

WYWAŻANIE WIRNIKÓW SILNIKÓW TURBINOWYCH

A. Rowiński

Instytut Lotnictwa

Streszczenie

W artykule przedstawiono problematykę konieczności wyważania statycznego i dynamicznego wirników silników turbinowych. Przedstawiono metodykę osiągnięcia wymaganej dokładności wyważania na przykładach zrealizowanych w Instytucie Lotnictwa konstrukcji silników: jednoprzepływowych K-15 i K-16 oraz dwuprzepływowego D-18.

Słowa kluczowe: *Lotniczy silnik turbinowy, wyważanie na wyważarce dynamicznej, stopień niewyważenia w warunkach pracy silnika.*

Wirnik silnika turbinowego jest obciążony siłami aerodynamicznymi pochodzącymi od oddziaływania gazów w kanale przepływowym silnika na łopatki sprężarki i turbiny, siłami osiowymi generowanymi ciśnieniem statycznym w wewnętrznych komorach odciążeniowych i chłodzących oraz siłami masowymi (odśrodkowymi) powodującymi odkształcenia w kierunku promieniowym elementów wirujących. Niejednorodne rozłożenie mas dla poszczególnych elementów wirnika względem jego osi geometrycznej powoduje, że wektory sił odśrodkowych mają niejednakowe wartości. Czynniki te są przyczyną drgań układu wirującego, które poprzez system łożyskowania przenoszone się na kadłub silnika. Szkodliwy wpływ sił odśrodkowych można ograniczyć poprzez wysoki poziom dokładności wymiarowej części i zachowanie współosiowości łączonych elementów. W tym celu stosuje się operacje wyważania wirnika poprzez korekcję rozkładu masy zarówno w zespole jak i dla poszczególnych elementów. Łożyska które są obciążone siłami pochodzącymi od ciężaru własnego wirnika, niewyważeniem, luzami w łożyskach, siłami pochodzącymi od przeciążeń w czasie lotu samolotu po torach krzywoliniowych oraz momentami groskopowymi, są zespołami których własności wytrzymałościowe pozwalają określić wielkość maksymalnej siły obciążającej wirnik a tym samym wielkość dopuszczalnego niewyważenia.

Dopuszczalne obciążenia statyczne Q_{stat} powinno być większe od Q i wynosi dla tego samego typu łożyska:

$$Q_{stat} = 0.85 * i * d_o^2$$

Dopuszczalne są obciążenia, które nie powodują odkształceń trwałych bieżni łożyska większych od 0.0001 średnicy elementu tocznego. Obciążenia jakie może przenosić łożysko kulkowe Q :

