

# Najnowsze rozwiązania w projektowaniu silników odrzutowych komercyjnych samolotów pasażerskich

Piotr Ułasiuk

Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Chełmie



Rolls Royce UltraFan

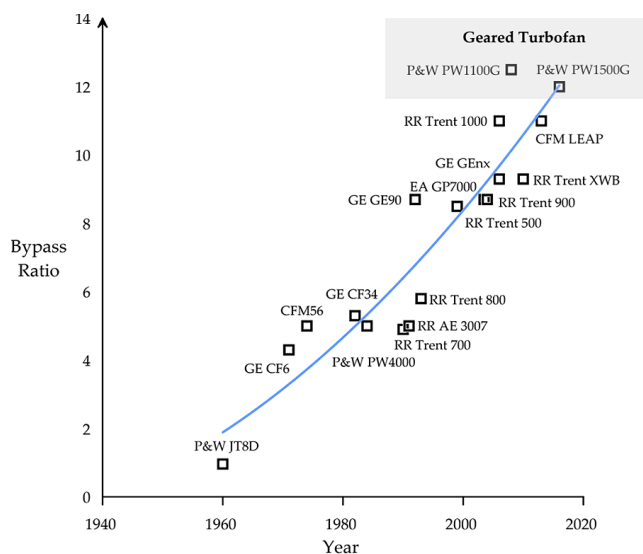
Źródło: [8]

## Streszczenie

Rynek lotniczy w Polsce, jak i na świecie dynamicznie się rozwija i przyciąga uwagę wielu inwestorów. Jak nigdy dotąd, największe koncerny lotnicze szukają w każdym możliwym aspekcie sposobu na zmniejszenie kosztów produkcji, eksploatacji oraz zużycia paliwa swoich samolotów. Bez wątpienia najważniejszym komponentem samolotu oraz tym, w którym można wprowadzić szereg nowych technologii i optymalizacji poszczególnych części, jest silnik odrzutowy. W artykule opisano najnowsze rozwiązania, które są wpro-

wadzone przez największych producentów napędów lotniczych oraz ich wpływ na polepszenie parametrów użytkowych. Przedstawiono wybrane rozwiązania konstrukcyjne i technologie stosowane w najnowszych konstrukcjach, jak na przykład Rolls Royce UltraFan, General Electric GEnx oraz Pratt & Whitney's PW 1100G.

**Słowa kluczowe:** silniki odrzutowe, optymalizacja, rynek lotniczy, technologie lotnicze, oszczędność paliwa, rozwój silników lotniczych



Ryc. 1. Ewolucja współczynnika dwuprzepływowości

Źródło: [5]

## Wprowadzenie

Istnieją dwie główne metody zwiększenia ciągu. Jedną z nich jest zwiększenie wydatku masowego powietrza prze-

ptywającego przez silnik. Może to być osiągnięte na skutek zwiększenia ilości (masy) powietrza lub przyspieszenie go do wyższych prędkości [1]. W praktyce pierwszy sposób jest stosowany prawie zawsze przy projektowaniu nowoczesnych silników dwuprzepływowych. Drugim sposobem jest zwiększenie energii gazów wylotowych poprzez spalanie mieszanki paliwowo-powietrznej w wyższej temperaturze. Powoduje to zwiększenie ilości energii odbieranej przez turbinę oraz ciąg uzyskany poprzez wylot gazów z wysoką prędkością.

