

Materiały kompozytowe w budowie modeli swobodnie latających

Jan Cihak
Czechy

Streszczenie

W artykule przybliżono nowoczesne materiały kompozytowe stosowane w konstrukcji i budowie modeli latających różnych klas. Opisano różne rodzaje kompozytów stosowanych w modelarstwie. Wyszczególniono zalety i wady omawianych materiałów. Skrótowno omówiono technologię wykonania wybranych elementów modeli swobodnie latających z wykorzystaniem kompozytów.

Słowa kluczowe: kompozyty, modele latające

Wprowadzenie

Ciągły rozwój przemysłu znajduje odzwierciedlenie we wszystkich obszarach działalności człowieka, w tym w modelarstwie lotniczym. To dzięki nowoczesnym materiałom kompozytowym i nowym technologiom konstrukcyjnym możliwe jest zbudowanie nie tylko powierzchni nośnych, ale także innych części modeli. Dotyczy to zarówno lekkich, jak i mocniejszych oraz trwalszych od stosowanych klasycznie materiałów konstrukcyjnych, takich jak balsa, listewki świerkowe, itp.

Dzisiejsze modele, budowane z użyciem materiałów kompozytowych, takich jak kevlar, tkaniny i rovingi węglowe, tkaniny szklane, żywice epoksydowe i inne, pozwalają znacznie lepiej niż dotychczas wykorzystać teoretyczną wiedzę z zakresu aerodynamiki. Jest to również jeden z powodów wyższej wydajności modeli.

Skrzydła są znacznie mocniejsze, szczególnie jeśli chodzi o wytrzymałość na skręcanie, a większa część ich ciężaru przypada na część nosową. Wytrzymałość konstrukcji ma bardzo korzystny wpływ na zachowanie modeli. Co prawda skrzydła nowego modelu wykonane z materiałów kompozytowych, z karbonowym D-boxem są stabilniejsze w porównaniu z konstrukcjami drewnianymi, jednak z doświadczenia wiemy, że przez pierwszy rok latania nowego modelu w zawodach osiągnęte wyniki nie są satysfakcjonujące. Konstrukcje wykonane z materiałów kompozytowych charakteryzują się nieco większą masą niż klasyczne – drewniane. Półprodukty od poszczególnych producentów różnią się nie tylko ceną i jakością, ale także wagą, dlatego należy wziąć ten fakt pod uwagę przed decyzją o zakupie i zastosowaniu do budowy modelu.

Producenci często stosują modyfikacje standardowego produktu zgodnie ze specyficznymi wymaganiami klienta. Warto wykorzystać taką możliwość. W przypadku skrzydeł najwięcej można zaoszczędzić na masie D-boxa i dźwigara skrzydła. Wiemy, że w środku rozpiętości skrzydła naprężenia stanowią ok. $\frac{1}{4}$ wartości maksymalnej i wymiarowanie

dźwigara powinno temu odpowiadać. Dalsza oszczędność masy zależy od zastosowanej powłoki poszycia, precyzji klejenia itp. W przypadku modelu z napędem gumowym klasy F1B sekcja silnika, czyli głowica, a także tył kadłuba to kolejny bardzo ważny czynnik, który będzie miał wpływ na całkowitą masę modelu. Jednocześnie nie można zaniedbywać faktu, że model musi wytrzymać obciążenia związane ze startami zawodniczymi, dlatego nie należy zmniejszać wytrzymałości konstrukcji modelu tylko po to, aby zaoszczędzić na wadze.

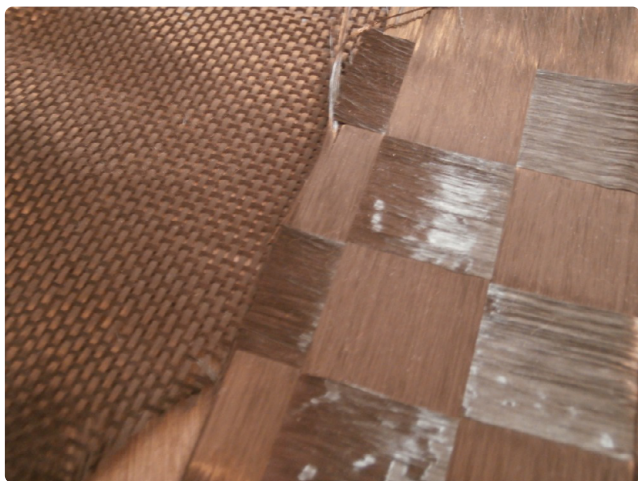
Podobnie jest z nowymi materiałami powłokowymi, którymi powlekane są węglowe szkielety skrzydeł, które znacznie różnią się od poszycia wykonanego z papieru japońskiego. Papierowe pokrycia nadawały szkieletom wytrzymałość i sztywność. Dzisiejsze folie (Mylar, Lamsan itp.), włókniny poliestrowe (Vlies, Icarex, Micafilm itp.) nie wzmacniają konstrukcji. Fakt ten należy uwzględnić przy projektowaniu skrzydeł oraz usterzeń, oznacza to, że szkielety powinny być odpowiednio zwymiarowane. Nowoczesne materiały powłokowe charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami pod względem obojętności na wilgoć, są bardziej odporne na starzenie i rozdieranie w porównaniu do konwencjonalnych papierów japońskich i koreańskich.

Materiały kompozytowe

Dla lepszego zrozumienia, czym są materiały kompozytowe, warto je zdefiniować, by nie ograniczać tego określenia wyłącznie do kompozytu węglowego, mimo że to właśnie on wraz z kompozytem szklanym jest najczęściej używany w modelarstwie lotniczym. Ogólnie, materiał kompozytowy rozumiany jest jako materiał heterogeniczny, który wyróżnia się właściwościami mechanicznymi, fizycznymi i chemicznymi, a jednocześnie charakteryzuje się tym, że powstaje w wyniku połączenia nie mniej niż dwóch składników. Bardzo ważną właściwością kompozytów jest synergizm, czyli fakt, że ich właściwości są znacznie wyższe od tych, które odpowiadałyby sumie właściwości poszczególnych składników. Ten synergizm ma na celu stworzenie jakościowo różnych materiałów.

