

Tomasz BIK

ZINTEGROWANE ZESPOŁY ŁOPATEK I DYSKÓW JAKO PRZYKŁAD ROZWOJU KOMPONENTÓW LOTNICZYCH NAPĘDÓW TURBOODRZUTOWYCH – CZ.2

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 wspólnie 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

Rozważając efektywność transportu mamy na względzie szereg uwarunkowań związanych z zapewnieniem odpowiedniego poziomu obsługi logistycznej, prawidłowym przepływem informacji wspieranym odpowiednimi systemami komputerowymi, ale także niezawodność wykorzystywanych pojazdów (samolotów dla przypadku lotnictwa). Niezawodność urządzeń technicznych określa ich ciągłą zdolność do bezusterkowej pracy, jest wyrazem trwałości i potwierdza zachowanie należytej staranności na każdym z etapów powstawania komponentów budujących zespoły maszynowe.

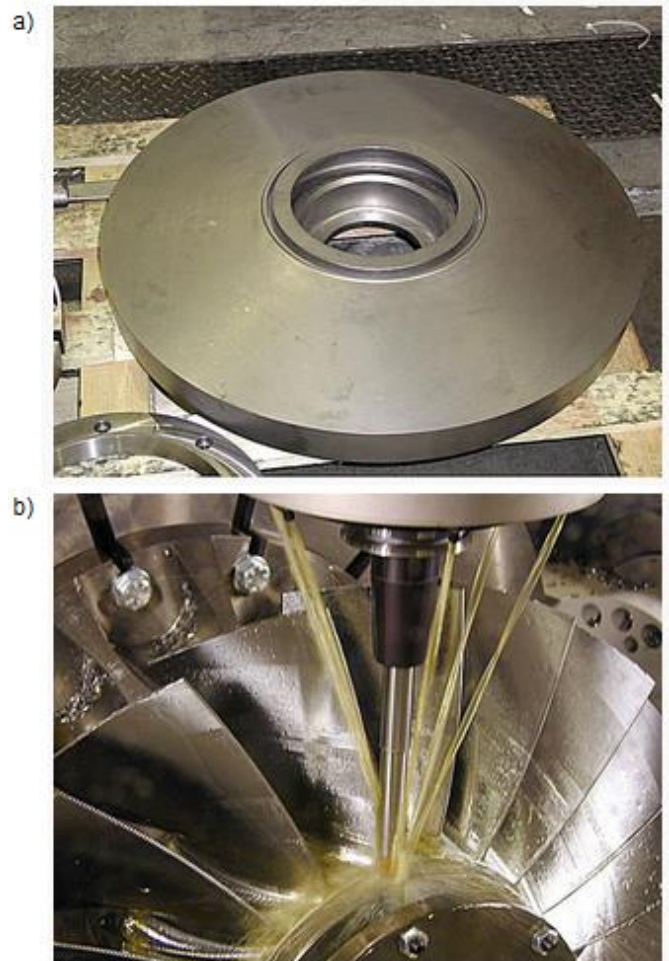
Statystyki wskazują, że silniki turbinowe są jednym z najbardziej niezawodnych modułów współczesnych samolotów. Wynika to przede wszystkim z wykorzystywania technik komputerowych do kontrolowania stanu technicznego silników oraz najnowszych technik projektowania, analizy i wytwarzania poszczególnych części i podzespołów. Główne technologie stosowane w produkcji części silników lotniczych, które mają wpływ na ich jakość to [3]: metody nowoczesnej obróbki ubytkowej i spajania komponentów, metody nanoszenia pokryć termoizolacyjnych i uszczelniających oraz monokrystaliczne odlewanie chłodzonych łopatek turbinowych. Część z tych metod stosowana jest również w trakcie produkcji zintegrowanych zespołów łopatek i dysków (blisków), które spotykane są w strukturze nowoczesnych konstrukcji kompresorów silników lotniczych.

1. WYTWARZANIE BLISKÓW

Zależnie od przewidzianego materiału konstrukcyjnego oraz definiowanego precyzyjnymi parametrami pracy przeznaczenia, bliski mogą być produkowane przy użyciu dalece odmiennych metod. Wśród nich, najbardziej rozpowszechnione to: frezowanie CNC z odkuwki, ubytkowa obróbka elektrochemiczna, odlewanie monolitycznego komponentu, drukowanie 3D oraz łączenie pojedynczych piór łopatek z dyskiem (spawanie lub zgrzewanie tarciove).