$$Q = \frac{60 * i^{0.7} * d_0^2 * \varphi * \cos \beta}{(n * h^3)}$$

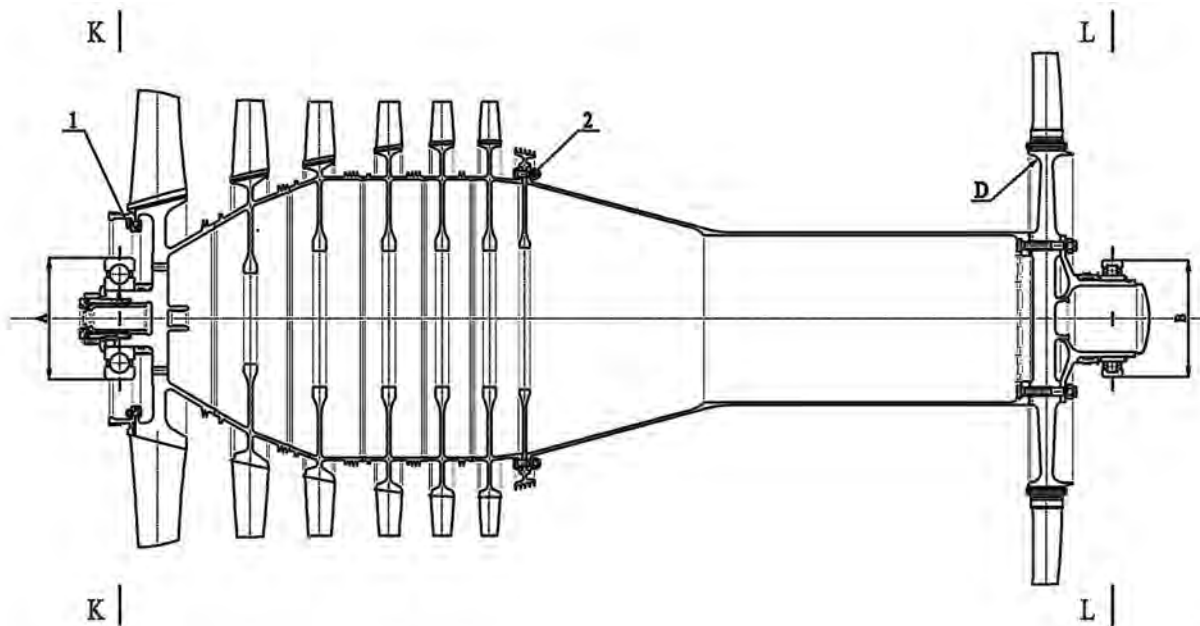
gdzie: d_0 - średnica kulki łożyska; i - liczba elementów tocznych; φ - współczynnik typu łożyska; β - kąt stycznej elementu tocznego; n - prędkość obrotowa; h - czas pracy łożyska

Reakcja P_s spowodowana niewyważeniem wirnika określona jest zależnością:

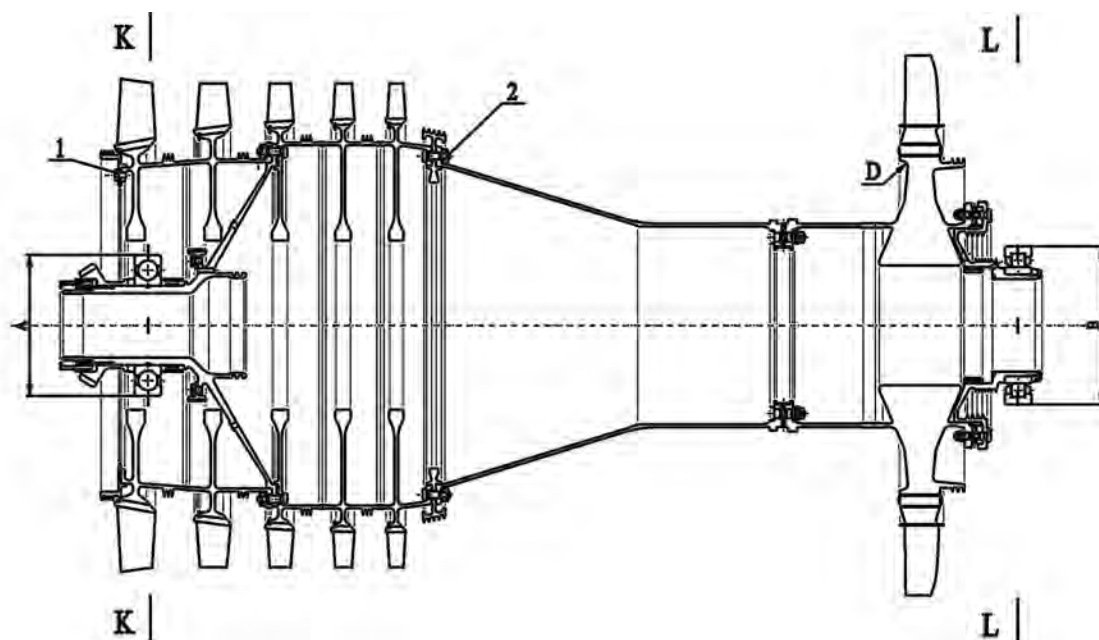
$$P_s = \frac{G_w * \omega^2}{g}$$

gdzie: g – przyspieszenie ziemskie cm/s^2 ; G_w - oznacza wartość wektora niewyważenia - gcm ;
 ω - prędkość kątowa wirnika - $1/s$

