

Drewno jako materiał konstrukcyjny w lotnictwie

Jarosław Pytko
Politechnika Lubelska

Streszczenie

Artykuł dotyczy wykorzystania drewna jako materiału w konstrukcji statków powietrznych. Przedstawiono historyczne aspekty użycia tego surowca w budowie samolotów. Wymieniono i scharakteryzowano najczęściej stosowane gatunki drewna, a także omówiono podstawowe technologie związane z jego zastosowaniem w konstrukcjach lotniczych. Opisano także przykłady wykorzystania drewna we współczesnych samolotach.

Słowa kluczowe: drewno, konstrukcja samolotów, płatowiec, śmigło

Wprowadzenie

Transformacja energetyczna wymusza na producentach i użytkownikach statków powietrznych wdrażanie rozwiązań, które zapewniają niski ślad węglowy. Obserwuje się wzmożone działania w zakresie poszukiwania nowych materiałów, a także innowacyjnych, mniej energochłonnych technologii wytwarzania. Mniej popularnym trendem jest ulepszanie starszych technologii czy powrót do tradycyjnych materiałów, lecz z nowym podejściem. Jako przykład można tu podać zastosowanie drewna jako materiału konstrukcyjnego.

Od początków lotnictwa drewno stanowiło podstawowy materiał konstrukcyjny w projektowaniu i budowie

płatowców. Jego dostępność i niska cena, a także stosunkowo prosta technologia obróbki i łączenia powodowały, że konstrukcje drewniane stanowiły podstawowe rozwiązanie w zakresie struktury pierwszorzędowej płatowca. Do dziś spotyka się wyprodukowane przed dziesiątkami lat samoloty i szybowce konstrukcji drewnianej. Świadczy to o wysokiej trwałości materiału.

Wysokie wymagania odnośnie do zeroemisyjności z jednej strony oraz niewątpliwe zalety drewna z drugiej sprawiają, że, wprawdzie dość nieśmiało, ale i dziś konstruktorzy sięgają po drewno jako materiał do budowy samolotów. Niniejszy artykuł zawiera podstawowe wiadomości z zakresu technologii drewna oraz prezentację przykładów stosowania go jako materiału w budowie współczesnych statków powietrznych.

Rys historyczny

Jak wspomniano we wprowadzeniu, drewno było szeroko stosowane w początkach lotnictwa. Przyczyniły się do tego jego praktyczne zalety, czyli dostępność, niska cena, a także własności mechaniczne – wytrzymałość, podatność obróbki oraz trwałość konstrukcji przy odpowiedniej konserwacji i warunkach przechowywania (hangarowania). Bogate



Ryc. 1. Amy Johnson przy samolocie DH 60 Moth o konstrukcji całkowicie drewnianej

doświadczenie inżynierskie w zakresie konstrukcji budynków, mostów czy jednostek pływających sprawiło, że wykorzystanie znanych technologii do tworzenia konstrukcji drewnianych przeniesiono także na grunt lotnictwa. I tak, konstrukcja i technologia dźwigarów czerpała z doświadczeń zdobywanych przy budowie dachów, sklepień, masztów. Odtwarzanie obłych kształtów zapewniających dobrą aerodynamikę możliwe było dzięki technice laminowania drewna, co uprzednio przez lata doskonalono w meblarstwie. W ten sposób lotnictwo uzyskało niemal gotowe rozwiązania technologiczne, włączając metody i urządzenia obróbkowe, kleje i metody klejenia, materiały i technologie impregnacyjne. Pewnym wyzwaniem było opracowanie nowych układów konstrukcyjnych, które spełniłyby odwieczne kryterium konstrukcji lotniczych, mianowicie wysoką wytrzymałość przy jak najniższej masie. Pojawiły się tu dźwigary dwuteowe, skrzynkowe, żebra ażurowe, itd. Szeroko stosowanym materiałem była sklejka, szczególnie brzoza, pochodząca z Finlandii. Powstawały coraz doskonalsze konstrukcje, w tym samoloty o wysokich osiąгах. Niepodobna tu wymienić wszystkich producentów samolotów drewnianych, lecz warto odnotować, że w czasach pionierskich przelotów maszyny latające posiadały, w całości bądź przynajmniej częściowo, konstrukcję drewnianą. Samolot Ryan NYP Spirit of St. Louis, na którym Charles Lindberg jako pierwszy przeleciał ponad Oceanem Atlantyckim, pokonując trasę Nowy Jork–Paryż w 1927 r., posiadał skrzydła zbudowane z drewna. Należy

też wspomnieć o angielskim DH 60 Moth, lekkim filigranowym dwupłacie, na którym Amy Johnson w 1930 r. dokonała przelotu z Anglii do Australii (ryc. 1) czy też o polskich RWD, w tym RWD-5 bis, który zasłynął dzięki mjr. Stanisławowi Skarżyńskiemu, zdobywcy Atlantyku Południowego (przelot z Afryki do Brazylii, 1933 r.).

Ale nie tylko małe samoloty budowano z drewna. Ekscentryczny lotnik-konstruktor, a zarazem przedsiębiorca amerykański – Howard Hughes skonstruował i zbudował łódź latającą H-4 Hercules, zwaną również „Spruce Goose” [„Świerkowa Gęś”]. Samolot został zbudowany w czasie II wojny światowej, a w wyniku ograniczeń na aluminium (niezbędnego do produkcji myśliwców i bombowców) do budowy użyto drewna, jednak nie świerka, jak sugeruje przytoczona nazwa, a brzozy. Rozpiętość skrzydeł wyniosła 97,51 m, a napęd stanowiło 8 silników tłokowych, każdy o mocy 3000 KM. Prawdopodobnie szczytowym osiągnięciem w zakresie samolotów drewnianych był angielski de Havilland Mosquito, dwusilnikowy myśliwiec o cechach bombowca, zabierający niemal 2 tony uzbrojenia i rozwijający prędkość lotu do 595 km/h. W projekcie Mosquito wykorzystano tzw. konstrukcję geodetyczną, polegającą na diagonalnym ułożeniu listewek szkieletu kadłuba. Podstawowym materiałem było tu drewno świerkowe, z którego wykonywano najbardziej obciążone elementy (tzw. struktura pierwszorzędowa), czyli dźwigary skrzydeł, szkielet kadłuba, obramowania okien i drzwi. Poza tym, na poszyciu szkieletu



Ryc. 2. Stanisław Skarżyński przy RWD-5 bis. Skrzydła tego samolotu posiadały konstrukcję drewnianą, częściowo kryte były płótnem

skrzydeł i kadłuba zastosowano sklejkę brzożową oraz balsę. Do łączenia elementów użyto popularnego kleju kazeinowego, a wyschnięte skleiny wzmocniano spinkami metalowymi. Samolot okazał się wyjątkowo udany, wśród pilotów zyskał przydomek „Wooden Wonder” [„Drewniane Cudo”], jednak ze względu na oczywiste niedomagania konstrukcji drewnianej w warunkach podwyższonej temperatury i wilgotności, wśród mechaników i obsługi naziemnej nazywany był „Termite’s Dream” [„Marzenie Termita”].