Kryterium podziałowym procesów produkcyjnych blisków może być również rozmiar pióra łopatek bądź kwestie obrabialności materiału. W przypadku gdy przestrzeń pomiędzy łopatkami i rozmiary samych łopat są spore, najbardziej popularną techniką jest wykonanie dysku i łopat w oddzielnych procesach i późniejsze łączenie ich

w zespół za pomocą spawania lub zgrzewania. Stosując tą metodę, eliminuje się konieczność usuwania sporej ilości materiału z obszarów pomiędzy sąsiednimi łopatkami jak również problemy z uzyskaniem wymaganej geometrii i chropowatości na powierzchniach profili łopat.



Rys. 1. Odkuwka bliska (a) i blisk w trakcie frezowania łopatek na maszynie CNC [21].

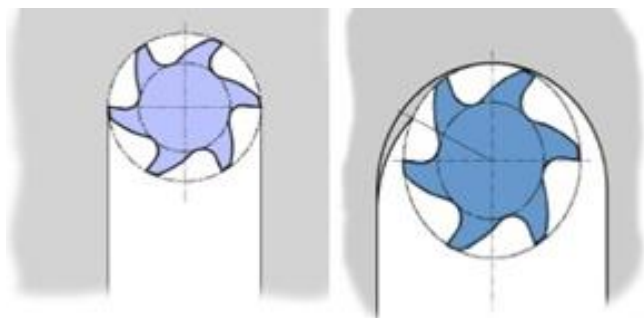
W kwestiach produkcji blisków ostatnich stopni kompresora sprawdzonymi metodami są wysoce wydajne procesy ubytkowej obróbki elektrochemicznej. Dzieje się tak ze względu na trudności w zastosowaniu konwencjonalnych metod ubytkowych do obróbki półfabrykatów będących początkowo odkuwkami trudnoobrabialnych stopów niklu lub spieków metali. Mając na względzie mnogość osobliwości przywołanych powyżej procesów, warto zaznajomić się przynajmniej z kilkoma spośród nich, dlatego w dalszej części opracowania zostaną pokrótce omówione najpowszechniej stosowane dziś metody produkcji blisków.

1.1. Frezowanie

Frezowanie jest obecnie najczęściej używaną metodą produkcji blisków. Wykorzystuje się go przede wszystkim do obróbki blisków o małych i średnich rozmiarach łopatek. Dla łopatek pierwszych stopni kompresorów jest to proces mało wydajny, głównie ze względu na dużą ilość usuwanego materiału i znaczną czasochłonność procesu. Zastosowanie frezowania do produkcji blisków wymaga odpowiedniego, poprzedzonego licznymi testami, doboru maszyn (5-cio osiowe frezarki o dużej dynamice i sztywności), narzędzi i ich geometrii (np. karbidowe, z chłodzeniem wewnętrznym) oraz opracowania stosownej technologii obróbki.



Rys. 2. Proces frezowania bliska na maszynie 5-cio osiowej [16].

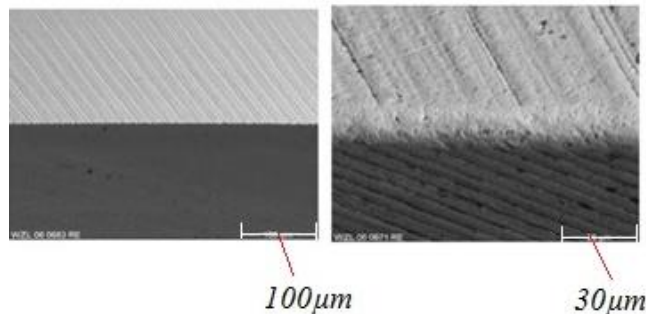


Rys. 3. Idea frezowania konwencjonalnego (po lewej) i obwodowego (po prawej).

Aby zwiększyć wydajność procesu, wielu producentów korzysta z opatentowanej metody frezowania obwodowego. Odnacza się ona wysokim współczynnikiem usuwania materiału, a jej istota polega na ograniczeniu obwodowego kąta kontaktu narzędzia z materiałem obrabianym do około 30-60°. Narzędzie w kolejnych krokach przemierza koliste ścieżki przestrzeni pomiędzy łopatkami dopasowując się do finalnego zarysu ich profili. Dla porównania, w

przypadku frezowania konwencjonalnego kąt kontaktu narzędzia z materiałem dochodzi nawet do 180° (Rys. 3). Podejście oparte na frezowaniu obwodowym w znaczny sposób redukuje obciążalność narzędzi siłami skrawającymi wydłużając tym samym ich żywotność. Wzrost wydajności obróbki możliwy jest natomiast przez zwiększanie głębokości i prędkości skrawania.