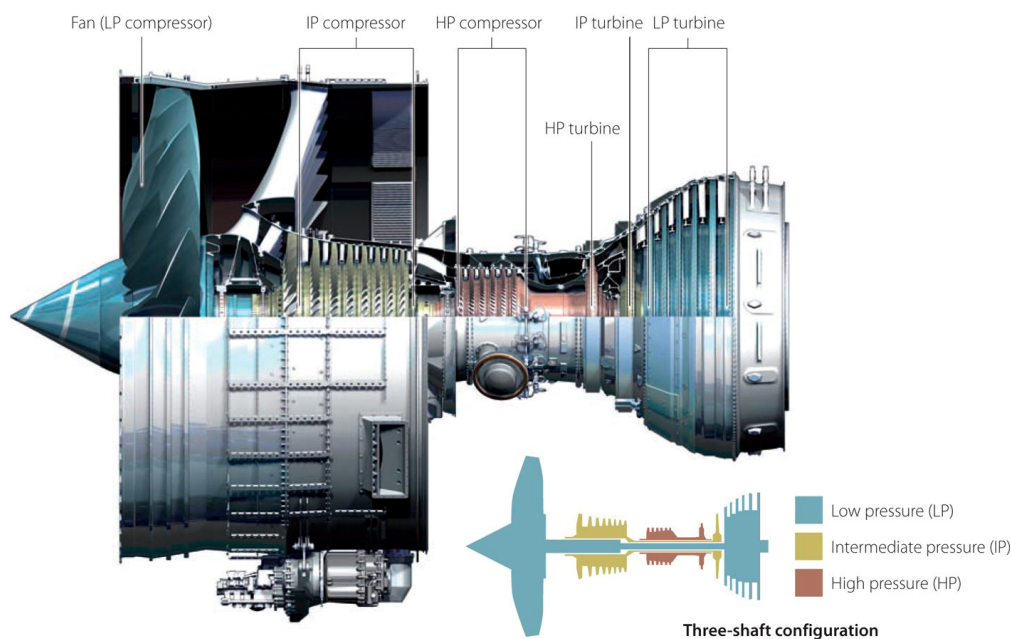
## Współczynnik dwuprzepływowości

Współczesne silniki odrzutowe korzystają z zalet wysokiego współczynnika dwuprzepływowości [2]. Określa on stosunek wydatku masowego powietrza przepływającego kanałem zewnętrznym do wydatku masowego powietrza przepływającego przez kanał wewnętrzny silnika. Wentylator umieszczony w przedniej części silnika jest odpowiedzialny za wytwarzanie nawet do 80% całkowitego ciągu silnika [3]. Wentylator jest napędzany przez turbinę znajdującą się w „gorącej” części silnika. Aby zoptymalizować taki układ, producenci dążą do miniaturyzacji rdzenia silnika (sekcji sprężarki, komory spalania, turbiny) oraz do maksymalnego zwiększenia rozmiarów wentylatora w celu zmniejszenia zużycia paliwa [4].



Ryc. 2. Airbus A220 z silnikami Pratt & Whitney PW1500G o współczynniku dwuprzepływowości 12:1

Źródło: [19]



Ryc. 3. RR Trent – zastosowanie trzech wałów

Źródło: [8]

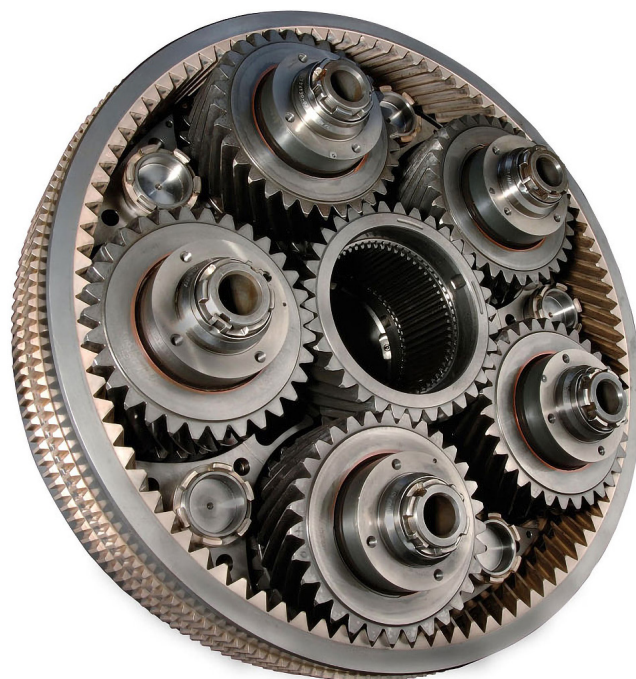
Na rycinie 1 przedstawiono tendencje zmiany współczynnika dwuprzepływowości dla silników odrzutowych od lat 60. do roku 2020. Nowsze konstrukcje rzadko kiedy posiadają współczynnik dwuprzepływowości mniejszy niż 10, a najnowocześniejsze konstrukcje osiągają stosunek aż 12,5:1 [5].