Wirnik silnika turbinowego jest wirnikiem sztywnym łożyskowanym na podporach struktury nośnej silnika znajdującej się na zewnątrz wirnika (rys. 1.) lub wewnątrz wirnika (rys. 2.). Wirnik składa się ze sprężarki, wału oraz tarczy turbiny. Elementy wirnika są zgrupowane w zespoły – wirnika sprężarki i wirnika turbiny. Wirniki wyważane są oddzielnie, w zespołach z tarczami technologicznymi, a następnie wielkość niewyważenia jest korygowana dla całego wirnika.



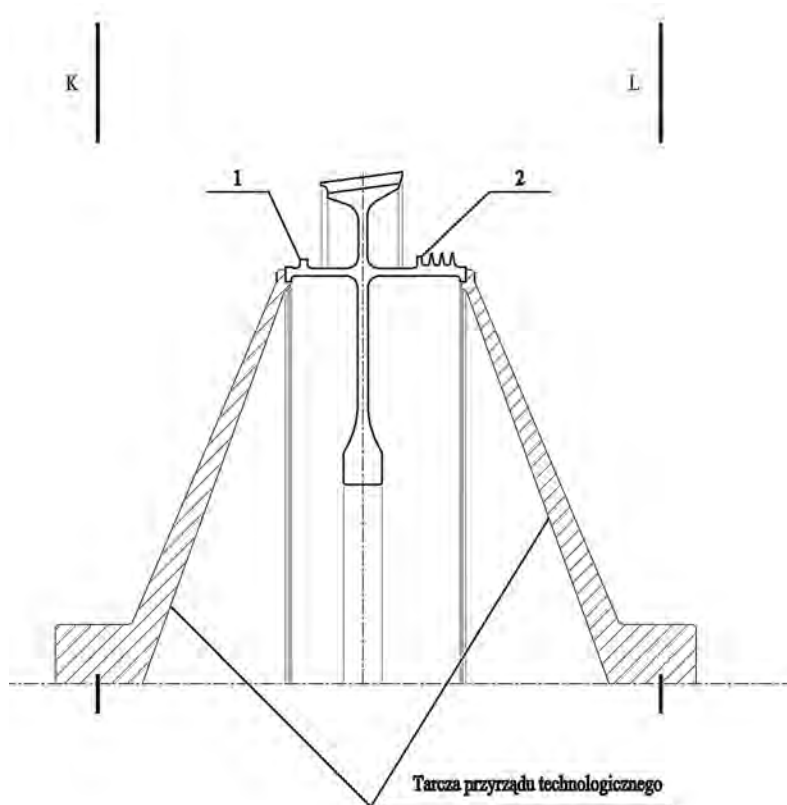
Rys. 1. Zespół wirnika sprężarki i turbiny silnika K15- do wyważania; 1,2-śruby wyważeniowe; D-miejsce usuwania materiału z tarczy turbiny



Rys. 2. Zespół wirnika sprężarki i turbiny wirnika wysokiego ciśnienia silnika D18- do wyważania; 1,2-śruby wyważeniowe; D-miejsce usuwania materiału z tarczy turbiny

