

KADŁUBY I ZESPOŁY NOŚNE SILNIKÓW TURBINOWYCH

ROWIŃSKI ARTUR

Instytut Lotnictwa

Streszczenie

Kadłuby współczesnych silników turbinowych spełniają podwójną rolę tj.: kształtują kanał przepływowy silnika oraz stanowią zespół nośny przenoszący obciążenia wynikające z reakcji wirnika na podpory łożysk i dalej na węzły mocowania silnika na płatowcu. Na zespół kadłubów działają siły wynikające z oddziaływania strumienia gazów znajdujących się w kanale głównym silnika w postaci ciśnienia i temperatury, siły bezwładności pochodzących od przeciążeń powstających podczas manewrów samolotu i od reakcji wirnika w postaci drgań wzdłużnych i poprzecznych. Podatność struktury kadłubów oraz ich połączeń kołnierzowych wywiera istotny wpływ na krytyczne prędkości obrotowe. Sztywność podpór i stopień zużycia łożysk wpływają na wartości częstotliwości i poziom amplitud drgań przenoszonych przez węzły mocowania silnika na konstrukcję płatowca. Największe obciążenia poprzeczne wirników i ich podpór występują podczas lotu statku powietrznego po torach krzywoliniowych.

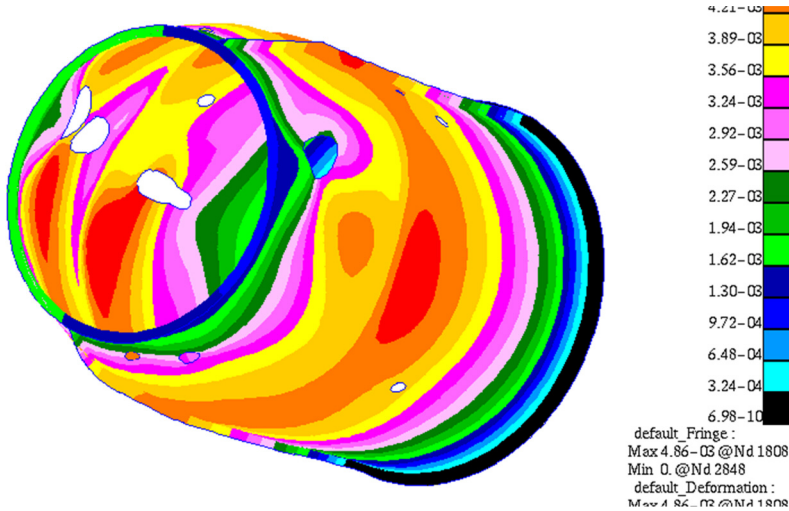
Słowa kluczowe: sztywność i podatność podpór, zespół nośny, częstotliwość i amplitudy drgań podpór, czujniki drgań

SIŁY DZIAŁAJĄCE NA KADŁUBY NOŚNE

Kadłuby lotniczych silników turbinowych, oprócz kształtowania kanału przepływowego powietrza i spalin, spełniają rolę zespołów nośnych – przejmujących wszystkie obciążenia wynikające z pracy wirników sprężarek, wentylatorów i turbin, które przenoszą na węzły mocowania silników w konstrukcji samolotów lub śmigłowców. W trakcie pracy poddawane są obciążeniom w postaci sił ściskających, zginających i skręcających zarówno o charakterze quasi-statycznym jaki i dynamicznym.

Obciążenia od sił ciśnieniowych powstających w procesie sprężania i rozprężania gazów w kanale przepływowym wywołują siły wzdłużne i momenty skręcające w kadłubach silnika. Siły gazodynamiczne wywołane są przez statyczne działanie gazów na łopatki aparatu kierownic i dynamicznie oddziaływanie strumienia gazu przepływającego przez silnik i zmieniającego swój kierunek i prędkość. Zmiana kierunku wywołuje moment skręcający kadłuby silnika. Siła działająca wzdłuż osi silnika powstaje w wyniku powiększania się prędkości i wartości ciśnienia podczas sprężania powietrza w sprężarce i rozprężania spalin w turbinie. Ciśnienia w komorach spalania nowych wentylatorowych dwuprzepływowych silników odrzutowych zbliżają się do 50-ciu barów podczas pracy na zakresie (i warunkach) startowych. Wektory sił działających na

sprężarkę i turbinę są przeciwnie skierowane, a ich wartości są wielokrotnie większe od siły ciągu silnika. Na rys. 1. przedstawiono przemieszczenia zewnętrznego kadłuba silnika dwuprzepływowego w wyniku działania sił zginających.

