

Marek FLIGIEL¹

BADANIE WPŁYWU TECHNOLOGII WYTWARZANIA NA NIEWYWAŻENIE ŁOPAT WIRNIKA NOŚNEGO ŚMIGŁOWCA

W artykule rozpatruje się własności statyczne i dynamiczne łopat wirnika nośnego śmigłowca mające wpływ na dynamikę pracy wirnika nośnego. Analizuje się oddziaływanie technologii wytwarzania łopat na ich masę oraz niewyważenie statyczne i dynamiczne. Rozpatrywane są główne parametry wpływające na wielkość niewyważenia, takie jak masa i momenty statyczne oraz ich wpływ na dynamikę łopat. Wirnik nośny analizuje się również pod kątem wpływu niewspółtorowości łopat na obciążenia dynamiczne osi wirnika. Przyczyną niewspółtorowości łopat są różnice azymutalne sił parcia powietrza na łopate, które powstają przy obrocie wirnika nośnego podczas lotu. Dokonuje się analizy kluczowych operacji procesu technologicznego wytwarzania łopat wirnika nośnego śmigłowca pod kątem wpływu na masę i niewyważenie statyczne łopat.

STUDY ON THE INFLUENCE OF THE MANUFACTURING TECHNOLOGY ON THE MAIN ROTOR UNBALANCE IN HELICOPTER

The article investigates the static and dynamic properties of helicopter rotor blades that have an impact on the dynamics of the main rotor. The impact is analyzed of the blade manufacturing technology on their mass as well as their static and dynamic imbalance. The main parameters are considered that affect the magnitude of imbalance, such as mass and static moments, as well as their impact on the dynamics of the blades. The rotor is also analyzed for effects of the track twist of the blades on the dynamic load of the rotor axis. The reason for the track twist of the blades is different azimuth air pressure forces exerted on the blade that form in the course of the rotor's revolutions during the flight. An analysis is performed of the key operations of the technological manufacturing process of helicopter main rotor blades in connection with its effect on the mass and the static unbalance of the blades.

1. WSTĘP

1.1. Łopaty wirnika nośnego śmigłowca

Głównym zespołem konstrukcyjnym śmigłowca, umożliwiającym jego ruch w powietrzu, jest wirnik nośny śmigłowca (rys. 1a). W klasycznym układzie napędowym śmigłowca występuje jeszcze śmigło ogonowe, którego zadaniem jest równoważenie momentu reakcyjnego powstającego w wyniku obrotów wirnika nośnego. Moment reakcyjny jest skutkiem obiektywnych praw fizyki opisanych trzecią zasadą dynamiki (Newtona). Odpowiedzialnym elementem konstrukcyjnym wirnika nośnego za utrzymanie i poruszanie się śmigłowca w powietrzu są łopaty. Łopaty wirnika nośnego wytwarzają siłę nośną i ciąg niezbędny do lotu poziomego (wzdłużnego i poprzecznego) i wznoszenia się oraz zawisu a także służą do sterowania śmigłowcem w czasie jego ruchu w powietrzu.

a)



b)



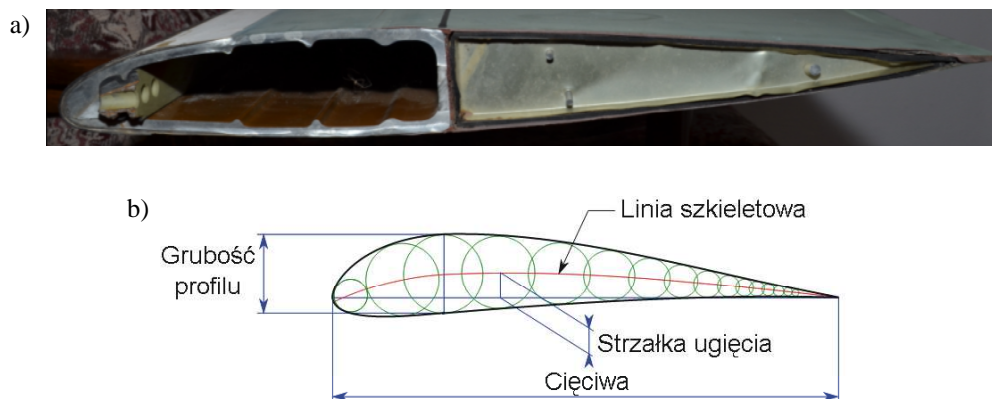
Rys. 1. a) śmigłowiec MI-8 [3], b) część końcowa łopaty śmigłowca MI-8

¹ Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny; 75-453 Koszalin; ul. Śniadeckich 2. tel: + 48 94 735-82-74,
e-mail: marek.fligiel@tu.koszalin.pl

