

Płk rez. prof. dr hab. inż. Jan Godzimirski
Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Techniki Lotniczej

Nowe technologie produkcji łopatek lotniczych silników turbinowych

Łopatki to bardzo charakterystyczne części lotniczych silników turbinowych. Są to zarazem najbardziej obciążone elementy silnika. Od ich trwałości zależy ресурс silnika. We współczesnych silnikach może być od 2000 do 3500 łopatek. Zważywszy na tak dużą liczbę tych części w porównaniu z liczbą innych części silnika, na niezawodność i trwałość silnika w głównej mierze wpływa więc niezawodność łopatek. Różnorodność lotniczych silników turbinowych stosowanych w wojskowych statkach powietrznych wynosi od 500 do 1000 godzin, a w cywilnych – od 10 000 do 20 000 godzin. Ze względu na to, że w silnikach turbinowych łopatki montowane są tak licznie, wytwarza się je w warunkach produkcji wielkoseryjnej, nawet wtedy, gdy produkcja silników jest jednostkowa. Koszt i czasochłonność wytwarzania łopatek stanowią od 20 do 35% kosztu i czasochłonności produkcji silnika.

Podczas eksploatacji łopatki poddawane są:

- rozciąganiu i zginaniu pod wpływem sił odśrodkowych,
- zginaniu i skręcaniu pod wpływem sił aerodynamicznych,
- wpływowi zmiennych naprężeń spowodowanych drganiami,
- wpływowi podwyższonej lub wysokiej temperatury (od 300 do 600 °C w wypadku łopatek sprężarek, od 800 do 1200 °C w wypadku łopatek turbin),
- zmęczeniu cieplnemu spowodowanemu gwałtownymi zmianami temperatury w stacjach przejściowych silnika,
- erozji pyłowej, wodnej (deszczowej) i gazowej,

- korozji elektrochemicznej i gazowej wysokotemperaturowej,
- zużyciu ciernokorozyjnemu (frettingowi) w miejscach połączeń (zamek, półka bandażowych i antywibracyjnych).

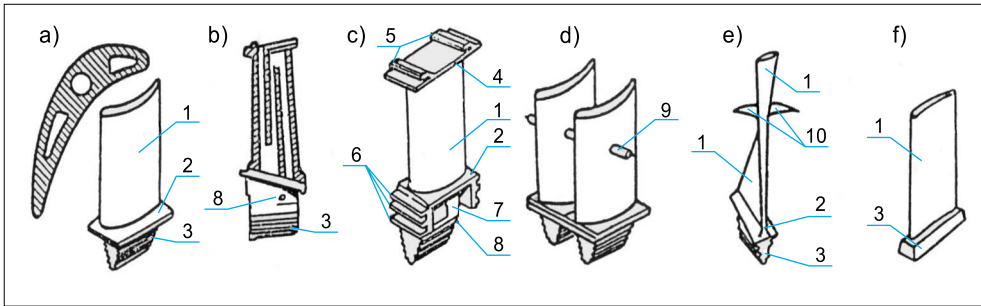
W jednakowych warunkach obciążenia trwałość i niezawodność łopatek sprężarki i łopatek turbiny zależą od wielu czynników, między innymi od:

- cech konstrukcyjnych łopatek zapewniających wyrównanie występujących naprężeń i brak ich koncentracji,
- zastosowanych materiałów i ich stanu po ukształtowaniu półfabrykatu,
- stanu uzyskanej warstwy wierzchniej (chropowatości, znaku i wartości naprężeń szczątkowych, stopnia umocnienia itp.),
- rodzaju i właściwości pokrycia.

Trzy ostatnie z wymienionych czynników są bezpośrednio związane z procesem produkcyjnym. Łopatki można sklasyfikować, przyjmując za kryterium:

- ♦ przeznaczenie – wirnikowe (robocze) łopatki sprężarki, wirnikowe łopatki turbiny, łopatki kierujące sprężarki, łopatki dyszowe turbiny,
- ♦ cechy konstrukcyjne – pełne, wydrążone, wydrążone z deflektorem, z kanałami, spajane z dwóch połówek, chłodzone transpiracyjnie, polikrystaliczne, monokrystaliczne,
- ♦ metody wykonania – przerabiane plastycznie (kute, walcowane, prasowane), odlewane, spawane, spiekane.