WIRNIK SPRĘŻARKI

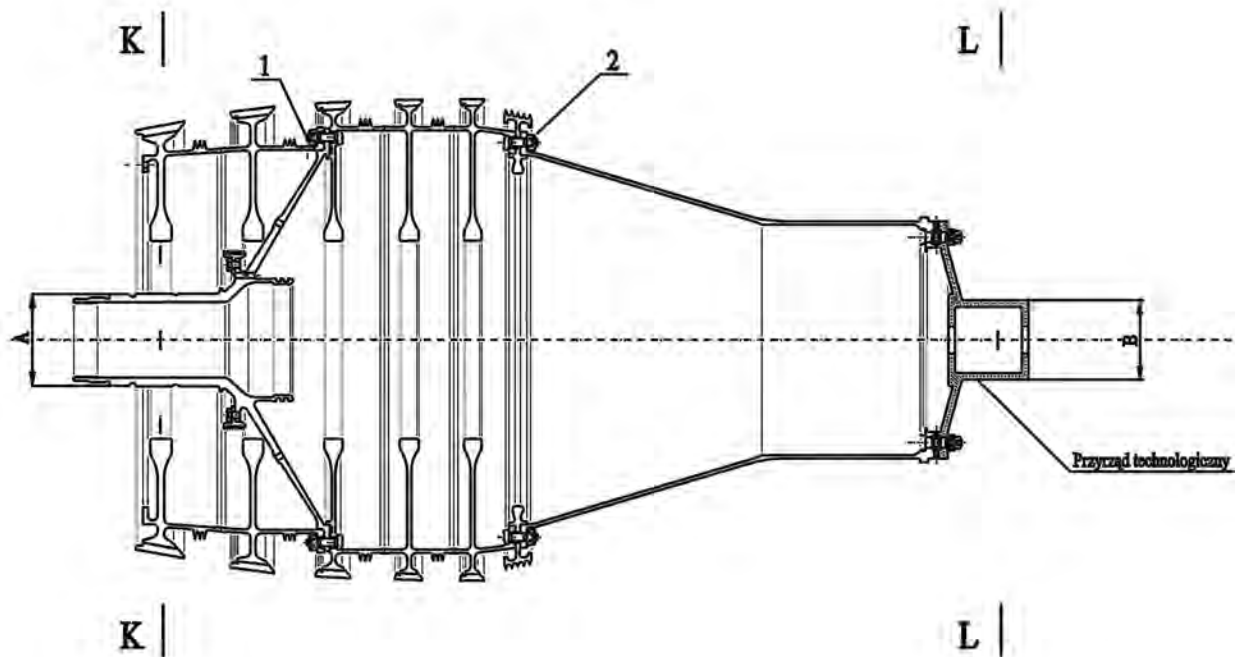
Wirnik składa się z tarcz sprężarki zespawanych w bęben, pierścienia pośredniego i łączących śrub. Tarcze pierwsza i ostatnia tworzące bęben sprężarki oraz pierścień pośredni nie podlegają wyważaniu indywidualnemu. Pozostałe tarcze są wyważane na wyważarce dynamicznej z dokładnością -3 gcm przy prędkości obrotowej 1000 obr/min. Tarcza sprężarki (rys. 3.) jest zamocowana w przyrządzie technologicznym składającym się z dwu cienkościennych tarcz stożkowych o kącie wierzchołkowym 140...150° podtrzymujących wyważaną tarczę na jej powierzchniach walcowych i czołowych. Tarcze przyrządu są zakończone czopami walcowymi o średnicy zewnętrznej $\varnothing 30$ mm, pozwalającym na ułożyskowanie zespołu wyważanego na rolkowych podporach wyważarki. Tarcze stożkowe przyrządu zwrócone stroną wierzchołkową na zewnątrz są ściągnięte śrubą centralną środkowaną w czopach łożyskowych z siłą 1.5...2.0 kN. Tarcza sprężarki jest ustawiona i zamocowana w przyrządzie tak, aby bicie promieniowe zewnętrznej powierzchni obrzeża tarczy względem powierzchni walcowej czopów przyrządu nie przekraczało 0.015 mm. Tarcze technologiczne są wyważane statycznie z dopuszczalnym niewyważeniem do 10 gcm. Stan wyważenia tarczy sprężarki jest uzyskiwany poprzez zdejmowanie materiału z powierzchni tarczy przeznaczonych konstrukcyjnie do tego celu.