Wymagania stawiane łopatom (rys. 1b), których jakość decyduje w dużej mierze o bezpieczeństwie użytkownika śmigłowca oraz jego parametrach aerodynamicznych, są priorytetowe. Łopaty wirnika nośnego muszą spełniać warunki najbardziej niezawodnych części śmigłowca. Wymagania stawiane łopatom wirnika nośnego można podzielić na trzy grupy:

1. Wymagania aerodynamiczne [1, 2]:
 - nieodrywanie się strug powietrza na końcowych odcinkach łopat,
 - liczby Macha na końcach łopat mniejsze od wartości krytycznych (0,8 – 0,85 Ma),
 - małe momenty sił aerodynamicznych wywoływane łopatom w przegubach głowicy sterującej.
2. Wymagania dotyczące wytrzymałości, sztywności i trwałości:
 - odpowiednia wytrzymałość statyczna, dynamiczna i trwałość zmęczeniowa,
 - minimalne odkształcenia profili łopat podczas lotu,
 - brak rezonansów i flutteru,
 - nieuleganie uszkodzeniom zmęczeniowym,
 - brak występowania odkształceń trwałych,
 - odpowiednia sztywność łopat na zginanie i skręcanie,
 - minimalny poziom drgań łopat i hałasu wywołanego łopatom.
3. Wymagania z zakresu produkcji, technologii:
 - prostota wykonania i powtarzalność geometrii,
 - zamienność łopat,
 - łatwość wyważania i kompletowania łopat.

Łopata wirnika nośnego powinna charakteryzować się dużą odpornością na działanie warunków atmosferycznych i zderzeń z niedużymi ciałami obcymi. Na jakość aerodynamiczną łopat wirnika nośnego w znacznej mierze wpływa również zastosowanie w niej odpowiedniego profilu aerodynamicznego (rys. 2). Profil aerodynamiczny łopaty zmienia się wzdłuż jej długości. Za najlepsze profile łopat uważa się profile serii NACA 230 (ang. National Advisory Committee for Aeronautic), (rys. 2a).



Rys. 2. Profil lotniczy: a) profil NACA 230 łopaty śmigłowca MI-8; b) charakterystyczne wielkości profilu lotniczego [4]

Łopata wirnika nośnego posiada kształt smukłego płata. Charakteryzuje ją długość i profil. Przekrój łopaty wirnika nośnego ma kształt profilu lotniczego (rys. 2b).

W celu uzyskania lepszych osiągnięć, na długości łopaty stosuje się różne skręcenie aerodynamiczne, tj., odpowiednio dobrane profile. Łopata wirnika nośnego posiada także skręcenie geometryczne profili (zwichrzenie) polegające na tym, że nasada łopaty posiada inny (większy) kąt nastawienia niż jej końcówka.

W rzucie z góry łopaty mają kształt prostokątny, przy czym mogą mieć różne końcówki:

- z eliptyczną owiewką,
- trapezową (rys.1b),
- ze skośnymi krawędziami natarcia i spływu,
- tzw. BERP (British Experimental Rotor Program); np., śmigłowiec Westland Lynx.

W celu eliminacji oddziaływań dynamicznych, stosuje się w wirniku głównym tłumiki hydrauliczne, których zadaniem jest tłumienie wahań łopat względem przegubu pionowego oraz antywibrator rolkowy, który jest dynamicznym rezonansowym eliminatorem drgań, tłumiącym drgania na śmigłowcu o częstości 4 harmonicznej obrotów wirnika [5].

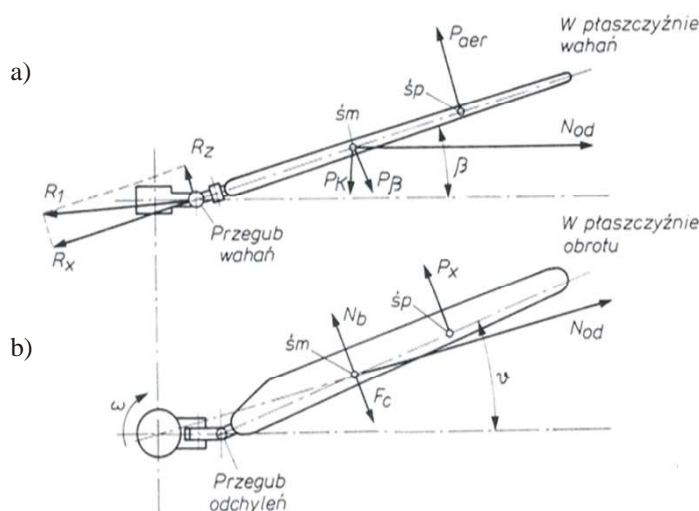
1.2. Torowanie łopat wirnika nośnego śmigłowca

