} + 1 \right) \frac{\pi_{st_i}^{*\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_{st_i}^*} \right)}$$

Procesy termo-gazodynamiczne w sprężarce



Przyrost entalpii w sprężarce:

$$i_2^* = i_1^* + l_s^*$$

Sprawność sprężarki:

izentropowa $\eta_s^* = \frac{l_{s_iz}^*}{l_s^*} = \frac{i_{2_iz}^* - i_1^*}{i_2^* - i_1^*}$

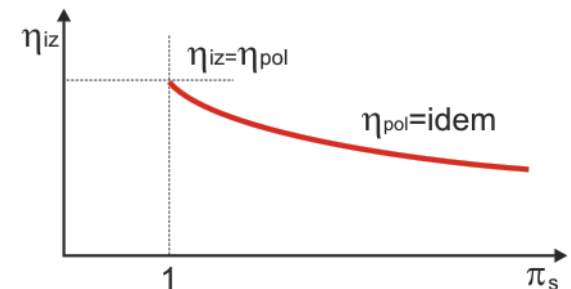
politropowa $\eta_{s_pol}^* = \frac{di_{iz}^*}{di^*} = \frac{k-1}{k} \frac{\ln \frac{p_2^*}{p_1^*}}{\ln \frac{T_2^*}{T_1^*}}$

Zależność zmiany temperatury od sprężu sprężarki:

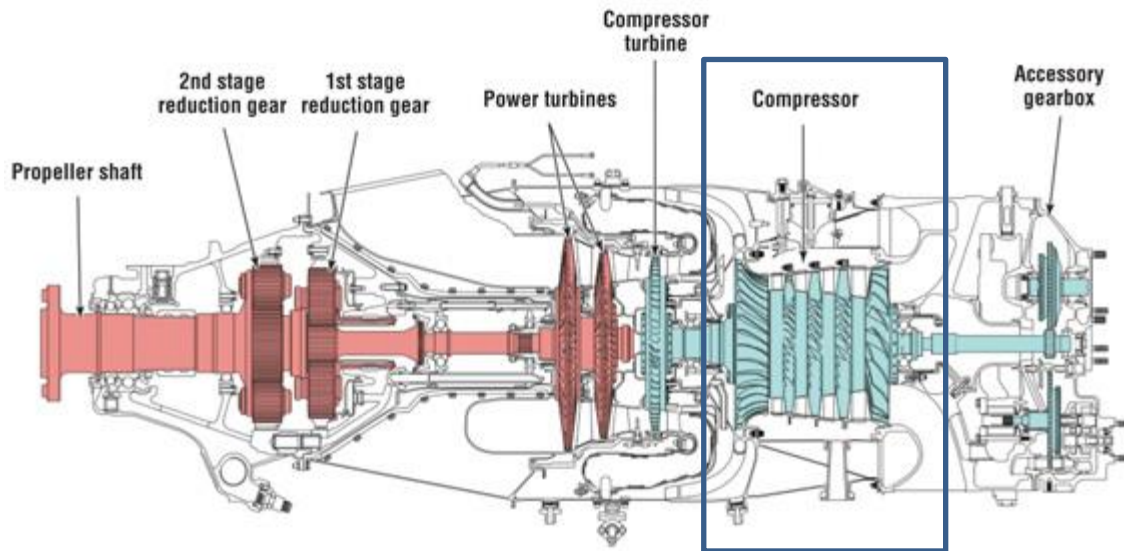
$$T_2^* = T_1^* \left(1 + \frac{\pi_s^{*\frac{\bar{k}-1}{k}} - 1}{\eta_{s_iz}^*} \right)$$

$$T_2^* = T_1^* \pi_s^{*\frac{k-1}{k \cdot \eta_{s_pol}^*}}$$

Zależność sprawności izentropowej sprężania od sprężu dla stałej sprawności politropowej