Innym ciekawym przykładem z czasów II w. św. było przenoszenie produkcji pływaków wodnosamolotów do zakładów zajmujących się na co dzień obróbką drewna, nie stricte lotniczych. I tak, w prefekturze Aichi, znana wytwórnia skrzypiec i innych instrumentów smyczkowych – Suzuki (nie należy mylić ze znanym producentem samochodów i motocykli), wobec braku popytu na instrumenty w czasie wojny, podjęła się produkcji pływaków do wodnosamolotów. Po II w. św. coraz większe znaczenie zaczęło mieć aluminium i jego stopy. Samoloty metalowe posiadały znacznie większy zakres użytkowy temperatur otoczenia, mniej szkodliwy był tu także wpływ czynników atmosferycznych (opady, oblodzenie). Ponadto, ze względu na coraz większe zapotrzebowanie na materiały konstrukcyjne oraz z powodu problemów w pozyskaniu dużych ilości dobrego drewna, tendencja wypierania go przez metal stawała się coraz silniejsza. Drewno pozostało jednak materiałem konstrukcyjnym w przypadku małych

samolotów sportowo-turystycznych, a w szczególności tych budowanych amatorsko. Do dziś z myślą o konstruktorach-amatorach amerykański supermarket lotniczy Aircraft Spruce & Specjalty oferuje zestawy świerka sitkajskiego do budowy 30 różnych samolotów.

Obecnie przemysłowe zastosowanie drewna w lotnictwie jest marginalne. Główną przyczyną wynika z zastąpienia tego naturalnego materiału stopami aluminium oraz, coraz częściej, kompozytami. Ponadto, światowe zasoby świerka, którego drewno nadawałoby się jako materiał konstrukcyjny, są niemal na wyczerpaniu. Tym niemniej obserwuje się dziś tendencję do sięgania po drewno, choć nie jest ono głównym i jedynym materiałem konstrukcyjnym, a raczej komponentem. W kolejnych rozdziałach artykułu omówiono gatunki drewna nadające się do budowy elementów płatowca, krótko scharakteryzowano technologie obróbki i zaprezentowano współczesne konstrukcje lotnicze budowane z użyciem drewna jako materiału konstrukcyjnego.

Drewno stosowane do budowy konstrukcji lotniczych

W samolotach wykorzystuje się sklejkę, drewno lite lub klejone warstwowo. W niektórych przypadkach stosuje się drewno klejone ciśnieniowo lub impregnowane chemicznie.



Ryc. 3. DH 98 Mosquito, dwusilnikowy samolot rozpoznawczo-myśliwsko-bombowy o konstrukcji drewnianej

Surowiec używany w konstrukcjach lotniczych musi spełniać normy dotyczące wilgotności, usłojenia, rodzaju i liczby drobnych sęków dla danego wymiaru, sztywności oraz być wolny od pęknięć i dużych sęków. Poziom degradacji drewna musi być akceptowalny, ubytki nieznaczne, a wilgotność powinna być określona i mieścić się w dopuszczalnych zakresach. W praktyce konstruktorskiej stosuje się kilka gatunków drewna. Według Becara [1] najważniejsze wymagania, jakie musi spełniać drewno lotnicze to:

- minimalna liczba stojów na jednostkę długości (przykładowo dla świerka – 6/cal, dla jodły, cedru – 8/cal);
- maksymalne nachylenie włókien drewna: ogólnie nie powinno przekraczać 1 : 15 względem osi podłużnej deski; dla dźwigarów masywnych, zewnętrzna ósma część wysokości dźwigara nie więcej niż 1 : 15; środkowa połowa wysokości dźwigara najwyżej 1 : 10;
- obecność i rozmiar sęków: ogólnie, żaden sęk nie może mieć średnicy większej niż ½ cala; w przypadku dźwigarów masywnych, średnica sęków nie może przekraczać wymiaru 1/16 cala;
- kieszenie żywiczne lub korowe: dla dźwigarów litych nie mogą być głębsze niż ¼ szerokości ani szersze niż 1/4 cala lub 1/2 szerokości; odległość między dwiema kieszeniami po tej samej stronie dźwigara nie może być mniejsza niż sześciokrotność długości krótszej kieszeni.

Świerk sitkajski jest preferowanym przez producentów samolotów gatunkiem drewna, ponieważ zapewnia optymalny stosunek wytrzymałości do masy w porównaniu z innymi gatunkami drewna. Jodła szlachetna, dagleźja zielona, choina zachodnia i cedr biały są mocniejsze, ale cięższe od świerka sitkajskiego. Niemal identyczny jak świerk stosunek masy do wytrzymałości mają sosna wejmutka i topola żółta, obie szeroko stosowane w budowie samolotów.

Istotne z punktu widzenia konstrukcji lotniczych gatunki drewna wymieniono poniżej [5]:

- brzoza – żółta lub biała, twarda, wytrzymała, nie rozłupuje się łatwo; szeroko stosowana do produkcji sklejk, a w pewnym stopniu również do podkładek w miejscach, gdzie śruby przebijają dźwigar;
- cedr – drewno białe, o prostym usłojeniu, łatwe w obróbce, bardzo sztywne i wytrzymałe; czasami stosowane jako materiał na podłużnice, znajduje zastosowanie w elementach ściskanych, dźwigarach oraz częściach kadłuba i pływaków;
- jesion – drewno białe, stosowane w budownictwie i meblarstwie, mocne, elastyczne, o grubym usłojeniu; używane do wykonywania łuków końcówek skrzydeł, bloków, wsporników elementów instalacji paliwowych i wszelkich elementów giętych;
- jodła dagleźja – żółto-biała, bardzo sztywna i mocna; często stosowana zamiast świerka, szczególnie do budowy żeber i małych elementów;
- klon – satynowo-żółty, bardzo twardy; używany do wykonywania elementów wysokoobciążonych, nośnych, np. w dźwigarach, w miejscach, gdzie przebijają je śruby;
- lipa – drewno białe, miękkie, łatwe w obróbce; stosowane głównie jako rdzeń sklejki o powierzchniach z twardego drewna, czasami na podkładki, rzadko jako element konstrukcyjny;

- mahoń – drewno brązowe, gruboziarniste, stosunkowo miękkie; używane głównie do produkcji sklejk, a także do wykańczania wnętrza;
- sosna – bardzo podobna pod względem właściwości do świerka i używana jako jego zamiennik;
- świerk – żółto-biały, o prostym usłojeniu i satynowym wyglądzie; jeśli jest dobrej jakości, drewno to jest zalecane przez konstruktorów i preferowane przez wytwórców samolotów o konstrukcji drewnianej; używany do budowy elementów struktury pierwszorzędowej, w tym na dźwigary skrzydeł, podłużnice, wręgi, żebra i wszelkie inne elementy konstrukcyjne.