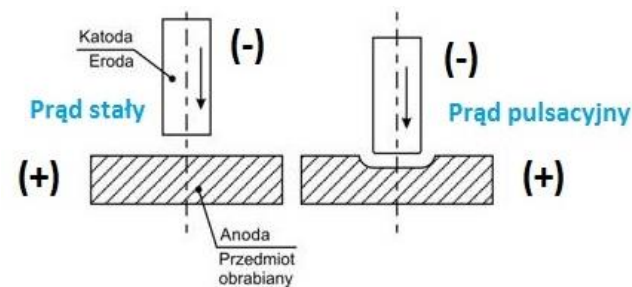
Przeprowadzone przez producentów narzędzi skrawających testy dowodzą, iż odpowiednia geometria ostrza narzędzia nie tylko wpływa na polepszenie własności struktury obrabianej powierzchni (Rys. 4), ale także wydłuża jego żywotność (w niektórych przypadkach podwaja). Implementowane na krawędziach skrawających zaokrąglenia znacząco redukują ryzyko mikrochippingu, odprysków i łuszczenia się materiału jednocześnie zapewniając regularne zużycie (ścieranie) narzędzia.



Rys. 4. Powierzchnia po obróbce narzędziem o ostrych i zaokrąglonych krawędziach [6].

1.2. Obróbka elektrochemiczna (ECM) / Pulsacyjna obróbka elektrochemiczna (PECM)

Procesami rozwijanymi w kontekście produkcji części silnikowych o skomplikowanej geometrii (łopatki bliska) są technologie obróbki elektrochemicznej i precyzyjnej pulsacyjnej obróbki elektrochemicznej. Oparte są one na zjawisku roztwarzania anodowego powierzchni obrabianej. Półfabrykat jest połączony z biegunem dodatnim źródła prądu stałego, natomiast znajdująca się w niewielkiej odległości elektroda robocza z biegunem ujemnym. Przestrzeń między elektrodami wypełnia z kolei elektrolit.



- odległość elektrody >1mm
- mniejsza dokładność
- szybsza obróbka
- odległość elektrody <0.1mm
- wysoka dokładność obróbki
- wolniejsze roztwarzanie materiału

Rys. 5. Idea obróbki materiału metodami ECM (po lewej) i PECM (po prawej).

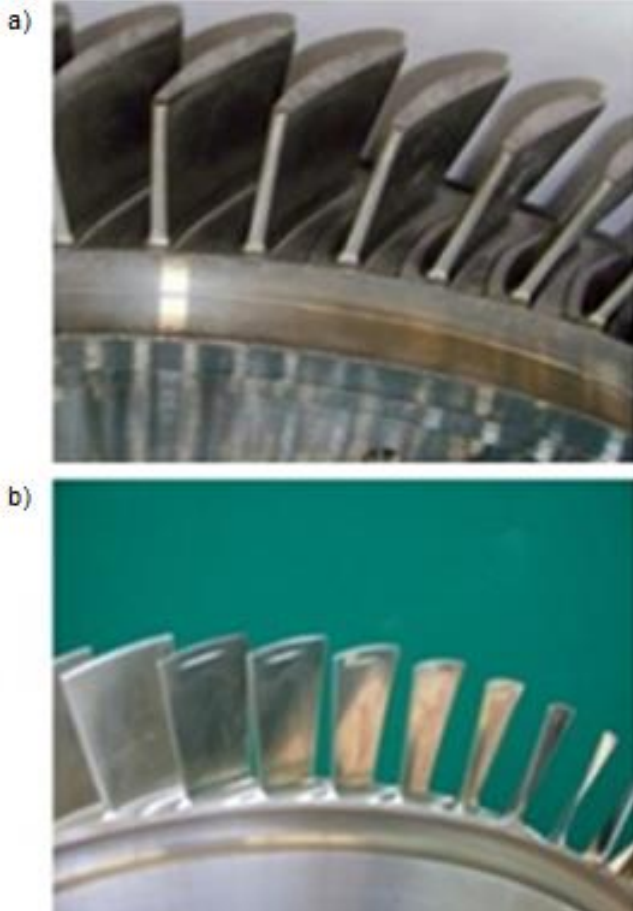
W czasie procesu elektrolizy w wyniku odprowadzenia elektrodów potencjał anody (u nas półfabrykatu bliska) przesuwają się w kierunku dodatnim od potencjału równowagi. Jednocześnie potencjał katody do której elektrony są doprowadzone przesuwają się w kierunku ujemnym. Zmiana potencjałów warunkuje przebieg reakcji elektrodowych podczas których na anodzie obserwować dają się procesy roztwarzania metalu (przechodzi on do roztworu w postaci jonów, gdzie następnie przybiera postać stosownego wodorotlenku),

natomiast na katodzie zachodzą procesy wyładowania kationów (najczęściej wydzielają się wodór).