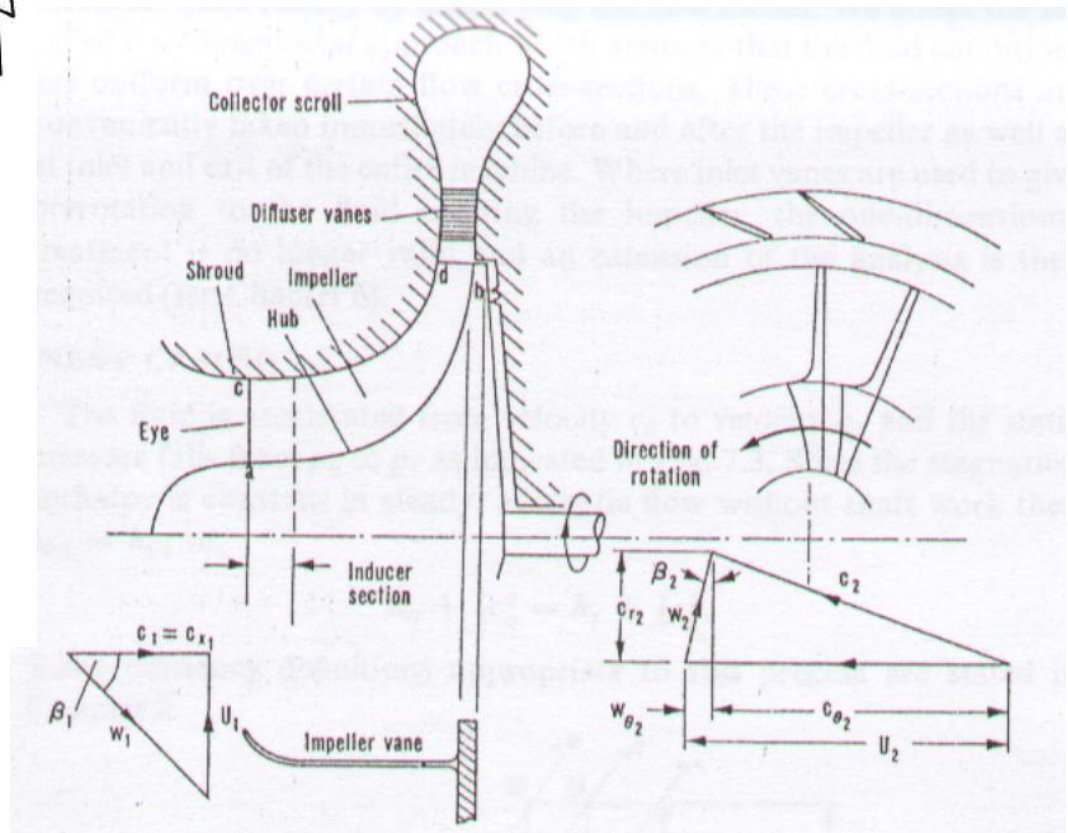
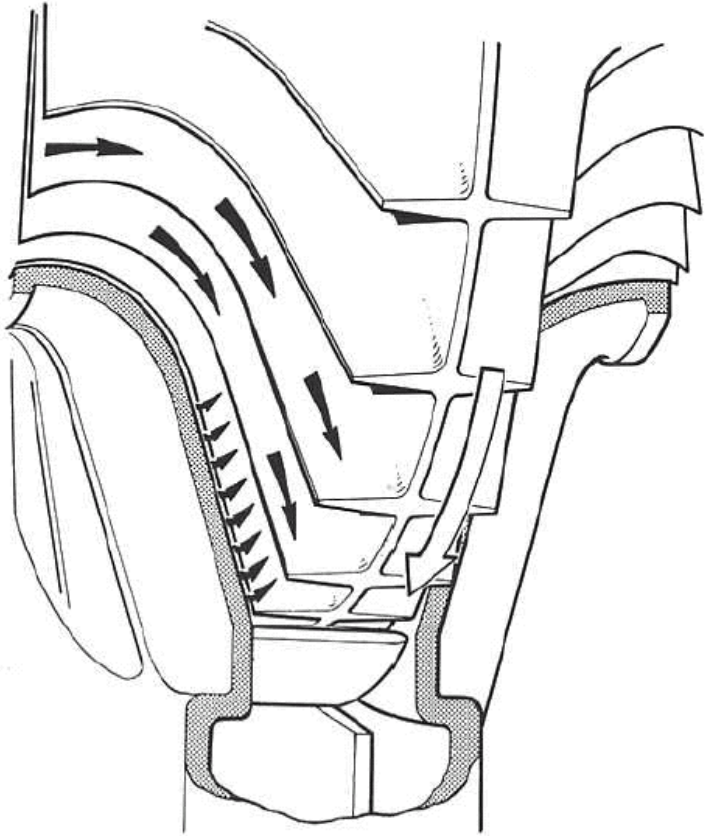
Sprężarki promieniowe lub osiowo- promieniowe w lotnictwie