### Nowa architektura silnika

Zwiększenie współczynnika dwuprzepływowości nie jest jednak prostym zadaniem. Istnieje praktyczny limit, do którego możemy zwiększać ten stosunek, po przekroczeniu którego wystąpią zbyt duże starty aerodynamiczne przewyższające uzyskane zalety. W konwencjonalnym silniku wentylator napędzany jest poprzez turbinę niskiego ciśnienia umiejscowioną bezpośrednio przed wylotem. Obraca się ona z bardzo dużą prędkością obrotową sięgającą rzędu nawet 30 000 obr/min [6]. Wartość ta jest często limitowana z powodu innych części połączonych tym samym wałem. Dla wentylatora optymalna prędkość obrotowa jest o wiele niższa niż dla turbiny [7]. Skutkuje to tym, że turbina, wentylator oraz sprężarka nie pracują w najbardziej optymalnych warunkach. Inżynierowie z brytyjskiej firmy Rolls Royce zastosowali trójwałowe rozwiązanie. Silnik posiada turbinę wysokiego, średniego i niskiego ciśnienia [8]. Wszystkie trzy są połączone z odpowiadającą im sprężarką. Każdy z wałów obraca się z własną prędkością obrotową, co przenosi się na pracę w optymalnych warunkach. Dodatkowo zastosowanie takiej architektury silnika pozwala na przeniesienie części pracy ze sprężarki średniego ciśnienia (IP) na sprężarkę wysokiego ciśnienia. Pozwoliło to na lepsze zarządzanie rozkładem temperatur szczególnie dla łożysk, które są najbardziej narażone na zużycie pod wpływem wysokich temperatur. Poprzez odciążenie wału średniego ciśnienia (IP)

trzeci wał jest mniej podatny na uszkodzenia. Ponadto to rozwiązanie pomogło w uzyskaniu bardzo wysokiego sprężu całkowitego wynoszącego 70:1.

Powiększanie rozmiarów wentylatora będzie związane z większymi siłami odśrodkowymi zgodnie ze wzorem. Aby nie zwiększać sił działających na łopatkę wentylatora jednocześnie zwiększając jej długość, należy zmniejszyć prędkość obrotową lub masę. Alternatywnie możemy zwiększyć



Ryc. 4. Przekładnia planetarna o przełożeniu 3:1 wykorzystywana w silniku PW1000G

Źródło: [20]

wytrzymałość. W celu zmniejszenia prędkości obrotowej, która ma największy wpływ na siły odśrodkowe, producenci stawiają coraz częściej na przekładnie pomiędzy wentylatorem a resztą silnika [9]. W praktyce używane są przekładnie planetarne z przełożeniem około 3:1 [10]. Zastosowanie takiej przekładni pozwala na znaczne zredukowanie prędkości obrotowej wentylatora (40000–50000 RPM) jednocześnie pozwalając turbinie niskiego ciśnienia obracać się z bardzo wysokimi prędkościami (12000–15000 RPM) [10].

Dodatkowo poprzez osiągnięcie tych najlepszych prędkości obrotowych kompresor oraz turbina mogą składać się z mniejszej liczby stopni przy tych samych osiągnięciach, co prowadzi do oszczędności miejsca oraz zmniejszenia masy silnika. W silniku UltraFan firmy Rolls Royce przekładnia przeniosła napęd o mocy 87000 KM [8], a w znacznie mniejszym PW1000G – 30000 KM. Przekładnie te również są zaprojektowane do pracy w systemie bezobrotowym, pomijając okresową wymianę oleju.