Elementami konstrukcyjnymi łopatek są: pióro, zamek, półka zamka oraz ewentualnie



Rys. 1. Przykłady łopatek wirnikowych: a) wielokanałowa chłodzona z zamkiem jodełkowym, b) jednokanałowa chłodzona, c) z wydłużonym zamkiem i półką bandaża, d) z rurką bandaża, e) z półką antywibracyjną, f) z zamkiem typu „jaskółczy ogon”, 1 – pióro, 2 – półka, 3 – zamek, 4 – półka bandaża, 5 – występ labiryntu, 6 – labirynt czołowy, 7 – wydłużenie zamka, 8 – otwór doprowadzenia powietrza, 9 – rurka bandaża, 10 – półka antywibracyjna

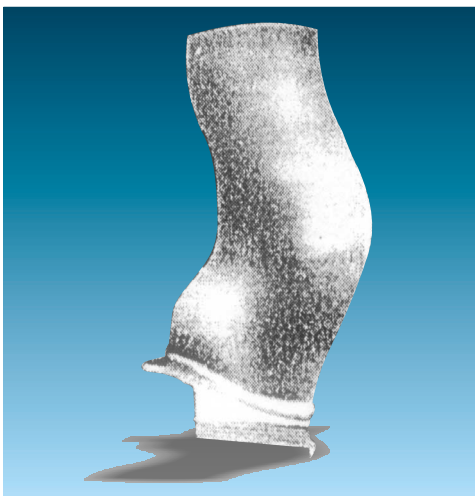
półka bandaża i półka antywibracyjna (rys. 1). Wypukła część pióra nazywana jest grzbietem, a wklęsła korytem. Krawędź pióra od strony wejścia gazów nazywana jest krawędzią natarcia, a przeciwległa krawędzią spływu.

Łopatki wirnikowe mają bardziej złożony kształt i narażone są na większe obciążenia mechaniczne niż łopatki kierujące, dlatego wymagają stosowania szczególnych technologii produkcyjnych, zapewniających wymaganą wytrzymałość i niezawodność. Pióra wirnikowych łopatek sprężarek mają zmienne przekroje i promienie krzywizn wzdłuż pióra,

ich kąt skęcenia dochodzi do 40° , a grubość krawędzi nie jest większa niż $0,1 - 0,25$ mm. W silnikach nowej generacji, w celu podwyższenia sprawności sprężarek i wentylatorów oraz wyeliminowania półek antywibracyjnych z zachowaniem niezbędnej sztywności, stosowane są łopatki szerokocięciwowe, często o bardzo złożonej geometrii przekroju (rys. 2). Pióra wirnikowych łopatek turbin mają zmienne przekroje wzdłuż długości pióra i skęcenia dochodzące do 60° . W porównaniu z łopatkami sprężarek przekroje łopatek turbin są grubsze, co umożliwia zastosowanie wewnętrznych kanałów do chłodzenia łopatek. Pióra łopatek są wykonywane z tolerancją rzędu $0,1$ mm, a ich chropowatość wynosi $Ra = 0,08 - 0,63$ mm. Zamki natomiast wykonywane są z tolerancją rzędu $0,01$ mm, a ich chropowatość może wynosić $Ra = 1,25$ mm.

Wytwarzanie łopatek stanowi szczególnie etap w produkcji lotniczych silników turbinyowych. Wynika to z:

- złożonej i różnorodnej geometrii tych wyrobów,
- wymagań dotyczących dokładności wykonania i stanu warstwy wierzchniej,
- stosowania drogich i trudno obrabialnych materiałów,
- dużej pracochłonności,
- konieczności stosowania do obróbki i kontroli specjalistycznego oprzyrządowania oraz zatrudniania wykwalifikowanego personelu.



Rys. 2. Łopatka wentylatora silnika *TREND 5000*

Wybrane technologie produkcji wirnikowych łopatek sprężarkowych

Wirnikowe łopatki sprężarkowe mogą różnić się wymiarami, kształtem oraz sposobem połączenia z tarczą (rys. 3). Przeciętna wysokość typowych łopatek sprężarkowych zawiera się w granicach 60 - 150 mm, ale wysokość łopatek wentylatorowych może wynosić do 1000 mm. Jeśli temperatura pracy łopatek sprężarkowych nie przekracza 500 °C, są one wytwarzane ze stopów tytanu, jeśli zakres temperatury pracy wynosi 500 – 650 °C, łopatki wytwarza się ze specjalnych stali żarowytrzymałych i żaroodpornych, jeśli natomiast temperatura pracy jest wyższa niż 650 °C – to ze stopów żarowytrzymałych i żaroodpornych na osnowie niklu. Podejmowane są próby – trzeba zaznaczyć, że obiecujące – wytwarzania łopatek wentylatorowych z kompozytów metalicznych aluminium-bor, a ostatnich stopni sprężarek z intermetali tytan-aluminium.