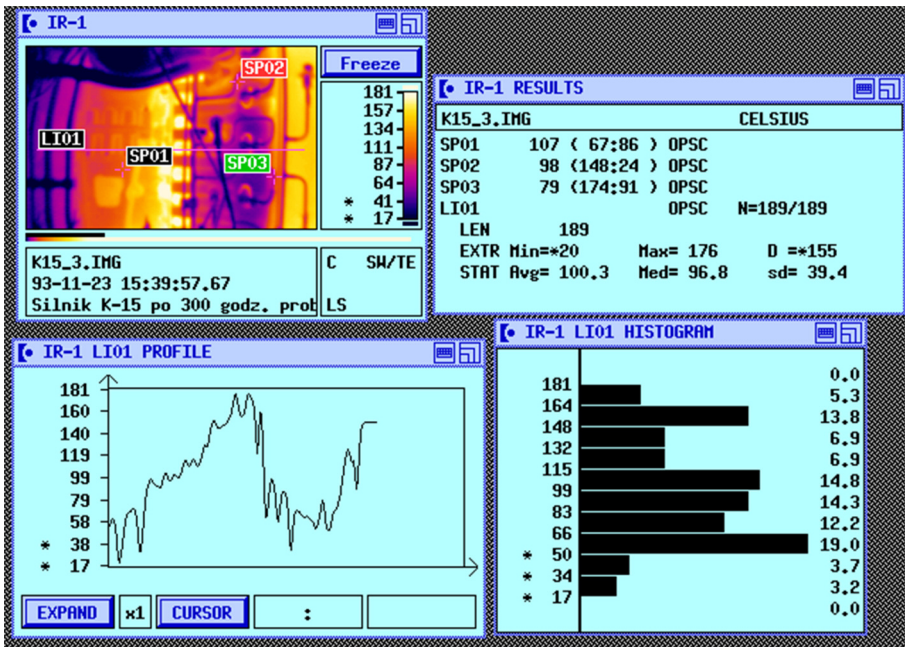


Rys.1. Mapa przemieszczeń modelu kadłuba zewnętrznego silnika dwuprzepływowego powstałych w wyniku działania siły zginającej

Obciążenia od naprężeń cieplnych powstają w wyniku różnic temperatur jakie oddziałują na poszczególne części kadłubów, a także na ich poszczególne powierzchnie. Rozkład naprężeń w wywołanych obciążeniem cieplnym uzależniony jest od wielkości tych obciążeń i kształtu elementów (rys. 2). Temperatura gazów w silniku turbinowym waha się od ujemnych wartości w kadłubie wlotowym 230 K do na wylocie z turbin 1600 K. i osiąga maksymalną wartość w strefie spalania w rurze ogniowej 2200 K. W wyniku wzrostu temperatury zarówno wirnik jak i kadłub silnika zmienia swoje wymiary liniowe. Siła wzdłużna jest przenoszona na strukturę zewnętrzną poprzez przednie łożysko sprężarki. Jego działania mają duży wpływ na wartość luzów wierzchołkowych na łopatkach turbiny- ze względu na stożkową zewnętrzną osłonę. Luzy te pomimo zastosowania docierających się wykładzin ceramicznych mogą osiągnąć znaczne wartości szczególnie w przejściowych stanach pracy silnika (w silniku jednoprzepływowym K-15 wynosił 4.3 mm), kiedy to wzajemne przesunięcia osiowe kadłuba i wirnika punktu widzenia spełnienia są największe. Struktura kadłuba łożyska turbiny, przenosząca obciążenia jest wydzielona i odizolowana od części gorących przestrzeni, przez którą przepływa chłodzące powietrze zza sprężarki. Łożysko osadzone sztywno w obudowie jest uszczelnione od strony turbiny ciśnieniowanym labiryntem. Kadłub turbiny cylindryczny jest niewrażliwy na odkształcenia i osiowe przemieszczenia wirnika.

Na kadłuby silników turbinowych śmigłowych śmigło oddziałuje w postaci reakcyjnego momentu śmigła i osiowej siły ciągu oraz momentu giroskopowego pojawiającego się podczas manewrów samolotu. W silnikach wentylatorowych moment wentylatora jest równoważony przez moment obrotowy turbiny w przypadku, gdy prędkości obrotowe obydwu wirników są jednakowe. W przypadku gdy są różne, zespół wirnika jest dodatkowo obciążony momentem skręcającym będącym różnicą momentów wentylatora i turbin. Agregaty instalacji silnikowych umieszczone są na zewnętrznych powierzchniach kadłubów i zamocowane przeważnie na punktowych wspornikach. Obciążone siłami bezwładności powstającymi podczas manewrów

samolotu, wprowadzają na strukturę kadłubów dodatkowe siły skupione. Obciążenia dynamiczne od reakcji wirników na zespoły łożyskowania osadzone w kadłubach mają charakter wysoko-cyklowych drgań poprzecznych (wynikających z niejednorodnego rozłożenia mas wirujących) oraz podłużnych (powstających w wyniku zmiany wielkości siły osiowej działającej na łożysko wywołanej odkształceniem wirnika w kierunku promieniowym). Obciążenia od sił bezwładności pochodzą od przeciążeń działających na silnik w czasie lotu krzywoliniowego. Największe siły bezwładności następują w czasie lotu po torach krzywoliniowych (wyjścia z lotu nurkowego) oraz twardego lądowania. Reakcje od momentu groskopowego sumują się z siłami pochodzącymi od przeciążeń. Manewr wiąże się ze zmniejszeniem prędkości lotu co daje dodatkową siłę wzdłużną sumującą się z ciągiem silnika.

