



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav letadlové techniky

Návrh Low-Cost letúna kategórie UL

Design of Low-Cost UL Aircraft

DIPLOMOVÁ PRÁCA

2020

Bc. Samuel ONDRUŠKA

Študijný program: N3958 LETECTVÍ A KOSMONAUTIKA
Študijný odbor: 3906T008 Letadlová a kosmická technika
Vedúci práce: Ing. Jaromír Kučera

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ondruška** Jméno: **Samuel** Osobní číslo: **437120**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Letectví a kosmonautika**
Studijní obor: **Letadlová a kosmická technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh Low-Cost letounu kategorie UL

Název diplomové práce anglicky:

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

1. Konstrukční návrh křídla
2. Výpočet zatížení křídla a dimenzování základních nosných prvků
3. Předběžný návrh řízení mechanizace křídla
4. Technologický návrh výroby hlavních nosných prvků křídla
5. Návrh sestavení křídla (postup, přípravky)
6. Předběžnou kalkulaci nákladů

Seznam doporučené literatury:

Podklady a doporučená literatura dle doporučení vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

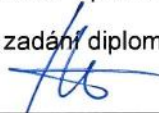
Ing. Jaromír Kučera, ústav letadlové techniky FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

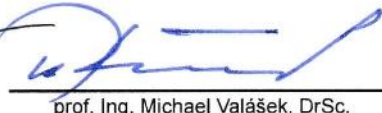
Datum zadání diplomové práce: **24.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **07.08.2020**

Platnost zadání diplomové práce:


Ing. Jaromír Kučera
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Robert Theiner, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

29. 04. 2020
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prehlasujem, že som túto prácu vypracoval samostatne a to výhradne s použitím prameňov a literatúry uvedených v zozname citovaných zdrojov.

Nemám závažný dôvod proti použitiu tohto školského diela v zmysle zákona §60 Zákona č.121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon).

V Prahe dňa:

.....
Samuel Ondruška

PodĎakovanie

Na tomto mieste by som sa rád poĎakoval vĎetkým, ktorí prispeli svojimi radami k vypracovaniu tejto diplomovej práce. PredovĎetkým chcem poĎakovať vedúcemu práce Ing. Jaromírovi Kučerovi za poskytnutie cenných rád a pozitívny prístup. Okrem toho patrí vĎaka mojim blízkym za neúnavnú podporu počas celého štúdia na vysokej škole.

Názov práce: Návrh Low-Cost letounu kategórie UL

Autor: Samuel Ondruška

Katedra: Ústav letadlové techniky

Vedúci diplomovej práce: Ing. Jaromír Kučera, Ústav letadlové techniky

Abstrakt: Úlohou tejto diplomovej práce je naviazať na predchádzajúci koncepčný návrh jednomiestneho letúna spĺňajúceho požiadavky predpisu UL-2 a podrobnejšie popísať technologický postup výroby low-cost krídla. Súčasťou práce je základné dimenzovanie nosných prvkov konštrukcie krídla, konštrukčný návrh jednotlivých nosných prvkov, návrh ich výroby a návrh prípravkov potrebných k výrobe takejto konštrukcie. Pri výrobe by mali byť v čo najvyššej miere zastúpené kompozitné materiály, lacné drevené polotovary a bežne dostupné stroje a nástroje. Diplomová práca obsahuje aj kalkuláciu nákladov na stavbu a odhad výslednej hmotnosti.

Kľúčové slová: Návrh letúna, UL-2, Skelný laminát, Low-cost, Krakorec, Prípravok, Kompozit, Technológia

Title: Design of Low-Cost UL airplane

Author: Samuel Ondruška

Department: Department of Aerospace Engineering

Supervisor: Ing. Jaromír Kučera, Department of Aerospace Engineering

Abstract: The role of this diploma thesis is to build on the previous conceptual design of a small one-seater aircraft, that refers to specification UL-2 and to describe low-cost production technology in more detail. Part of the diploma thesis is basic dimensioning, design and description of production technology of primary construction's elements and design of assembly jigs used in production of this construction. Composite materials, plywood or laminated wooden boards and commonly available machines and tools should be mainly used in production. The diploma thesis also contains calculation of construction cost and weight estimation.

Keywords: Aircraft design, UL-2, Glass-fibre laminate, Low-cost, Bayonet, Assembly jig, Composite, Technology

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Rozbor konštrukčných riešení krídla.....	2
2.1	Hlavný nosník	3
2.2	Pomocný nosník	3
2.3	Poťah	3
2.4	Zavesenie krídel	3
2.4.1	Krídlo s troma závesmi	4
2.4.2	Krídlo so vzperou	4
2.4.3	Predĺženie nosníkov	4
3	Zaťaženie krídla	5
3.1	Zaťaženie krídla v bode D.....	5
3.2	Zaťaženie krídla v bode E	6
3.3	Priebeh zaťaženia krídla pre rozhodujúce prípady	7
4	Pevnostná kontrola	9
4.1	Súčiniteľ bezpečnosti	9
4.2	Voľba materiálu a výrobnéj technológie	10
4.2.1	Laminát s jednosmerne orientovanou výstužou	11
4.2.2	Laminát s vláknami pod uhlom $\pm 45^\circ$	12
4.2.3	Laminát s vláknami pod uhlom $\pm 45^\circ$ vákuovo lisovaný	13
4.3	Pásnice.....	13
4.4	Stojiny	16
4.5	Poťah	17
4.6	Krídello.....	22
4.7	Krakorec	22
4.8	Koreňové rebro.....	23
5	Riadenie.....	25
5.1	Zaťaženie krídeliek	25