Operację, której celem jest doprowadzenie do wirowania wszystkich łopat wirnika nośnego w jednakowej bądź bliskiej jednakowej płaszczyźnie oraz wirowania wszystkich łopat wirnika nośnego w położeniu tworzących tego samego stożka. Przyczyną niewspółtorowości łopat są różnice sił nośnych wytwarzanych przy obrocie wirnika nośnego przez każdą z łopat. Inną aerodynamiczną siłą nośną na każdej łopacie, powoduje przesunięcie położenia wektora wypadkowej sił aerodynamicznych wirnika z jego osi, co wywołuje drgania śmigłowca, gdyż wektor wypadkowej sił aerodynamicznych wiruje wokół osi wirnika nośnego i powoduje wychylenie śmigłowca za każdym obrotem łopat. Wymiana pojedynczej łopaty lub nawet wszystkich łopat powoduje powstanie niewspółtorowości. Operacja torowania ma na celu eliminację niewspółtorowości łopat. Z aerodynamicznego punktu widzenia wyrównuje siły nośne łopat poprzez zmianę kątów nastawienia łopat za pomocą zmiany długości drążków łączących wodzidła przegubu osiowego z tarczą sterującą. Operacja torowania sprowadza wektor główny sił aerodynamicznych łopat na oś obrotu wirnika głównego. Niewspółtorowość łopat wynikająca z niejednakowej względnej sztywności wzdłuż jej długości i cięciwy, spowodowana niejednakową względną konstrukcyjną sztywnością i procesem technologicznym, eliminuje się za pomocą mocowanych na końcach łopat cienkich kłapek nazywanych kompensatorami aerodynamicznymi lub płytkami wyważającymi (trymerami). Poprzez zmianę kąta ustawienia trymera względem łopaty zmienia się wartość momentu zwichrzającego łopatę, co powoduje z kolei zmianę kąta nastawienia przekrojów łopaty i w efekcie prowadzi do wyrównania sił aerodynamicznych. Łopata wirnika nośnego jest giętkim elementem konstrukcyjnym śmigłowca, dlatego jej własności dynamiczne muszą być korygowane przy rzeczywistych ustawieniach eksploatacyjno-motorycznych śmigłowca.

Niewspółtorowość łopat wirnika nośnego to nieprawidłowość pracy wirnika nośnego określona tym, że każda z łopat wirnika nośnego w jednym i tym samym azymucie łopaty nie przyjmuje w trakcie obrotu położenia tworzących tego samego stożka. Przyczyną niewspółtorowości łopat są różnice sił nośnych wytwarzanych przy obrocie wirnika nośnego przez każdą z łopat. Inną aerodynamiczną siłą nośną na każdej łopacie, powoduje przesunięcie położenia wektora wypadkowej sił aerodynamicznych wirnika z jego osi, co wywołuje drgania śmigłowca, gdyż wektor wypadkowej sił aerodynamicznych wiruje wokół osi wirnika nośnego i powoduje wychylenie śmigłowca za każdym obrotem łopat. Wymiana pojedynczej łopaty lub nawet wszystkich łopat powoduje powstanie niewspółtorowości. Operacja torowania ma na celu eliminację niewspółtorowości łopat. Z aerodynamicznego punktu widzenia wyrównuje siły nośne łopat poprzez zmianę kątów nastawienia łopat za pomocą zmiany długości drążków łączących wodzidła przegubu osiowego z tarczą sterującą. Operacja torowania sprowadza wektor główny sił aerodynamicznych łopat na oś obrotu wirnika głównego. Niewspółtorowość łopat wynikająca z niejednakowej względnej sztywności wzdłuż jej długości i cięciwy, spowodowana niejednakową względną konstrukcyjną sztywnością i procesem technologicznym, eliminuje się za pomocą mocowanych na końcach łopat cienkich kłapek nazywanych kompensatorami aerodynamicznymi lub płytkami wyważającymi (trymerami). Poprzez zmianę kąta ustawienia trymera względem łopaty zmienia się wartość momentu zwichrzającego łopatę, co powoduje z kolei zmianę kąta nastawienia przekrojów łopaty i w efekcie prowadzi do wyrównania sił aerodynamicznych. Łopata wirnika nośnego jest giętkim elementem konstrukcyjnym śmigłowca, dlatego jej własności dynamiczne muszą być korygowane przy rzeczywistych ustawieniach eksploatacyjno-motorycznych śmigłowca.