W procesie wytwarzania łopatek sprężarkowych bardzo ważne jest przygotowanie półfabrykatu, gdyż od niego w dużym stopniu zależy struktura materiału. Proces przygotowania półfabrykatu powinien zapewniać:

- uzyskanie półfabrykatu z takimi nadatkami technologicznymi, które zapewnią przy-

gotowanie gotowego produktu o wymaganych wymiarach geometrycznych,

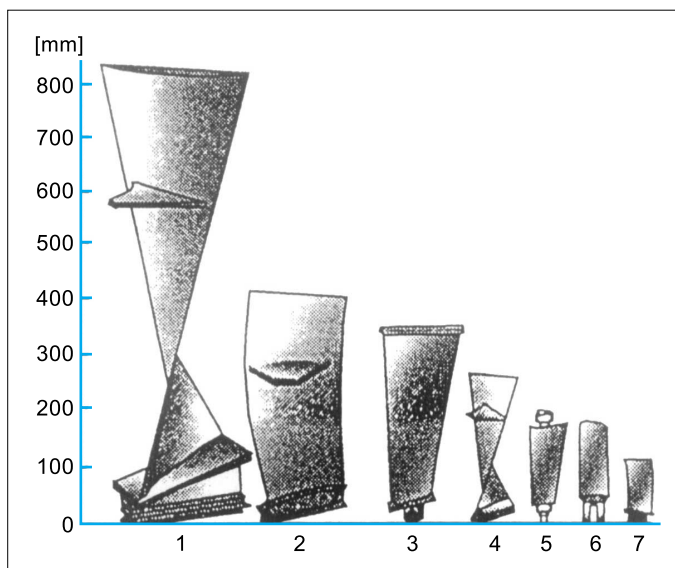
- możliwość wykonania półfabrykatu z materiałów stosowanych na łopatki,
- uzyskanie produktu o optymalnej strukturze i właściwościach fizyczno-mechanicznych,
- uzyskanie półfabrykatu bez potencjalnych ognisk inicjacji zniszczenia (wad),
- minimalne zużycie materiału,
- jak najmniejsze czasochłonność i koszty,
- uzyskanie prefabrykatu wymagającego jedynie w minimalnym zakresie obróbki mechanicznej,
- uzyskanie prefabrykatu wymagającego jedynie w minimalnym zakresie obróbki ręcznej.

Obecnie najczęściej stosuje się następujące metody przygotowania półfabrykatów łopatek sprężarkowych:

- ♦ matrycowe prasowanie na gorąco na prasach śrubowych lub korbowych,
- ♦ izotermiczne prasowanie (matryce podgrzane do temperatury surówki),
- ♦ dynamiczne wyciskanie,
- ♦ walcowanie na gorąco lub izotermiczne.

Surówką do wykonania półfabrykatu jest walec o określonych wymiarach i chropowatości $Rz \leq 40$ mm wykonany z walcowanego

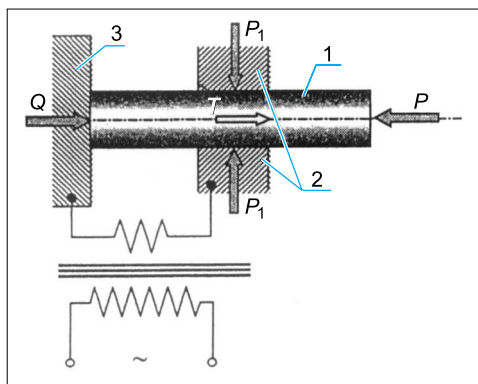
Rys. 3. Łopatki sprężarkowe: 1 - 7 – grupy wymiarowe łopatek



na gorąco pręta. Na powierzchni surówki nie może być pęknięć, włosowatości, wgnieceń czy innych wad. Surówka jest również kontrolowana ultradźwiękami w celu wykrycia wad wewnętrznych.

Kucie matrycowe obejmuje kształtowanie wstępne, matrycowanie wstępne i matrycowanie ostateczne. Kształtowanie wstępne półfabrykatów łopatek polega na spęczeniu materiału pod zamek i ewentualnie półki. Spęczenie można wykonywać, stosując metodę spęczenia na kowarkach poziomych lub metodę walcowania na gorąco. Znane są i bardziej wydajne metody: spęczenie elektrycznooporowe i walcowanie cykliczne.

W trakcie elektrospęczenia dokonuje się elektrooporowego nagrzewania tylko tej części surówki, która podlega deformacji (rys. 4), materiał ulega deformacji w miarę nagrzewania. Specjalne urządzenia pracują w cyklu półautomatycznym – półfabrykat jest mocowany i zdejmowany ręcznie, cykl roboczy zaś jest sterowany automatycznie. Parametry elektrospęczenia dobierane są eksperymentalnie. Prawidłowość doboru parametrów ocenia się na podstawie kształtu i wymiarów oraz struktury materiału spęczanej części. Spęcać można końce pręta, a także jego środkową część (np. pod półkę antywibracyjną). Ta metoda spęczenia ma wiele zalet, między innymi tę, że nie trzeba ogrzewać surówki w piecu. Po-