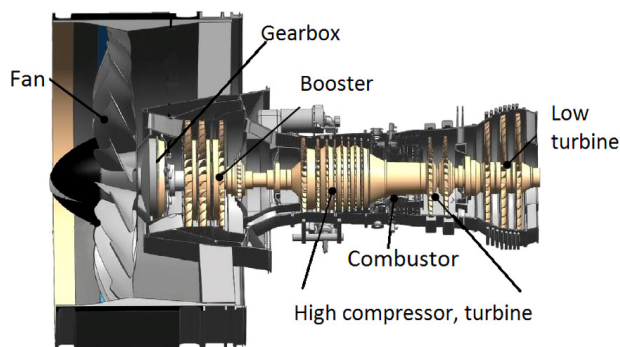
Końcówki łopat wentylatora posiadają największą prędkość obrotową. Prowadzi to nierzadko do przekraczania przez nie prędkości dźwięku. Pomimo tego, że obudowa silnika skutecznie zapobiega większym stratom aerodynamicznym, spowodowanych przez fale uderzeniowe, jednak mały spadek osiągnięć istnieje. Dla przykładu porównując silniki CFM56-2 oraz CFM56-3, gdzie średnica wentylatora jest mniejsza (a co za tym idzie, zmniejsza się prędkość obrotowa końcówek łopat) dla wersji „-3” zauważalny jest wzrost wydajności oraz zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa o prawie 3% [11]. Ponadto przy przekraczaniu prędkości dźwięku wytwarza się bardzo duży hałas. Jego redukcja staje się coraz ważniejsza przy rosnącym zagęszczeniu zabudowy wokół lotnisk. Zjawisku temu również możemy zapobiegać za pomocą użycia przekładni planetarnych.

Pomimo istnienia pomysłu wykonania takiego mechanizmu napędu wentylatora od niemal 50 lat, dopiero teraz technologia pozwala na seryjną produkcję. Spowodowane jest to między innymi rozwojem materiałów wykorzystywanych w lotnictwie. Charakteryzują się one ponadprzeciętną wytrzymałością oraz niewielką masą.

## Rozwój materiałów używanych w silnikach turbowentylatorowych

Drugi sposób pozwalający zwiększyć rozmiary wentylatora, jednocześnie nie zwiększając sił odśrodkowych, o których wspomniano, to zmniejszenie masy łopaty wentylatora. Najbardziej efektywnym sposobem jest używanie lekkich materiałów kompozytowych, takich jak włókno węglowe [12]. Kompozyty są używane głównie ze względu na ich wysoki współczynnik wytrzymałości do masy oraz możliwości uzyskania szczególnych własności kierunkowych wytrzymałości. Ponadto kompozyty węglowe mogą być używane do tworzenia bardzo złożonych geometrycznie kształtów w prosty sposób.

W porównaniu z tradycyjnymi materiałami, takimi jak tytan czy aluminium, kompozyty oferują niższą masę przy zachowaniu odpowiedniej wytrzymałości. Przykładowo dla silnika GENx, w którym wykorzystano kompozyty



Ryc. 5. Pratt & Whitney's Geared Turbofan PW 1100G

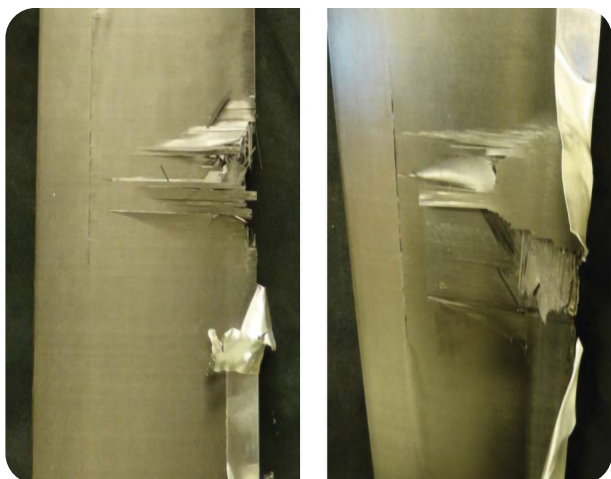
Źródło: [21]