5.2	Návrh trasy riadenia krídeliek	28
5.2.1	Tiahla.....	28
5.2.2	Vidlice a oká.....	30
5.2.3	Páky.....	30
6	Technologický návrh.....	31
6.1	Nosník	32
6.1.1	Výroba formy	32
6.1.2	Jadro krakorca	33
6.1.3	Nosník	34
6.2	Pomocný nosník	37
6.3	Rebrá	38
6.4	Koreňové rebro.....	39
6.5	Riadenie.....	40
6.5.1	Uloženie pák.....	40
6.5.2	Tiahla.....	43
6.5.3	Páky a pánty	45
6.6	Poťahy	47
7	Zostavovanie	48
7.1	Ustavovanie.....	48
7.2	Lepenie.....	49
7.3	Nábežná hrana	50
7.4	Odtoková hrana	51
7.5	Krídello.....	52
7.5.1	Zostavenie primárnej konštrukcie	52
7.6	Krídlo	54
7.6.1	Zadná torzná komora.....	54
7.6.2	Montáž riadenia.....	57
7.6.3	Montáž nábežnej a odtokovej časti krídla	58

7.6.4	Poťah.....	59
7.6.5	Predbežná kontrola hmotnosti.....	62
8	Rozpočet.....	63
9	Záver	65
10	Zdroje	68

1 Úvod

Medzi rekreačnými pilotmi je od počiatkov lietania veľký dopyt po jednoduchých a lacných letúnoch. Nízka cena však býva častokrát vykúpená až príliš jednoduchými konštrukciami v podobe motorizovaných rogál. Výroba koncepčne klasického letúna s pevnými krídlami a chvostovými plochami nikdy nebola jednoduchá a vyžadovala veľmi dobrú vybavenosť dielne, dostupnosť vhodných materiálov, ako letecké preglejky či plechy z hliníkových zliatin. Takéto riešenia neboli dostupné pre širokú verejnosť amatérskych pilotov, pretože bez dobrej znalosti technológie a množstva prípravkov nebolo možné takéto letún skonštruovať. Okrem toho sú tieto klasické materiály väčšinou nedostupné.

Nástupom kompozitných materiálov sa situácia výrazne nezlepšila, jednak z dôvodu vysokej ceny a jednak z dôvodu potreby výroby formy. Ich použitie bolo väčšinou obmedzené len na drahšie konštrukcie. Postupom času sa tieto materiály stávali stále viac dostupnými v mnohých špecifikáciách a predovšetkým sklenené kompozity s epoxidovou maticou sa stali atraktívne aj pre domáce využitie v mnohých aplikáciách. Táto skutočnosť dala vznik myšlienke o postavení low-cost letúna vyrobeného z kompozitu s použitím technológií podobných práci s plechmi. Týmto spôsobom by bolo možné úplne alebo do veľkej miery vynechať potrebu foriem, respektíve ich zjednodušiť natoľko, aby boli vyrobiteľné z rovných lamino dosiek.

Daný letún má byť vyrobiteľný v bežnej dielni alebo garáži za použitia bežne dostupných strojov a nástrojov. V súčasnosti sa cena skleneného plátna alebo kepru pohybuje od 40 Kč/m² a sklenej jednosmernej tkaniny od 200 Kč/m² v závislosti od plošnej hmotnosti. Spomínané materiály pochádzajú z certifikovanej výroby a ich mechanické vlastnosti sú známe.

Je isté, že v prípade sústavy riadenia sa budú musieť využiť aj kovové materiály. To znamená, že sa nedá vyhnúť zvaraniu oceľových plechov, no ide len o malú časť prvkov z vyrábanej konštrukcie.

Cieľom tejto diplomovej práce je definovanie konečného konštrukčného návrhu krídla, ktorý vychádza z už existujúceho koncepčného a aerodynamického návrhu. Na základe získaných dimenzií nosných častí krídla ďalej navrhnuť použitie konkrétnych materiálov a technologický návrh výroby danej konštrukcie. Následne navrhnuť prípravky potrebné pri zostavovaní konštrukcie a montáže potáhu. Overí sa, či sú predpoklady na výrobnú a hmotnosť dosiahnuteľné a či je koncepčný návrh pre takúto technológiu vhodný.