Do budowy modeli latających wykorzystuje się najczęściej tkaniny szklane, aramidowe (Kevlar), węglowe (przedstawione na rycinie 1) lub hybrydowe, będące połączeniem tych materiałów. Każdy rodzaj tkaniny sprzedawany jest w różnych gramaturach. Na przykład tkanina o gramaturze 25 g/m² jest znacznie lżejsza i cieńsza niż tkanina z tego samego materiału, ale o większej gramaturze, np. 160 g/m². Czasami, i jest to jak najbardziej poprawne, włókno węglowe

w postaci rovingu jest oznaczone wartością Tex. Wartość ta wskazuje wagę 1000 m danego włókna. Oznaczenie Tex 100 oznacza, że 1 km rovingu waży 100 g.



Ryc. 1. Tkanina węglowa, z lewej płótno o gramaturze 68 g/m², z prawej 60 g/m²

Istnieje kilka rodzajów włókien wykorzystywanych do produkcji materiałów kompozytowych. Mogą to być pasma cięte stosowane do wytwarzania mas kompresyjnych lub wtryskowych. Włókna mielone otrzymuje się poprzez mielenie włókien bardzo delikatnych, w wyniku czego otrzymuje się króciutkie odcinki. Proste pasma to włókna bez skręceń. Rovingiem określa się sploty o bardzo małej liczbie zwojów, mniejszej niż 40 na 1 metr długości (ryc. 2). Ten rodzaj materiału doskonale nadaje się do produkcji prepegów. Bardzo często wagę rovingu oznacza się wartością Tex, czasem także dTex. Wartość dTex wskazuje wówczas, ile gramów waży 10 000 m (10 km) włókna. Wielokrotnie stosowane jest oznaczenie typu NF6 50 K. Oznacza to, że włókno składa się z sześciu tysięcy włókien elementarnych (monokrystalicznych). Ponadto można wyróżnić kilka rodzajów przędzy dla poszczególnych rodzajów tkanin. Występuje przędza prosta lub kablowa, która powstaje w wyniku skręcenia pasm i ich połączenia. Jest bardzo popularna w produkcji tkanin technicznych. Tkaniny rovingowe są tkane i najczęściej stosowane do laminowania kontaktowego, pultruzji, nawijania itp.

Bardzo istotną wartością tych tkanin jest gramatura, która określa masę jednostkową i jednocześnie delikatność danej tkaniny. Tkaniny rovingowe dzielimy także ze względu na splot (płótno, diagonal, satyna). O ile nie zaznaczono inaczej, domyślnym jest splot płócienny. Stosunkowo niedawno w modelarstwie pojawiły się tkaniny TeXtreme szwedzkiej produkcji Oxeon. Są one dziane w formie pasków o różnej szerokości, najczęściej 20–50 mm. Oprócz taśm węglowych zawierają również taśmy z włóknami polimerowymi, co skutkuje nawet o 20% mniejszą masą jednostkową w porównaniu do konwencjonalnych typów. Jednocześnie w tych tkaninach jest mniej otworów, a włókna nie są faliste. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie dużego udziału objętościowego włókien. Tkaniny produkowane są również w formie hybrydowej i najczęściej łączą włókna różnych typów (węglowo-aramidowe, węglowo-szklane itp.).



Ryc. 2. Roving węglowy 60 TEX

Wykorzystywane są też inne tkaniny, na bazie przędzy, które nie są przeznaczone do stosowania w konstrukcjach modeli latających, ale raczej jako geotekstylia, tkaniny izolacyjne lub filtracyjne itp. Stosowane są również maty, w których włókna są dłuższe (ok. 25–50 mm). To właśnie te posięte włókna łączy się spoiwami polimerowymi, natomiast w przypadku stosowania włókien ciągłych nie ma konieczności stosowania spoiw, ponieważ same się ze sobą przeplatają. Podobnie jak tkaniny, maty również różnią się gramaturą.

Warto również wspomnieć o prepegach. Wykorzystuje się je do produkcji wysokiej klasy kompozytów polimerowych. Są konfekcjonowane i oferowane w formie rolek o różnej szerokości lub szpul, na które nawinięto równolegle ułożony roving, tkaninę lub matę oraz osnowę – albo termoplastyczną, albo z półutwardzonego reaktywnego tworzywa sztucznego. Tkaniny impregnuje się roztworem żywicy (epoksydowej, bismaleinimidu, benzoksazyny, ftalonitrylu, polichinoksaliny, fenofomaldehydu, cyjanoestru, poliamidu).

Do produkcji prepegów czasami używa się również żywic poliestrowych i winylestrowych. W prepegu żywica występuje w postaci resitolu, co odpowiada tzw. stanowi B, gdy cząsteczki są usieciowane, ale sieć ma bardzo małą gęstość. Prepegi wyposażone są z jednej strony w nośnik, a z drugiej w folię separacyjną. Zależy to od rodzaju użytej żywicy i układu żywica–utwardzacz, który decyduje o trwałości prepegów. W temperaturze około 20°C prepegi zwykle zaczynają się starzeć. Najpierw stopniowo zmniejszają swoją lepkość, zapobiegając w ten sposób przemieszczaniu się poszczególnych warstw ułożonych jedna na drugiej. Zmniejsza się również ryzyko powstawania kieszeni powietrznych pomiędzy warstwami. Podczas dalszego starzenia w temperaturze pokojowej około 20°C żywica twardnieje. Dzięki temu konieczne jest przechowywanie prepegów z reaktywną matrycą z tworzywa sztucznego w temperaturze około –18°C.

Powyższy przegląd dotyczy najczęściej stosowanych materiałów kompozytowych do budowy modeli lotniczych. W kolejnym rozdziale omówione zostaną właściwości kompozytów, a także technologia wytwarzania półfabrykatów kompozytowych w budowie modeli latających.