Świerk sitkajski

Naturalne miejsca występowania świerka sitkajskiego znajdują się w pasie wzdłuż wybrzeża Pacyfiku – od północnej Kalifornii aż po północny kraniec Zatoki Cooka na Alasce. Gatunek ten rośnie głównie w lasach nadbrzeżnych, w których wraz z choiną zachodnią stanowi większą część drzewostanu. Chociaż świerk sitkajski sporadycznie tworzy czyste drzewostany, zazwyczaj rośnie w sąsiedztwie innych gatunków, np. jodły olbrzymiej, cedru czerwonego oraz innych gatunków świerka (ryc. 4). Drzewa rosnące w lesie są wysokie i proste, z otwartymi, stożkowatymi koronami. Dojrzałe drzewo świerka sitkajskiego ma długi, cylindryczny, często pozbawiony gałęzi pień o wysokości od 12 do 24 m. Drzewa te osiągają wiek od 400 do 450 lat. W stanach



Ryc. 4. Kompaktowa odmiana świerka sitkajskiego – drzewko 25-letnie, wysokie na 3,5 m

Waszyngton i Oregon, dojrzałe świerki zazwyczaj mają średnicę od 12 do 18 m i ponad 60 m wysokości. Na Alasce średnie wymiary dojrzałych drzew są nieco mniejsze [5].

Drewno świerka sitkajskiego ma proste usłojenie i stosunkowo jednolitą teksturę, jest umiarkowanie lekkie, średnio twarde i częściowo odporne na obciążenia mechaniczne, w tym udarowe. Jest to drewno łatwe w obróbce. Ważną zaletą z punktu widzenia konstrukcji lotniczych jest jego wysoka wytrzymałość i twardość w odniesieniu do gęstości. Pod tym względem nie ma sobie równych. Łatwo poddaje się suszeniu komorowemu i jest umiarkowanie odporne na gnienie. Drewno to nie ma charakterystycznego zapachu i zawiera bardzo mało przewodów żywicznych.

W przemyśle drzewnym świerk sitkajski jest wykorzystywany do produkcji tarcicy i masy papierniczej. Materiał cięty na tarcicę jest wykorzystywany w budownictwie oraz w produkcji przemysłowej, w tym do wytwarzania instrumentów muzycznych.

Ze względu na stosunek wytrzymałości do gęstości, a także dzięki możliwości pozyskiwania czystych, prostosłojnych belek o dużych rozmiarach i jednolitej fakturze (z niewielką liczbą ukrytych wad), świerk sitkajski jest zdecydowanie najkorzystniejszym drewnem do budowy samolotów. W przeszłości z tego drewna powstało wiele szkieletów samolotów znanych lotników, którzy wstawili się rekordowymi przelotami. Świerk sitkajski stanowił główny materiał konstrukcyjny niemal wszystkich samolotów drewnianych, zarówno produkowanych przemysłowo, jak i budowanych w warunkach amatorskich. Wymagania dotyczące budowy samolotów są jednak tak rygorystyczne, że tylko około pięć procent drzewostanu świerka sitkajskiego nadaje się do tego celu. Drewno wykorzystywane do produkcji elementów konstrukcyjnych samolotów, a także elementów akustycznych instrumentów muzycznych pochodzi z drzew stosunkowo młodych, liczących od 75 do 100 lat. Po ścięciu drzewa tarcica jest transportowana do tartaku, gdzie jest suszona w komorze, zgodnie z normą AN-W-2. Ciężar właściwy drewna nie powinien być mniejszy niż $0,36 \text{ g/cm}^3$, a nachylenie włókien nie powinno przekraczać 1 : 15. Ponadto drewno musi być piłowane w kierunku pionowym i nie może mieć więcej niż sześć słoików na cal. Nie może również zawierać kiepszeń żywicznych ani korowych, niedopuszczalne są także smugi, ubytki i szorstkość. Dopuszcza się jedynie niewielką liczbę bardzo ciasnych sęków. Po obróbce, jeśli nie zostaną wykryte żadne wady, drewno może zostać certyfikowane jako świerk sitkajski o jakości lotniczej – najlepsze drewno na świecie do budowy samolotów [2].

Mechaniczna obróbka drewna

Mechaniczna obróbka drewna obejmuje cięcie, frezowanie, szlifowanie, wiercenie, toczenie. Głównym celem obróbki jest uzyskanie półwyrobu (deski, listwy), a także elementów gotowych (wykonanych z jednego kawałka materiału bazowego). Toczenie stosowane jest w przypadku elementów osiowosymetrycznych o przekrojach kołowych. Szlifowanie

jest najczęściej zabiegiem mającym na celu pasowanie elementów przed montażem, a także nadanie ostatecznego kształtu i gładkości powierzchni. Obróbka mechaniczna drewna nie wymaga specjalistycznych narzędzi ani wyposażenia ponad typowe maszyny warsztatowe. Wystarczające są nawet narzędzia ręczne w połączeniu z uchwytami i prowadnicami zapewniającymi zachowanie zadanej geometrii wykonywanych elementów. Zatem, tzw. amatorska budowa samolotu na podstawie planów czy też z wykorzystaniem zestawów jest możliwa w warunkach warsztatowych, nawet w garażu. Hałaśliwość obróbki mechanicznej drewna jest niższa niż w przypadku metalu, a obrabiane drewno nie kaleczy dłoni i wydziela przyjemny, nieszkodliwy zapach. Ze względu na obszerność zagadnienia zrezygnowano tu z przytaczania szczegółów metod obróbki mechanicznej drewna, zainteresowanym Czytelnikom proponuje się literaturę [3]–[6] oraz [8], [9]. Należy podkreślić, iż niezbędnym etapem nabywania umiejętności obróbki drewna jest bezpośredni kontakt z doświadczonym stolarzem lotniczym, co w obecnej sytuacji jest prawie niemożliwe. Jednym z niewielu w Polsce jest Jerzy Gruchalski, budowniczy kilku replik przedwojennych szybowców i motoszybowców konstrukcji drewnianej.