2. OBCIĄŻENIA DYNAMICZNE ŁOPAT ŚMIGŁOWCA

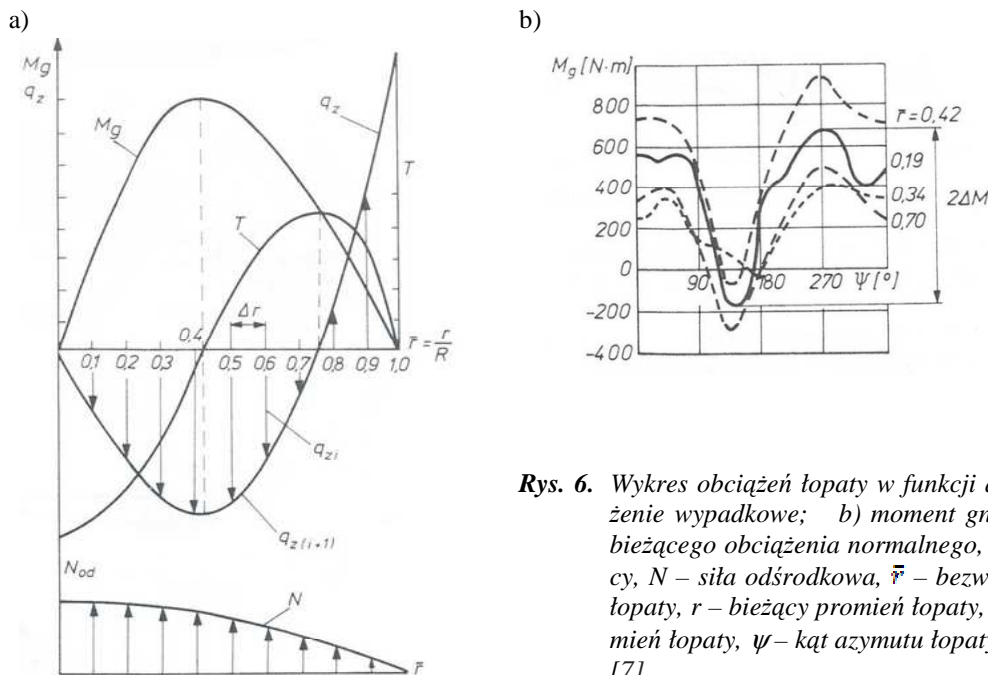
Własności dynamiczne wirnika nośnego są funkcją własności aerodynamicznych i niewyważenia masowego łopat, tj. rozkładu mas wzdłuż długości i cięciwy łopat. Odpowiedni rozkład masy w profilu łopaty wzdłuż jej cięciwy w dużym stopniu wpływa na siły sterowania śmigłowcem w różnych stanach lotu i w zabezpiecza przed flatterem. Środek masy profili łopaty wirnika nośnego powinien znajdować się możliwie blisko krawędzi natarcia, w odległości 25 % cięciwy od noska łopaty [6]. W konstrukcji łopaty, dla uzupełnienia niedokładności wynikających z procesu technologicznego wytwarzania, w nosku łopaty wirnika nośnego tworzy się specjalny układ obciążający. Masa wyrównowazająca osiąga nawet połowę masy całej łopaty (przesunięcie środka masy przekroju o 1 % wymaga obciążenia noska masą w przybliżeniu równą 10 % masy całej łopaty). W łopatach spływowa część jest lżejsza i wykonana jest z kompozytów z lekkim wypełniaczem komórkowym.



Rys. 5. Siły działające na łopatę wirnika nośnego: a) w płaszczyźnie najmniejszej sztywności łopat: P_{aer} – obciążenie aerodynamiczne, P_k – siła ciężkości konstrukcji łopaty, N_{od} – siła odśrodkowa, P_{β} – siła bezwładności; b) w płaszczyźnie obrotu wirnika nośnego: P_x – siła oporu czołowego, N_b – siła bezwładności, N_{od} – siła odśrodkowa, F_c – siła Coriolisa [7]

Własności dynamiczne i aerodynamiczne łopat, wynikające z rozłożenia konstrukcyjnego masy oraz technologii produkcji łopat, wzajemnie na siebie oddziałują. Ta koincydencja obciążeń dynamicznych uwydatnia się przede wszystkim w zagadnieniach sterowania, stateczności i bezpieczeństwa lotu. Znaczny moment bezwładności łopat korzystnie wpływa na stateczność dynamiczną śmigłowca, zapewnia zgromadzenie w wirniku dostatecznie dużej energii kinetycznej umożliwiającej bezpieczne przejście, np. do lotu w warunkach autorotacji w przypadku awarii silników.

Problemem konstrukcyjnym jest opracowanie dostatecznej wytrzymałości łopat. Wynika to, ze złożoności obciążeń działających na łopatę i ich okresowego charakteru. Przyczyną okresowo zmieniających się obciążeń aerodynamicznych jest cyklicznie powtarzająca się różnica prędkości przepływu powietrza na łopatach zajmujących różne położenia azymutalne w locie. Aby temu zapobiec w każdym cyklu następują zmiany kątów natarcia łopat oraz ich wahania. Siły działające na łopatę możemy zrzutować na płaszczyznę najmniejszej sztywności łopaty (płaszczyzna wahań, rys. 5a), oraz na płaszczyznę prostopadłą do osi obrotu wirnika nośnego (rys. 5b) [7].