Budowa modelu latającego z wykorzystaniem materiałów kompozytowych

Obecnie istnieje wiele instrukcji i procedur w zakresie pracy z materiałami kompozytowymi. W ciągu ostatniej dekady temat poruszany był kilkakrotnie. Mimo to pytania dotyczące

materiałów kompozytowych i ich przetwarzania są nadal aktualne. Jeśli zdecydujemy się na wykorzystanie do budowy modelu niektórych półproduktów kompozytowych pochodzących od producentów, warto najpierw poznać zalety i wady poszczególnych konstrukcji oraz charakterystykę podzespołów. Jeśli znamy właściwości komponentów, w oparciu o tę wiedzę jesteśmy w stanie optymalnie rozwiązać problem konstrukcji naszego modelu tak, aby wszystkie założenia konstrukcyjne zostały spełnione.

Dlatego warto poznać właściwości, jakie posiadają różne rodzaje materiałów kompozytowych. Dla poszczególnych produktów podane są także zalecane wymiary konkretnych części. Wymiary nie mogą być rozumiane dogmatycznie i mają jedynie charakter orientacyjny, oparty na doświadczeniu autora przy budowie dotychczasowych modeli. Rozmiar można dostosować w zależności od tego, czy priorytetem jest otrzymanie konstrukcji o wysokiej wytrzymałości i o większej masie, czy też dąży się do możliwie lekkiej masy przy jednoczesnym zachowaniu wystarczającej wytrzymałości w warunkach startów zawodniczych.

Paski kompozytowe do wzmocnienia żeber

Producenci oferują zestawy do wiązania żeber w różnych rozmiarach. Zawierają one prefabrykaty w formie pasków wykonanych z jednokierunkowych włókien węglowych o różnej gramaturze. Materiał ten, jak sama nazwa wskazuje, składa się z włókien prowadzonych tylko w jednym kierunku. Paski są różnej długości, ich szerokość to najczęściej 0,8–2,5 mm, a grubość uzależniona jest od gramatury użytej tkaniny i waha się w granicach 0,1–0,2 mm.

Rozmiar pasków węglowych do wykonania statecznika poziomego odpowiada jego rozmiarowi. Przykładowo, pasek o grubości 0,8 × 0,1 mm jest odpowiedni do wykonania statecznika typowego modelu F1B. W przypadku statecznika modelu szybowca klasy F1A, rozmiary paska wynoszą 1,0 × 0,1–0,2 mm. To samo dotyczy budowy skrzydeł. Jako prefabrykat do wykonania żeber skrzydeł modeli klas F1B i F1H wystarczający jest pasek o szerokości 1,3–1,5 mm i grubości 0,1–0,2 mm. W przypadku skrzydeł modeli szybowców klas F1A i F1E szerokość pasków może wynosić około 1,5–2,5 mm, a grubość 0,15–0,2 mm. Istnieją również taśmy na żebra przykadłubowe o wymiarach 5–20 mm × 0,1–0,2 mm. Producenci są oczywiście w stanie dostosować wymiary pasków do indywidualnych wymagań.

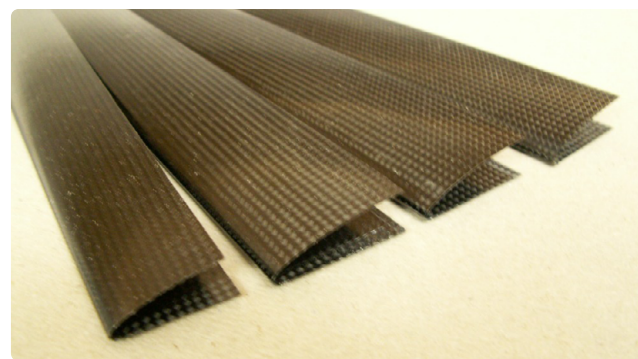
Wymiary pasków dobierane są z uwzględnieniem wytrzymałości balsy, z której wykonane są żebra. Ważne, by były one tej samej szerokości lub nieco szersze niż balsowa część żeberka. Ma to znaczenie ze względów estetycznych, gdyż widoczny jest również balsowy fragment, szerszy od listwy karbonowej. Żebra z opaskami węglowymi są stosowane głównie w konstrukcjach, w których krawędzie spływu wykonane są z włókna węglowego. W przeciwnym razie trzymałyby się bardzo słabo, wręcz niewystarczająco, na cienkich końcach żeber balsowych. Możliwe jest również użycie pasków do wiązania konstrukcji wykonanej w całości z balsy z krawędzią spływu także z balsy. Samo opasanie żeber może

znacznie wzmocnić konstrukcję, ale jest to też idealny sposób na pierwsze próby z użyciem technologii kompozytu węglowego. Taśmy przykleja się za pomocą kleju cyjanoakrylowego do dolnej i górnej krawędzi żeber – od krawędzi natarcia lub kesonu czy D-Boxa, z kilkumilimetrową zakładką, do krawędzi spływu – lub na całej jej szerokości. Dzięki temu uzyskamy optymalne wzmocnienie całej konstrukcji.

Zakładka paska węglowego na kesonie może się różnić w zależności od obciążenia złącza. W przypadku żebra przykadłubowego może ona wynosić 10–15 mm lub nawet 20 mm. W miejscu łączenia ucha skrzydła wystarczająca jest zakładka 5–10 mm. Pozostałe zakładki na żeberkach powinny mieć wówczas w idealnym przypadku wymiar 4–10 mm. Wszystko zależy od oczekiwanej wytrzymałości, estetyki, czystości aerodynamicznej itp. Na D-Boxie, przynajmniej na początku, zaleca się lekkie przeszlifowanie taśm, aby przed malowaniem na konstrukcji nie utworzył się uskok.