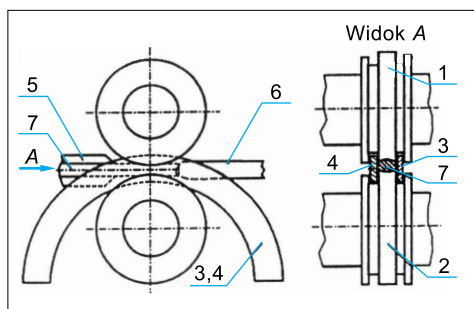


Rys.4. Schemat spęczenia elektrooporowego: 1 – surówka, 2 – zacisk promieniowy, 3 – styk oporowy, P – siła docisku, T – siła tarcia, Q – siła spęczenia

nieważ czas nagrzewania jest krótki (0,5 - 2 min), nie tworzy się zgorzelina ani nie zmieniają się właściwości chemiczne warstwy wierzchniej. Spęczenie zachodzi w jednej operacji niezależnie od wielkości odkształcenia, gdyż nie ma ryzyka utraty stateczności (wyboczenia), bo materiał jest nagrzewany i odkształca się stopniowo.

Półfabrykaty łopatek można wstępnie przygotować, stosując również metodę wzdłużnego walcowania cyklicznego (rys. 5). Podgrzaną surówkę, w postaci długiego pręta (do 1800 mm), zabezpiecza się pokryciem, które spełnia funkcję smaru, izolacji termicznej i bariery ochronnej przed korozją, nasycaniem gazami oraz wypalaniem dodatków stopowych, a następnie przepuszcza przez odpowiednie wyprofilowane walce. Podczas jednego obrotu wałków następuje przewalcowanie i oddzielenie od surówki kilku półfabrykatów. Pierścienie ograniczające zapobiegają powstawaniu wypływek. Jest to metoda wysoko wydajna, opłacalna przy dużej produkcji.

Wstępnie ukształtowane półfabrykaty łopatek poddawane są prasowaniu matrycowemu – zwykłemu lub izotermicznemu. Matrycowanie izotermiczne jest o wiele korzystniejsze w porównaniu z matrycowaniem zwykłym. Pozwala uzyskać przy jednym lub niewielkiej liczbie przejść bardzo dokładne półfabrykaty łopatek różnego kształtu i wymiarów, z półkami antywibracyjnymi włącznie. Podczas matrycowania izotermicznego półfabrykatów

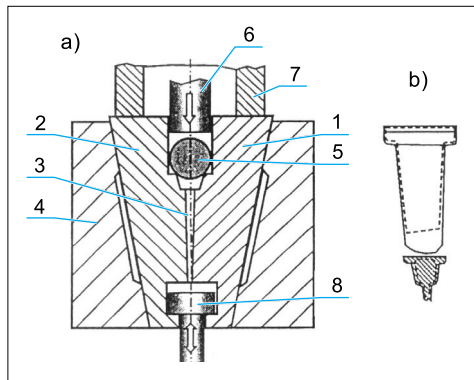


Rys. 5. Schemat wzdłużnego walcowania cyklicznego: 1, 2 – rolki robocze, 3, 4 – elementy ograniczające, 5, 6 – wejściowa i wyjściowa prowadnica, 7 – półfabrykat

ze stopów tytanu zarówno surówka, jak i matryce podgrzewane są do temperatury 930 ± 10 °C. Na koniec półfabrykaty są trawione w celu usunięcia warstwy wierzchniej utwardzonej poprzez dyfuzję gazów.

Ciekawą metodą wytwarzania dokładnych półfabrykatów łopatek sprężarkowych o długości do 150 mm ze stopów tytanu lub żarowytrzymałych stali jest dynamiczne wyciskanie (rys. 6). Podgrzana surówka włączana jest do gniazda matrycy z dużą prędkością – od 35 do 40 m/s. Matryca składa się z dwóch części, których powierzchnie zewnętrzne po złożeniu mają kształt stożka. Dzielona matryca jest osadzana w sztywnym korpusie. W płaszczyźnie podziału matrycy wykonane jest gniazdo, którego kształt odpowiada kształtowi wytwarzanego półfabrykatu. Surówka, nagrzana do odpowiedniej temperatury, jest odkształcana w wyniku dynamicznego uderzenia w nią bijaka. Uderzenie z dużą prędkością wywołuje w materiale naprężenia, które umożliwiają odkształcenie tego materiału rzędu 90%. Warunki przemieszczania materiału polepszają się, co umożliwia z kolei wypełnienie trudno dostępnego przestrzeni matrycy podgrzewanej do temperatury 300 - 350 °C. Pozwala to na wykonanie dokładnych, cienkościennych półfabrykatów z nadatkami na piórze rzędu dziesiątych części milimetra na stronę. Do wyjęcia półfabrykatu służy ciągnio, za pomocą którego matryca jest rozkładana. Po wyjęciu ukształtowanego półfabrykatu, przesmarowaniu gniazda i wciągnięciu matrycy w gniazdo korpusu cykl kształtowania można powtórzyć.