Klejenie

Klejenie jest szeroko stosowanym rodzajem techniki łączenia elementów konstrukcji drewnianych w lotnictwie. Zapewnia trwałe i mocne połączenie, bez osłabiania struktury łączonych elementów, jak się dzieje w przypadku połączeń gwintowych czy z użyciem gwoździ. Przy zastosowaniu odpowiedniego kleju, spoina posiada wyższą wytrzymałość na rozerwanie niż klejone elementy.

Rozwój klejów lotniczych przeszedł długą drogę – od klejów kazeinowych, stosowanych jeszcze przed I w. św. aż do początku lat 40. XX w., po kleje żywiczne, które stopniowo wypierają kazeinę, ze względu na to, że są mocniejsze, całkowicie wodoodporne i odporne na ataki pleśni i grzybów.

Klej Aerolite został opracowany w Anglii dla firmy De Havilland, specjalnie do produkcji samolotu Mosquito. Jego podstawowym składnikiem jest żywica mocznikowo-formaldehydowa, która jest odporna na wodę, owady i pleśń. Klej posiada dobre właściwości wypełniania szczelin. Użycie Aerolite polega na wymieszaniu proszku z wodą i nałożeniu go na jedną powierzchnię klejoną. Następnie, na drugą powierzchnię nakłada się utwardzacz i łączy elementy. Klej Aerolite utwardza się w temperaturach nie niższych niż 10°C , pod warunkiem, że podczas wiązania kleju zostanie miejscowo doprowadzone ciepło. Kolejnym rodzajem kleju nadającego się do budowy samolotów drewnianych jest FPL-16A, dwuskładnikowy biały klej epoksydowy, opracowany przez Forest Products Laboratories, USA. Oprócz drewna klei również metale i niektóre tworzywa sztuczne. FPL-16A jest wciąż dostępny na rynku. Inny klej strukturalny to T-88. Jest to produkt polecany przez wielu producentów zestawów do samodzielnego montażu. Nie kruszy się

i zapewnia mocne spoiny nawet w bardzo niesprzyjających warunkach (np. w temperaturze otoczenia ok. 1°C). Sprawdza się zarówno w klejeniu drewna, jak i stali oraz aluminium. Jest to istotna właściwość, gdyż w konstrukcji płatowca mogą występować połączenia drewno-metal, które można realizować metodą klejenia. Po całkowitym utwardzeniu klej jest odporny na działanie wody, oleju, benzyny oraz większości innych chemikaliów [5], [7].

Klej Weldwood Plastic Resin Glue i inne kleje rezorcynowe posiadają atest FAA, czyli mogą być stosowane na certyfikowanych samolotach i używa się ich z dużym powodzeniem od wielu lat. Kleje te są odporne na działanie wody, benzyny oraz rozpuszczalników. Podczas gdy Plastic Resin to klej jednoskładnikowy, kleje rezorcynowe są dwuskładnikowe. Są one odporne na działanie czynników zewnętrznych, zimnej lub wrzącej wody, ciepła, pleśni i rozpuszczalników.

Są to główne kleje stosowane do budowy drewnianych samolotów amatorskich lub naprawy certyfikowanych samolotów z elementami drewnianymi [5].

Kleje rezorcynowo-żywiczne są dostarczane w mieszaninach wodno-alkoholowych, które przechowywane w temperaturze pokojowej zachowują stabilność przez ponad rok. Żywice rezorcynowe miesza się z utwardzaczem – twardestwo po 5–7 godzinach w temperaturze 24°C (pełna wytrzymałość wymaga znacznie dłuższego czasu). Ograniczeniem stosowalności żywic rezorcynowych jest temperatura otoczenia, która nie powinna być niższa niż 20°C, a szybkość utwardzania rośnie w wyższych temperaturach. Czas przydatności do użycia mieszanki żywicy z utwardzaczem wynosi 2–5 godzin w temperaturze 24°C.

Coraz większą popularność zyskują dwuskładnikowe, uniwersalne kleje na bazie żywic epoksydowych lub poliamidowych. Trwale łączą drewno, metale, tworzywa sztuczne, włókno szklane i ceramikę. Tworzą spoinę o wysokiej wytrzymałości na odrywanie. Utwardzenie następuje zazwyczaj po kilkunastu minutach, ale maksymalną wytrzymałość spoiny uzyskuje się po 2–7 dniach [5]. Przykładem

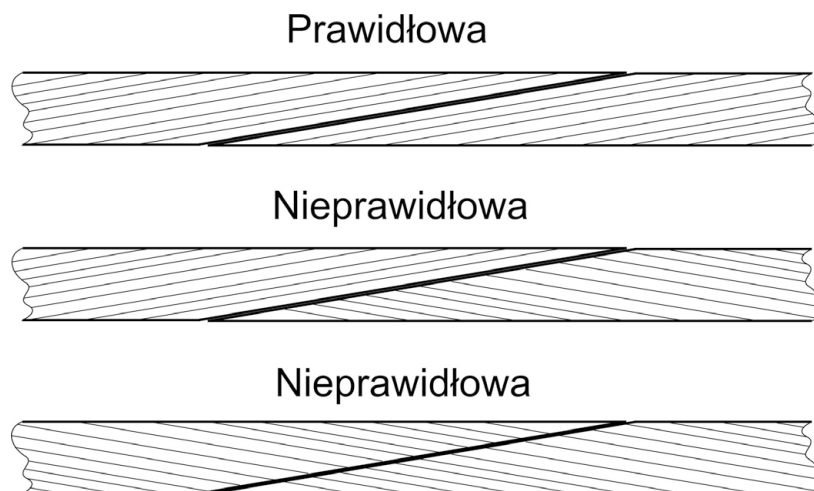
jest Aeropoxy ES6209, który jest dwuskładnikowym klejem epoksydowym. Po utwardzeniu tworzy wytrzymałe i trwałe spoiny konstrukcyjne. Charakteryzuje się półprzezroczystą, półpłynną konsystencją i posiada kolor bursztynowy. Proporcje mieszania żywicy i utwardzacza to 1 : 1, co wagowo lub objętościowo ułatwia przygotowanie kleju do użycia. Czas przydatności po zmieszaniu obu składników jest długi, ok. 60–90 minut, a utwardzenie następuje po 18–24 godzinach, jeśli klejone elementy znajdują się w temperaturze otoczenia 21°C. Choć jest to klej płynny, charakteryzuje się kontrolowaną lepkością przepływu, co minimalizuje wypływanie kleju ze spoiny.