D-Box

U producentów dostępne są skrzynie skrętne z włókna węglowego zwane D-Box. Dostosowane są one do modeli różnych klas i wielkości, a także do wymagań dotyczących projektowanych wytrzymałości skrzydła lub statecznika w różnych wagach. D-Boxy są wykonane z tkanin węglowych o różnych splotach (płótno, diagonal itp.). Głównym elementem D-boxa jest wylaminowane oprofilowanie nosowej części profilu skrzydła (jak na rycinie 3). Producentom łatwiej jest wykonać D-box o splocie diagonalnym, ponieważ nie przesuwają się on tak bardzo podczas obróbki (nie ma tak dużego ruchu włókien jak w przypadku klasycznego płótna).



Ryc. 3. Główny element skrzyni skrętnej D-box – oprofilowanie noska krzydła

Pod względem właściwości wytrzymałościowych nie ma różnicy pomiędzy splotem skośnym i płóciennym do zastosowania w konstrukcji modeli latających. Tkaniny o splocie skośnym są z reguły droższe, dlatego produkty końcowe są odpowiednio wyceniane. Do skrzydeł modeli napędem gumowym F1G i P30, a także do stateczników modeli klas F1A, F1B, F1H i A3 istnieje możliwość zastosowania węglowych skrzyń skrętnych wykonanych z tkaniny o gramaturze 67 g/m². Na D-Boxy skrzydeł modeli klasy F1B stosowane są tkaniny o gramaturze 80 g/m². Tkaniny takie występują również w D-Boxach na uchach modeli klasy F1H. Tkaniny

o gramaturze 93 g/m² doskonale nadają się do budowy kesonów skrzydeł modeli klasy A3, a także uch skrzydeł modeli klasy F1A.

Powszechnie stosowana jest także tkanina o gramaturze 160 g/m². Jest ona zwykle spotykana w większych modelach. Minimalną masę modelu możemy uzyskać, stosując D-box wykonany z grubszy materiału. Chodzi głównie o modele klas F1A, F1C i F1H. Im cięższy materiał, z jakiego wykonane są karbonowe D-boxy, tym są one mocniejsze. Dlatego w modelach, w których chcemy znacząco zwiększyć wytrzymałość skrzydła na skręcanie, preferujemy zastosowanie grubszy tkaniny. Grubość ścianki D-boxa waha się w granicach 0,1–0,3 mm, w zależności od gramatury tkaniny. Konstrukcja skrzydeł i stateczników z wykorzystaniem karbonowego D-boxa to optymalny wariant pod względem masy, stabilności i sztywności konstrukcji.

Producenci dostarczają karbonowe skrzynie skrętne D-Box o różnych długościach i z różnymi promieniami krawędzi natarcia, dostosowanymi do różnych profili. Dlatego przed zakupem D-boxa warto wiedzieć, z jakiego profilu chcemy skorzystać lub do jakiego modelu D-box będzie przeznaczony. Do modeli latających w spokojnych warunkach nadają się D-boxy z ostrzejszą krawędzią natarcia, o mniejszym jej promieniu, około 0,7 mm. Są to głównie Findahl, Makarov, Lyzura i podobne profile. D-boxy z promieniem krawędzi natarcia około 1,0 mm są uniwersalne dla większości modeli. Nadają się do profili: Stamov, Benedek, Espada, Andriukov itp. Krawędzie natarcia o promieniu 1,5 mm i większym stosowane są głównie do skrzydeł modeli na wietrzną pogodę. Obecnie można znaleźć skrzynki D-box do profilu LDA od wielu producentów. Tutaj sytuacja przy wyborze jest jeszcze bardziej skomplikowana. Zależy od tego, z jakiego profilu chcemy korzystać. Istnieją znaczne różnice pomiędzy LDA i kształtem ich przedniej części. Niektóre profile zachowują zagięcie linii środkowej, opuszczając łuk i tylko nieznacznie zwiększając wysokość profilu. Inne idą w odwrotną stronę i przy tej samej krzywiznie linii środkowej są znacznie wyższe i mniej łukowate.

Aerodynamicy powinni podejść do powyższych dywagacji z przymrużeniem oka, jest to próba krótkiego, przystępnego wyjaśnienia problemu zwykłemu modelarzowi nieznałemu dogłębnie terminologii. Konstrukcje skrzyń skrętnych z włókna węglowego pozwalają lepiej niż kiedykolwiek wykorzystać wiedzę o prawach aerodynamiki. Wiemy, że najważniejszy jest kształt krawędzi natarcia, a konstrukcja D-boxa pozwoli podążać za nią najlepiej jak to możliwe. Zwykle istnieje ściśle określony promień ze względu na sposób wykonania półproduktu (w formie pozytywowej i negatywowej). Pozwala to uzyskać pożądany kształt z wysoką precyzją. Jest rzeczą oczywistą, że żebra, które znajdują się w krawędzi natarcia mogą częściowo kształtować i deformować kształt D-boxa.

W ten sposób można kształtować niewielkie odchylenia. Przy wyborze szerokości D-boxa bardzo trudno jest zdalnie zoptymalizować wymiar. Zależy to od ciężaru tkaniny, głębokości skrzydła, rozpiętości, itp. Dlatego wszystkie podane tutaj wymiary mają charakter wyłącznie orientacyjny. Ogólnie można powiedzieć, że szerokość D-Boxa wynosi około 1/4 głębokości skrzydła. W żadnym wypadku nie należy lekceważyć rozpiętości skrzydeł. W przypadku

skrzydeł F1A, gdy na całej rozpiętości tkaniny zastosuje się gramaturę 160 g/m² możliwe są dwa warianty. Przy rozpiętości 2000–2200 mm szerokość D-Boxa wynosi 35–37 mm w środku, 27–30 mm na załamaniu ucha i 15–16 mm na końcu ucha. W przypadku zastosowania na uchu cenniejszy tkaniny (93 g/m²) szerokość D-Boxa na końcu ucha jest większa, 17–20 mm.