W zależności od metody wytwarzania półfabrykaty łopatek wykonywane są jako półprecyzyjne, z nadatkami pióra od 1,5 do 2,5 mm na stronę, lub precyzyjne, z nadatkami od 0,2 do 0,6 mm. W pierwszej kolejności obrabiane są zamki łopatek. Obróbkę wykonuje się metodami: frezowania, przeciągania lub toczenia i szlifowania. Obrobiony zamek staje się bazą do obróbki pióra. Obróbka piór, w zależności od dokładności wykonania półfabrykatów łopatek, polega na frezowaniu, szlifowaniu i ewentualnie polerowaniu (półfabrykaty półprecyzyjne) lub szlifowaniu i po-

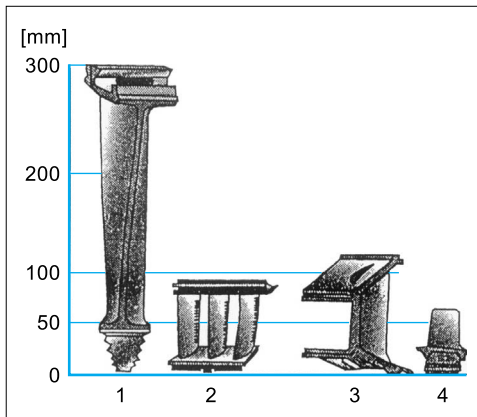


Rys. 6. Schemat wyciskania dynamicznego (a) i uzyskany półfabrykat (b): 1, 2 – rozkładane części matrycy, 3 – gniazdo matrycy, 4 - korpus, 5 – surówka, 6 – bijak, 7 – docisk matrycy, 8 – ciągnio

lerowaniu (półfabrykaty precyzyjne). Frezowanie i szlifowanie piór jest sterowane numerycznie. Do szlifowania wykorzystywane są szlifierki taśmowe, gdyż szlifowanie na takich szlifierkach powoduje powstawanie w warstwie wierzchniej pióra korzystnych naprężeń ściskających. Frezowanie często zastępuje się kształtową obróbką elektrochemiczną, a szlifowanie i polerowanie szlifowaniem elektrochemicznym. W produkcji łopatek sprężarkowych wykonywanych bez pólek stosuje się czasami precyzyjne walcowanie na zimno. Końcową operacją obróbki pióra często jest obróbka wibrościerna (odmiana obróbki luźnymi kształtkami ściernymi). Aby zwiększyć trwałość i niezawodność łopatek sprężarkowych, powierzchnie piór umacnia się zgniotem, na powierzchnie piór nanosi się pokrycia ochronne, wprowadza jonowo dodatki stopowe, wykonuje srebrzenie roboczych powierzchni zamków oraz nanosi pokrycia odporne na ścieranie na stykające się powierzchnie pólki antywibracyjnych.

Wybrane technologie produkcji łopatek turbinowych

Łopatki wirnikowe turbin są najbardziej obciążonymi częściami lotniczych silników turbinowych. Narażone są na duże obciążenia mechaniczne w wysokiej temperaturze



Rys. 7. Łopatki turbiny: 1 - 4 – grupy wymiarowe łopatek

oraz na agresywne oddziaływanie produktów spalania. Łopatki turbin mogą znacznie różnić się kształtem i wymiarami (rys. 7). Większość łopatek turbin ma długość od 60 do 250 mm. Cechą charakterystyczną wirnikowych łopatek turbinowych jest zamek wielotrapezowy (jodełkowy), który za pomocą od 2 do 5 par „zębów” przekazuje równomiernie obciążenie na tarczę turbiny. Zamek wykonywany jest z dokładnością większą niż $\pm 0,01$ mm.

Materiały stosowane na łopatki turbin muszą spełniać takie podstawowe wymagania, jak:

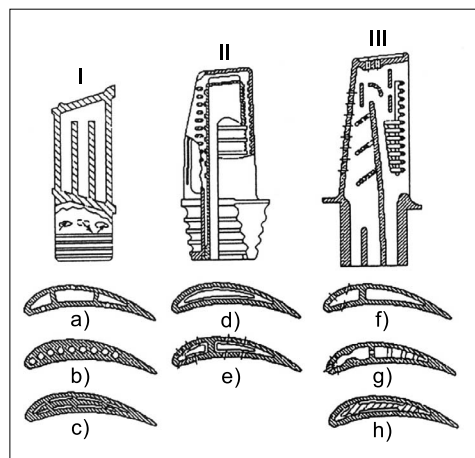
- wysoka wytrzymałość i sztywność w wysokiej temperaturze,
- żarowytrzymałość (odporność na pełzanie, odporność na zmęczenie cieplne),
- żaroodporność (odporność na wysokotemperaturową korozję gazową),
- odporność na erozję,
- podatność technologiczna.

