

Tomasz BIK

## ZINTEGROWANE ZESPOŁY ŁOPATEK I DYSKÓW JAKO PRZYKŁAD ROZWOJU KOMPONENTÓW LOTNICZYCH NAPĘDÓW TURBOODRZUTOWYCH – CZ.1

*W artykule przedstawiono charakterystykę zintegrowanych zespołów łopatek i dysków stosowanych jako elementy konstrukcyjne lotniczych silników turboodrzutowych. Zwrócono uwagę na typowe własności tych zespołów, które w sposób bezpośredni determinują wydajność pracy kompletnych jednostek napędowych. Przywołane procesy produkcyjne definiują podejmowane współcześnie kierunki rozwoju wirujących części kompresorów, natomiast napotkane ograniczenia konstrukcyjne pozwalają na zdefiniowanie zakresu możliwych do osiągnięcia parametrów eksploatacyjnych. Wynikająca z zastosowania tytułowych komponentów większa sprawność silników, która pozwala zmniejszyć zużycie paliwa, ograniczyć hałas czy podnieść poziom bezpieczeństwa podróży w sposób bezpośredni przekłada się na zwiększenie efektywności transportu lotniczego.*

### WSTĘP

Współczesne silniki lotnicze są zaawansowanymi technologicznie zespołami mechatronicznymi, których wytwarzanie oparte jest o szereg innowacyjnych technik zarówno na etapie projektowania jak i samej produkcji. Przez kilka ostatnich dziesięcioleci daje się obserwować systematyczny rozwój całej branży lotniczej. Jego efektami są udoskonalenia wprowadzane w konstrukcjach znajdujących się w eksploatacji oraz całkiem nowe rozwiązania, odzwierciedlające osiągnięcia techniki ostatnich lat.

Rezultaty prowadzonych badań rozwojowych są szczególnie widoczne w obszarze lotniczych jednostek napędowych. To dzięki nim współczesne samoloty zużywają mniej paliwa produkując przy tym mniej szkodliwych dla środowiska zanieczyszczeń, są cichsze, a sama podróż odbywa się w bardziej komfortowych warunkach. Nie bez znaczenia pozostaje wzrost bezpieczeństwa pasażerów i pilotów wynikający z wysokiej niezawodności silników, a także wydłużenie czasu eksploatacji oraz okresów pomiędzy kolejnymi serwisami poszczególnych jednostek. Rozważając czynniki wymienione powyżej oraz mając na względzie wciąż nie w pełni wykorzystany potencjał branży lotniczej możemy przypuszczać, że jej dalszy rozkwit będzie kontynuowany co najmniej przez następne kilkadziesiąt lat.

### 1. CEL PRACY

Za cel niniejszego opracowania przyjmuje się ukazanie zintegrowanego zespołu łopatek i dysku (blisk) (Rys.1.) jako przykładu jednego z szeregu konsekwentnie rozwijanych komponentów silników lotniczych. Ze względu na fakt, iż bliski mają bezpośredni wpływ na wzrost wydajności pracy napędów turboodrzutowych, przyjmuje się, że pozytywnie wpływają na efektywność całego transportu lotniczego. Wykorzystywane podczas ich projektowania, testów i produkcji technologie odzwierciedlają obecne kierunki rozwojowe dla elementów konstrukcyjnych silników. Informacje zbierane podczas eksploatacji i diagnostyki serwisowej jednostek wyposażonych w bliski potwierdzają natomiast przewidywany wzrost efektywności ich pracy.

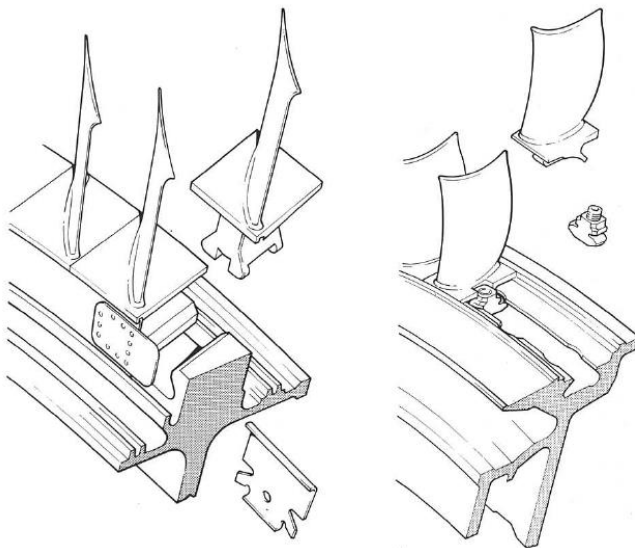


Rys. 1. Zintegrowany zespół łopatek i dysku (blisk) [19].