Przy większej rozpiętości skrzydeł (2200–2600 mm), ze względu na ich większe obciążenie siłami aerodynamicznymi, można zastosować pośrodku również szerszy D-Box, przy czym ciężar będzie wówczas wyższy. W części środkowej szerokość D-Boxa waha się między 40–42 mm, na załamaniu 28–32 mm, a na końcu ucha 14–15 mm. Jeśli na uchu zastosowano lżejszą tkaninę, rozmiar wynosi 16–18 mm. Pytanie brzmi, jak duża jest oszczędność na masie, jeśli zastosujemy cienki materiał na uchach, podczas gdy ogólne zalecenie mówi o zwiększeniu szerokości D-Boxa. Gdy chcemy zaoszczędzić na masie, warto zastanowić się, czy nie lepiej zastosować cały D-Box z tkaniny o mniejszej gramaturze przy zachowaniu gabarytów. Ale jest to pytanie przede wszystkim do konstruktorów modeli wyczynowych.

W przypadku modeli F1B stosowanie cieńszego materiału nie powoduje większych problemów. W skrzydłach modelu szybowca klasy F1H szerokość D-Boxa z tkaniny o gramaturze 160 g/m² wynosi 30 mm w środku, 27–25 mm w załamaniu i 20–18 mm na końcu ucha, co jest więcej niż wystarczające. Jeśli używane są cienkie tkaniny, można nieznacznie dostosować rozmiar, stosując większy, zalecany dla cięższych tkanin. Tkaniny o gramaturze 93 g/m², 80 g/m² lub 67 g/m² są dziś powszechnie stosowane w modelach klasy F1B. Pierwsza z wymienionych tkanin jest, moim zdaniem, niepotrzebnie przewymiarowana. Jest to wariant „ekonomiczny”, w którym poszukuje się kompromisu pomiędzy ceną, wagą i wytrzymałością. Standardowo w skrzydłach modeli F1B występują D-Boxy wykonane z tkaniny o gramaturze 80 g/m². Głębokość D-Boxów wynosi zazwyczaj 30 mm w środku, 25–27 mm w miejscu załamania i 18–20 mm (czasami mniej) na końcu ucha. Istnieje możliwość zamiany tej standardowej tkaniny na lżejszą (67 g/m²) bez regulacji głębokości D-boxa.

W przypadku modeli F1B powoduje to jedynie nieznaczne, prawie niezauważalne zmniejszenie wytrzymałości, ale za to przyczynia się do istotnego zmniejszenia masy, co jest pożądane. W przypadku modeli mniejszych kategorii – F1G, P30, a także przy statecznikach do modeli klas F1A, F1H i F1B istnieje możliwość znacznego zawężenia wymiarów D-boxa. Oszczędza się w ten sposób na masie, zachowując wystarczającą wytrzymałość konstrukcji D-Boxa, czyli sztywność, stabilność, wytrzymałość na zginanie i skręcanie. Szerokości D-Boxów w statecznikach standardowo mieszczą się w przedziale 10–15 mm dla modeli klas F1A, F1H, F1B, A3. Wszystkie te D-boxy wykonane są z najlżejszego możliwego materiału o gramaturze 67 g/m². Jeśli zachodzi potrzeba jeszcze większej oszczędności na masie, można zastosować D-Boxy wykonane z czystego Kevlaru lub hybrydowych tkanin aramidowo-węglowych o niższej gramaturze.

Generalnie polecam stosowanie karbonowych lub hybrydowych skrzyń skrętnych do budowy kesonu. Choć Kevlar jest wytrzymały i da się uzyskać odpowiednią wytrzymałość,

stosując nawet materiały o gramaturze 25 g/m², to jednak nie dają one konstrukcji takiej sztywności jak D-Boxy wykonane z tkanin węglowych lub hybrydowych.

Przy konieczności znacznego zaoszczędzenia na masie, technologia produkcji D-Boxów umożliwi także odessanie nadmiaru żywicy epoksydowej i nasycenie nią jedynie włókien węglowych. Powierzchnia D-Boxów nie jest całkowicie gładka, ale są one znacznie lżejsze. W przypadku D-Boxów wykonanych z tkaniny o gramaturze 93 g/m² różnica pomiędzy powierzchnią gładką a powierzchnią strukturalną wynosi około 5 g. W obu sytuacjach wytrzymałość jest jednakowa. Zatem wybór zależy od upodobań modelarza.

Listwy węglowe

Obecnie listwy węglowe są powszechnie stosowane do budowy dźwigarów i krawędzi spływu skrzydeł oraz stateczników modeli swobodnie latających wszystkich klas. Są one zwykle wykonane z jednokierunkowych tkanin węglowych o różnej masie, dzięki czemu osiąga się pożądany wymiar i wytrzymałość kołnierza. Zaletą krawędzi spływu wykonanych z listwy węglowej jest to, że zachowują pożądany kształt przy prawidłowej konstrukcji z żebrowaniem i nie skręcają się. Podobnie jest w przypadku dźwigarów.

W numerze 2/1996 czasopisma „Modelar” (na 22 s.) problematykę dźwigarów węglowych opisał inż. Ivan Hořejší. Krótko przybliży poruszane w artykule problemy. Aby jak najlepiej wykorzystać listwy węglowe do budowy dźwigara, zaleca się skleić go z dwóch listewek węglowych (pas górny i dolny) z wypełnieniem z balsy na całej szerokości. Wiadomo, że w połowie rozpiętości skrzydła naprężenie maleje do ok. 1/4. W związku z powyższym zalecane jest odpowiednie wymiarowanie dźwigara. Bardzo ważne jest odpowiednie połączenie listw węglowych z wypełnieniem z balsy. Dźwigar często może pęknąć na skutek nieprawidłowego klejenia listw do balsowego wypełnienia.