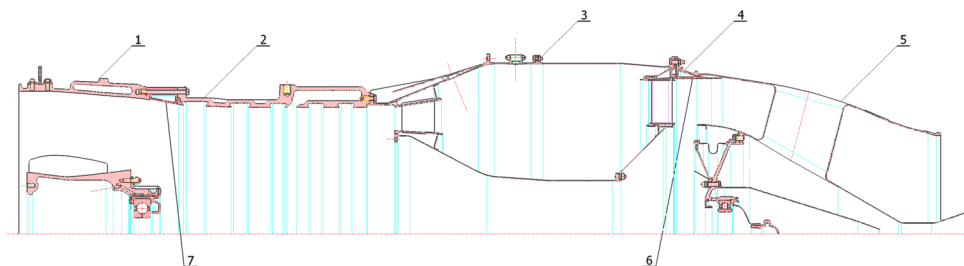


Rys. 2. Rozkład temperatury na zewnętrznej powierzchni kadłuba sprężarki oraz osłony komory spalania silnika K-15 przy nominalnych prędkościach obrotowych
 IR-1- zdjęcie w podczerwieni badanego fragmentu zespołu kadłubów silnika, IR-1 Results- cyfrowe wyniki pomiarów silnika oraz markerów, IR-1 Profile- profil rozkładu temperatury wzdłuż mierzonej powierzchni, IR-1 Histogram- histogram temperatury

STRUKTURY NOŚNE KADŁUBÓW SILNIKÓW TURBINOWYCH

Konieczność minimalizacji oporów w kanałach przepływowych silników i konieczność przenoszenia obciążeń z podpór wirników zmusza do budowy przestrzennych układów połączeń cienkościennych elementów walcowych i stożkowych z opływowymi żebrami i wieńcami kierownic sprężarek czy wentylatorów w jedną sztywną konstrukcję – zdolną do przenoszenia sił skupionych (z kadłubów) łożysk do węzłów mocowania silnika na płatowcu. Należy tu podkreślić usztywniające oddziaływanie ciśnienia w kanale przepływowym na jego ściany wewnętrzne, do których są mocowane węzły mocowania silnika w płatowcu. Zespół kadłuba silnika turbinowego składa się z kadłuba sprężarki, wentylatora, komory spalania turbin, kadłubów pośrednich oraz kadłuba przekładni wewnętrznej. Przekładnia która znajduje zastosowanie

w silnikach śmigłowych i śmigłowcowych może być samodzielnym modułem ulokowanym pomiędzy, bądź jest częścią rozbudowanego kadłuba wlotowego np. silnik TWD-10.

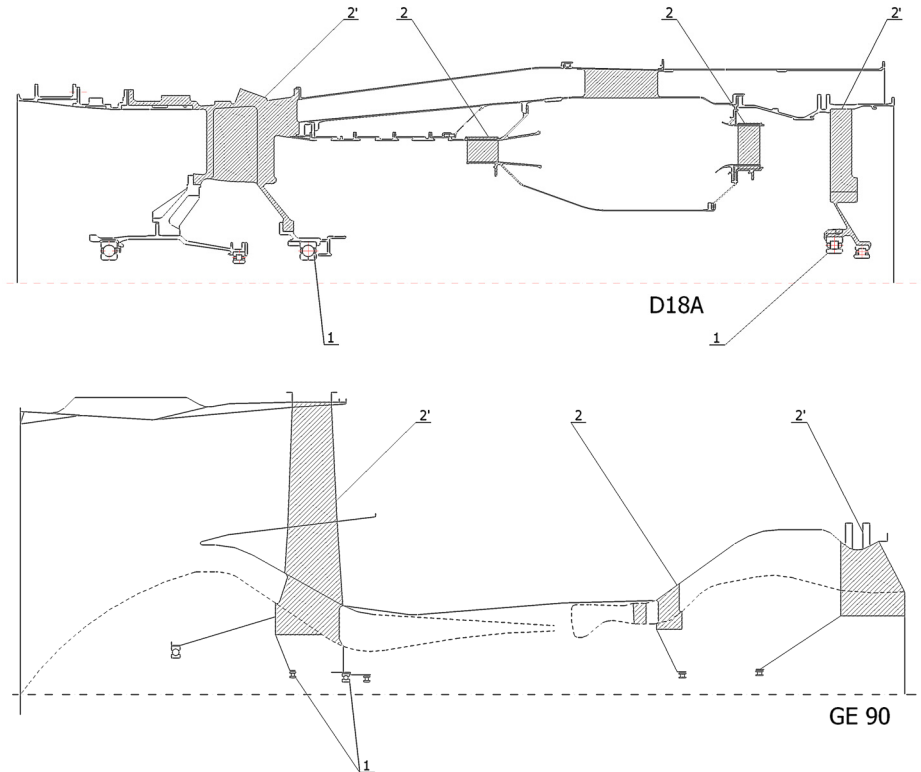


Rys 3. Przekrój silnika jednoprzepływowego K-15 - zestawienie kadłubów
 1 - kadłub wlotowy, 2 - kadłub sprężarki, 3 - kadłub komory spalania, 4 - kadłub turbiny,
 5 - dysza wylotowa, 6 - uszczelnienie ulowe, 7 - wykładzina uszczelniająca