ZALETY SPRĘŻARKI PROMIENIOREJ

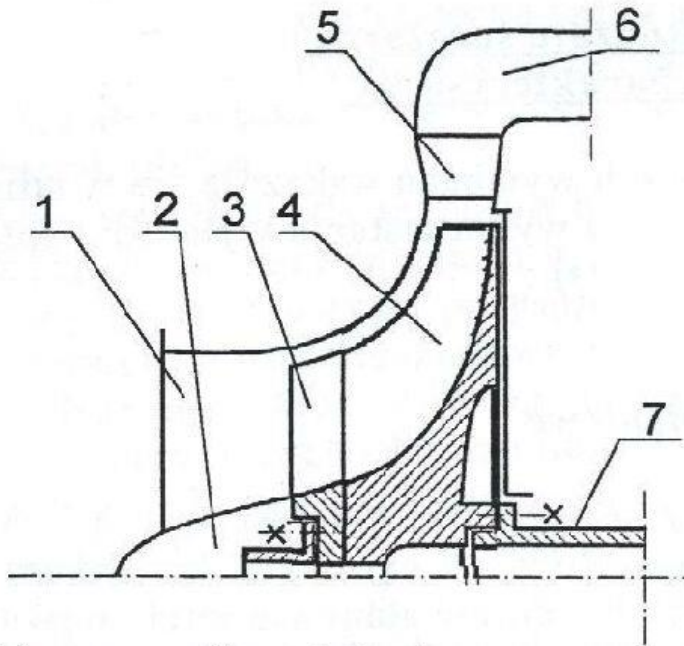
- wysoki spręż na pojedynczym stopniu 4-10 (1,2-1,8 stopnie sprężarki osiowej)
- możliwość stosowania dla małych wydatków przepływu powietrza
- małe wymiary osiowe , ale przy rozbudowanych wymiarach promieniowych

Przepływ przez sprężarkę odśrodkową



Sprężarka promieniowa

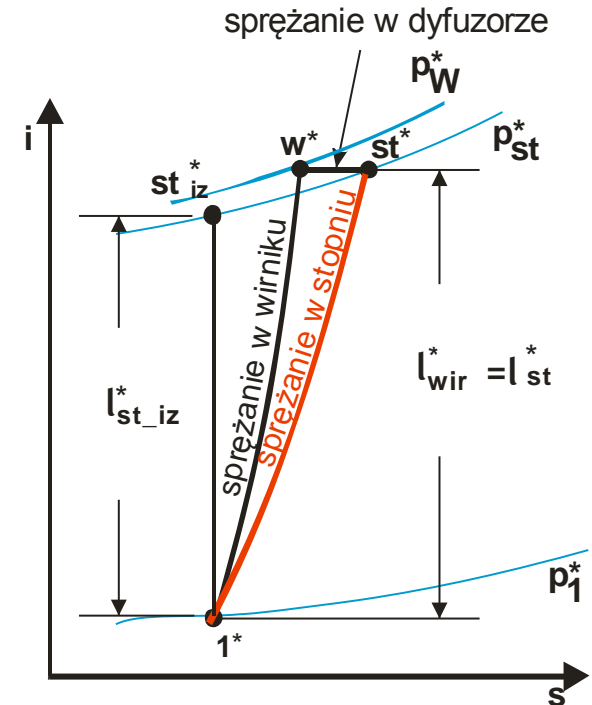
CHARAKTERYSTYKA PRACY STOPNIA SPRĘŻARKI



Rys.1 Schemat sprężarki promieniowej
1-włot; 2-owiewka; 3-zabierak; 4-kanały międzyłopatkowe wirnika;
5-dyfuzor; 6-wylot; 7-wał

Praca stopnia sprężarki:

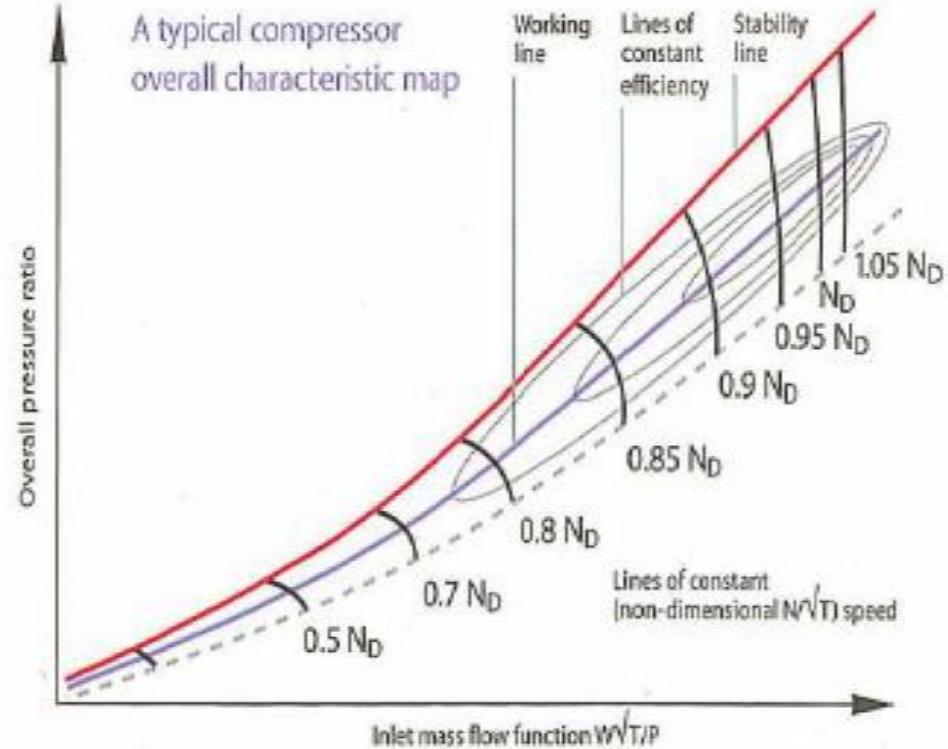
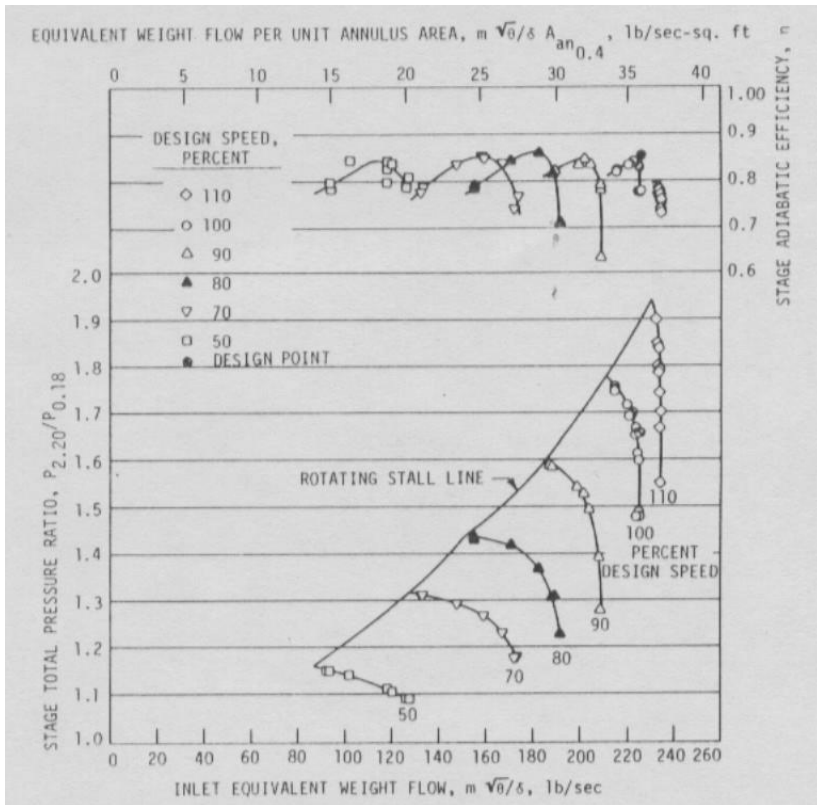
$$l_{st}^* = u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}$$