Dynamiczne starty modeli w kategorii F1A są znaczącym sprawdzianem struktury karbonowej, a zwłaszcza wytrzymałości dźwigara skrzydła. Stosowanie pasów węglowych na belce i krawędzi spływu jest dziś powszechne. Dlatego zaleca się używać karbonowej krawędzi spływu nawet w przypadku konstrukcji skrzydła balsowego. Wymiary pasów dźwigara i krawędzi spływu muszą być ściśle dobrane zgodnie z wymaganiami konstrukcyjnymi. Pas dźwigara skrzydła dla modelu F1A może mieć szerokość 10–15 mm w środku i 4,5–3,5 mm w przekroju załamania, natomiast jego grubość wynosi 0,8–1,3 mm. Na początku ucha szerokość pasa to 4,5–3,5 mm i ok. 2 mm na końcu. Grubość wynosi wówczas około 0,6 mm. Rozmiar krawędzi spływu może wynosić 3,5 × 0,8–0,9 mm w środku i 3,5 > 2,0 × 0,8–0,9 mm w uchu. Wytrzymałość warstwy o grubości 0,8 mm na krawędzi spływu jest wystarczająca, a dodatkowo polecane jest wymiarowanie belki w zależności od naprężeń.

Najwięcej ciężaru można zaoszczędzić na konstrukcji dźwigara skrzydła, dlatego nie ma potrzeby nadmiernego zwiększania jego przekrojów. W przypadku modeli F1H wystarczający jest pas dźwigara o wymiarach 5,5 > 3,0 × 0,9 mm dla środka

i 2,5 > 1,5 × 0,45 mm dla ucha. Wystarczająca będzie krawędź spływu o wymiarach 2,6 > 2,1 > 1,6 × 0,6 mm. W przypadku mniej obciążonych konstrukcji skrzydeł, takich jak modele F1B, przykładowy rozmiar kołnierza to 3,5 > 1,8 × 0,4 mm pośrodku i 1,8 > 0,5 × 0,4 mm w uchu. Krawędź spływu ma orientacyjnie 2,6 > 2,1 > 1,6 × 0,5 mm. Wymiary pasa dźwigara statecznika poziomego wynoszą około 1,5–2,0 mm × 0,2–0,3 mm. Krawędzie spływu mają w tym przypadku standardową grubość 1,2–1,5 mm × 0,5–0,6 mm. Zaleca się zwymiarowanie pasów dźwigara i krawędzi spływu tak, aby mogły wytrzymać naprężenia konkurencyjne. Zbyt duży rozmiar skutkuje wzrostem masy, a co za tym idzie – niepotrzebnymi kosztami finansowymi.

Rurki węglowe

Rurki węglowe można wytwarzać poprzez skręcanie jednokierunkowych tkanin węglowych lub przy pomocy tzw. pończoch węglowych o różnej gramaturze, które można rozciągać i nasycać, aby uzyskać rurkę o wymaganej średnicy. Pończochy występują w kilku rozmiarach w zależności od średnicy finalnego produktu. Jednokierunkowe rurki węglowe z tkaniny węglowej są mniej podatne na zginanie niż rurki pończochowe. Rury węglowe nadają się do budowy powierzchni nośnych szczególnie w przypadku stateczników – poziomego i pionowego. Można je również wykorzystać przy budowie skrzydeł mniejszych modeli, takich jak w klasach F1G i P30.

Konstrukcja z rurką węglową jest bardzo prosta w wykonaniu. Wystarczy zbudować żebra o pożądanym profilu i wywiercić w ich środku otwór o średnicy rurki. Następnie żebra są nawlekane na rurkę i klejone. Po sklejeniu krawędzi spływu i natarcia oraz ewentualnym opasaniu żeber otrzymujemy bardzo lekką i mocną konstrukcję.

Konstrukcje rurowe nie osiągają tak dużej wytrzymałości przy zginaniu jak konstrukcje z belek węglowych oraz D-box, dlatego można je stosować tylko na mniej obciążonych częściach. W ogólnej koncepcji rury znajdują uzasadnienie tam, gdzie potrzebujemy bardzo lekkiej konstrukcji o mniejszych wymaganiach dotyczących zginania. Wytrzymałość na zginanie można zwiększyć jedynie poprzez zwiększenie średnicy rury. Jednakże wraz ze wzrostem średnicy lub grubości ściany rośnie również ciężar. Dlatego ważne jest prawidłowe wymiarowanie rur. Jeśli się to uda, nagrodą będzie bardzo szybko wykonana konstrukcja z belki rurowej, a ponadto, jeśli wymiary zostaną odpowiednio dobrane, wytrzymałość na zginanie, skręcanie oraz ciężar części będą w pełni satysfakcjonujące dla konstruktora.

Do wytworzenia dźwigarów powierzchni ustateczniających często stosowane są materiały kompozytowe, węglowo-epoksydowe, szklano-epoksydowe, aramidowo-poliestrowe czy też folie karbonowe i duralowe. Właściwości elementów kompozytowych zależą od właściwości poszczególnych materiałów. Rury węglowe są mocne i kruche. Jeśli zostaną wzmocnione tkaniną aramidową, są nieco twardsze od karbonowych, zachowując przy tym podobną masę, ale jednocześnie są bardziej „gumowe”. Kadłuby węglowe w kombinacji węgla i folii duralowej są bardzo twarde, ale jednocześnie

niezwykle delikatne. Istotne jest to, co preferujemy, czy kadtub najlżejszy, czy coś cięższego, ale trwalszego. W przypadku modeli wyczynowych należy wybrać możliwie najlżejsze układy konstrukcyjne.

Głowice modeli klasy F1A, F1H oraz wieżyczki modeli F1B

Te elementy wykonywane są z kompozytu karbonowo-epoksydowego, czasem także w połączeniu z kevlarem lub tkaniną szklaną. Jeśli głowice tych modeli są karbonowe, to jest to bardzo wydajna konstrukcja. Jeśli jest to połączenie tkaniny aramidowej i węglowej, produkt jest nieco bardziej podatny na skręcanie, ale z drugiej strony jest znacznie twardszy, co w tym przypadku jest bardzo korzystne. W tym kontekście zwracam uwagę na problem, który się pojawia.