Głównymi elementami nośnymi są kadłuby pośrednie i turbin, w których osadzone są zespoły łożysk i na których zamocowane są główne węzły mocowania silnika. Struktura podzespołów przenoszących główne obciążenia silnika jest kształtowana tak, aby osiągnąć dużą sztywność oraz zminimalizować wpływ odkształceń cieplnych na wielkość luzów osiowych i promieniowych pomiędzy wirnikiem a kadłubem. Struktura wykonana jest w formie zespołu cylindrów dużej średnicy łączonych śrubami na wzajemnie centrowanych kołnierzach, usztywnionych dodatkowo opływowymi żebrami i aparatami kierującymi (w kadłubie sprężarki). W silniku turbinowym podatność połączeń kołnierzowych wywiera istotny wpływ na krytyczne prędkości obrotowe wirnika. Wpływ sztywności kadłuba na krytyczne prędkości obrotowe jest szczególnie istotny przy wyższych prędkościach obrotowych wirnika. W silnikach wentylatorowych, o dużej powierzchni pola przekroju czołowego, na zewnętrznym płaszczu dwupowłokowego kadłuba wlotowego, znajduje się osłona której zadaniem jest zabezpieczenie elementów gondoli silnika i kadłuba płatowca przed przebicciem częścią pióra łopatki wentylatora, która powstanie w wyniku zderzenia się ptaka lub innego „ciała obcego” podczas lotu. Osłony typu „plaster miodu” wykonane są z materiałów lekkich mogących zakumulować poprzez swoje odkształcenie energię uderzenia, odłamka łopatki, np. włókna kewlarowe umieszczone są pomiędzy powłokami cylindrowymi kadłuba. Innym rozwiązaniem jest pozostawienie pustej przestrzeni osłoniętej od kanału przepływowego zamkniętą powłoką wykonaną z materiału kompozytowego. Takie rozwiązanie umożliwia zamknięcie oderwanej części pióra łopatki i uniknięcie uszkodzenia innych łopatek wentylatora przez zderzenie z nią oraz uniemożliwia zaczepienie wirnika wentylatora o fragmenty rozciągniętej odłamkiem osłony kewlarowej. Powierzchnie kanału wlotowego kadłuba są zabezpieczane powłoką antykorozyjną. Zasadniczym czynnikiem decydującym o wyborze rodzaju powłoki lakierniczej jest jej odporność na erozję. Różnorodność materiałów, z których wykonana jest sprężarka osiowa stwarza konieczność stosowania różnego rodzaju powłok zabezpieczających. Części sprężarki wykonane ze stopów aluminium zabezpieczone są przed korozją przez wytwarzanie na ich powierzchni tlenkowych powłok anodowych. Części lub powierzchnie kadłubów wlotowego i sprężarki narażone na erozyjne działanie pyłów zabezpieczone są przez nakładanie przeciwkorozyjnych powłok lakierniczych. Na tych powierzchniach, w wyniku utleniania chemicznego, wytworzono uprzednio warstwę ochronną. Powłoka lakiernicza chroni powierzchnie przed korozją w sposób mechaniczny, oddzielając metal od środowiska korozyjnego. W związku z tym wymagana jest całkowita szczelność i nieprzepuszczalność powłoki oraz dobre związanie jej

z pokrywaną powierzchnią. Powłoka musi spełnić te warunki w podwyższonej temperaturze (do 200°C).

Deformacje kadłubów, które mają niekorzystny wpływ na sprawność procesów sprężania i rozprężania w kanale głównym, są kompensowane poprzez system wymiany ciepła, który doprowadza sprężone powietrze o odpowiedniej temperaturze i ciśnieniu do poszczególnych segmentów kadłuba.