Sprawność stopnia sprężarki:

$$\eta_s^* = \frac{l_{st_{iz}}^*}{l_{st}^*} = \frac{i_{st_{iz}}^* - i_1^*}{i_{st}^* - i_1^*}$$

Charakterystyka sprężarki



Zredukowany wydatek masowy przepływu

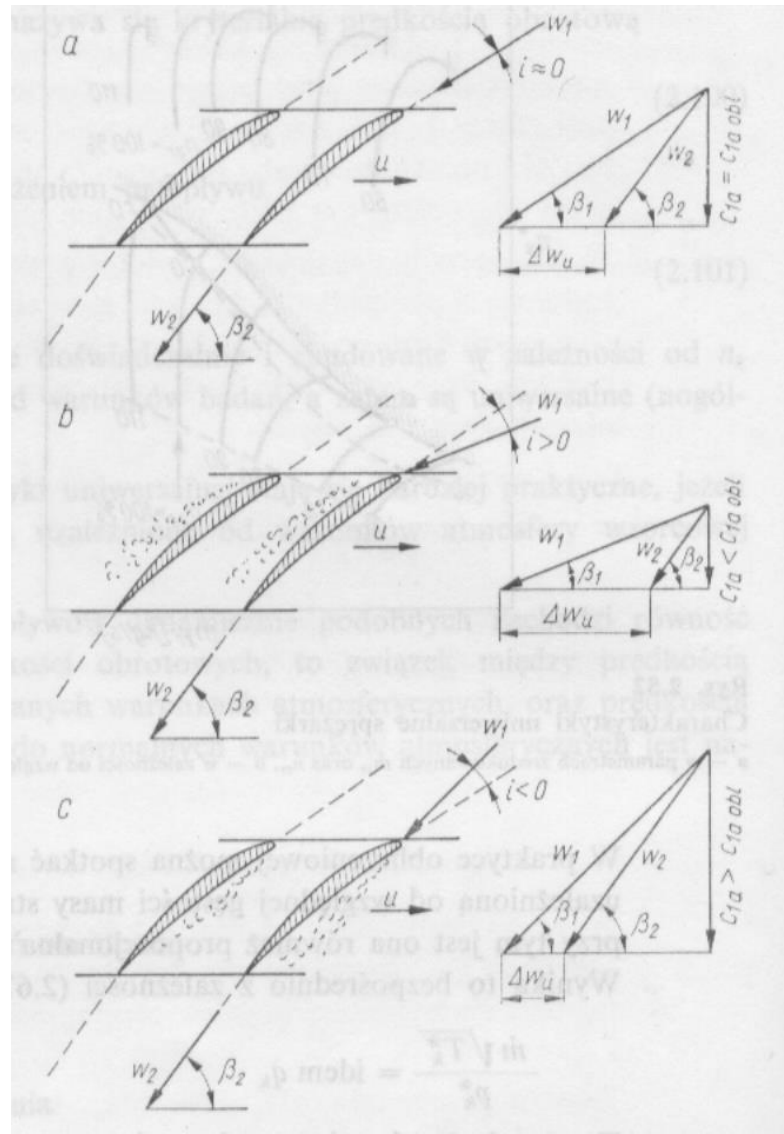
$$m_{zr} = m \frac{\sqrt{T_1^*}}{p_1^*}$$

Zredukowana prędkość obrotowa

$$n_{zr} = \frac{n}{\sqrt{T_1^*}}$$

Niestateczna praca sprężarki – pompaż

Napływ obliczeniowy na łopatkę



Napływ na łopatkę z dodatnimi kątami natarcia

Napływ na łopatkę z ujemnymi kątami natarcia

Zapobieganie niestatecznej pracy sprężarki

Upust

Sterowanie łopatek kierownic sprężarki

Podział sprężarki na dwa wirniki