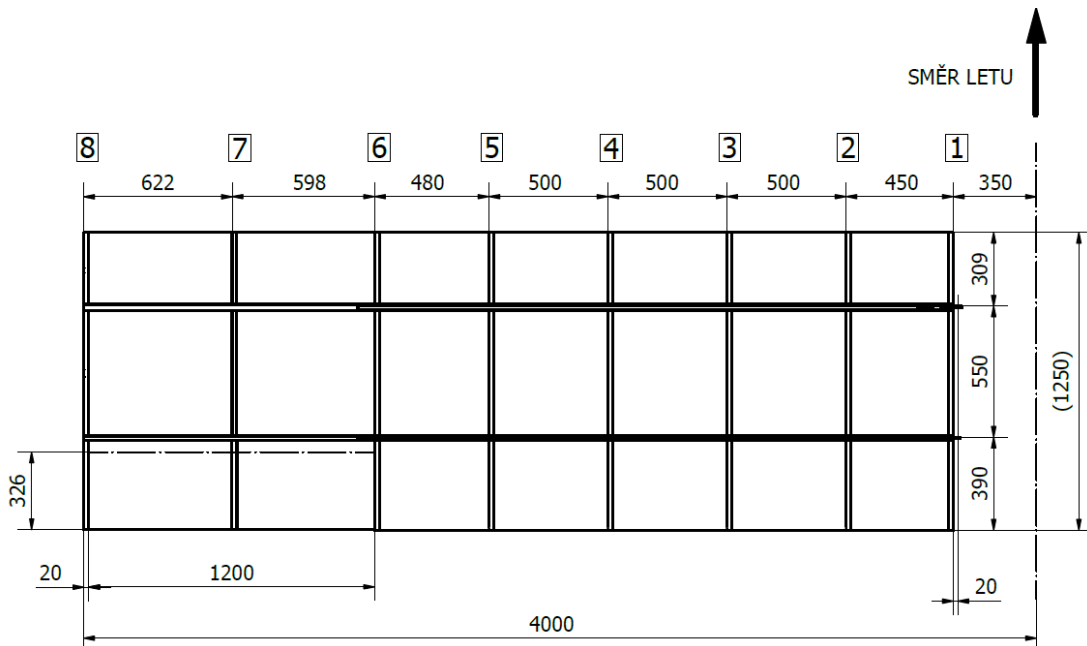
2 Rozbor konštrukčných riešení krídla

Základné technické údaje

Rozpätie	8 m
Plocha krídla	10 m ²
Dĺžka	5 250 mm
MTOW	300 kg
Minimálna rýchlosť v_S	65 km/h
Maximálna rýchlosť v_H	168 km/h

Z koncepcného návrhu letúna vyplýva, že bolo zvolené obdĺžnikové, delené krídlo s jedným hlavným, jedným pomocným nosníkom a ôsmimi rebrami, vrátane koreňového. V prípade zvolenej výrobnéj technológie nebolo možné uvažovať o aerodynamicky výhodnejšom lichobežníkovom krídle so zúžením, kde by navyše mohla hroziť potreba jeho krútenia. Delenie krídla sa môže na prvý pohľad zdať ako konštrukčná komplikácia, avšak vzhľadom na rozmery štandardnej dielne či garáže by sa do týchto priestorov nedelené krídlo jednoducho nezmestilo. Rozdelenie krídla prináša aj zjednodušenie manipulácie, skladovania a prípadných servisných úkonov. Prevzatý návrh bude ďalej rešpektovaný s výnimkou navrhnutého spojenia krídlo-trup.

Konštrukčný návrh krídla vychádza z predbežného návrhu predchádzajúcej diplomovej práce [1], kde bol kladený dôraz predovšetkým na technologickú jednoduchosť a použitie overených postupov ako pri aerodynamických, tak aj pri pevnostných výpočtoch. Predpokladá sa využitie dvoch torzných dutín, čomu bude prispôbený ďalší návrh.



Obr. 1.: Systémový výkres krídla [1]

2.1 Hlavný nosník

Stojina hlavného nosníka sa podieľa na prenose posúvajúcej sily a spolu s poťahom na prenose krútiaceho momentu. Musí byť dostatočne tuhá a schopná prenášať šmykové napätie. V tomto prípade je vhodné použiť tkaninu orientovanú pod uhlom $\pm 45^\circ$, prípadne použiť sendvičové jadro, ktorým získame vyššiu tuhosť konštrukcie.

2.2 Pomocný nosník

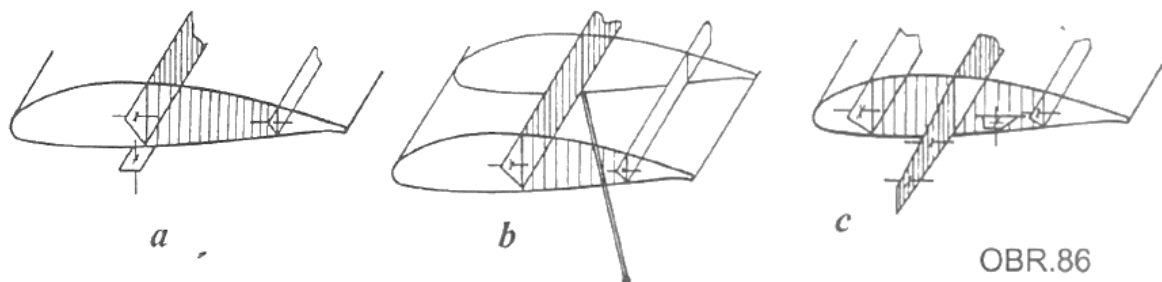
Nakoľko celkové zaťaženie krídla prenáša hlavný nosník, pomocný nosník bude nielen predovšetkým závesy krídeliek a bude sa podieľať na prenose šmykového toku ako súčasť torznej dutiny. Z dôvodu prenosu minimálnych ohybových momentov a posúvajúcich síl, je možné v prvom návrhu použiť na výrobu celého pomocného nosníka jedinou tkaninu (plátno). Spolu s hlavným nosníkom a poťahmi tvorí torznú dutinu krídla, ktorá prenáša krútiaci moment.