Rys. 6. Wykres obciążeń łopaty w funkcji azymutu: a) obciążenie wypadkowe; b) moment gnący: q_z – rozkład bieżącego obciążenia normalnego, M_g – moment gnący, N – siła odśrodkowa, \bar{r} – bezwymiarowy promień łopaty, r – bieżący promień łopaty, R – całkowity promień łopaty, ψ – kąt azymutu łopaty, ΔM – amplituda [7]

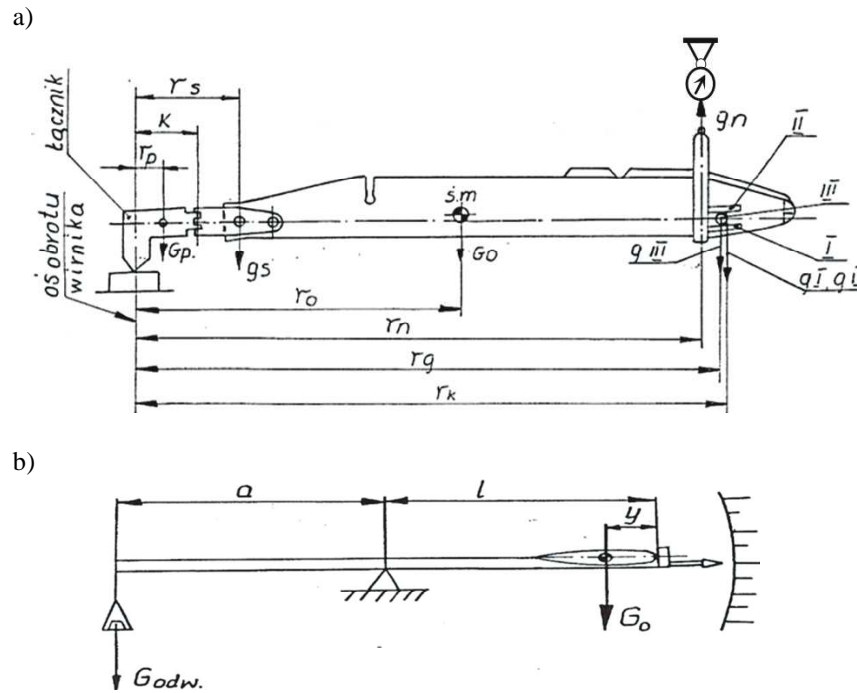
3. NIETYWAŻENIE, KOMPLETACJA I TECHNOLOGIA WYWAŻANIA ŁOPAT WIRNIKÓW NOŚNYCH

Głównymi przyczynami wpływającymi na nietyważenie dynamiczne łopat wirników są:

- 1) błędy konstrukcyjne (niekiedy założone konstrukcyjne nietyważenie związane z funkcją konstrukcji),
- 2) wady materiałowe,
- 3) błędna technologia lub błędy w realizacji prawidłowej technologii wytwarzania,
- 4) czynniki atmosferyczne w różnych strefach klimatycznych użytkowania wirników – wilgotność, susza,
- 5) długotrwała eksploatacja,
- 6) uszkodzenia powstałe w trakcie eksploatacji (pęknięcia, odklejenia, zabrudzenia, itp.).

Z obciążeń siłami i momentami sił łopat śmigłowca wynika, że przyjęte metody konstruowania i stosowane w przemyśle procesy wytwarzania łopat powinny sprzyjać minimalizacji nietyważenia początkowego [8], co ułatwia w znacznym stopniu kompletowanie łopat.

Łopata śmigłowca w procesie technologicznym podlega wyważeniu podłużnemu (rys. 7a) i poprzecznemu (rys. 7b). Podstawą kompletacji łopat jest wyważenie podłużne. Wyważenie poprzeczne wykonuje się dla sprawdzenia położenia środka masy w łopacie po cięciu. Pełni ono pomocniczą rolę w kompletacji łopaty i wykonuje się je po wyważeniu podłużnym. Wyważenie podłużne łopaty wirnika głównego przeprowadza się na stanowiskach, których schemat pokazano na rysunku 7a.



Rys. 7. Schemat stanowiska do wyważenia łopaty wirnika nośnego śmigłowca: G_0 – masa całkowita łopaty, r_0 – odległość środka masy łopaty od osi obrotu [m]: a) wyważanie podłużne: g_{III} – masa wkładana w gniazdo wyważenia statycznego III [g], r_g – odległość gniazda wyważenia statycznego III od osi obrotu [m]; g_s – masa wkładana do gniazda sworznia dużego [g], r_s – odległość gniazda sworznia dużego od osi obrotu [m]; b) wyważanie poprzeczne: y – odległość środka masy G_0 łopaty wzdłuż cięciwy profilu, g_I – masa wkładana w komorę wyważenia przedniego I [g], g_{II} – masa wkładana w komorę wyważenia tylnego II [g], r_k – odległość komór wyważenia przedniego I i tylnego II od osi obrotu [m] [9]

Wyważenie podłużne i kompletacja łopat polega na:

- wykonaniu pomiaru masy całkowitej łopaty G_0 i masy reakcyjnej g_n w podporze (punkcie podparcia łopaty - reakcja podpory) oraz wyznaczeniu momentu statycznego łopaty z zależności:

$$M_{st,l} = g_n r_n - G_p r_p, \quad (1)$$

gdzie: $G_p \cdot r_p$ – moment statyczny łącznika,

- zakwalifikowaniu łopaty do jednej z grup selekcyjnych na podstawie wskazań masy reakcyjnej g_n porównanej z wielkością wskaźnika masy kontrolnej g_a w punkcie podparcia łopaty i wielkości momentu statycznego łopaty $M_{st,l}$, wg. zależności (1),
- wyważeniu łopaty w danej grupie selekcyjnej.

Wyważenie łopat w grupie selekcyjnej polega na doprowadzeniu wskazań masy reakcyjnej łopaty g_n w przekroju reakcyjnym (podparcia łopaty) do wielkości wskaźnika kontrolnego g_a danej grupy selekcyjnej i odbywa się według poniższego planu operacyjnego technologii wyważania:

- wypełnienie gniazda wyważenia statycznego podłużnego III płytkami wyważającymi o masie g_{III} nie większej niż dopuszczalne dla danego typu łopaty,
- wypełnienie gniazda sworznia dużego płytkami o masie g_s nie większej niż dopuszczalnej g_{smax} dla danego gniazda wyważania,
- wypełnienie komór wyważenia poprzecznego przedniego I i tylnego II masą wyważającą nie większą niż dopuszczalna w obu komorach (przykładowo, masa dopuszczalna w obu komorach nie może być większa niż połowa masy g_{smax}).

Dopuszczalna jest zamiana mas wyważających pomiędzy gniazdem wyważenia statycznego III i gniazdem sworznia dużego w odpowiedni sposób określony w technologii wyważania. Przed wypełnianiem masą korekcyjną komory przedniej I i tylnej II wyważenia poprzecznego należy dokonać pomiaru wyważenia poprzecznego łopaty. W przypadku, gdy odległość środka masy łopaty od noska łopaty jest mniejsza niż technologicznie określona, należy połowę masy wyważającej umieścić w komorze wyważenia przedniego I i połowę w komorze wy-

ważenia tylnego II. W pozostałych przypadkach całą masę wyważającą umieszcza się w komorze wyważenia przedniego I. Odległość położenia środka masy łopaty od osi obrotu wirnika nośnego wyznacza się ze wzoru:

$$r_0 = \frac{M_{st.ł.}}{G_0} \quad (2)$$

4. PRZYKŁADOWY PLAN OPERACYJNY TECHNOLOGII WYTWARZANIA ŁOPATY WIRNIKA NOŚNEGO ŚMIGŁOWCA

Proces technologiczny wytwarzania łopat wirnika nośnego śmigłowca jest procesem skomplikowanym o dużej liczbie operacji i dzieli się na etapy, co również sprzyja stabilności i jakości produkcji. W zależności od konstrukcji i rodzaju użytego materiału do produkcji proces technologiczny w znacznym stopniu może się różnić od przytoczonego przykładowego. Przykład podziału procesu technologicznego na etapy:

- etap I produkcja dźwigara,
- etap II układanie pokrycia górnego,
- etap III wklejanie żeberek i wypełniacza łopaty,
- etap IV pasowanie wymiarowe dźwigara do pokrycia górnego,
- etap V układanie pokrycia dolnego,
- etap VI pasowanie wymiarowe dźwigara do pokrycia dolnego,
- etap VII montaż łopaty,
- etap VIII wyważenie statyczne łopat i ich kompletacja.

Ze względów na zakres procesu technologicznego rozpatrzmy etap I i etap VII procesu technologicznego. Etap VIII wyważenia statycznego łopat i ich kompletacja omówiony został w wcześniejszych rozdziałach.

Tab. 2. Główne przykładowe operacje technologiczne wytwarzania dźwigara łopaty i ich wpływ na masę i moment statyczny dźwigara