### 2. ZINTEGROWANE ZESPOŁY ŁOPATEK I DYSKÓW

Sprężarka jest obok turbin(y) i przedziału komory spalania jednym z głównych zespołów tworzących silnik przepływowy. Ma decydujący wpływ na jego spręż a poprzez to na właściwe osiągi całego zespołu napędowego. Dlatego też, od każdego elementu mechanicznego (w tym blisku) składającego się na konstrukcję sprężarki, wymaga się wysokiej sprawności i niezawodności pracy.

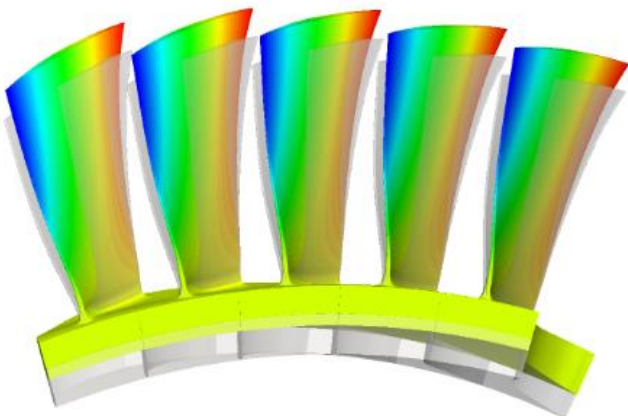
Współczesne silniki turbinowe (np. GENX, PW1000G, Trent 1000, EJ200) zdominowane zostały przez wielostopniowe sprężarki osiowe jedno- lub dwuwirnikowe, w silnikach dwuprzepływowych poprzedzane dodatkowo zespołem wentylatora. Elementy wirujące tradycyjnych sprężarek osiowych składają się zazwyczaj z wielu rozdzielnych elementów nośnych (tarcz lub bębnow) na których osadzone są łopatki w sposób umożliwiający ich demontaż i ponowny montaż podczas obsługi serwisowej (Rys. 2).



**Rys. 2.** Przykłady łączenia łopatek kompresora z dyskiem: zamek (po lewej) oraz połączenie śrubowe (po prawej).

W tradycyjnych rozwiązaniach lotniczych i przemysłowych spotyka się więc tarcze z łopatkami mocowanymi indywidualnie za pomocą śrub i nakrętek lub na zasadzie zamka łopatki (typu choinkowego lub tzw. jaskółczego ogona) i slotu jej mocowania w dysku. Alternatywą wobec tego rodzaju połączeń jest rozwijana od połowy lat 80 ubiegłego stulecia konstrukcja blisków, w której dysk i łopatki stanowią zwartą, jednolitą część. Zaletami takiej konstrukcji są przede wszystkim:

- sięgająca 20% redukcja masy (brak śrub i nakrętek lub zamka łopatki i wieńca slotów na dysku)
- wzrost wydajności aerodynamicznej kompresorów (eliminacja przecieków w obszarze połączeń łopatek z wieńcem dyskowym a przez to wyższa kompresja)
- wydłużenie czasu eksploatacji (pozbycie się podatnego na fretting i zmęczenie połączenia kontaktowego)
- eliminacja zagrożenia pęknięciem zamka w obszarze karbu i oderwania się łopatki
- mniejsza liczba części składowych (większa niezawodność)
- mniejsza pracochłonność montażu
- krótsze łańcuchy tolerancji wykonania i montażu części składowych

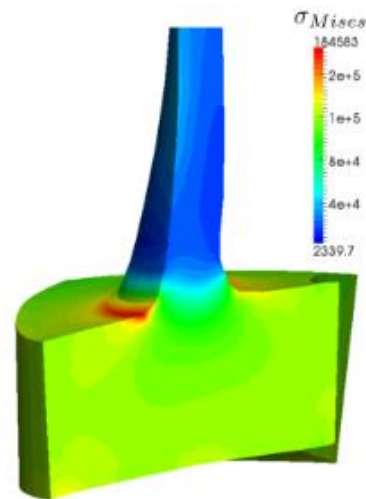


**Rys. 3.** Deformacje łopatek bliska na skutek działania siły odśrodkowej (kolor szary – geometria nieodkształcona, kolor czerwony – obszary najbardziej odkształcone) [12].