2.3 Poťah

Zabezpečuje prenos krútiaceho momentu, tvorí vonkajší geometrický obrys a zabezpečuje prenos vztlakovej sily. Okrem prenosu šmykovej sily nesmie prepúšťať plyny (vzduch) a vlhkosť dovnútra konštrukcie. Preto je nutné hlavne v prípade poťahov zložených z tkaniny myslieť na ich nepriepustnú úpravu.

2.4 Zavesenie krídel

Ako pri všetkých častiach navrhovaného lietadla aj tu je nutné brať do úvahy nízku výrobnú cenu a technologickú nenáročnosť. Tento konštrukčný uzol má za úlohu prenášať ohybový moment, krútiaci moment a posúvajúcu silu od aerodynamických síl. Vzhľadom na tieto požiadavky sa ako ideálna možnosť zdá krídlo priebežné. Zároveň by mala výroba prebehnúť v štandardnej domácej dielni, ktorá má málokedy dostatočné rozmery, v tomto prípade viac ako 8 metrov. Z tohto dôvodu bolo zvolené delené krídlo, ktorým sa získa aj výhoda jednoduchšieho skladovania, prepravy a prípadných opráv. Najpoužívanejšie riešenia zavesenia krídel sú na Obr. 2. [2]



Obr. 2.: a) Krídlo s tromi závesmi b) Krídlo so vzperou c) Predĺženie nosníka – krakorec [2]

2.4.1 Krídlo s tromi závesmi

Jedno z najbežnejších zavesení krídla je schematicky zobrazené na Obr. 2 a). Dvojica závesov na hlavnom a pomocnom nosníku s čapom orientovaným rovnobežne s osou trupu prenáša krútiaci moment. Čapy hlavného nosníka prenášajú ohybový moment a posúvajúce sily. Horný čap hlavného nosníka orientovaný rovnobežne s osou trupu prenáša posúvajúcu silu T_Y . Spodný čap, orientovaný zvislo, prenáša posúvajúcu silu T_X . Vzhľadom na veľmi malú vzdialenosť čapov hlavného nosníka by bolo nutné použiť vysokopevné materiály a tomu prispôsobiť aj dimenzovanie uchytení v krídle a trupe. Zároveň si toto riešenie vyžaduje aj vysokú presnosť. Pre zadané podmienky nie je vhodné.

2.4.2 Krídlo so vzperou

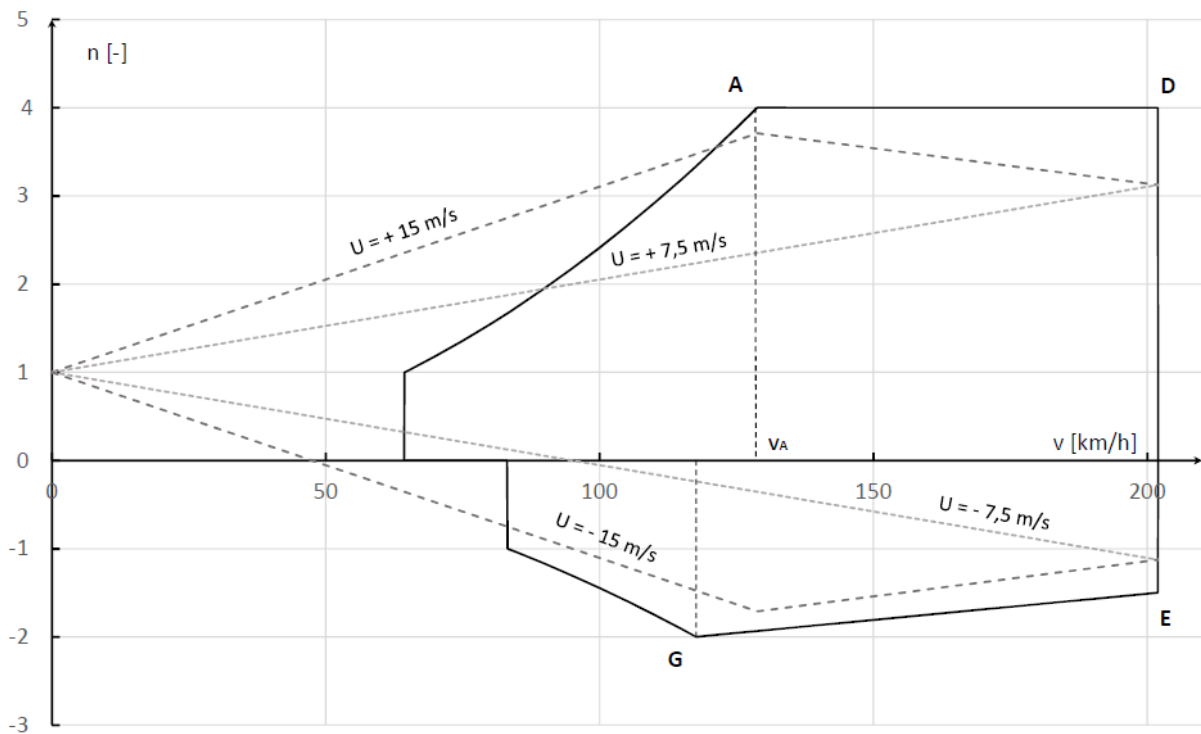
Prirodzene, takáto konštrukcia na Obr. 2 b) má opodstatnenie hlavne pri hornoplošníku, ponúka však množstvo výhod. Hlavnou výhodou je možnosť použitia duralovej trubky ako hlavného nosníka, čo by výrazne zjednodušilo výrobu a riešenie prenosu krútiaceho momentu. Takéto konštrukčné riešenie pôsobí pri použití na low-cost letún ako najvhodnejšie. Okrem nespornej výhody v rozložení zaťaženia ako do závesov krídla v trupe, tak aj do vzpery, táto konštrukcia ponúka možnosť sklápania krídel, čo do veľkej miery uľahčuje prípadný prevoz a skladovanie. Prenášanie zaťaženia z krídla do viacerých miest v trupe prináša výhodu v použití menej pevných, teda v mnohých prípadoch lacnejších materiálov. Napriek nesúladu s prvotným návrhom je vhodné túto možnosť uviesť.