Do głównych zalet tego rodzaju obróbki zaliczyć można przede wszystkim:

- małe zużycie narzędzi
- zdolność obróbki stopów twardych, trudnoobrabialnych metodami konwencjonalnymi (np. na osnowie niklu)
- mała chropowatość uzyskiwanych powierzchni części
- duża dokładność i powtarzalność wymiarowa procesu
- możliwość obróbki małych i cienkościennych zarysów
- obróbka zgrubna i wykończeniowa możliwe w jednej operacji
- sprzyja produkcji seryjnej
- brak negatywnych efektów temperaturowych i mechanicznych dla mikrostruktury materiału
- nie wpływa na zmianę własności materiału (twardość, wytrzymałość, własności magnetyczne)

Proces ECM ze względu na niezbyt precyzyjne odwzorowywanie pełnego konturu łopatek (głównie w obszarze krawędzi i promieni przejść) jest w praktyce najczęściej używany do obróbki zgrubnej. Obróbka wykańczająca łopatek realizowana jest z kolei w technologii PECM. Jej domeną są skrajnie małe odległości pomiędzy roztworzonym materiałem a wibrującą elektrodą w trakcie obróbki oraz pulsacyjna postać prądu zasilającego. Dzięki zastosowaniu technologii półprzewodnikowej i precyzyjnemu sterowaniu pulsacją prądu, technologia PECM gwarantuje pożądaną geometrię łopatek blisków.



Rys. 6. Łopatki bliska po obróbce wstępnej ECM (a) i wykańczającej PECM (b) [6].

Przeprowadzane próby dowodzą że dla przypadku materiałów trudnoobrabialnych jak np. stopy na osnowie niklu, najbardziej zasadną metodą w kontekście produkcji blisków jest PECM. Zdecydowanie przewyższa ona prędkość obróbki w technologii czystego frezowania, gwarantuje lepszą jakość powierzchni materiału i więk-

szą stabilność geometryczną części. Wszystko to sprawia, że technologie ubytkowej obróbki elektrochemicznej są coraz częściej głównym sposobem produkcji komponentów lotniczych o skomplikowanej geometrii i wykonywanych z materiałów trudnoobrabialnych.

1.3. Zgrzewanie tarciove liniowe

Zgrzewanie tarciove jest używane do wytwarzania mocno obciążonych połączeń pomiędzy łopatkami a dyskiem. W procesie tym dysk unieruchamiany jest w stacjonarnym przyrządzie a łopatki mocuje się kolejno w uchwytach za pośrednictwem których wprawiane są w liniowe oscylacje. Dociskając obie części do siebie, na skutek tarcia wydziela się ciepło. Ciepło rozgrzewa miejscowo oba stykające się elementy do poziomu zbliżonego temperaturze kucia. Finalne dopasowanie i dociśnięcie poszczególnych łopatek do dysku, przy jednoczesnym zaprzestaniu wibracji, powoduje ustanowienie nierozłącznego połączenia. Powstały w trakcie zgrzewania naddatek materiału jest usuwany w procesie obróbki wykańczającej (frezowanie).



Rys. 7. Pióra i dysk przygotowane do łączenia metodą zgrzewania tarciovego [18].

W procesie zgrzewania tarciovego łopatek i dysku równie istotne co samo zgrzewanie jest odpowiednie przygotowanie i zamocowanie elementów zgrzewanych. Chodzi bowiem o to, aby nie pogarszać ich funkcji aerodynamicznych oraz nie wzmacniać odchyłek wymiarowych błędnym zorientowaniem części w przyrządach. Aspekty te są istotne, jako że prowadzone obecnie badania nakierowane są również na łączenie komponentów wykonanych z dwóch odmiennych materiałów, dzięki czemu będzie można je stosować w mocno obciążanych i poddawanych wysokiej temperaturze pracy turbinach silników lotniczych.