Rys. 3. Tarcza IV stopnia sprężarki w przyrządzie technologicznym do wyważania; 1 i 2-miejsca usuwania materiału

Wirnik sprężarki bez łopatek

Tarcza sprężarki pierwszego stopnia jest wyważana w zespole jej wirnika wraz z pierścieniami labiryntów przed pierwszym i za ostatnim stopniem i łączącymi je śrubami. Wirnik sprężarki (rys. 4.) jest połączony z przyrządem technologicznym, umożliwiającym łożyskowanie zespołu na podporach wyważarki. Wstępne wyważenie uzyskane za pomocą przylepianej plasteliny na powierzchniach tarczy jest zastępowane poprzez dobór śrub o podwyższonych łbach. Pożądaný moment statyczny śrub wyważających jest uzyskany przez ich odpowiednie rozmieszczenie na obwodzie. Po wyważeniu położenie śrub zostaje odczytane przy odpowiednich otworach pierścienia labiryntu.



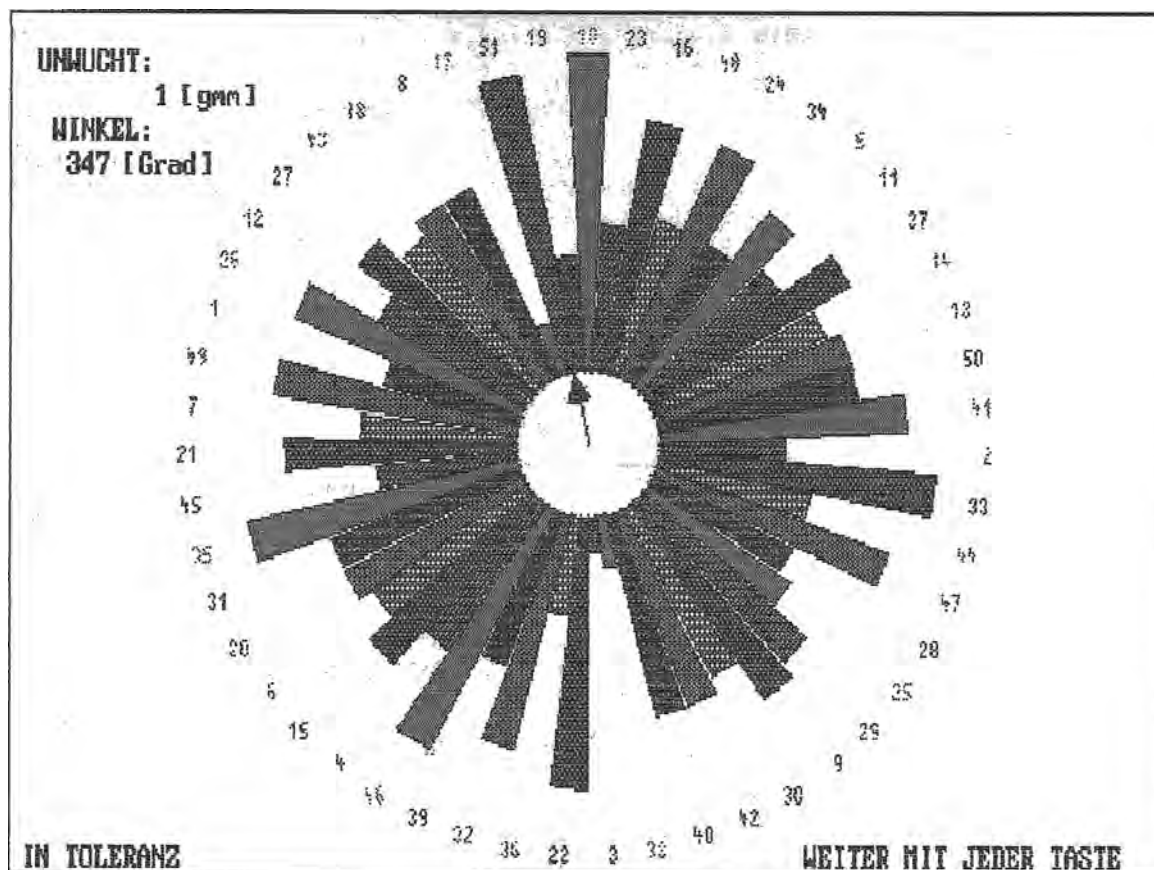
Rys. 4. Wirnik sprężarki wysokiego ciśnienia silnika D-18; 1,2-śruby wyważeniowe