2.4.3 Predĺženie nosníkov

Ako najvhodnejšia možnosť spojenia krídel bolo vybrané prepojenie krídel pomocou krakorcov – predĺženie nosníkov na Obr. 2 c). V tomto prípade budú ohybový moment a posúvajúca sila prenášané medzi čapmi krakorcov a krútiaci moment dvojicou čapov v koreňovom rebre. Ešte výhodnejšie riešenie je použitie krakorcov, ktoré prechádzajú celým trupom, spojené sú len v strede jedným čapom a následne guľovým čapom pravého krídla do ľavého koreňového rebra a naopak. Avšak takýmto robustným guľovým uložením by sa konštrukcia značne skomplikovala a už menšie rameno pri neúplných krakorcovoch rieši problém s prenosom ohybového momentu.

3 Zat'azenie krídla

Pre pevnostné výpočty krídla boli vybrané dva rozhodujúce prípady podľa výslednej letovej obálky. Prvým prípadom je bod D, v ktorom sa dosahuje jednoznačne najvyššia hodnota ohybového momentu krídla, je teda dôležitý pri návrhu pásnic. Druhým je bod E, v ktorom na krídle vzniká najvyšší krútiaci moment.



Obr. 3.: Obálka letových násobkov pri MTOW [1]

3.1 Zat'azenie krídla v bode D

Vztlaková sila

$$L_{KR} = \frac{n \cdot G - \frac{1}{L_{VOP} - \Delta x} \cdot M_{z0KR}}{1 + \frac{\Delta x}{L_{VOP} \cdot \Delta x}} \quad (3-1)$$

$$\begin{aligned}
 L_{KR} &= \frac{4 \cdot 300 \cdot 9,81 \cdot \frac{1}{3,125 - 0,02625} \cdot (-2410,54)}{1 + \frac{0,02625}{3,125 \cdot 0,02625}} \\
 &= 12565,03 \text{ N}
 \end{aligned} \quad (3-2)$$

Merné sily

$$c_{LK\check{R}} = \frac{Y_{K\check{R}c}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_c^2 \cdot S} = \frac{12565,03}{\frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot \left(\frac{202}{3,6}\right)^2 \cdot 10} = 0,6516 \quad (3-3)$$

$$q_0 = \frac{n_c \cdot G_{K\check{R}}}{\frac{l}{2} \cdot \left(1 + \frac{b_k}{b_0}\right)} \quad (3-4)$$

$$q_0 = \frac{4 \cdot 50,94 \cdot 9,81}{\frac{8,65}{2} \cdot \left(1 + \frac{1,25}{1,25}\right)} = 249,86 \text{ N/m} \quad (3-5)$$

3.2 Zat'azenie krídla v bode E

Vztlaková sila

$$Y_{KR} = \frac{n \cdot G - \frac{1}{L_{VOP} - \Delta x} \cdot M_{z0KR}}{1 + \frac{\Delta x}{L_{VOP} \cdot \Delta x}} \quad (3-6)$$

$$Y_{KR} = \frac{-1,5 \cdot 300 \cdot 9,81 \cdot \frac{1}{3,125 - 0,02625} \cdot (-2410,54)}{1 + \frac{0,02625}{3,125 \cdot 0,02625}} = -3461,13 \text{ N} \quad (3-7)$$

Merné sily

$$c_{yK\check{R}} = \frac{Y_{K\check{R}c}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_c^2 \cdot S} = \frac{-3461,13}{\frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot \left(\frac{202}{3,6}\right)^2 \cdot 10} = -0,1795 \quad (3-8)$$

$$q_0 = \frac{n_c \cdot G_{K\check{R}}}{\frac{l}{2} \cdot \left(1 + \frac{b_k}{b_0}\right)} \quad (3-9)$$