Głównym ograniczeniem jest to, że żywice epoksydowe mięknią pod wpływem ciepła, a jeśli są utwardzane w temperaturze pokojowej wykazują niedostateczne właściwości w temperaturze podwyższonej. Testy przeprowadzone przez Bellanca Aircraft wykazały, że dwie najpopularniejsze żywice epoksydowe: T-88 i FPL-16A zaczynają mięknieć w temperaturze 54°C i wykazują około 25% swojej pierwotnej wytrzymałości w temperaturze 74°C.

Drugim poważnym ograniczeniem żywicy epoksydowej jest zagrożenie dla zdrowia związane z jej stosowaniem. Wszystkie żywice epoksydowe są substancjami toksycznymi i należy przestrzegać zaleceń producenta dotyczących bezpieczeństwa przy korzystaniu z nich w warsztacie. Zazwyczaj oznacza to dobrą wentylację pomieszczenia oraz ochronę rąk gumowymi rękawicami lub kremem ochronnym. Efekty działania żywicy epoksydowej kumulują się. Oparzenia na dłoniach mogą wystąpić dopiero po kilkukrotnej ekspozycji i zazwyczaj są trwałym uszczerbkiem na zdrowiu [7].

Połączenia na zakładkę

Połączenie na zakładkę to jedno z najważniejszych połączeń, jakie występują w drewnianej konstrukcji lotniczej. Elementy łączone muszą być precyzyjnie obrobione, ponieważ



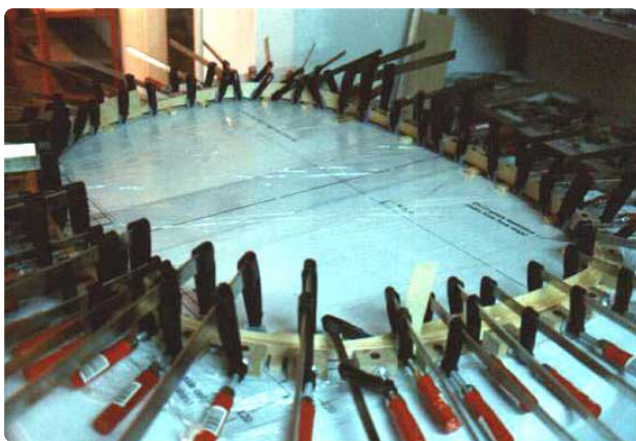
Ryc. 5. Połączenie na zakładkę

wytrzymałość połączenia zależy od powierzchni i jakości kontaktu między klejonymi powierzchniami. Ważne są również właściwości stosowanego kleju. Kleje epoksydowe i Aerolite wypełniają szczeliny, natomiast rezorcyna i żywica Weldwood nie mają tej właściwości. Istotne jest również, że siła docisku łączonych elementów zależy od rodzaju kleju.

Wykonanie prawidłowego połączenia na zakładkę wymaga zastosowania się do kilku zasad. Po pierwsze, nachylenie nie powinno być większe niż 1 : 15. Kierunek włókien względem połączenia na zakładkę jest również ważnym czynnikiem. Najkorzystniejszy sposób przygotowania elementów do klejenia jest taki, aby wszystkie cięcia na zakładkę były wykonane wzdłuż kierunku nachylenia włókien. Chodzi o to, aby zminimalizować ilość włókien czółowych widocznych na powierzchni połączenia na zakładkę, gdyż klejenie takich włókien jest trudniejsze i powoduje słabsze połączenie (ryc. 5). Ponadto, w elementach laminowanych odległość wzdłużna między najbliższymi końcami łączenia sklejki w sąsiednich laminacjach nie może być mniejsza niż 10-krotność grubości laminacji [7].

Laminowanie

Laminowanie drewna to proces obróbki polegający na sklejanju wielu cienkich warstw drewna, zwanych lamelami lub fornirami. Robi się to za pomocą kleju i nacisku, tworząc jeden, mocniejszy i bardziej stabilny element. W przeciwieństwie do sklejki, w której włókna układają się pod kątem 90 stopni, w klejonym drewnie włókna zazwyczaj biegną równolegle, choć istnieją również laminaty krzyżowe. Technika laminowania pozwala na wytwarzanie elementów o kształtach krzywych drugiego stopnia, które występują często w przypadku wręg kadłuba lub żeber skrzydła [3]. Rycina 6 przedstawia wręg kadłuba samolotu w trakcie laminowania. W celu prawidłowego klejenia należy zastosować liczne ściski stolarskie na całym obwodzie elementu o kształcie elipsoidalnym. Elementy konstrukcyjne otrzymywane metodą laminowania posiadają znacznie wyższe parametry użytkowe niż drewno gięte, a przede wszystkim wyższą wytrzymałość mechaniczną [4].



Ryc. 6 Przykład elementu konstrukcji wykonanego metodą laminowania

Konserwacja i zabezpieczenie lotniczych konstrukcji drewnianych

Istotną wadą drewna jest wrażliwość na działanie wilgoci oraz brak odporności na szkodliwe oddziaływanie drobnoustrojów, w tym przede wszystkim grzybów. Degradacja konstrukcji drewnianej wskutek działania grzybów jest powolna i zazwyczaj niewidoczna aż do momentu zniszczenia elementu struktury w momencie przeciążenia, co może nawet spowodować katastrofę. Wraz z rozwojem grzyba zachodzący proces fizyczny powoduje ciemnienie i rozjaśnianie obszarów drewna, otwieranie powierzchni, a następnie ich pękanie.

Grzyb często przenika do elementów konstrukcyjnych wraz z wodą deszczową lub śniegiem – przedostaje się przez nieszczelne osłony kabiny, otwory stabilizatorów w kadłubie oraz przez okucia skrzydeł i mocowania goleni podwozia we wnękach na koła. Pojawienie się grzybów jest najczęściej skutkiem lotów na mokrych lub pokrytych śniegiem pasach startowych lub lotniskach trawiastych. Innym szkodliwym zjawiskiem jest kondensacja pary wodnej, która występuje wskutek różnicy temperatur (chłodny przedmiot w zderzeniu z ciepłym wilgotnym powietrzem) w niedostatecznie wentylowanych miejscach. Tworzy się wówczas naprzemiennie wilgotna i sucha atmosfera, idealna do rozwoju procesów gnilnych. Drewniany samolot powinien być stale hangarowany. Mimo stosowania powłok ochronnych, czas i działanie unoszących się w powietrzu substancji chemicznych powodują degradację drewna. Pęknięcia w powłokach, nawet bardzo cienkie, wchłaniają wilgoć w efekcie zjawisk kapilarnych. Dodatkowo, metalowe okucia mające kontakt z drewnem sprzyjają gniciu w wyniku działania produktów korozji [7].