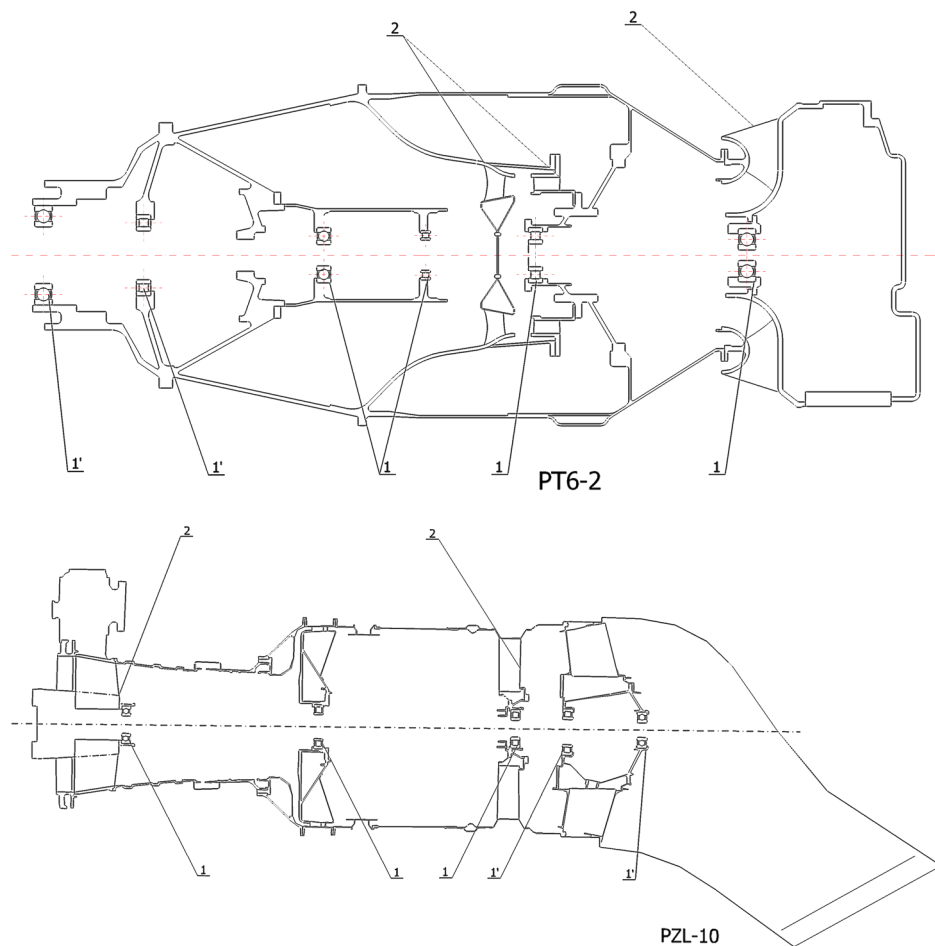
Rys. 4. Szkice struktur nośnych kadłubów silników odrzutowych:
a) dwuprzepływowy silnik odrzutowy, b) wentylatorowy silnik odrzutowy,
1 - podpora wirnika, 2,2' - kierownice, żebra nośne

Na rys. 4 zestawiono szkice charakterystycznych struktur nośnych kadłubów silników odrzutowych jedno i dwu przepływowych (w tym wentylatorowego).

Na szkicach nie zaznaczono miejsc odbioru napędu z wirnika wytwornicy spalin do skrzyni napędu agregatów i jej zamocowania w kadłubie. Jej usytuowanie wynika bowiem z konieczności zapewnienia łatwego dostępu eksploatacyjnego do agregatów – zależnego od przewidywanego miejsca zabudowy silnika na płatowcu. Wewnątrz kadłubowe w samolocie lub przykadłubowe skrzydłowe lub podskrzydłowe.

Na rys. 5 przytoczono schematy struktur nośnych kadłubów silników śmigłowych i śmigłowcowych. Jeszcze w sporej liczbie silników śmigłowych znajdujących się w użytkowaniu wykorzystuje się konstrukcje jednowirnikowe w których wirnik turbiny napędza sprężarkę oraz śmigło – za pośrednictwem zębatej przekładni redukcyjnej. Jednak dążenie do wysokiej sprawności zespołu napędu silnika w szerokim zakresie pracy silnika i warunków lotu, narzuca sensowność stosowania oddzielnego wirnika wytwornicy spalin (sprężarki i jej turbiny