Niektóre głowice można kupić z powłoką węglową wykończoną od wewnątrz, która na zewnątrz jest pokryta warstwą farby. Zdarza się, że podstawowym materiałem konstrukcyjnym jest wówczas włókno szklane. To znacznie osłabia produkt, ponieważ kompozyt szklany jest bardzo kruchy i ma znacznie mniejszą wytrzymałość przy tej samej wadze w porównaniu z kompozytem węglowym lub węglowo-aramidowym. Dlatego, decydując się na zakup, nie należy sugerować się wrażeniem estetycznym, pięknym wykończeniem. Nie ma pewności, co kryje się pod warstwą farby i pomiędzy widoczną stroną wewnętrzną. Korzystniej jest zastosować nieco droższą głowicę, ale z obróbką powierzchni węgla, wówczas jest pewność, że konstrukcja głowicy powstała co najmniej z dwóch warstw węgla.

Głowica powinna posiadać duże okienko do umieszczenia haka dynamicznego i wyłącznika czasowego. Podobnie wieżyczka w modelach klasy F1B (pokazana na rycinie 4) powinna być wystarczająco przestronna, aby pomieścić osprzęt i elektronikę. Nawet w tak niewielkim elemencie jak wieżyczka czy głowica można zaoszczędzić na wadze.



Ryc. 4. Wieżyczka modelu klasy F1B

Klejenie materiałów kompozytowych

Zasadniczo do łączenia materiałów kompozytowych stosuje się kleje epoksydowe lub cyjanoakrylanowe. Do klejenia niektórych części zaleca się użycie żywicy epoksydowej, a dla

innych wręcz przeciwnie, drugiego kleju. Z doświadczenia wiadomo, że korzystne jest klejenie żywicą epoksydową wszystkich części z wyjątkiem żeber i taśm. Można korygować wzajemne położenie klejonych elementów dzięki temu, że czas utwardzania jest dłuższy niż czas utwardzania spoiny cyjanoakrylanowej.

Przed sklejeniem elementów kompozytowych wszystkie półfabrykaty należy każdorazowo lekko przeszlifować i odtłuścić. Najlepiej odtłuścić je nadchlorem, jednak w sytuacji awaryjnej wystarczy alkohol lub rozcieńczalnik nitro. Dźwigary węglowe nadają się do ponownego przeszlifowania, podobnie jak wnętrze D-boxa. Podczas produkcji pozostałości separatora pozostają na półproduktach, niezależnie od tego, że żywica laminująca podczas utwardzania tworzy na powierzchni warstwę, na której żaden klej nie trzyma się dobrze. Żywica wykorzystywana do laminowania nie nadaje się zbyt do klejenia części kompozytowych. Polecam do tego średnio gęsty klej cyjanoakrylanowy.

Budowa skrzydeł kompozytowych na bazie D-box

Przed montażem skrzydła należy przygotować powierzchnie robocze wgłębione, zgodnie z kształtem dolnej powierzchni profilu. W przypadku niewielkiej serii kilku skrzydeł wystarczy wyciąć szablon ze styropianu za pomocą drutu elektrooporowego. Konieczne jest wcześniejsze pozytywowe lub negatywowe dopasowanie szablonów. Szkieletu nie można skręcać po sklejeniu. Można jedynie dokonać niewielkiej korekty żelazkiem wysokotemperaturowym. Wszystkie złącza muszą zostać dokładnie przeszlifowane i odtłuszczone.

Pierwszą rzeczą, którą należy wykonać są żebra skrzydła. Umieszcza się je w skrzynce skrętnej w odległości 10–15 mm, a jako materiału wystarczy użyć balsy grubości 1,5 mm. Z balsy o większej grubości wykonane są jedynie żebra: u nasady i w załamaniu. W przypadku modelu F1A żebro nasady ma szerokość 20 mm, a w załamaniu 7 mm. Rozstaw żeber może wynosić 15–30 mm. W przypadku modelu klasy F1B wystarczające jest żebro nasady o średnicy 10 mm i żebro załamania 5 mm.

Dźwigary skrzydeł

Wysokość belki dźwigara wynika z szablonu profilu. Rycina 5 przedstawia gotowe dźwigary skrzydła przed montażem. Zmierzoną wartość zmniejszamy dwukrotnie o grubość ściany D-boxa i grubość nici kevlarowej. Jednocześnie odejmujemy dwukrotnie grubość pasa dźwigara i otrzymujemy wysokość wypełnienia z balsy. Dokładność wysokości belki będzie zależała od precyzji cięcia i szlifowania. Po sklejeniu nie ma już możliwości korekty wysokości dźwigara.

Wypełnienie belki dźwigara należy wykonać z balsy na całej szerokości pasów. Podczas montażu konstrukcji możemy spekulować, czy lepiej wykonać środnik ze słojami prostopadłymi do pasów węglowych, czy też poziomymi. To indywidualna decyzja każdego modelarza. Ze względu na fakt, że obecnie stosuje się różne tworzywa sztuczne

jako wypełnienia, wybór orientacji słoików drewna jest raczej nawiązywaniem do tradycji z dawnych czasów, gdy balsa była podstawowym materiałem konstruktorskim. Klejenie pasów odbywa się za pomocą żywicy epoksydowej poprzez pokrycie listwy balsy, a następnie przymocowanie pasów węglowych.



Ryc. 5. Dźwigary skrzydeł modelu F1B

Ważne jest, aby pasy dźwigara przylegały do wypełnienia i aby nie występowały przekroje o kształcie trapezowym. Jeśli nie uda się za pierwszym razem, nieprawidłowy dźwigar można zdemontować: wyciąć balsowe wypełnienie, delikatnie przeszlifować pas węglowy i powtórzyć klejenie z użyciem nowego wypełnienia balsowego. Po sklejeniu należy usunąć nadmiar kleju i wypełnienia balsowego po bokach dźwigara. W miejscu, w którym znajdować się będzie złącze skrzydła należy całkowicie usunąć wypełniacz balsowy. Tuleje sprzęgu skrzydeł wkleja się w dźwigar tak, aby uzyskać żądaną sztywność bez konieczności zaginania łącznika. Następnie wypełnia się całą przestrzeń żywicą epoksydową z mikrobalonem lub innym wypełniaczem. Zdecydowanie zaleca się stopniowe zmniejszenie przekroju dźwigara poprzez odcięcie wypełniacza balsowego pod pewnym kątem, co równomiernie rozłoży naпруżenia na pasach dźwigara.