wentylator, masa została zmniejszona o 66% w porównaniu z łopatkami wykonanymi z tytanu, jednocześnie zwiększając ich wytrzymałość o 100%. Ponieważ wytrzymałość została tak znacząco zwiększona, przekrój poprzeczny łopaty mógł być zmniejszony, a prędkość obrotowa zwiększona [13]. Doprowadziło to do tego, że General Electric zmniejszyło liczbę łopat z 22 do 18, ponownie zmniejszając masę układu. Zmniejszenie liczby łopat pomaga w zredukowaniu poziomów hałasu [14].

Niestety używane do tego celu kompozyty posiadają również wady. Jedną z wad kluczowych dla wentylatora silnika odrzutowego jest mała udatność. Łopatki wentylatora są pierwszym elementem, na który natrafi ciało obce przy zderzeniu. Dlatego muszą one posiadać wysoką wytrzymałość na uderzenia tak, aby całość struktury nie została zniszczona. Przy uderzeniu łopata nie może również przebić obudowy silnika i uderzyć w konstrukcję samolotu. Przeprowadzone przez NASA badania pokazują, że łopatki wykonane z włókna węglowego nie spełniają wymogów bezpieczeństwa [15]. Z tego powodu kompozytowe łopatki wentylatora są często wzmacniane za pomocą tytanu na krawędziach natarcia, który posiada o wiele większą udatność oraz akceptowalną wagę. Takie rozwiązanie możemy zaobserwować w silnikach GENx oraz UltraFan.

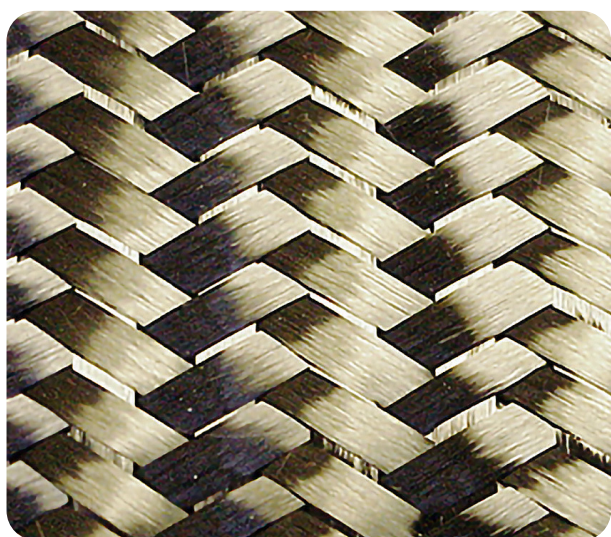
Po sukcesie związanym z wykorzystaniem kompozytów w produkcji wentylatorów inżynierowie próbowali znaleźć dla nich zastosowanie w innych częściach silnika. Próby użycia kompozytów do wykonania elementów sekcji gorącej silnika zakończyły się niepowodzeniem. Kompozyty z włókna węglowego tracą swoją integralność przy już przy 490°C utrzymywanych przez 3 min [14]. Prowadzone są najnowsze badania nad nowymi materiałami, które nie bazują na węglu i mogłyby zostać użyte do najgorętszych sekcji silnika. Przykładem są kompozytowe materiały ceramiczne CMC (ang. *ceramic matrix composites*), wykazujące bardzo wysoką odporność na temperatury panujące np. w komorze spalania, jednocześnie posiadając niższą wagę niż aktualnie stosowane materiały, takie jak nadstopowy aluminium [17].