Te wymagania spełniają do temperatury około 1100 °C materiały, które obecnie stosuje się na łopatki turbin, czyli złożone stopy na osnowie niklu lub kobaltu z licznymi składnikami i dodatkami stopowymi (Ti, Al, Mo, W, Nb, Zr, B, V, Y, La, Re Ta i innymi). Ze względu na konieczność zwiększania temperatury gazów przed turbiną łopatki turbin współczesnych silników są zazwyczaj łopatkami chłodzonymi, a więc wykonanymi z ka-

nałami wewnętrznymi. Znane są różne metody chłodzenia łopatek (rys. 8):

- wielokanałowe,
- deflektorowe,
- deflektorowe z perforacją,
- wielokanałowe (bezdeflektorowe) z perforacją,
- kanałowe z porowatą ścianką.

Wykonanie chłodzenia wielokanałowego łopatek wzdłuż ich pióra jest najprostsze technologicznie, ale nie zapewnia równomiernego chłodzenia, zwłaszcza krawędzi natarcia i krawędzi spływu. Taką metodą chłodzenia można stosować, gdy temperatura gazów przed turbiną nie jest wyższa niż 1180 °C. Zastosowanie deflektorów i otworków wypuszczających powietrze gwarantuje bardziej równomierne pole temperatury łopatki i bardziej intensywne chłodzenie, ale jest to metoda trudna technologicznie. Chłodzenie z zastosowaniem perforacji powoduje nie tylko odprowadzenie ciepła, ale również powstanie warstewki zimniejszego powietrza wokół pióra łopatki, a to zabezpiecza łopatkę przed nagrzewaniem. Rozmieszczając otworki w odpowiedni sposób, można planować proces chłodzenia. Zapotrzebowanie na powietrze chłodzące w tym wypadku jest dwukrotnie większe



Rys. 8. Chłodzone wirnikowe łopatki turbin: I – wielokanałowe (a, b, c), II – deflektorowe (d, e), III - bezdeflektorowe z perforacją (f, g), z porowatą ścianką (h)

niż przy chłodzeniu konwencjonalnym (wielokanałowym).

Zastosowanie porowatych ścianek pióra łopatek, tzw. chłodzenia efuzyjnego, nie tylko pozwala efektywnie chłodzić ściankę łopatek, ale powoduje też, że wokół niej wytwarza się bardzo równomierna warstewka ochronna powietrza. Jako zaletę tej metody wskazuje się małe zapotrzebowanie na powietrze chłodzące, od 1,5 do 3 razy mniejsze w porównaniu z metodą chłodzenia klasycznego. Problemem jest jednak wytwarzanie materiałów o porowatości 50% i porach o średnicy od 50 do 100 mm oraz możliwość szybkiego zamykania porów produktami spalania. Taki sposób chłodzenia wymaga również dokładnej filtracji (odpylania) powietrza chłodzącego.

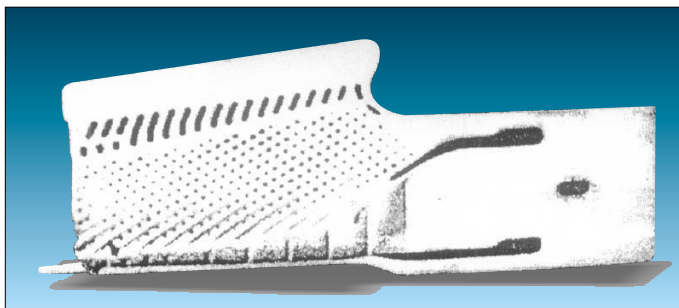
Łopatek dyszowe turbin często wykonuje się jako chłodzone deflektorowo z perforacją. W łopatkach wirnikowych zazwyczaj stosuje się chłodzenie wielokanałowe z perforacją. Liczba wykonywanych otworków o średnicy od 0,3 do 0,6 mm wynosi do 100 w piórze jednej łopatek.

Obecnie łopatek turbin wykonuje się głównie metodą precyzyjnego odlewania próżniowego. Spowodowane jest to wieloma czynnikami. Stopy żarowytrzymałe stosowane na łopatek są materiałami bardzo źle skrawalnymi, a odlewanie precyzyjne pozwala uzyskać pióra łopatek z taką dokładnością, że nie wymagają one dodatkowych obróbek kształtujących. Odlewanie próżniowe zapobiega utlenianiu materiału, w związku z czym nadatki technologiczne i wybrakowane łopatek można ponownie wykorzystywać jako materiał konstrukcyjny, a trzeba zaznaczyć, że jego