Z jednej lub obu stron dźwigara do balsy przyklejamy boki – węgiel (0,1–0,2 mm) na całej wysokości. Następnie owijamy całą belkę nićmi kevlarowymi, nawlekamy obok nitki w miejscu łączenia skrzydeł i płynnie rozszerzamy belkę do szerokości ok. 5 mm do punktu załamania. Drugą opcją jest „zamknięcie” całego nosa karbonową pończochą. Eliminuje to konieczność klejenia boków.

Klejem cyjanoakrylanowym przykleja się do wykonanego dźwigara przednie półżebra. Następnie należy dokładnie ustalić położenie D-boxa, aby po sklejeniu nie były potrzebne żadne korekty (ryc. 6). Belkę dźwigara wraz z półżebrowymi smaruje się klejem epoksydowym, całość wkłada się do D-boxa i mocuje do wcześniej przygotowanego szablonu za pomocą taśmy klejącej. To ważny moment operacji montażu skrzydeł. Wszelkie błędy powstałe na tym etapie po wyschnięciu są nie do usunięcia bez zniszczenia D-boxa. Po wyschnięciu (ryc. 7) pomiędzy dźwigarem i krawędzią spływu klejone są tylne półżebra. Dopasowywać należy od góry i od dołu. Paski węglowe zachodzą na D-box ok. 5–7 mm, na żebrze nasady skrzydła F1A powinny zachodzić 15 mm oraz 10 mm dla modeli F1B, F1H. Paski węglowe zachodzą na całej szerokości krawędzi spływu.

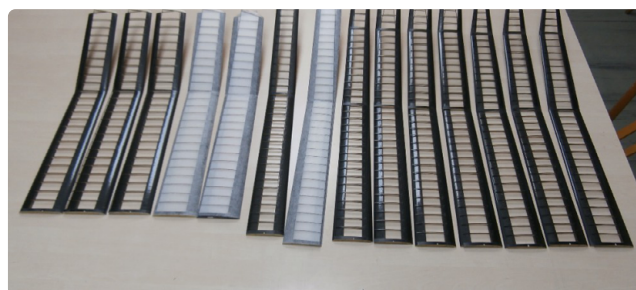


Ryc. 6. D-boxy przygotowane do klejenia



Ryc. 7. D-boxy po sklejeniu

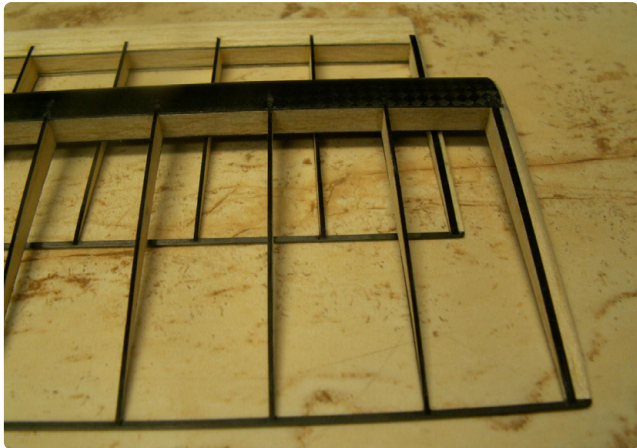
Po usunięciu nadmiaru kawałków taśmy sprawdza się, czy skrzydła nie wypaczyły się w trakcie schnięcia kleju. W przypadku stwierdzenia nieprawidłowego montażu ostatnia szansa poprawy polega na poluzowaniu pasków na D-boxie i żebrach i ustawieniu pożądanego zniekształcenia. Jeśli korekta się uda, należy delikatnie przeszlifować końce pasków na krawędzi spływu i na D-boxie, aby po przyklejeniu nowych pasków nie było zbyt dużego „uskoku”. Po przeszlifowaniu w dźwigar można wkleić złącze skrzydeł z włókna szklanego, a po sklejeniu połączenie można ponownie laminować od góry i od dołu kawałkiem tkaniny węglowej. Przed ponownym laminowaniem złącza należy lekko przeszlifować i odtłuścić D-box. Na koniec należy wykonać dodatkowe pokrycie żebra przykadłubowego z tkaniny węglowej lub szklanej. Rycina 8 przedstawia gotowe szkielety skrzydeł modelu klasy F1B.



Ryc. 8. Sklejone szkielety skrzydeł F1B przed pokryciem

Fotografia (ryc. 9) przedstawia szczegół konstrukcji szkieletu skrzydła.

Pokrycie skrzydeł możemy wykonać z włókniny poliestrowej, folii, Icarexu i wielu innych materiałów. Przykładem jest folia Mylar, pokazana na rycinie 10. Sama konstrukcja



**Ryc. 9. Szczegół zakończenia ucha skrzydła modelu klasy F1B.
Widoczne paski węglowe na grzbietach żeber**

jest już bardzo sztywna i niepodatna na skręcanie i zginanie, w związku z czym nie ma potrzeby wzmacniania jej przez oklejanie papierem, a następnie cellonowanie, jak miało to miejsce w przypadku konstrukcji drewnianych.

Podobną technologię stosuje się w wykonawstwie stateczników poziomych (ryc. 11) i pionowych, z zaznaczeniem różnic, o których mowa powyżej (np. rurki węglowe w miejsce dźwigarów skrzynkowych w konstrukcji statecznika pionowego).

Kompozyty karbonowe są również chętnie stosowane w technologii wykonania łopat śmigieł modeli z napędem gumowym, jak pokazano na rycinie 12.



Ryc. 10. Materiał pokryciowy Mylar



Ryc. 11. Szkielet statecznika poziomego modelu klasy F1B



**Ryc. 12. Łopaty śmigieł modelu z napędem gumowym klasy F1B,
wykonane z kompozytu karbonowo-epoksydowego**