Wirnik sprężarki wraz z łopatkami

Wirnik sprężarki składa się z bębna i łopatek wirnikowych poszczególnych stopni. Bęben tworzą tarcze zespawane elektronowo na obwodzie. Tarcze przed spawaniem są ustawiane w stos w przyrządzie spawalniczym tak aby wektory niewyważenia w sąsiednich tarczach były przesunięte wobec siebie o 180° . Łopatki są dobierane wg następujących zasad różnica momentów statycznych w komplecie I i II stopnia nie powinna przekraczać 22 gcm a dla pozostałych stopni 15 gcm. Łopatki są ustawiane we wrębach tarczy, tak aby różnica momentów statycznych łopatek o kolejnym numerze nie była większa niż 2 gcm, a moment statyczny ostatniej nieparzystej łopatki nie różnił się więcej niż 2 gcm od średniego momentu statycznego dwu sąsiednich łopatek. Wirnik sprężarki jest wyważany dynamicznie z masą umieszczoną pomiędzy podporami. Zespół do wyważania składa się z bębna sprężarki, łopatek wirnikowych wszystkich stopni, łożyska kulkowego oraz wszystkich elementów zamocowanych na czopie tarczy pierwszego stopnia, pierścienia labiryntu zamocowanego do ostatniego stopnia sprężarki oraz tarczy technologicznej z czopem. Na czopie zamocowane jest łożysko walcowe o podwyższonej klasie dokładności wykonania. Wzajemne położenia kątowe tarczy technologicznej i bębna sprężarki należy dobrać tak aby bicie promieniowe części zamkowej tarczy nie przekraczało 0.02 [mm].

Dopuszczalne niewyważenie wirnika sprężarki przed operacją wyważania wynosi 50 gcm. Proces wyważania odbywa się wieloetapowo, poprzez wielokrotne wyważanie wirnika wraz kolejno zamocowywanymi na nim łopatkami poszczególnych stopni. Wyważenie rozpoczyna się do rozmieszczenia łopatek na środkowym stopniu sprężarki a następnie wielkość niewyważenia, mierzona na podporach zewnętrznych, jest korygowana przez rozmieszczanie łopatek na kolejnych stopniach. Jeżeli niewyważenie przekracza dopuszczalną wielkość, można wymienić do 5 łopatek pierwszego stopnia i do 10 z ostatniego, na łopatki o innym momencie statycznym, przy czym należy zakładać łopatki o mniejszym momencie statycznym od wymienianych. Wykres z programu obliczającego rozkład łopatek na stopniu w/g ich momentów statycznych przytoczono na rys. 5.

Sprężarka jest wyważana do osiągnięcia 4 gcm na przedniej i tylnej podporze. Tarcza technologiczna wykonana jest w podwyższonej klasie dokładności tak, aby bicie promieniowe i czołowe powierzchni bazowych względem powierzchni walcowej czopa łożyska nie przekraczało 0.01 mm. Dokładność wyważenia tarczy wynosi -1 gcm.