Zależnie od przeznaczenia, poszczególne bliski różnią się pomiędzy sobą geometrią, konfiguracją ich wzajemnego łączenia oraz naturalnie - gabarytami. Aspekty te determinują wprost rodzaj stosowanych metod produkcji oraz ich parametry. Wszystko po to, aby finalne komponenty w maksymalnym stopniu spełniały stawiane im wymagania eksploatacyjne.

Oprócz szeregu zalet, bliski posiadają również pewne trudne do wyeliminowania mankamenty, wśród których najistotniejszymi są:

- pracochłonność wykonania i związane z nią wysokie koszty produkcji
- skomplikowane, wymagające specjalistycznego oprzyrządowania oraz wiedzy metody produkcji i napraw
- czasochłonne, liczne kontrole międzyoperacyjne
- w przypadku stwierdzenia uszkodzenia nawet pojedynczej łopatki, konieczność demontażu całego silnika celem wymiany bliska lub regeneracji jego uszkodzonego obszaru
- trudności w spełnieniu wymagań podczas wyważania
- skomplikowana geometria części wywołująca złożony stan naprężeń w całej jej objętości
- trudności w osiągnięciu pożądanej geometrii, odpornej na wpływ wibracji harmonicznym (dla komponentu monolitycznego nie obserwujemy efektu tłumienia drgań, obecnego na granicy połączeń łopatek rozłącznych z dyskiem)



**Rys. 4.** Obszary koncentracji naprężeń przy przejściu łopatki w strefę dyskową bliska (kolor czerwony – obszar największych naprężeń) [12].

Z uwagi na fakt, iż sprężarka znajduje się na początku kanału przepływowego, bliski (zwłaszcza początkowe stopnie) muszą odznaczać się szczególnymi własnościami i odpornością na uszkodzenia mechaniczne. Podczas startu i lądowania samolotu łopatki blisków narażone są na zderzenia z ziarnami piasku bądź innymi zasysanymi odłamkami nawierzchni, natomiast w trakcie lotu łopatki te mogą zostać uszkodzone w wyniku kontaktu ze znajdującymi się w powietrzu: pyłem, grudkami lodu czy ptakami (Rys. 5). Dodatkowym efektem ubocznym zasysanych do wnętrza sprężarki pyłów są powstające na łopatkach blisków osady, które zaburzając przepływ strugi czynnika roboczego zmniejszają sprawność całego silnika. Jako że zespół niskiego ciśnienia usytuowany jest tuż za wlotem powietrza, zanieczyszczenia osadzają się przede wszystkim na łopatkach w jego obszarze. Niezbędna jest zatem okresowa kontrola i mycie kanałów przepływowych sprężarek.

Środowisko i warunki pracy zespołów łopatek zintegrowanych z dyskami wymagają stosowania wytrzymałych i odpornych temperaturowo stopów, odznaczających się przy tym wysokim wskaźnikiem

lekkości (stosunek wytrzymałości do gęstości materiału). Najmniej obciążane łopatki przeznaczone do pracy w temperaturze 400-500[K] wykonuje się więc ze stopów aluminium (np. PA28, PA29), a łopatki sprężarek naddźwiękowych i o dużych sprężach, dla temperatury rzędu 700-800[K], ze stopów tytanowych lub na osnowie niklu. W kompresorach niskiego ciśnienia tradycyjny stop Ti6V4 coraz częściej jest zastępowany np. przez Ti6242 lub Ti6246, podczas gdy dla kompresorów wysokiego ciśnienia popularny IN718 jest powszechnie zastępowany stopem DA718, odznaczającym się około 7% większą wytrzymałością. Ostatnie stopnie blisków od strony komory spalania, poddawane w trakcie pracy najwyższemu naprężeniu termicznym, są najczęściej produkowane ze stopów niklu ([5]).