Drewniana konstrukcja samolotu jest podatna na ukryte uszkodzenia spowodowane przez owady żerujące na drewnie. Widać ich obecność w drobnych otworach i kawałkach przeżutego drewna – trocinach. Niektóre żerujące owady można wręcz usłyszeć. Prawidłowe zabezpieczenie drewna środkiem uszczelniającym, takim jak lakier lub mieszanka żywiczna, zastosowane podczas montażu samolotu lub po naprawach, stanowi ochronę przed szkodnikami.

Powierzchnia drewna jest porowata i umiarkowanie chłonna. Dlatego też drewniane elementy konstrukcji samolotu muszą być zabezpieczone przed chłonnością poprzez nałożenie impregnatu lub podkładu. Wnika on tylko na tyle głęboko, aby zamknąć pory, zanim będzie można nałożyć równomierną warstwę wykończeniową.

Drewno liściaste o tak dużych porach jak w przypadku brzozy wymaga nakładania szpachłówki poprzez wcieranie jej w słoje drewna w celu ich zapchania. Aby uzyskać wykończenie o lustrzanej gładkości, właściwie każdy rodzaj drewna należy pokryć szpachłóvką do szlifowania, której część jest szlifowana po wyschnięciu.

Aby powłoki ochronne mogły dostosowywać się do zmian kształtu i wymiarów powierzchni, muszą pozostać w pewnym stopniu plastyczne przez cały okres użytkowania. Wymagany stopień plastyczności stoi zazwyczaj w sprzeczności z potrzebą szybkiego schnięcia i twardości powłoki.

Ważne, by po wyschnięciu powłoki ochronne zwiększały wagę samolotu w jak najmniejszym stopniu.

Farby poliuretanowe zastąpiły tradycyjne emalie starszego typu. Powszechnie uważa się, że w przypadku powierzchni zewnętrznych najlepszym systemem malarskim są podkłady epoksydowe i poliuretanowe powłoki nawierzchniowe. Farby te są wyjątkowo trwałe i zachowują „mokry wygląd” nowej powłoki przez wiele lat. Jednym z mankamentów tych farb jest to, że wilgoć uwięziona pod powłoką powoduje korozję metalu. Testy przeprowadzone w krajowym laboratorium badawczym w USA – „Forest Products Laboratory” pokazują jednak, że farby poliuretanowe i epoksydowe mają doskonałą skuteczność, jeśli chodzi o eliminację wilgoci. Jest ona niemal równa skuteczności farb pigmentowanych aluminium [7].

W celu ochrony zaleca się stosowanie powłok epoksydowych lub poliuretanowych na wewnętrznych powierzchniach konstrukcji drewnianej (ryc. 7). Korzystne jest nałożenie dwóch warstw. Przykładem produktu dostępnego komercyjnie są żywice epoksydowe West System, znane w szkodnictwie. Żywice te zostały specjalnie opracowane w celu zapewnienia drewnu maksymalnej ochrony przed wilgocią. Epoksydy są rozpuszczane reaktywnymi rozcieńczalnikami. Reaktywność należy rozumieć jako udział rozcieńczalnika w reakcji chemicznej, dzięki której tworzy się na drewnie trwała, szczelna warstwa. Zastosowanie zwykłych rozpuszczalników powoduje powstanie warstwy porowatej, ponieważ rozpuszczalnik odparowuje podczas utwardzania epoksydu. W takim przypadku szczelność powłoki nie jest zachowana [5].



Ryc. 7. Nakładanie warstwy ochronnej żywicy epoksydowej na powierzchnie wewnętrzne konstrukcji skrzydła

Przykłady konstrukcji lotniczych wykorzystujących drewno

F8L Falco

Samolot Falco jest dziełem włoskiego konstruktora Stelio Fratiego. Powstał w roku 1955 jako dwumiejscowy dolnopłat z chowanym, trójkątowym podwoziem. Głównym

przeznaczeniem samolotu były loty sportowe, akrobacyjne oraz daleka turystyka lotnicza. Falco charakteryzuje się klasyczną sylwetką, dzięki której zyskał przydomek „Ferrari of the air”. Jednak najistotniejszą zaletą tego samolotu jest jego układ aerodynamiczny, w tym geometria i proporcje powierzchni skrzydeł i usterzeń, co powoduje, że Falco posiada bardzo dobre własności lotne. Samolot był produkowany we Włoszech w wytwórniach Aviamilano, Aeromere oraz Laverda (producent motocykli). W latach 80. XX w. amerykański inżynier lotniczy Alfred Scott, w porozumieniu z konstruktorem, opracował szczegółową dokumentację technologiczną samolotu, mając na celu wdrożenie produkcji zestawów do samodzielnego montażu. Tak powstał Sequoia F8L Falco, który jest do dziś budowany przez konstruktorów-amatorów (tzw. *home builders*) na całym świecie [3]. Grafika na okładce niniejszego numeru TLiA prezentuje samolot Falco, G-HCWB, zbudowany przez Angus Buchanana z Wielkiej Brytanii w 2018 r.

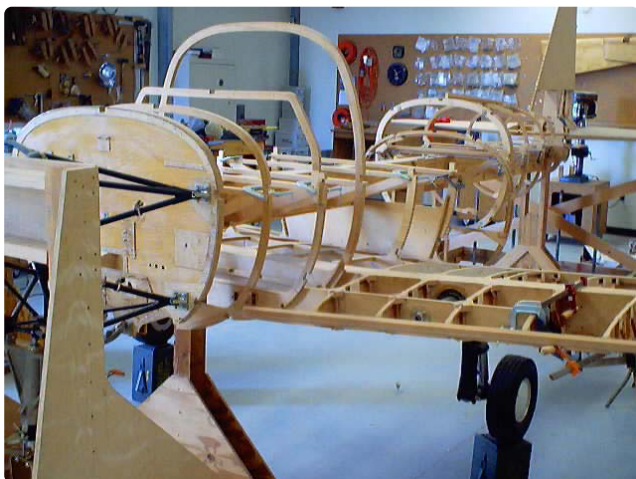
Samolot Falco został zaprojektowany i skonstruowany jako całkowicie drewniany. Kadłub posiada konstrukcję półskorupową z wręgami i podłużnicami, zaś skrzydła są dwudźwigarowe z klasycznymi ażurowymi żebrami. Głównym materiałem konstrukcyjnym szkieletu jest świerk sitkajski, z którego laminowane są wręgi i półwręgi kadłuba (ryc. 8), podłużnice kadłuba, skrzynkowe dźwigary, a także żebra skrzydła i usterzeń (ryc. 9 i 10). Elementy żeber o kształtach elipsoidalnych są również wykonane technologią laminowania drewna. Poszycie kadłuba, skrzydeł i usterzeń stanowią arkusze sklejki brzozonej. Jedynymi elementami metalowymi są okucia, golenie podwozia i elementy układu sterowania. Rycina 4 przedstawia fragment planów konstrukcyjnych samolotu, zaś rycina 5 pokazuje fragment konstrukcji skrzydła. Dokumentacja technologiczna dostępna na stronie seqair.com, zawiera szczegółowe rysunki wykonawcze wszystkich elementów drewnianych [7].