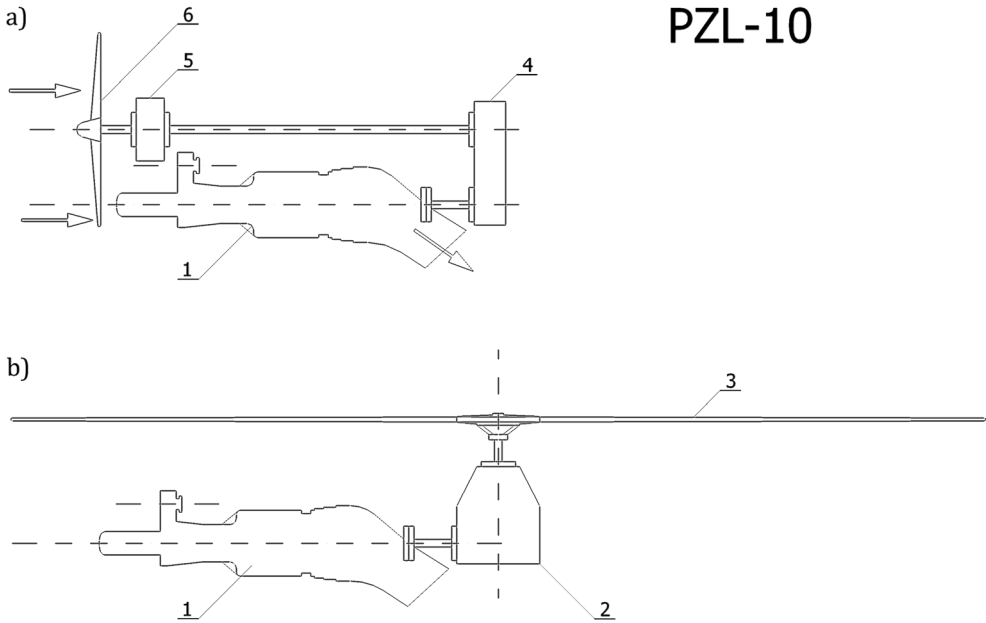
napędowej) i wydzielonej oddzielnej turbiny napędowej śmigła. Silniki z wydzieloną turbiną napędową są szczególnie korzystne jako napęd śmigłowców, ze względu na przebieg obrotowej charakterystyki momentu obrotowego tej turbiny – przy ustalonej prędkości obrotowej wirnika wytwornicy spalin. Stąd współczesne silniki śmigłowe i śmigłowcowe są budowane w układzie z oddzielną turbiną napędową. Pozwala to na budowanie identycznych (pod względem przepływowym) silników w dwóch wersjach przekazywania mocy tj. na śmigło oraz na wirnik nośny śmigłowca (rys. 6).



Rys. 5. Szkice struktur nośnych silników śmigłowych i śmigłowcowych
 1'' – podpora wirnika nośnego śmigła, 1 - podpora wirnika wytwornicy spalin,
 1' - podpora wirnika turbiny napędowej, 2 - stójki nośne

Z przeglądu przedstawionych szkiców wynika jednoznacznie komplikacja konstrukcji kadłubów i liczby podpór w przypadku zastosowania dwuwirnikowości sprężarek – a jest to konieczność w dwuprzepływowych silnikach odrzutowych. W silnikach RR RB-211 oraz Trent zastosowano konstrukcje trójwirnikowe, a także w RB199 z samolotu Tornado i turbinowym silniku śmigłowym PW-125 samolotów CASA. W konstrukcjach wielowirnikowych długie wały o małej średnicy zamontowane są współosiowo, a to powoduje, że giętne postacie drgań występują już przy małych prędkościach obrotowych. W celu przesunięcia krytycznych prędkości

obrotowych na wyższy poziom, najlepiej poza zakres nominalny stosuje się wzajemne podparcie wirników w postaci łożyska wewnętrzznego. Wówczas obie bieźnie obracają się zgodnie w tym samym kierunku lecz ze znacznie mniejszymi prędkościami względnymi niż gdyby to łożysko było osadzone w nieruchomej podporze kadłuba silnika. Wnosi to jednak określone kłopoty wynikające z trudności niezbędnego chłodzenia i olejenia tak osadzonego łożyska, oraz uniemożliwia kontrole stanu łożyska technikami stosowanymi podczas eksploatacji.



Rys. 6. Wyprowadzenie wału napędowego wariantów silnika:
 a) śmigłowcowego, b) śmigłowego,
 1 - silnik, 2 - reduktor, 3 - wirnik nośny śmigła, 4 - reduktor wstępny,
 5 - reduktor śmigłowy, 6 - śmigło

OCENA OBCIĄŻEŃ KADŁUBÓW SILNIKÓW TURBINOWYCH

Względy konstrukcyjne nakazują ocenę nie tyle wartości naprężeń i osiągniętych współczynników bezpieczeństwa względem granic sprężystości użytych materiałów analizowanej części kadłuba w ekstremalnych warunkach cieplnych, lecz wielkości jej odkształceń cieplnych i sprężystych. Kadłuby silników turbinowych mają co najmniej dwie grupy węzłów konstrukcyjnych wymagających precyzyjnej oceny przemieszczeń i odkształceń promieniowych, w których muszą występować ściśle określone dokładności wzajemnego położenia części współpracujących. Dotyczy to bieźni łożysk na czopach wałów wirników w podporach kadłuba, luzów wierzchołkowych pomiędzy łopatkami roboczymi wieńców wirnikowych sprężarek i turbin oraz powierzchni współpracujących wszystkich uszczelnień labiryntowych. Odnosi się to do pracy w warunkach ustalonych i nieustalonych, w całym zakresie prędkości obrotowych silnika i warunków lotu statku powietrznego. Obciążenia kadłubów siłami i momentami częściowo równoważą się w samym silniku, a przenoszone na płatowiec węzłami mocowania to reakcyjne momenty sprężarek turbin (w stanach ustalonych) oraz ciśnienia w kanałach przepływowych z wyjątkiem ciągu w silnikach odrzutowych, a ciągu śmigła i jego reakcyjnego momentu obrotowego w silnikach śmigłowych i śmigłowcowych.