Inaczej wygląda sytuacja w przypadku obudowy silnika. Z jednej strony jest to często jeden z najcięższych komponentów silnika, a z drugiej nie jest to część przenosząca wysokie obciążenia ani nie można go uznać jako głównego elementu konstrukcyjnego. Pomimo tego obudowa musi być na tyle wytrzymała, aby wytrzymać przypadek, gdy



Ryc. 6. Uszkodzone uderzeniem łopatki silnika wykonane z kompozytów węglowych  
Źródło: [15]

jedna z łopat wentylatora ulegnie uszkodzeniu i oderwie się od wału. W tym przypadku obudowa spełnia zadanie ochrony reszty płatowca przed „wyszrzeloną” z bardzo wysoką prędkością częścią. Dlatego też podjęto działania w celu wykonania obudowy silnika wykonanej z kompozytu o niskiej wadze, ale również spełniającej wymogi bezpieczeństwa w przypadku opisanej awarii. NASA w swoich badaniach wykorzystwała trójosiowy splot węglowy jako innowacyjną alternatywę dla aluminium w produkcji osłon wentylatorów do silników odrzutowych [16]. Sploty te są nie tylko wyjątkowo wytrzymałe, ale także umożliwiają znaczne zmniejszenie wagi i zużycia paliwa. Skuteczne rozłożenie obciążeń sprawia, że struktury splotowe są wyjątkowo odporne na uderzenia. Ponieważ wszystkie włókna w strukturze biorą udział w odbieraniu obciążenia, splot absorbuje dużą ilość energii podczas awarii, co czyni go bardzo skutecznym rozwiązaniem w osłonach łopat wentylatora w samolotach komercyjnych.



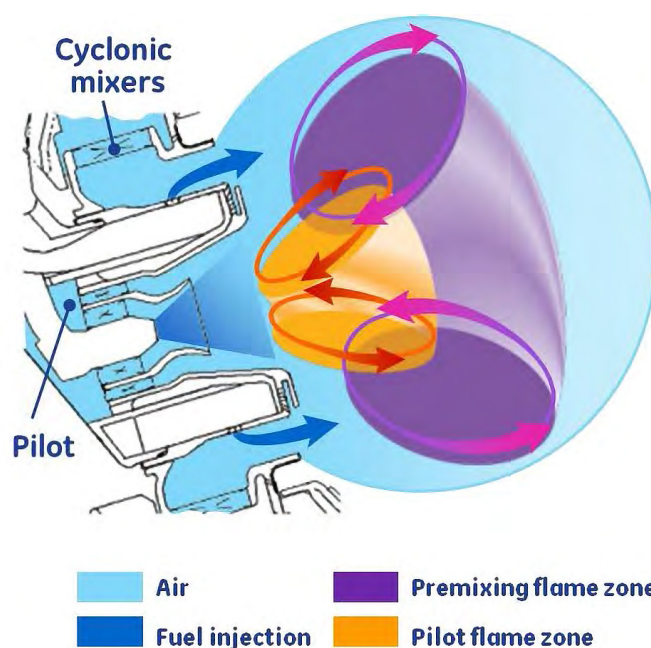
Ryc. 8. Spleciona struktura kompozytu węglowego pozwalająca na przeniesienie wysokich obciążeń  
Źródło: [16]



Ryc. 7. Przekrój przez obudowę silnika  
Źródło: [10]

## Technologie wtrysku paliwa

Przy szukaniu oszczędności oraz bardziej ekonomicznych rozwiązań nie sposób nie zatrzymać się przy samym sednie sprawy, jakim jest zużycie paliwa. Każde z powyżej przedstawionych rozwiązań w pewnym stopniu pośrednio przekłada się na niższe zużycie paliwa. Jednakże producenci silników szukają również nowych rozwiązań bezpośrednio zarządzających wtryskiem ilości paliwa. Zasadniczo dąży się do uzyskania mieszanki paliwowo-powietrznej mniej bogatej w paliwo. Prowadzi to do zmniejszenia zużycia paliwa oraz emisji spalin, co jest szczególnie ważne przy coraz bardziej rygorystycznych celach klimatycznych [8]. Poprzez ulepszone mieszanie paliwa i powietrza przed zapłonem osiąga się bardziej kompletne spalanie. Oprócz maksymalizacji uwolnienia energii z paliwa występuje także korzyść dla emisji, z mniejszą ilością NOx i cząstek emitowanych [18]. System Twin Annular Premixing Swirler (TAPS) wykorzystuje wtryskiwacze paliwa z dwoma kanałami (centralny