Ryc. 8. Drewniana konstrukcja kadłuba samolotu F8L Falco. Widoczne laminowane wręgi

Samolot Falco charakteryzuje się wysokimi osiąganymi, np. prędkość przelotowa wynosi 250 km/h, a zasięg 1400 km. Warto odnotować, że Włoch Andrea Tremolada w lipcu 2000 r. przeleciał na samolocie F8L Falco z Włoch do Bra-

zylii, pokonując Atlantyk Południowy. Odcinek o długości 1982 mil morskich, między Capo Verde a Recife, pokonał w czasie 13 h 43'. Lot odbywał się w bardzo trudnych warunkach pogodowych, wśród burz. Pilot musiał wznieść się na wysokość 15 000 stóp, aby uniknąć niebezpiecznych turbulencji. Intensywny deszcz spowodował czasową niesprawność większości elektronicznych urządzeń pokładowych, ale Tremolada nie utracił kontroli nad maszyną i szczęśliwie wylądował na lotnisku Recife w Brazylii [14].



Ryc. 9. Szkielet skrzydła F8L Falco



Ryc. 10. Konstrukcja części ogonowej – usterzenia poziome i pionowe

Samolot Integral R

Francuska firma Aura Aero wykorzystuje drewno w samolotach Integral (ryc. 11). Bazując na konstrukcjach sprzed lat, jak np. CAP10/20, CAP 232 oraz ROBIN 400, postanowiono stworzyć serię nowoczesnych samolotów szkolno-treningowych, wykorzystując drewno jako główny materiał konstrukcyjny skrzydeł [11]. Jak uzasadniono wybór drewna? Po pierwsze, jest to surowiec odnawialny, zatem zapewnia niższy ślad węglowy i brak problemów z recyklingiem. Drewno jest tradycyjnym materiałem lotniczym, sprawdzonym w przeszłości w różnorodnych konstrukcjach lotniczych,

a w połączeniu z włóknem węglowym zapewnia lekką, wytrzymałą i łatwą w naprawie konstrukcję. Hybrydowa konstrukcja drewniano-węglowa zapewnia wytrzymałość i odporność mechaniczną samolotu, poprawia jego parametry środowiskowe poprzez minimalizację wpływu na środowisko i redukcję śladu węglowego, a także zapewnia wydajność w wymagających misjach szkoleniowych. Należy zaznaczyć, że francuski przemysł lotniczy posiada bogate tradycje w zakresie projektowania, wdrażania i produkcji samolotów drewnianych. Wprawdzie chodzi głównie o małe samoloty, 2- lub 4-miejscowe, jednak ogólna liczba wyprodukowanych egzemplarzy, opinie użytkowników, a także fakt, iż wiele z samolotów wyprodukowanych w latach 50. i 60. XX w. lata do dziś, jest ważnym argumentem na rzecz drewna.



Ryc. 11. Samolot Integral R, w którym wykorzystano drewno jako materiał konstrukcyjny



Ryc. 12. Wizualizacja projektu Integral E

W konstrukcji samolotów Integral wykorzystano również nowoczesne metody projektowania i doboru materiału. Precyzyjna orientacja słoików drewna, zautomatyzowana za pomocą oprogramowania CAD, pozytywnie wpływa na wytrzymałość i integralność kadłuba oraz całości płatowca.

Integral R jest samolotem dwumiejscowym, w układzie dolnopłata ze stałym podwoziem, dwu lub trójkołowym. Jest on certyfikowany według przepisów EASA CS-23 oraz FAA. Posiada napęd na silnik tłokowy Lycoming AEIO-390, który zapewnia prędkość przelotową 278 km/h. Główne zastosowanie samolotów Integral R to szkolenie podstawowe i zaawansowane, w tym akrobacja lotnicza, co umożliwia szeroki zakres współczynnika obciążeń dynamicznych +7,5/-

7,5 g dla kategorii CAT A2 przy masie całkowitej 935 kg. Rycina 12 przedstawia projekt, będącej w trakcie rozwoju, wersji Integral E, napędzanej silnikiem elektrycznym Safran ENGINEUS 100B1 o mocy 125 kW. Będzie to najbardziej zaawansowany samolot, jeśli chodzi o zeroemisyjność i przyjazną dla środowiska technologię produkcji.

Śmigła MT-Propeller

Śmigła lotnicze są przykładem zastosowania drewna w konstrukcji elementów układu napędowego statku powietrznego. Pierwsze śmigła były wykonywane z drewna klejonego, lecz już w latach 30. XX w. zaczęto produkować śmigła metalowe, które charakteryzowały się wyższą wytrzymałością i udurowością. Jednakże nie zrezygnowano całkowicie z użycia drewna w technologii śmigieł lotniczych, a ostatnio przeżywa ono renesans. Niemiecka firma MT-Propeller oferuje kilkadziesiąt modeli śmigieł zarówno do tłokowych, jak i turbinowych samolotów. Drewno jest tu wykorzystywane jako materiał rdzenia łopaty śmigła.

Centralny rdzeń łopaty śmigła wykonywany jest z wysokiej jakości wielowarstwowo laminowanego drewna świerkowego lub jesionowego, a w niektórych konstrukcjach stosuje się sprasowane, uplastycznione drewno bukowe. Przekrój łopaty śmigła wykonanego tym sposobem pokazano na rycinie 13. Technologia określona jako „natural composite” bazuje na doświadczeniach jeszcze z czasów II w. św., gdy łopaty śmigieł samolotów myśliwskich były produkowane z drewna. W efekcie otrzymuje się lekkie i wytrzymałe śmigło o wysokim dekremencie tłumienia. Krawędź natarcia łopaty jest wzmacniana przez obrzeżowanie warstwą metalu, przykładowo niklowo-kobaltową [13].