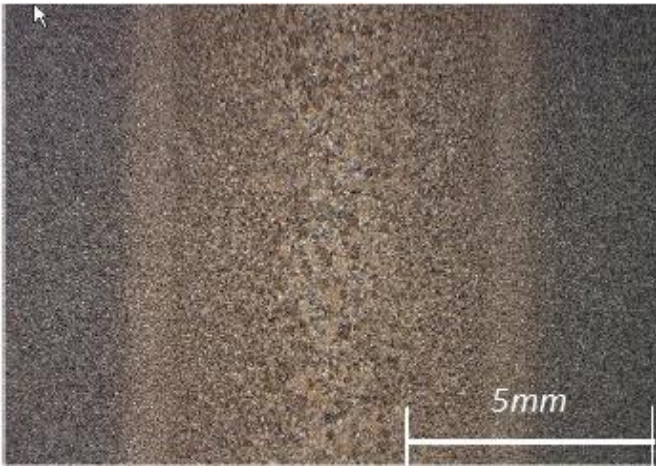
Jako że zgrzewanie liniowe wymaga stosowania zaawansowanych technologicznie maszyn i przyrządów, a sam proces jest trudny do pełnego nadzorowania, opracowana została alternatywna metoda łączenia łopatek z dyskami – wysokoczęstotliwościowe zgrzewanie indukcyjne IHFP (z ang. Inductive High Frequency Pressure Welding).

1.4. Wysokoczęstotliwościowe zgrzewanie indukcyjne

Jest to proces w którym łączenie elementów realizowane jest także poprzez ich wzajemny docisk, z tą różnicą, że wymagana do rozgrzania łopatek i dysku energia cieplna wytwarzana jest lokalnie przez wysokoczęstotliwościowe zmienne pola elektromagnetyczne (Rys. 8.). Otrzymana tym sposobem zgrzeina jest silnie jednorodna i odznacza się własnościami bardzo zbliżonymi do materiałów łączonych (Rys. 9). Skomplikowane maszyny wymagane przy zgrzewaniu liniowym do wytworzenia mechanicznych wibracji i dużych sił dociskowych, w metodzie IHFP zastąpiono mniejszymi urządzeniami których nadrzędną funkcją jest wysterowanie właściwych parametrów procesu zgrzewania.



Rys. 8. Proces wykonywania złącza w metodzie IHFP [18].



Rys. 9. Przekrój przez złącze wykonane metodą IHFP [5].

Wysokoczęstotliwościowe zgrzewanie indukcyjne wykorzystywane jest głównie do produkcji blisków początkowych stopni kompresorów niskiego ciśnienia oraz łączenia dużych łopatek wentylatorów z integrującą je piastą. Dzięki niemu możliwe jest łączenie łopatek i dysków wykonanych z odmiennych materiałów. Zaletą tej technologii jest stosunkowo niewielka strefa wpływu temperatury w trakcie procesu oraz fakt, iż obrabiany komponent poddawany jest o wiele mniejszym naprężeniom w porównaniu do naprężeń towarzyszących zgrzewaniu tarciovemu. Metoda IHFP odgrywa ważną rolę w procesie napraw blisków umożliwiając wymianę pojedynczych, uszkodzonych łopatek na nowe.

PODSUMOWANIE

Poprawnie zaprojektowane i wykonane bliski zwiększają sprawność i wydajność pracy całego silnika. Niższe zużycie paliwa, mniej zanieczyszczeń odprowadzonych do środowiska czy mniejszy hałas przyczyniają się wprost do wzrostu efektywności transportu lotniczego. Charakter pracy blisków sprawia jednak że są one komponentami silnie obciążanymi i narażanymi na uszkodzenia w przypadku niewłaściwej eksploatacji. Kluczową kwestią okazuje się więc być zastosowanie do ich produkcji stopów o podwyższonej wytrzymałości. Aby jednak zapewnić poprawność i powtarzalność geometryczną wykonania, należy wspierać się zaawansowanymi technologicznie procesami, które mimo dużych wymagań gwarantują osiągnięcie założonych na wstępie parametrów.

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, aNo. 6, a2014.
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. Bussmann 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. Bussmann 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. Dźygadło 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
16. Strona internetowa: www.fertigung.de
17. Strona internetowa: www.gkn.com
18. Strona internetowa: www.mtu.de
19. Strona internetowa: www.sandvik.coromant.com
20. Strona internetowa: www.hydrochem.com
21. Strona internetowa: 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