Ryc. 9. System TAPS  
Źródło: [18]

określany jako pilot oraz główny), jak pokazano na rycinie 9. Centralny wtrysk działa podobnie jak standardowy wtryskiwacz wykorzystujący bogatą mieszankę. Podczas rozruchu i niskiej mocy paliwo jest w 100% wtryskiwane do pilota. Przy wyższej mocy paliwo jest dzielone pomiędzy kanał centralny i główny. Wtrysk główny to zestaw promieniowych strumieni, które wchodzą do większego wirującego obszaru powietrza głównego. Spalana jest tam mieszanka uboga w paliwo. Przy wysokiej mocy większość paliwa jest wstrzykiwana przez wtrysk główny. Sprawia to, że zarówno obszar mieszania paliwa pilota centralnego, jak i głównego są ubogie w paliwo. Dokładne wymieszanie paliwa pozwala na zastosowanie mieszanki znacznie uboższej niż stechiometryczna oraz niższej temperatury spalania, co prowadzi do znacznego zmniejszenia emisji w szczególności tlenków azotu.

## Podsumowanie

W przyszłości możemy spodziewać się kolejnych nowych rozwiązań wraz z rozwojem rynku lotniczego. Wiele technologii wykorzystywanych w innych dziedzinach przemysłu sprawdziło się i znalazło szerokie zastosowanie. Lotnictwo charakteryzujące się bardzo wysokimi standardami jakości i niezmiernie szerokim i długotrwałym testom będzie powoli wprowadzać coraz to nowsze technologie już dostępne, a tylko oczekujące na dostosowanie do warunków pracy w silniku odrzutowym. Szczególnie rozwój inżynierii materiałowej pozwoli na produkcję i optymalną ze względów ekonomicznych materiałów dotychczas nieużywanych w lotnictwie. Coraz częściej można zaobserwować również wpływ zastosowania nowych rodzajów produkcji, jak np. druk 3D w lotnictwie do wykonywania bardzo złożonych elementów. Całościowy rozwój przyczyni się do coraz bardziej efektywnego, tańszego i ekologicznego transportu lotniczego, który odgrywa istotną rolę w gospodarce globalnej.