Nr operacji	Treść operacji
1.	Pasowanie części – wpływa w niewielkim stopniu, w granicach tolerancji technologicznej
2.	Ważenie syciwa – dokładność ważenia wpływa na masę dźwigara i jego dalszy czas obróbki
3.	Laminowanie – rozkład masy użytych środków do laminowania wzdłuż dźwigara i profilu w znacznym stopniu wpływa na wzdłużny i poprzeczny (po cięciwie) moment statyczny dźwigara
4.	Kontrola międzyoperacyjna – umożliwia korektę dokładności wykonania dźwigara
5.	Przygotowanie do wygrzewania – przygotowanie i jakość techniczna urządzeń grzewczych wpływa pośrednio na proces wygrzewania i jego dokładność
6.	Wygrzewanie – operacja w dużym stopniu w pośredni sposób odpowiedzialna za własności dynamiczne dźwigara a w szczególności za geometrię wzdłużną i poprzeczną, a także wytrzymałość statyczną i dynamiczną całych łopat
7.	Obróbka – dokładność i kultura obróbki wpływa na rozłożenie masy po wygrzewaniu i wpływa na moment statyczny całej łopaty
8.	Cechowanie i ważenie – jest operacją pośrednio wpływającą na końcową selekcję łopat
9.	Kontrola ostateczna – wpływa na zakwalifikowanie dźwigara do dalszej produkcji lub zakwalifikowania, jako brak
10.	Przygotowanie do laminowania, przygotowanie tkanin – czas przygotowawczy decydujący o jakości laminowania
11.	Ważenie syciwa - dokładność ważenia wpływa na masę dźwigara i jego dalszy czas obróbki
12.	Laminowanie – rozkład masy użytych środków do laminowania wzdłuż dźwigara i profilu w znacznym stopniu wpływa na wzdłużny i poprzeczny (po cięciwie) moment statyczny dźwigara
13.	Przygotowanie do laminowania – czas przygotowawczy decydujący o jakości laminowania
14.	Ważenie syciwa – dokładność ważenia wpływa na masę dźwigara i jego dalszy czas obróbki
15.	Laminowanie – rozkład masy użytych środków do laminowania wzdłuż dźwigara i profilu w znacznym stopniu wpływa na wzdłużny i poprzeczny (po cięciwie) moment statyczny dźwigara
16.	Kontrola międzyoperacyjna - umożliwia korektę dokładności wykonania dźwigara
17.	Przygotowanie do wygrzewania – przygotowanie i jakość techniczna urządzeń grzewczych wpływa w pośredni sposób na proces wygrzewania i jego dokładność
18.	Wygrzewanie – operacja w dużym stopniu w pośredni sposób odpowiedzialna za własności dynamiczne dźwigara a w szczególności za geometrię wzdłużną i poprzeczną, a także wytrzymałość statyczną i dynamiczną całych łopat

19.	Obróbka – dokładność i kultura obróbki wpływa na rozłożenie masy po wygrzewaniu i wpływa na moment statyczny całej łopaty
20.	Cechowanie i pomiar – kwalifikacja dźwigara
21.	Przeprężanie – wpływa na dynamikę i trwałość zmęczeniową, w zależności od technologii może wpływać na moment statyczny
22.	Wygrzewanie – operacja w dużym stopniu w pośredni sposób odpowiedzialna za własności dynamiczne dźwigara a w szczególności za geometrię wzdłużną i poprzeczną, a także wytrzymałość statyczną i dynamiczną całych łopat
23.	Kontrola międzyoperacyjna – umożliwia korektę dokładności wykonania dźwigara

Tab. 3. Główne przykładowe operacje technologiczne wytwarzania łopaty i ich wpływ na masę i moment statyczny łopaty wirnika nośnego

Nr operacji	Treść operacji
1.	Sporządzanie kompozycji – wpływa na masę i momenty statyczne łopaty
2.	Laminowanie – rozkład masy użytych środków do laminowania wzdłuż dźwigara i profilu w znacznym stopniu wpływa na wzdłużny i poprzeczny (po cięciwie) moment statyczny dźwigara
3.	Kontrola międzyoperacyjna – umożliwia korektę dokładności wykonania dźwigara
4.	Wygrzewanie – operacja w dużym stopniu w pośredni sposób odpowiedzialna za własności dynamiczne łopaty a w szczególności za geometrię wzdłużną i poprzeczną, a także wytrzymałość statyczną i dynamiczną całych łopat
5.	Obróbka laminatu – dokładność i kultura obróbki wpływa na rozłożenie masy po wygrzewaniu i wpływa na moment statyczny całej łopaty
6.	Kontrola międzyoperacyjna – umożliwia korektę dokładności wykonania dźwigara
7.	Sporządzanie kompozycji – wpływa na masę i momenty statyczne łopaty
8.	Usuwanie niedoklejeń – umożliwia korektę niedużych defektów wykonania łopaty, wpływa na jakość dynamiczną i masę
9.	Wygrzewanie – operacja w dużym stopniu w pośredni sposób odpowiedzialna za własności dynamiczne łopaty a w szczególności za geometrię wzdłużną i poprzeczną, a także wytrzymałość statyczną i dynamiczną całych łopat
10.	Przygotowanie do wygrzewania – przygotowanie i jakość techniczna urządzeń grzewczych wpływa w pośredni sposób na proces wygrzewania i jego dokładność
11.	Wygrzewanie – operacja w dużym stopniu w pośredni sposób odpowiedzialna za własności dynamiczne łopaty a w szczególności za geometrię wzdłużną i poprzeczną, a także wytrzymałość statyczną i dynamiczną całych łopat
12.	Pomiary, kontrola – umożliwia korektę dokładności wykonania dźwigara
13.	Korekta kątów – wpływa na aerodynamikę łopaty i torowanie (niewyważenie dynamiczne łopaty)
14.	Wygrzewanie – operacja w dużym stopniu w pośredni sposób odpowiedzialna za własności dynamiczne łopaty a w szczególności za geometrię wzdłużną i poprzeczną, a także wytrzymałość statyczną i dynamiczną całych łopat
15.	Kontrola – umożliwia korektę dokładności wykonania dźwigara
16.	Sporządzanie kompozycji – wpływ na masę i momenty statyczne łopaty
17.	Laminowanie – rozkład masy użytych środków do laminowania wzdłuż dźwigara i profilu w znacznym stopniu wpływa na wzdłużny i poprzeczny (po cięciwie) moment statyczny dźwigara
18.	Sporządzanie kompozycji – wpływ na masę i momenty statyczne łopaty
19.	Laminowanie – rozkład masy użytych środków do laminowania wzdłuż dźwigara i profilu w znacznym stopniu wpływa na wzdłużny i poprzeczny (po cięciwie) moment statyczny dźwigara
20.	Cechowanie – operacja jakościowa organizacji wytwarzania
21.	Kontrola ostateczna - kwalifikuje do zbrakowania łopaty lub dalszej operacji wyważania i kompletowania łopat, przeprowadza selekcje łopat
22.	Wyważanie i kompletowanie łopat – wpływ na aerodynamikę i dynamikę omówiono w poprzednich rozdziałach