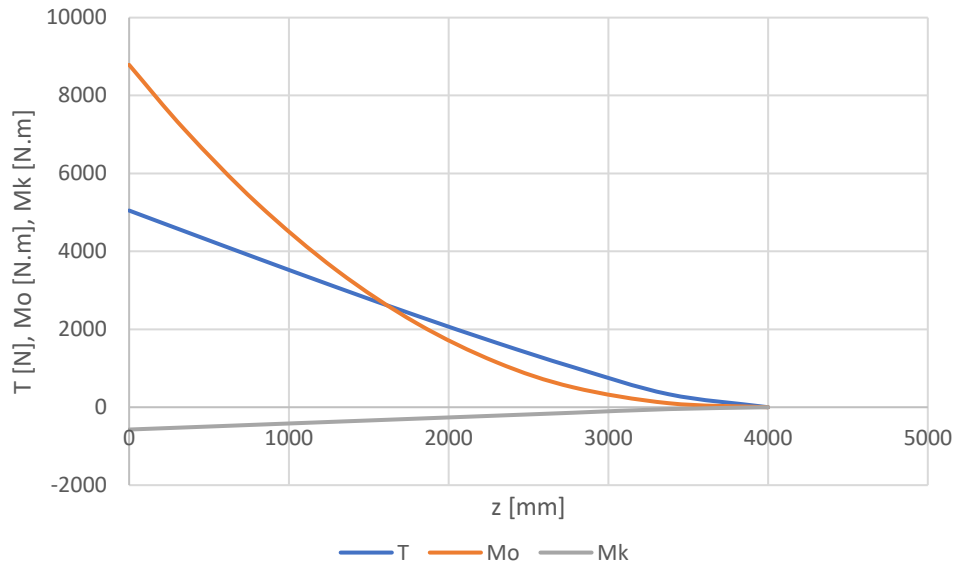
$$q_0 = \frac{-1,5 \cdot 50,94 \cdot 9,81}{\frac{8,65}{2} \cdot \left(1 + \frac{1,25}{1,25}\right)} = -93,7 \text{ N/m}$$

3.3 Priebeh zaťaženia krídla pre rozhodujúce prípady

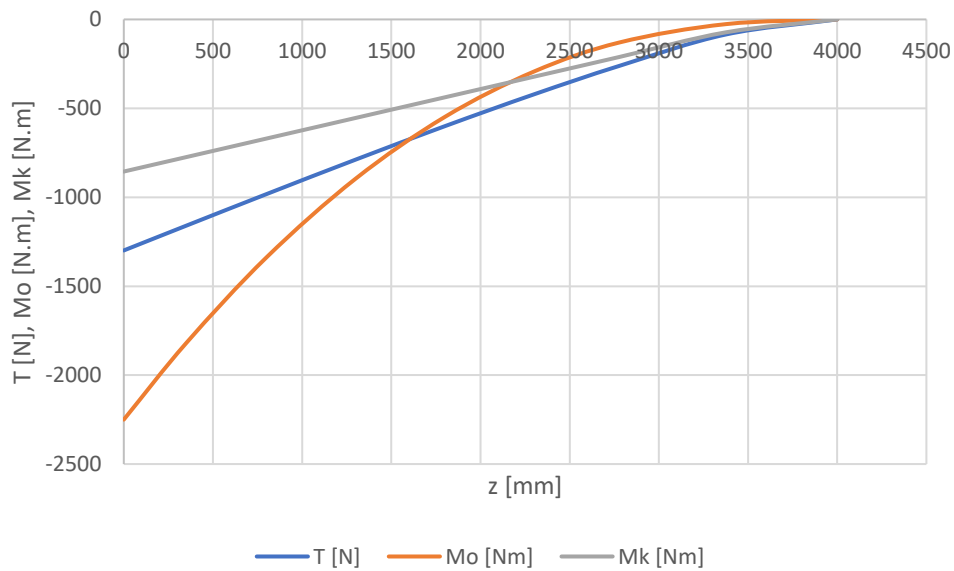
$$T_C = \int_0^l q_y dz$$

$$M_{oC} = \int_0^l T_C dz$$

$$M_{kC} = \int_0^l q_{kC} dz$$



Obr. 4.: Graf priebehu T, Mo a Mk po polorozpätí krídla v bode D



Obr. 5.: Graf priebehu T, Mo a Mk po polorozpätí krídla v bode E

Tab. 1.: Graf priebehu T, Mo a Mk po polorozpätí krídla v bode D a E

Rebro	z [mm]	D			E		
		T [N]	Mo [Nm]	Mk [Nm]	T [N]	Mo [Nm]	Mk [Nm]
1-2	350	5048,330	-1298,850	8786,944	-2249,994	-572,544	-855,171
2-3	800	4511,630	-1159,717	7113,951	-1819,744	-518,223	-774,036
3-4	1300	3826,132	-982,084	5237,955	-1337,839	-448,382	-669,718
4-5	1800	3077,079	-788,187	3512,152	-895,271	-370,780	-553,810
5-6	2300	2349,716	-600,265	2155,453	-548,158	-293,179	-437,902
6-7	2780	1654,240	-421,126	1154,464	-292,811	-215,577	-321,993
7-8	3378	1028,342	-260,657	510,645	-129,183	-141,080	-210,721