Rys. 5. Rozmieszczenie łopatek stopnia sprężarki wg wartości ich momentów statycznych

WIRNIK TURBINY

Wirnik turbiny składa się z wału, tarczy nośnej wraz z łopatkami, czopa wału wraz z łożyskiem walcowym, tarczy technologicznej z osadzonym na jej czopie łożyskiem kulkowym i śruby sprzęgającej wirnik z napędem wyważarki (rys 6.). Rozmieszczenie łopatek w tarczy przebiega wg następujących zasad:

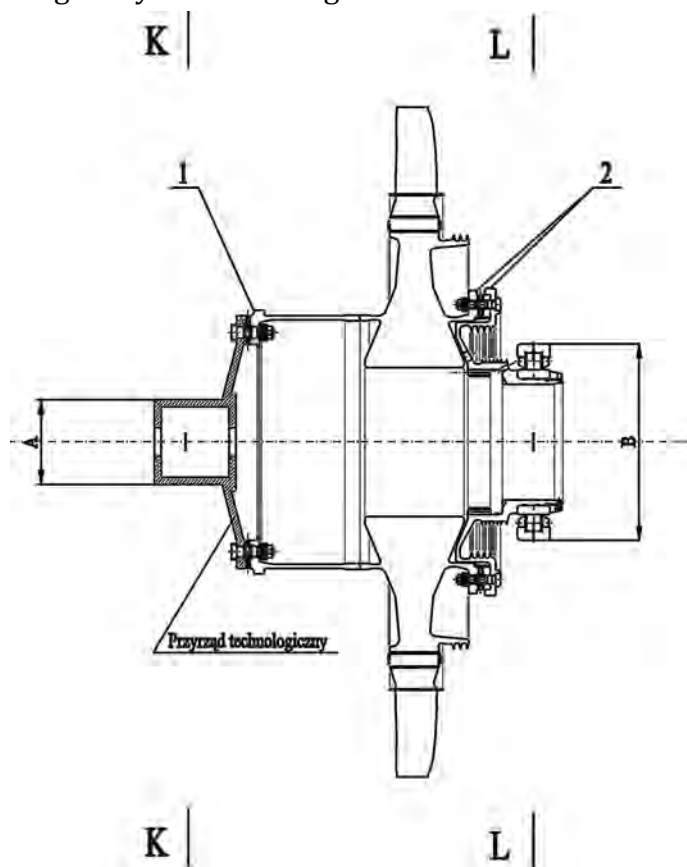
- różnica mas łopatek w jednym komplecie nie powinna przekraczać 2 gramów
- łopatki należy ustawiać w tarczy tak aby różnica mas kolejnych łopatek nie była większa niż 0.2 grama a masa ostatniej nieparzystej łopatki różniła się nie więcej niż 0.2 grama od średniej masy obydwu łopatek

Wzajemne położenie kątowe tarczy technologicznej i wirnika turbiny należy dobrać tak, aby bicie poprzeczne zewnętrznej walcowej powierzchni tarczy technologicznej względem osi wirnika nie przekraczało 0.015 mm. Zespół jest wyważany na wyważarce dynamicznej z dokładnością -4 gcm przy prędkości obrotowej 1000 obr/min. Tarcza technologiczna wykonana tak aby bicie promieniowe i czołowe powierzchni centrującej względem powierzchni walcowej czopa łożyska nie przekraczało 0.01 mm. A bicie wzdłużne powierzchni bazowej max. 0.01 [mm]. Dokładność wyważenia tarczy wynosi -1 gcm.