## Bibliografia

- [1] Brauhn, R.D. (2015). *Aviation Maintenance Technician Certification Series: Gas Turbine Engines. Module 15*, Aircraft Technical Book Co.
- [2] Balicki, W., Głowacki, P., Szczeciński, S., & Kozakiewicz, A. (2016). Bilans energetyczny wirników dwuprzepływowych silników odrzutowych. *Prace Instytutu Lotnictwa*, 3(244), 321–328.
- [3] Hodson, H., & Howell, R. (2005). *The role of transition in high-lift low-pressure turbines for aeroengines*. *Progress in Aerospace Sciences*, 41, 419–454.
- [4] Russell, J. (2021, October 27). NASA, US Industry Accelerate Advancement of Small Core Aircraft Engines. Explore. <https://www.nasa.gov/aeronautics/nasa-us-industry-accelerate-advancement-of-small-core-aircraft-engines/>
- [5] Alves, P., Silvestre, M. & Gamboa, P. (2020). Aircraft Propellers – Is There a Future?. *Energies*, 13(16). <https://doi.org/10.3390/en13164157>
- [6] Gas turbine. (2024, September 17). In Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Gas\\_turbine](https://en.wikipedia.org/wiki/Gas_turbine)
- [7] Guynn, M., Berton, J. J., Fisher, K. L., Haller, W. J., Tong, M. & Thurman, D. R. (2013, August 24). *Engine Concept Study for an Advanced Single-Aisle Transport*. NASA NTRS.
- [8] Rolls Royce. (2024, September 17). *The Ultimate TurboFan*. <https://www.rolls-royce.com/innovation/ultrafan.aspx>
- [9] Graham-Rowe, D. (2021, December 13). *More Efficient Jet Engine Gets in Gear*. MIT Technology Review. <https://www.technologyreview.com/2010/12/13/24891/more-efficient-jet-engine-gets-in-gear/>
- [10] Fehrm, B. (2016, March 4). *Engine architectures*. Leeham News and Analysis. <https://leehamnews.com/2016/03/04/bjorns-corner-engine-architectures/>
- [11] Epstein, N. (1981). *CFM56-3 High By-Pass Technology for Single Aisle Twins*. In 1981 AIAA/SAE/ASCE/ATRIF/TRB International Air Transportation Conference, 26–28 May 1981. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.1981-808>
- [12] Fromm, J. (2016). *Composite Fan Blades and Enclosures for Modern Commercial Turbo Fan Engines. ASEN 5063: Gas Turbine Propulsion*. <https://www.colorado.edu/faculty/kantha/sites/default/files/attached-files/fromm.pdf>
- [13] Mecham, M. (2006, 17 April). GENx Development Emphasizes Composites, Combustor Technology. <https://aviationweek.com/genx-development-emphasizes-composites-combustor-technology>
- [14] Ranasinghe, K., Guan, K., Gardi, A., & Sabatini R. (2019). Review of Advanced Low-Emission Technologies for Sustainable Aviation. *Energy*, 188. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115945>
- [15] Miller, S. G., Handschuh, K. M., Sinnott, M. J., Kohlman, L. W., Roberts, G. D., Martin, R. E., Ruggeri, Ch. R. & Pereira, J. M. (2015, February 15). *Materials, Manufacturing, and Test Development of a Composite Fan Blade Leading Edge Subcomponent for Improved Impact Resistance*. NASA NTRS. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20150002113>
- [16] National Aeronautics and Space Administration. (2006). *Damage-Tolerant Fan Casings for Jet Engines*. NASA Spinoff. [https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2006/T\\_1.html](https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2006/T_1.html)
- [17] Ohnabe, H., Masaki, S., Onozuka, M., Miyahara, K., Sasa, T. (1999). Potential application of ceramic matrix composites to aero-engine components, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 4(30), 489-496. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(98\)00139-0](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(98)00139-0)
- [18] U.S. Department of Transportation. (2013, June). *TAPS II Combustor Final Report Continuous Lower Energy, Emissions and Noise (CLEEN) Program*. Federal Aviation Administration. [https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/about/office\\_org/headquarters\\_offices/apl/TAPS\\_II\\_Public\\_Final\\_Report.pdf](https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/about/office_org/headquarters_offices/apl/TAPS_II_Public_Final_Report.pdf)
- [19] Lukas Souza. (2024, October 15). A Large Jetliner Sitting on Top of an Airport Tarmac. [Photograph]. Unsplash. [https://unsplash.com/photos/a-large-jetliner-sitting-on-top-of-an-airport-tarmac-M\\_wNYGi9o3s](https://unsplash.com/photos/a-large-jetliner-sitting-on-top-of-an-airport-tarmac-M_wNYGi9o3s)
- [20] Chandler, Ch. (2014, February 27). *Turbine Technology: Innovations in Turbine Engines*. Aviation Pros. [www.aviationpros.com/article/10617063/turbine-technology-innovations-in-turbine-engines](http://www.aviationpros.com/article/10617063/turbine-technology-innovations-in-turbine-engines)
- [21] Fehrm, B. (2024, April 19). *New engine development. Part 4. Propulsive efficiency*. Leeham News and Analysis. <https://leehamnews.com/2024/04/19/bjorns-corner-new-engine-development-part-4-propulsive-efficiency/>