5. PODSUMOWANIE

Na wytwarzanie niezawodnych łopát wirnika nośnego śmigłowców ma wpływ bardzo wiele czynników. Na jakość łopát wpływa, oprócz rozwiązań konstrukcyjnych, jakość użytych materiałów a także rodzaj i możliwości technologiczne wytworzenia zaprojektowanej łopaty. Przytoczone w artykule własności aerodynamiczne i dynamiczne łopát są priorytetowe i w dużym stopniu wpływ na nie ma proces technologiczny wytwarzania łopát wirnika nośnego.

Z analizy przykładowego procesu wynika, że rozbiecie jego na etapy, operacje oraz zabiegi prowadzi do uzyskania o odpowiednich własności statycznych, dynamicznych i aerodynamicznych i wyłonienia kluczowych punktów operacji technologicznych (technology key points) wpływających na jakość łopát i ekonomię wytwarzania (mniej wybrakowanych łopát). W procesie technologicznym wytwarzania ze względu na trwałość a tym samym bezpieczeństwo eksploatacji występuje zwiększona liczba punktów kontroli jakości. Po każdej kluczowej operacji technologicznej następuje kontrola jakości łopát, co wpływa korzystnie na własności aerodynamiczne i dynamiczne łopaty a także na liczbę braków i ekonomię przedsiębiorstwa.

Poszczególne etapy i operacje procesu technologicznego związane z dodatkowym wyposażeniem łopát w niezbędne w eksploatacji instalacje wymagają ponownej kontroli w celu ukończenia łopát wg., grup eksploatacyjnych. W tym celu również należy sprawdzić parametry dynamiczne (masę i momenty statyczne łopát). Kontrola ta jest wstępną przed wprowadzeniem łopát do eksploatacji na śmigłowcu. O przynależności łopát do danej grupy eksploatacyjnej oraz wprowadzeniem ich do użytkowania jest etap wyważania dynamicznego – torowania na ziemi, w powietrzu i sprawdzenie występowania drgań łopát między innymi na flutter a także sprawdzenie ciągu wirnika nośnego. Podczas tych prób siły aerodynamiczne i bezwładności powodują, tzw. rozrzut masy w objętości łopaty, co powoduje konieczność ponownego sprawdzenia własności dynamicznych.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] *Właściwości i pilotowanie śmigłowca w locie* – Poznań, DWLot. 554/62, 1984.
- [2] *Praktyczna aerodynamika śmigłowca* – Poznań, DWLot. 2252/83, 1984.
- [3] *Ilustrowana encyklopedia współczesnych śmigłowców*. ESPADON, 1992.
- [4] <http://itlims.meil.pw.edu.pl/>
- [5] Witkowski R.: *Budowa i pilotaż śmigłowców*. Warszawa, WKŁ 1986.
- [6] *Ilustrowany Leksykon Lotniczy – Pionowzłoty*. Warszawa, WKŁ 1993.
- [7] *Ilustrowany Leksykon Lotniczy: Napędy*; WKŁ 1993.
- [8] Łączkowski R.: *Wyważanie elementów wirujących*. Warszawa, WNT 1979.
- [9] *Instrukcja zapewnienia jakości I.Z.1. OPL 66-215 Prób zdawczych i odbiorczych łopát wirnika nośnego śmigłowców PZL – „Sokół i Kania”*, Świdnik 1994.