**Rys. 5.** Łopatki kompresora uszkodzone mechanicznie w wyniku ich kontaktu z ciałami obcymi [14].

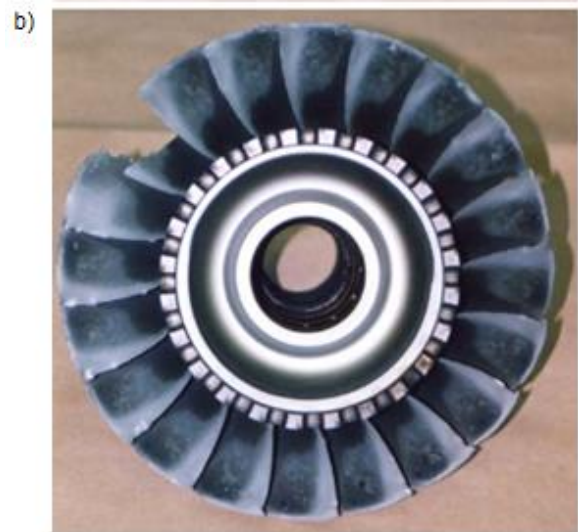


**Rys. 6.** Spieczony nalot ciał obcych (piasek, kurz) na łopatkach ostatniego stopnia kompresora [20].



**Rys. 7.** Blisk z pokryciem antyerozyjnym w obszarze przepływu medium roboczego [5].

Równoległe z rozwojem struktur materiałowych rozwijane są technologie pokryciowe, których głównym zadaniem jest osłona i wydłużenie żywotności rodzimego materiału części (Rys. 7). Pokrycia osłaniają łopatki blisków przed korozją wywołowaną wysoką temperaturą w środowisku gazowym i erozyjnym oddziaływaniem zasasyanych przez kompresor piasku i kurzu (Rys. 6). Stopy przeznaczone do produkcji blisków kompresorów wysokiego ciśnienia, szczególnie narażonych na oddziaływanie czynników destrukcyjnych, wzbogaca się więc pierwiastkami zdolnymi wytworzyć na powierzchni części tlenki zmniejszające prędkość utleniania się materiału. Tlenkami o bardzo dobrych właściwościach zabezpieczających przed korozją są: tlenek chromu  $Cr_2O_3$ , tlenek aluminium  $Al_2O_3$  i tlenek krzemu  $SiO_2$ .



**Rys. 8.** Blisk z uszkodzonymi mechanicznie łopatkami (a – widok od przodu, b – widok od tyłu) [22].

Typowe uszkodzenia blisków oprócz uszkodzeń zmęczeniowych, sprowadzają się do uszkodzeń mechanicznych ich piór (Rys. 5, Rys. 8, Rys. 9), tj. wgnieceń i wyrwań materiału na krawędziach natarcia oraz wierzchołkach, wygięcia krawędzi natarcia, spływu lub wierzchołków ale też rys na wklęsłej i wypukłej stronie profilu. Ponadto, uszkodzeniu mogą ulec przestrzenie między łopatkami oraz masy uszczelniające nad ich wierzchołkami (wykruszenie lub wytarcie). Najbardziej narażone na uszkodzenia mechaniczne są łopatki pierwszego stopnia, toteż ich kontroli dokonuje się najczęściej (kontrola wizualna), a w przypadku stwierdzenia nieprawidłowości kontrolę rozszerza się na kolejne stopnie wspomagając się borskopią, fiberoskopią i wideoskopią.



Rys. 9. Wykruszone pióro bliska w trakcie naprawy [18].

Pomimo licznych podobieństw procesy naprawcze łopatek blisków różnią się od napraw zwykłych łopatek, zwłaszcza kiedy w grę wchodzi ponowne nanoszenie powłok lub obróbka cieplna. Najbardziej rygorystycznym procesem wśród napraw jest jednak kompletna wymiana łopatek, wiążąca się z ich odcinaniem i ponownym łączeniem w krytycznych dla części strefach (Rys. 4). W przypadku tak wymagających komponentów jak bliski bardzo dużą uwagę przywiązuje się do jakości ich wykonania, dlatego zarówno części nowe jak i po naprawie, przed montażem poddawane są ścisłej kontroli mającej wykazać ich zdolność do użycia. Sprawdzana jest głównie geometria, wymiary krytyczne (pomiar optyczny i na maszynach współrzędnościowych) oraz jakość struktury materiałowej (fluorescencyjna kontrola penetracyjna, kontrola ultradźwiękowa, trawienie segregacyjne). Ilość kontrolowanych wymiarów części podyktowana jest najczęściej stabilnością procesu produkcyjnego.

## PODSMOWANIE

Konstrukcja blisków wprowadza ważny wkład w kierunku optymalizacji sprawności pracy i redukcji masy komponentów napędów turbodrzutowych poprzez co wpływa wprost na zwiększenie efektywności transportu lotniczego. Biorąc pod uwagę odporne na wysoką temperaturę bliski ostatnich stopni kompresora wysokiego ciśnienia, ich projekt stał się najnowocześniejszym w obrębie całej sprężarki. Kluczową kwestią dla sukcesu prowadzonych prac rozwojowych okazała się techniczna wykonalność i wysoka eksploatacyjna niezawodność produktu.