4 Pevnostná kontrola

Pred samotným návrhom tvaru nosníka je vhodné aspoň rámcovo poznať potrebný počet vrstiev tkaniny na dosiahnutie požadovanej hrúbky laminátu. Tento odhad je závislý na type tkaniny a jeho plošnej hmotnosti. Rámcové hodnoty sú uvedené v Tab. 2. [3]

Tab. 2.: Rámcové hodnoty hrúbky tkaniny v závislosti na type a plošnej hmotnosti [3]

Plošná hmotnosť tkaniny [g/m ²]	Typ tkaniny	Počet vrstiev [-]	Hrúbka [mm]
48	Plátno	1	0,04
86	Plátno	1	0,06
162	Plátno	1	0,12
230	Plátno	1	0,17
220	Jednosmerná	1	0,25

V počiatočoch návrhu je vhodné zadefinovať, aký hmotnostný pomer matrice a výstuže dokážeme pri zvolenej technológii dosiahnuť. Predpokladá sa použitie najjednoduchších metód výroby kompozitného materiálu s minimálnou potrebou vákuového lisovania. Avšak v prípade výroby hlavného nosníka je potrebné použiť túto technológiu, aby sa predišlo vadám v objeme materiálu. Vákuové lisovanie môže byť nákladnou technológiou, no v prípade recyklácie odsávacieho materiálu a hlavne vákuovacej fólie sa dajú tieto náklady znížiť na prijateľnú úroveň.

4.1 Súčiniteľ bezpečnosti

Vypočítané hodnoty prevádzkového zaťaženia pre vybraté prípady je nutné upraviť na výpočtové zaťaženie, teda ho prenásobiť výsledným súčiniteľom bezpečnosti f_U .

Hodnota súčiniteľa bezpečnosti f je štandardne 1,5, ak nie je uvedené inak. V prípade kompozitných konštrukcií sa výsledný súčiniteľ bezpečnosti f_U uvádza v rozmedzí 1,5 až 2,25, teda je použitý zvyšujúci súčiniteľ bezpečnosti v rozmedzí 1 až 1,5.

Zvyšujúci súčiniteľ bezpečnosti závisí od:

- súčasti a dielu, na ktorý bude vzťahovaný
- presnosti výpočtov a ich spoľahlivosti
- predložených skúšok vzoriek kompozitného materiálu a ich výsledkov
- overení výroby, kontrolných postupov a skúseností výrobcu

Vzhľadom na amatérsku výrobu a neistoty vo výrobe bol zvolený najvyšší možný výsledný súčiniteľ bezpečnosti, ktorý uvádza predpis, $f_U = 2,25$. [4]

4.2 Voľba materiálu a výrobnéj technológie

Vychádzajúc z predchádzajúcich návrhov je jasné, že na výrobu lacného kompozitného letúna musí byť použitý sklený kompozit s epoxidovou matricou. Sklenené vlákno má dostatočne vysoké mechanické vlastnosti a s jeho tkaninami sa dobre pracuje. Oproti uhlíkovému kompozitu nie je potrebné riešiť zamedzovanie styku kompozitu s kovovými materiálmi, ktoré budú použité napríklad na čapy alebo mechanizáciu krídla. Vzhľadom na to, že kompozit nie je izotropný materiál, je potrebné si zadať povahu namáhania v každej dimenzovanej súčasti.

Mechanické vlastnosti kompozitného materiálu nie je možné definovať ako súčet vlastností matrice a výstuže. Je potrebné brať do úvahy nielen orientáciu vlákien v jednotlivých vrstvách laminátu, ale aj hmotnostný pomer vystužujúcich vlákien a matrice. Mechanické vlastnosti laminátu pre konkrétne zaťaženia sa určia zo vzťahu (4-3) až (4-5). [3]

Vzorový výpočet vychádza z jednosmerného laminátu, ktorý bude použitý na výrobu pásnic hlavného nosníka.

Pre výpočet mechanických vlastností laminátu je potrebná hodnota objemového podielu vlákien ϕ_F . Naopak pri návrhu a výrobe sa pracuje s hmotnostným podielom vlákien ψ_F . Z tohto dôvodu je potrebné vykonať prepočet uvedený v rovnici (4-1).

$$\psi_F = \phi_F \cdot \frac{\rho_R}{\rho_F \cdot \phi_R + \rho_R \cdot \phi_F} = 0,35 \cdot \frac{1,15}{2,6 \cdot 0,65 + 1,15 \cdot 0,35} = 0,549 \quad (4-1)$$

$$\sigma = [\sigma_F \cdot \phi_F + (1 - \phi_F) \cdot \sigma_R] \cdot k_{II} \quad (4-2)$$

V prípade, že $\sigma_R \ll \sigma_F$, je možné zjednodušiť vzťah nasledovne

$$\sigma \approx \sigma_F \cdot \phi_F \cdot k_{II} \approx 2900 \cdot 0,35 \cdot 0,8 \approx 815 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (4-3)$$

Obdobne pre modul pružnosti laminátu

$$E = [E_F \cdot \phi_F + (1 - \phi_F) \cdot E_R] \cdot k_{II} \quad (4-4)$$

$$E_R \ll E_F \Rightarrow E \approx E_F \cdot \phi_F \cdot k_{II} \quad (4-5)$$

$$E \approx 78 \cdot 0,65 \cdot 0,8 \approx 23,1 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Hodnota hmotnostného podielu vlákien v kompozite závisí predovšetkým na zvolenej technológii výroby, na ktorej ďalej závisí aj dosiahnuteľná hrúbka laminátu. Vybrané vlastnosti laminátu v závislosti na výrobnéj technológii sú uvedené v Tab. 3.