Węzły mocowania są według przepisów lotniczych klasyfikowane jako elementy krytyczne silnika. Na węzły mocowania w każdym typie silników przenoszone są obciążenia od siły ciężkości w warunkach lotu ustalonego i zwiększone obciążenia podczas lotu torach krzywoliniowych statku.

SŁY DZIAŁAJĄCE NA ZAWIESZENIE SILNIKA

$$P = \frac{-pm_{sil}}{g} + K_s + m_{sam}$$

gdzie,

K_s - ciąg silnika, p - wektor przyspieszenia środka masy - $p = [p_x, p_y, p_z]$, m_{sil} - masa silnika, m_{sam} - masa samolotu

Oddziaływanie silnika na zawieszenie jest sumą momentów od sił bezwładności i giroskopowych od manewrów samolotu.

$$Mx_z = Mx_b + Mx_g$$

gdzie,

M_b - Momenty działające na zawieszenie silnika od sił bezwładności $M_b = -\frac{dK_0}{dt} - \omega K_0$

M_g - Moment od sił giroskopowych $M_g = -I_0 \Omega \times \omega_s$

I_0 - masowy moment bezwładności wirnika

K - kręt samolotu w położeniu przestrzennym $K_0 = [K_x, K_y, K_z]$

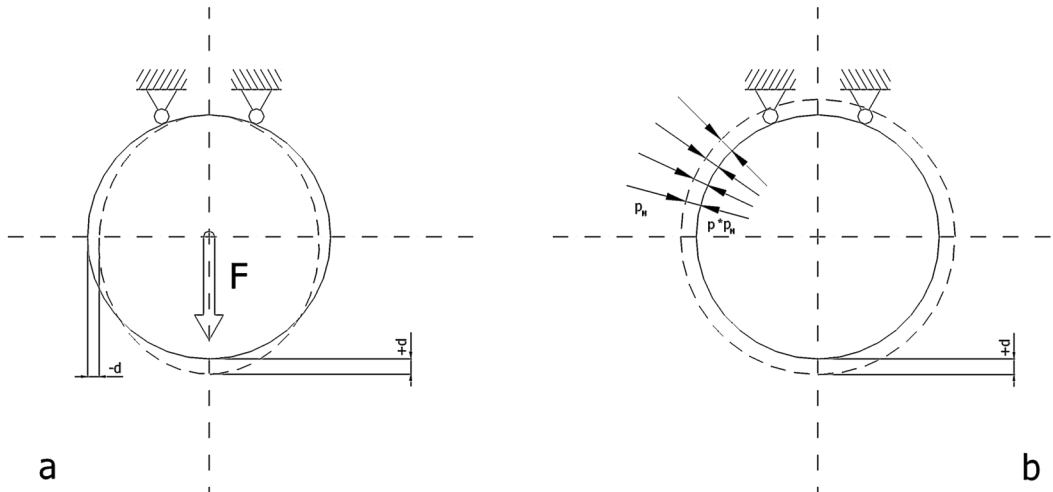
Ω - prędkość kątowna samolotu

ω_s - prędkość kątowna wirnika silnika

Zminimalizowanie wpływu reakcyjnych momentów obrotowych w silnikach śmigłowych można osiągnąć przez zastosowanie śmigieł przeciwbieżnych, co jest charakterystyczne w pojawiających się samolotach z napędem śmigło-wentylatorowym. Cienkościenne konstrukcje zewnętrznych ścian kadłubów, które są jednocześnie ścianami kształtującymi kanały przepływowe silników zawieszane punktowo w węzłach mocowania silników w płatowcu odkształcają się podczas przeciążeń poprzecznych (rys. 7). Wielkości tych odkształceń stanowiąc o wyborze montażowych luzów wierzchołkowych łopatek sprężarek i turbin. Natomiast stosowanie coraz wyższych wartości sprężu w nowopowstających konstrukcjach zwłaszcza w wentylatorowych silnikach odrzutowych sprzyja powstaniu osiowo-symetrycznych odkształceń zewnętrznych ścian kadłubów, co może w znacznym stopniu niwelować wielkości odkształceń podczas przeciążeń siłami poprzecznymi.

Niepomijalnym obciążeniem elementów składowych kadłubów silników turbinowych jest odkształcalność cieplna - silnie zróżnicowana na strefę chłodną do osłony komory spalania i gorącą obejmującą pozostałą część kadłuba. Obydwie strefy są rozdzielone w przedziale silnikowym ścianą ogniową i oddzielnie wentylowanymi - chłodzone wymuszonym przepływem powietrza. Zmniejszenie wpływu odkształceń cieplnych konstrukcji jest realizowane przez systemy chłodzenia, odpowiedni dobór materiałów oraz rozwiązania konstrukcyjne zawierające elementy podatne.