## BIBLIOGRAFIA

1. Antonio M. Mateo Garcia (2011): BLISK Fabrication by Linear Friction Welding. *Advances in Gas Turbine Technology*, Dr Ernesto Benini (Ed.), ISBN: 978-953-307-611-9, INTECH.
2. BAI B., BAI G., LI Ch.: Application of Improved Hybrid Interface Substructural Component Modal Synthesis Method in Vibration Characteristics of Mistuned Blisk, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 27, No. 6, 2014.
3. Balicki W., Chachurski R., Głowacki P., Godzimirski J., Kawalec K., Kozakiewicz A., Pagowski Z., Rowiński A., Szczeciński J., Szczeciński S.: *Lotnicze silniki turbinowe. Konstrukcja- Eksploatacja-Diagnostyka Część 1*, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa, 2010.
4. Bill G.: *The development of Jet and Turbine Aero Engines*.
5. Busmann M., Bayer E.: *Blisk Production of the Future, Technological and Logistical Aspects of Future-Oriented Construction and Manufacturing Processes of Integrally Bladed Rotors.*, MTU Aero Engines, ISABE-2009-1169.
6. Busmann M., Bayer E.: *Market-oriented blisk manufacturing. A challenge for production engineering.*, MTU AeroEngines GmbH Dachauer Str. 665 D80995 Munchen.

7. Christian Maria Firrone and Teresa Berruti (2012). Non Contact Measurement System with Electromagnets for Vibration Tests on Bladed Disks, *Applied Measurement Systems*, Prof. Zahurul Haq (Ed.), ISBN: 978-953-51-0103-1, InTech.
8. Dąbrowski L., Keller R., Tomczak J.: Przykłady innowacyjnego wykorzystania precyzyjnych obrabiarek ECM, *Inżynieria Maszyn*, R. 16, z. 4, 2011.
9. Dzierżanowski P., Kordziński W., Łyżwiński M., Otyś J., Szczeciński S., Wiatrek R.: *Turbinowe silniki odrzutowe*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1983.
10. Dzygadlo Z., Łyżwiński M., Otyś J., Szczeciński S., Wiatrek R.: *Zespoły wirnikowe silników turbinowych*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1982.
11. Examination of a Field Compressor Blisk, Technical Analysis Report no: 39/01 Occurrence no: 200102263 Reference no: be/200100016.
12. Grossmann D., Juettler B., Schlusnus H., Barner J., Anh-Vu V.: Isogeometric Simulation of Turbine Blades for Aircraft Engines
13. Kumar R.: A review on blisk technology, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 2, Issue 5, May 2013.
14. Mishra R. K., Raghavendra Bhat R.: Analysis of compressor surge in a military turbojet engine: A case study
15. Strona internetowa: [www.bladonjets.com](http://www.bladonjets.com)
16. Strona internetowa: [www.fertigung.de](http://www.fertigung.de)
17. Strona internetowa: [www.gkn.com](http://www.gkn.com)
18. Strona internetowa: [www.mtu.de](http://www.mtu.de)
19. Strona internetowa: [www.sandvik.coromant.com](http://www.sandvik.coromant.com)
20. Strona internetowa: [www.hydrochem.com](http://www.hydrochem.com)
21. Strona internetowa: [www.verticalmachiningcentres.blogspot.com](http://www.verticalmachiningcentres.blogspot.com)
22. Technical Analysis Report No: 39/01. Occurrence No: 200102263. Examination of a Failed Compressor Blisk
23. Patent: US 5113583 A - Integrally bladed rotor fabrication
24. Patent: US 5867885 A - IBR fixture and method of machining
25. Patent: US 5109606 A - Integrally bladed rotor fabrication or repair

### Blades and discs integrated units as an example for components development of aircraft turbojet engines

*This article presents characteristics of blades and discs integrated units used as construction components of turbojet engines. An attention was drawn to the typical properties of these units that in a direct way determine complete engine performance. The mentioned production processes define the currently undertaken trends in development of compressors rotating parts, whereas the encountered structural limitations allow to define the range of operating parameters possible to achieve. Higher engine efficiency, resulting from usage of the title components, it helps to reduce fuel consumption, restrict noise and improve the safety of traveling what directly turns into increasing of the air transport efficiency.*

Autor:

mgr inż. **Tomasz Bik** – Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Konstrukcji Maszyn