Dopuszczalne niewyważenie wirnika przed operacją wyważania wynosi w płaszczyźnie przedniej podpory 20 gcm a tylnej 50 gcm. W przypadku większych wartości, nie przekraczających odpowiednio 35 gcm i 85 gcm, poprawę stanu niewyważenia można osiągnąć poprzez:

- zmianę położenia kątowego wału turbiny względem tarczy turbiny z zachowaniem warunków bicia,
- zmianę położenia kątowego czopa turbiny względem tarczy turbiny z zachowaniem warunków bicia
- zabudowę jednej lub więcej łopatek turbiny o odpowiedniej masie (przy czym masa łopatek powinna być mniejsza od łopatek wymienionych)

W celu uzyskania pożądanego stanu wyważenia należy w płaszczyźnie przedniej podpory zbierać materiał z zewnętrznego obrzeża kołnierza wału pomiędzy otworami śrub a w płaszczyźnie tylnej podpory wyważać plasteliną na powierzchni promienia wewnętrznego półki labiryntu. Po wyważeniu wirnika należy odczekać wzajemne położenie wału, czopa turbiny, labiryntu i pierścienia wewnętrznego łożyska walcowego.



Rys 6. Wirnik turbiny zespołu wytwornicy spalin z silnika D- 18 w przyrządzie technologicznym do wyważania; 1,2-miejsca usuwania materiału z wału, tarczy turbiny i tarczy labiryntu

KOMPLETNY WIRNIK SPRĘŻARKI I TURBINY

Wirnik składa się z zespołu sprężarki, turbiny, łożysk podpór przedniej i tylnej, elementów ustalających bieżnię wewnętrznego łożyska na czopach oraz śrub i podkładek łączących obydwa zespoły (rys. 1.). Dopuszczalne niewyważenie wirnika przed operacją wspólnego wyważania w płaszczyznach przedniej (K) i tylnej (L) podpory nie powinno przekraczać 50 gcm. Za pomocą ciężarka zamocowanego w płaszczyźnie środkowego labiryntu (2) na rysunku 6 zostaje wprowadzony stan obciążenia w którym wektory niewyważenia rejestrowane na obydwu podporach (K) i (L) są przesunięte w fazie o $175 \div 180^\circ$ a stosunek ich wartości $1.5 \pm 5\%$.

Niewyważenie w płaszczyźnie podpory K jest korygowane poprzez zakładanie podkładek wyważających pod śruby łączące pierwszy stopień sprężarki z labiryntem, a w płaszczyźnie L, poprzez zdejmowanie materiału z tarczy turbiny (punkt D-rys. 1.) na łuku nie przekraczającym 20° . Dokładność wyważenia całego wirnika sprężarki i turbiny wynosi 4 gcm.

PODSUMOWANIE

Konstruktorski wymóg uzyskania jak najmniejszego stopnia niewyważenia wirnika dopuszczonego do montażu jest podyktowany faktem ograniczenia mocy wyważarki obracającej kompletny wirnik (z palisadami łopatek sprężarki i turbiny). W przypadku wyważania wirników silników K15 i D-18 prędkości obrotowe ich wirników wynosiły 1000 obr/min, co oznacza, że na zakresie maksymalnym pracy silników, (prędkości obrotowe wirników są rzędu 16000-17000 obr/min) powodując wzrost sił odśrodkowych od niewyważenia 250 krotnie.

LITERATURA

- [1] **R. Łączkowski:** *Wyważanie elementów wirujących*, Wyd. Naukowo - Techniczne, Warszawa 1979
- [2] **Carl Schenck AG Darmstad** - *Balancing Technology*, 1979
- [3] **Carl Schenck AG Darmstad**- *User's instructions for balancing machine H1BK*
- [4] **Instytut Lotnictwa, Zakład Silników Lotniczych**, *Instrukcja montażu i wyważania elementów i zespołów pędni silnika K-15*, Warszawa, 1993
- [5] **Instytut Lotnictwa, Zakład Silników Lotniczych**, *Projekt Wstępny silnika D-18 Obliczenia sił poprzecznych obciążających łożyska pędni*, Warszawa, 1987
- [6] **S. Szczeciński [i inni]:** *Lotnicze zespoły napędowe*, Wyd. WAT, Warszawa, 2009
- [7] **W. Balicki. [i inni]:** *Historia i perspektywy rozwoju napędów lotniczych*, Biblioteka Naukowa ILOT, Warszawa, 2005