Poszczególne zespoły kadłubów są wykonywane ze stopów aluminium, tytanu, stali oraz stopów żaroodpornych, różniących się współczynnikami rozszerzalności cieplnej. Szczególnej uwadze są poddawane kadłuby łożysk, tak aby ich przemieszczenia promieniowe nie powodowały zacisku łożysk. Już w silnikach RR Derwent i Nene kadłuby łożysk podpierających turbinę były połączone z kadłubem turbiny za pomocą żeber skośnie usytuowanych, co na skutek przemieszczenia kątownego kadłuba wynikającego z obciążenia cieplnego, ogranicza możliwość zacisku bieżni łożyska. Komora łożyskowa w części gorącej silnika jest oddzielana od kanału przepływowego dwupowłokowa strukturą i wentylowana powietrzem zza sprężarki. Zwiększa to trwałość łożysk poprzez obniżenie temperatury ich pracy i zmniejsza niebezpieczeństwo koksowania oleju. Powyższe odnosi się również do uproszczonych modeli fizycznych kadłubów, które pozwalają jednak ocenić wpływ najważniejszych rodzajów obciążeń na odkształcenia kadłubów, zależnych od zakresów pracy silników warunków lotu. W każdym przypadku nowych konstrukcji konieczne jest prowadzenie odpowiednich badań eksperymentalnych odzwierciedlających rzeczywiste obciążenia w przewidywanych warunkach użytkowania samolotu. Zróżnicowanie odkształcalności cieplnej części współpracujących ze sobą narzuca dobór odpowiednich pasowań i luzów.



Rys. 7. Odkształcenie ścian zewnętrznych kadłubów silników pod działaniem sił:
a) poprzecznych, b) ciśnienia w kanale wlotowym

F - siła poprzeczna, π - spręż silnika, p_H - ciśnienie otoczenia, δ - przemieszczenie promieniowe ściany pod działaniem obciążeń

KADŁUBY JAKO ŹRÓDŁO INFORMACJI DIAGNOSTYCZNYCH

W wewnętrznej strukturze, oraz na zewnętrznych mocowaniach kadłubów silników turbinowych znajdują się przewody instalacji paliwowej, olejowej, powietrznej. Zarówno na przewodach rurowych jak i bezpośrednio na kadłubach mocowane są czujniki ciśnienia, temperatur, poziomu drgań, czy „korki magnetyczne”, które dostarczają informacji zarówno do systemu diagnostycznego, umożliwiającego ocenę stanu zużycia silnika, jak i do systemu ostrzegania przed awarią, zainstalowanego w kabinie pilota samolotu. Czujniki drgań umieszczone są na kadłubach w pobliżu głównych podpór wirników, w miejscu które zapewnia dogodny dostęp w trakcie obsługi eksploatacyjnej oraz pomiar poziomu drgań wirnika bez dodatkowego

wpływu elementów sprężystych i tłumiących konstrukcji. Pomiar częstotliwości oraz amplitudy drgań umożliwia zarówno ocenę stanu wirnika (wektor niewyważenia pojawiający się w wyniku oderwania się części łopatki) oraz stopnia uszkodzenia węzłów łożyskowych (wzrost poziomu amplitudy drgań spowodowane pojawieniem się nadmiernych luzów w łożysku). Doświadczenie wskazuje, że częstotliwości odpowiadające zdwojonej prędkości obrotowej wirnika sygnalizują zużywanie się łożysk, w których jest osadzony. System przepływów wewnętrznych rozprowadza sprężone powietrze o odpowiednich parametrach pobierane z różnych części głównego kanału sprężania kanałami i przewodami rurowymi znajdującymi się na zewnątrz kadłubów jak i w ich strukturze, zarówno w celu ogrzewania elementów konstrukcji we wlocie do sprężarki, jak i obniżania temperatury kadłubów w strefie gorącej oraz wymuszania przepływów przez elementy wirnika poprzez zapewnienie odpowiedniej różnicy ciśnienia. Sterowanie procesem ogrzewania i chłodzenia poszczególnych sekcji kadłubów ma szczególne znaczenie w trakcie akceleracji i deceleracji silnika. Sterowanie wielkością luzów wierzchołkowych na łopatkach wirnikowych zespołów turbin, przy szybkich zmianach temperatury spalin umożliwia utrzymanie optymalnej sprawności turbiny a jednocześnie zabezpiecza wierzchołki piór łopatek roboczych przez zacieraniem w elementach uszczelniających kadłuba.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Instytut Lotnictwa – Zakład Silników Lotniczych – „Projekt Wstępny silnika D-18 Obliczenia sił poprzecznych obciążających łożyska pędni” – Warszawa 1987 r.
- [2] Instytut Lotnictwa – Zakład Silników Lotniczych – „Opis silnika K-15” – Warszawa 1993 r.
- [3] Instytut Lotnictwa – Zakład Silników Lotniczych – „Instrukcja eksploatacji silnika K-15” – Warszawa 1993 r.
- [4] Instytut Lotnictwa – Zakład Silników Lotniczych – „Sprawozdania i protokoły z badań silników K-15, K-16, SO-3, D-18, GTD-350”
- [5] W. Balicki [i in.] – „*Lotnicze zespoły napędowe*” – Wyd. WAT, Warszawa 2009 r.