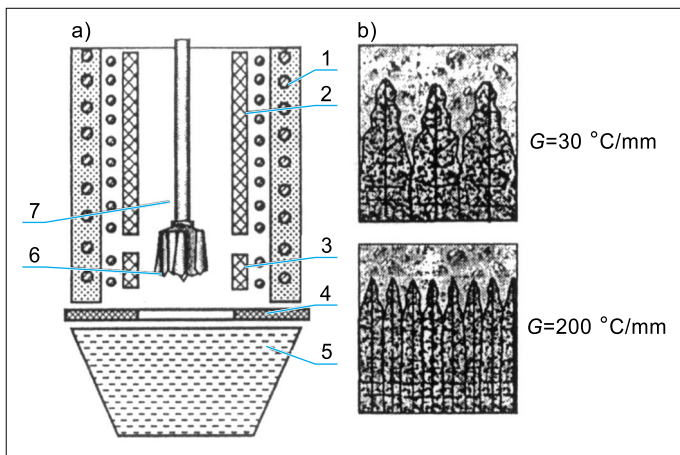
cena jest wysoka. Ponadto odlewanie ze sterowanym chłodzeniem umożliwia uzyskiwanie łopatek o ukierunkowanej (kolumnowej) krystalizacji oraz łopatek monokrystalicznych. Takie struktury materiału są w wysokim stopniu żarowytrzymałe.

Powszechnie łopatek odlewane są metodą wytapianych modeli (do form skorupowych). Aby uzyskać wewnętrzne kanały chłodzące, w formach muszą być umieszczone specjalne rdzenie ceramiczne (rys. 9). Wykonuje się je metodą spiekania proszków. Materiał rdzeniowy powinien dokładnie wypełniać formę do prasowania i dobrze odwzorowywać jej wewnętrzny profil. Powinien wykazywać niską adhezję do formy, aby możliwe było wyjęcie sprasowanego rdzenia. Ponadto materiał powinien charakteryzować się dostateczną wytrzymałością po sprasowaniu, a odpowiednią po spiekaniu oraz małym skurczem (od 0,3 do 0,5%). Zbyt niska wytrzymałość rdzenia w temperaturze zalewania płynnym stopem grozi wybozeniem rdzenia, a zbyt wysoka – powstaniem pęknięć. Przyczyną wybrakowania prawie 50% rdzeni jest wybozenie, przesunięcie lub popęknięcie rdzenia w trakcie wypalania formy lub podczas jej zalewania. Materiał rdzeniowy powinien być rozpuszczalny w roztworach alkalicznych, gdyż rdzenie są usuwane z odlewów metodą trawienia.

Odlewanie metodą wytapianych modeli stosowane jest w przemyśle, nie tylko lotniczym, od wielu lat. Badania są ukierunkowane na modyfikowanie i opracowywanie nowych materiałów stosowanych w modelach. Obecnie poza materiałami wytapianymi na bazie parafiny, stearyny, ceryzyny i kalafonii stosowane



Rys. 9. Ceramiczny rdzeń odlewanej łopatek turbiny



Rys. 10. Schemat urządzenia do odlewania łopatek turbin z ukierunkowaną krystalizacją (a) oraz wpływ gradientu temperatury na rozmiary ziaren kolumnowych (b): 1 – piec podgrzewający formę, 2 – górna nagrzewnica, 3 – dolna nagrzewnica, 4 – ekrany cieplne, 5 – wanna z chłodziwem w postaci ciekłego metalu, 6 – zarodek krystalizacji (Ni-W), 7 – forma ceramiczna

są rozpuszczalne w wodzie saletry, żele i polimery. Dające wytopić się lub rozpuścić modele odlewanych łopatek formowane są w stalowych rozbieralnych formach, w których wcześniej umieszcza się ceramiczne rdzenie. Następnie, czasami w próżni, zalewa się formę materiałem modelowym i przeprowadza prasowanie modelu. Uzyskane modele są łączone w bloki, na podstawie których wykonuje się ceramiczną formę odlewniczą. Formuje się ją z 7 - 12 kolejno nanoszonych warstw przez powlekanie ceramiczną masą, posypywanie korundem i suszenie na powietrzu i w środowisku amoniakalnym. Następnie usuwa się z formy masę rdzeniową przez rozpuszczanie lub wytapianie w autoklawach parowych. Potem formę poddawana jest spiekaniu.

Topienia stopu, zalewania formy i krystalizacji odlewu dokonuje się w próżni. Ostatnio szeroko stosowana jest metoda ukierunkowanej krystalizacji łopatek. Ukierunkowana struktura odlewu powstaje w procesie przechodzenia formy z płynnym metalem przez front krystalizacji w strefie sztucznie wytworzonego gradientu temperatury. Wyróżnia się ukierunkowaną krystalizację nisko- i wysokogradientową. W niskogradientowej gradient temperatury wynosi około $30\text{ }^{\circ}\text{C/mm}$, a prędkość krystalizacji od $0,5$ do 5 mm/min . W wysokogradientowej gradient zawarty jest w przedziale od 130 do $200\text{ }^{\circ}\text{C/mm}$, a prędkość krystalizacji wynosi $20 - 200\text{ mm/min}$.