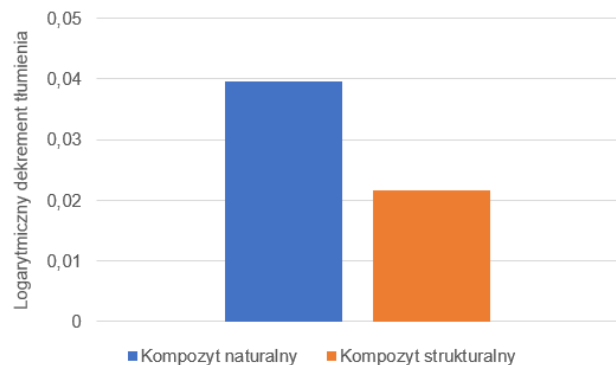
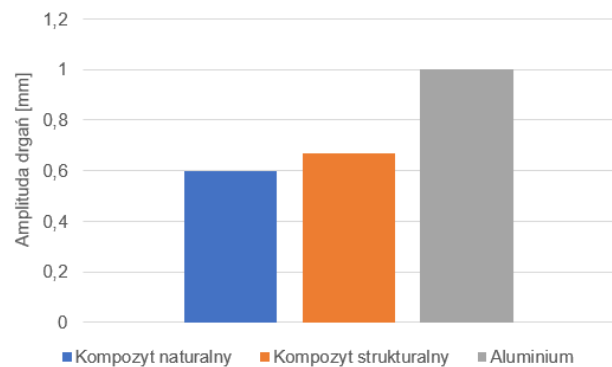
Ryc. 13. Przekrój łopaty śmigła wykonanej z drewna klejonego

Przykładem śmigła o konstrukcji wykorzystującej drewno jest MT/BLR Whisper Prop, które zastosowano do napędu dwusilnikowego samolotu turbinowego Beechcraft King Air 90 (ryc. 14). Łopaty kompozytowe są wykonane z wysokowytrzymałego, uplastycznionego drewna konstrukcyjnego w połączeniu z warstwami włókna węglowego. Opracowano serię śmigieł 4-, 5-, a nawet 7-łopatowych, które posiadają mniejszą średnicę przy minimalnym wzroście masy całkowitej. Mniejsza średnica śmigła redukuje ryzyko zassania ciał obcych z drogi startowej, dzięki czemu zmniejsza się ryzyko uszkodzenia łopat śmigła, silnika oraz poszycia płatowca. Dzięki lżejszym łopatkom redukcja momentu żyroskopowego zmniejsza obciążenia dynamiczne na silniku i płatowcu o 40%. Drewniany rdzeń łopat śmigła zapewnia o 45% wyższy współczynnik tłumienia, co skutkuje znaczącą redukcją drgań i hałasu, poprawiając komfort w kabinie i kokpicie oraz zmniejszając zmęczenie akustyczne samolotu i przyrządów pokładowych (ryc. 15). Pomiary wykazały redukcję poziomu ciśnienia akustycznego przez

śmigło Whisper Prop w porównaniu z oryginalnym śmigłem fabrycznym, odpowiednio o 6,5 dB(A) dla samolotu Beech 1900C i o 5 dB(A) dla samolotu Beech 1900D. TBO śmigieł MT/BLR Whisper Prop wynosi 4500 godzin lub 72 miesiące [10].



Ryc. 14. Samolot Beech King Air 90 ze śmigłami pięciołopatkowymi MT



Ryc. 15. Wpływ materiału łopaty śmigła na amplitudę drgań i współczynnik tłumienia

Innym obszarem stosowania drewna w budowie statków powietrznych są elementy struktury drugo- i trzeciorzędowej, takie jak odłogi w samolotach transportowych i pasażerskich, a także elementy wykończenia wnętrza kabiny pasażerskiej w samolotach klasy luksusowej. Austriacka firma F/List oferuje wykończenia kabiny w drewnie według projektu odbiorcy lub własnych aranżacji [12].



Ryc. 16. Drewniane elementy wykończenia kabiny pasażerskiej samolotu klasy luksusowej

Podsumowanie

Obecnie drewno ma marginalne zastosowanie jako materiał konstrukcyjny w przemysłowej produkcji samolotów. Jest natomiast chętnie wykorzystywane do amatorskiej budowy samolotów klasy „experimental” (ew. „specjalny”), głównie ze względu na prostotę technologii obróbki. Podejmowane są próby powtórnego włączenia drewna do produkcji samolotów lub ich podzespołów (w formie drewna klejonego z przekładkami z kompozytu węglowego). Zastosowanie tego materiału w konstrukcjach lotniczych na szerszą skalę jest ograniczone, na przeszkodzie stoją niewystarczające zasoby naturalne świerka sitkajskiego, który jest najbardziej odpowiednim gatunkiem do budowy samolotów. Niewykluczone jednak, że coraz ostrzejsze wymagania związane z wdrażaniem programów dekarbonizacji przemysłu skłonią konstruktorów do sięgnięcia po drewno jako składnik kompozytu.

Bibliografia:

- [1] Becar, N.J. (1989). Selection and Evaluation of Wood. W: Poberezný, P., Schmid, S.H. (ed.). *EAA Aircraft Building Techniques, Wood*. EAA Aviation Foundation, Oshkosh, WI, USA, s.19–21.
- [2] Goyer, N. (1999). Building Wood Aircraft. *Custom Planes*, 2(3), s. 20–25, 89.
- [3] Henry, S. (1998). Falco. The Sequoia Aircraft Company and Stelio Frati. *Custom Planes*, 1(3), s. 34–39.
- [4] Jagels, R. (2025). A Deep Dive into Bending Wood. *Wooden Boat*, 304, s. 88–89.
- [5] Poberezný, P., Schmid, S.H. (ed.) (1989). *EAA Aircraft Building Techniques, Wood*. EAA Aviation Foundation, Oshkosh, WI, USA.
- [6] Ross, R.J. (ed.) (2010). *Wood Handbook. Wood as Engineering Material*. United States Department of Agriculture. Forest Service. Forest Product Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-190, Madison Wisconsin, USA.
- [7] Scott, A. (2002). *F8L Falco Construction Manual*, Sequoia Aircraft Corporation, Virginia, USA.
- [8] *Design of Wood Aircraft Structures*. (1944). ANC-18 Bulletin. United States Department of Agriculture. Forest Service. Forest Product Laboratory. Army-Navy-Civil Committee on Aircraft Design Criteria, Washington, USA.
- [9] *Wood Aircraft Inspection and Fabrication*. (1944). ANC-19 Bulletin. United States Department of Agriculture. Forest Service. Forest Product Laboratory. Army-Navy-Civil Committee on Aircraft Design Criteria, Washington, USA.
- [10] <https://skiesmag.com/press-releases/blr-names-alpine-air-express-as-launch-partner-for-beech-1900d-whisper-prop/> (dostęp: 13.08.2025).
- [11] <https://aura-aero.com/en/> (dostęp: 12.08.2025).
- [12] <https://f-list.at/en/> (dostęp: 28.08.2025).
- [13] https://www.mt-propeller.com/en/entw/pro_blades.htm (dostęp: 13.08.2025).
- [14] <http://seqair.com/Hangar/Tremolada/Tremolada.html> (dostęp: 4.09.2025).