Takie warunki krystalizacji można uzyskać, zanurzając formę w wannie z niskotopliwym metalem (rys. 10). Podwyższenie gradientu temperatury na froncie krystalizacji powoduje uzyskanie bardziej zwartej i jednorodnej w przekroju poprzecznym pióra, cienkokolumnowej struktury bez powierzchniowych defektów. Pióro łopatki powstaje z kilku wydłużonych ziaren bez poprzecznych granic, wzdłuż których najczęściej dochodzi do zniszczeń łopatki podczas eksploatacji. Odlewy monokrystaliczne w porównaniu z odlewami o ukierunkowanej krystalizacji mają lepsze charakterystyki trwałościowe. Wynika to głównie z braku faz węglkowych na granicach ziaren, które są źródłem mikropełnięć przy cyklicznych obciążeniach mechanicznych i termicznych.

Skrzepnięte bloki łopatek chłodzone są na powietrzu, a ceramiczne formy – rozbijane ręcznie. Odlewy łopatek odcina się od systemu zalewowego tarczami ściernymi, a następnie piaskuje, poleruje i sprawdza ich makrostrukturę. Ceramiczne rdzenie usuwa się z odlewów, wytrawiając je podgrzanym roztworem wodorofluorku potasowego. Odlane półfabrykaty łopatek są dokładnie kontrolowane pod względem ich geometrii – sprawdzany jest profil pióra, rozłożenie powierzchni bazowych i grubość ścianek. Ciągłość materiału odlewu, rozłożenie kanałów, przegród, żeber i innych wewnętrznych elementów konstrukcyjnych

oraz pozostałość masy rdzeniowej sprawdza się metodą rentgenowską, wypełniając wewnętrzną przestrzeń kontrastującym proszkiem metalicznym. Ostatecznej kontroli powierzchni pióra łopatki dokonuje się po wcześniejszym polerowaniu taśmą ścierną.

Metodą precyzyjnego odlewania uzyskuje się półfabrykaty łopatek bez nadatków na mechaniczną obróbkę pióra i z nadatkami wynoszącymi od 0,8 do 1,2 mm na stronę zamka oraz ewentualnie półek bandażowych. Z dalszych licznych operacji wykonywanych podczas produkcji łopatek należy wymienić te, które związane są z:

- ◆ kształtowaniem zamka i półek,
- ◆ wykonaniem otworów perforacyjnych w piórze,
- ◆ nadaniem odpowiedniej gładkości kanałom wewnętrznym,
- ◆ naniesieniem pokryć ochronnych,
- ◆ kontrolą procesu produkcyjnego.

Zamek i pióro łopatek kształtowane są głównie metodą szlifowania głębokiego oraz szlifowania elektrochemicznego. Profile uszczelnień labiryntowych na półkach bandażowych szlifowane są po zamocowaniu kompletu łopatek w przyrządzie (technologicznej tarczy). Otwory perforacyjne w piórach łopatek wykonuje się metodami elektroerozyjnymi lub metodą laserową. W celu zwiększenia

gładkości kanałów wewnętrznych przetłacza się przez nie specjalne pasty ściernie – poddaje się je tzw. gładzeniu ekstruzyjnemu. Pokrycia ochronne nanosi się na pióra łopatek w celu zwiększenia ich żaroodporności, termicznej izolacji i odporności na erozję. Na końce łopatek można nanosić pokrycia odporne na ścieranie, współpracujące z pokryciami uszczelniającymi. Kontrola międzyoperacyjna poza badaniem struktury materiału, badaniami defektoskopowymi, sprawdzaniem kształtu i wymiarów łopatek obejmuje również badania oporów przepływu powietrza przez kanały chłodzące oraz mikroskopowe badania jakości naniesionych pokryć.

Jak widać, wzrost sprawności, trwałości i niezawodności lotniczych silników turbiniowych zależy nie tylko od postępu w ich konstruowaniu i diagnozowaniu czy od stosowania nowych materiałów konstrukcyjnych, ale także od opracowania i wprowadzania nowych technologii produkcyjnych. Ważną rolę w budowie współczesnych lotniczych silników turbinowych odgrywają pokrycia ochronne.

Opracowano na podstawie:

Ju. S. Elisieew, A. G. Bojcow, V. V. Krymow, L. A. Chworostuchin, *Technologija proizvodstwa awiacyonyh dwigatielej*, Maszynostrojenije, Moskwa 2003.

Blades are specific parts of a turbine engine due to both, their amount (in an engine there may be between 2000 – 3500 blades) and influence on reliability and endurance of the engine. The author points to processes which may affect blades during their exploitation and discusses selected production technologies of rotodynamic compressor blades and turbine blades.