Tab. 3.: Obmedzenia v závislosti a použitej technológii [3]

	Ručná laminácia	Vákuové lisovanie
Náklady	nízke	stredné
Veľkosť komponentov	veľké	do 10 m
Minimálny rádius	cca 1 mm	cca 0,5 mm
Bežná hrúbka	0,1 - 10 mm	0,1 - 5 mm
Obsah vláken	do 50%	>80%

Podobne ako pri izotropných materiáloch aj pri kompozitoch existuje rozdiel medzi mechanickými vlastnosťami v ťahu a v tlaku. Podľa dostupných zdrojov je možné vypočítať napätie v tlaku z ťahovej skúšky zo vzťahu (4-6). [5]

$$\sigma_c \approx 0,85 \cdot \sigma_t \approx 0,85 \cdot 815 \approx 693 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (4-6)$$

4.2.1 Laminát s jednosmerne orientovanou výstužou

Pre súčasti namáhané predovšetkým ťahovým (tlakovým) napätím bol zvolený jednosmerný laminát. Konkrétna tkanina bola vybraná z katalógu internetového obchodu Havel Composites, odkiaľ je možné zakúpiť tieto materiály aj širokou verejnosťou. Bola vybraná jednosmerná tkanina s plošnou hmotnosťou 220 g/m². Hoci sa predpokladá vákuové lisovanie s odsávacou tkaninou, v mieste jadra krakorca nie je možné očakávať dostatočné odsatie prebytočnej živice. Z tohto dôvodu boli pre výpočet použité pesimistické vstupné údaje, ktoré korešpondujú skôr s ručnou lamináciou. Parametre potrebné pre výpočet mechanických vlastností materiálu sú zobrazené v Tab. 4. [6]

Tab. 4.: Parametre zložiek jednosmerného laminátu

Parametre tkaniny	
Typ vlákna	Sklené - EC9 68x5t0
σ [MPa]	2900
E [GPa]	69
ρ_F [g/cm ³]	2,6
t_d [mm]	0,25
t_w [mm]	0,19
k_{II} [-]	0,8
ψ_F [-]	0,35
Parametre živice	
Typ živice	Epoxid
σ [MPa]	33,7
E [GPa]	2,4
ρ_M [g/cm ³]	1,15
ψ_R [-]	0,65

Dosadením do rovníc (4-3) až (4-5) sa získajú mechanické vlastnosti navrhnutého laminátu.

Tab. 5.: Mechanické vlastnosti jednosmerného laminátu

σ_t [MPa]	830
σ_c [MPa]	705,5
E [GPa]	23,1

Tieto hodnoty boli vypočítané na základe informácií zo zdrojov [3], [6] a [7]. Neistota vzniká predovšetkým pri kvalite výroby laminátu v domácich podmienkach. Výsledné hodnoty vychádzajú nielen z mechanických hodnôt vlákien, ale aj z mechanických vlastností tkaniny. Preto sa odporúča vykonať materiálové skúšky, ktoré poskytnú skutočnú informáciu o mechanických vlastnostiach daného laminátu. Pre výpočet a potreby tejto záverečnej práce postačujú aj vyššie vypočítané hodnoty.

4.2.2 Laminát s vláknami pod uhlom $\pm 45^\circ$

Výpočet výsledných mechanických vlastností prebieha analogicky, podľa vzťahov (4-3) až (4-5).

Tab. 6.: Parametre laminátu $\pm 45^\circ$

Parametre tkaniny v lamináte	
Typ vlákna	Sklené - EC9 68x5t0
σ [MPa]	2900
E [GPa]	80
ρ_F [g/cm ³]	2,6
t_d [mm]	0,17
k_{II} [-]	0,5
ψ_F [-]	0,35
Parametre živice	
Typ živice	Epoxid
σ [MPa]	33,7
E [GPa]	2,4
ρ_M [g/cm ³]	1,15
ψ_R [-]	0,65

Tab. 7.: Výsledné mechanické vlastnosti laminátu $\pm 45^\circ$

σ_t [MPa]	590
σ_c [MPa]	501,5
E [GPa]	17,7

4.2.3 Laminát s vlákny pod uhlom $\pm 45^\circ$ vákuovo lisovaný

Tab. 8.: Parametre laminátu $\pm 45^\circ$ vyrobeného vákuovým lisovaním

Parametre tkaniny v lamináte	
Typ vlákna	Sklené - EC9 68x5t0
σ [MPa]	2900
E [GPa]	69
ρ_F [g/cm ³]	2,6
t_d [mm]	0,17
k_{II} [-]	0,5
ψ_F [-]	0,7
Parametre živice	
Typ živice	Epoxid
σ [MPa]	33,7
E [GPa]	2,4
ρ_M [g/cm ³]	1,15
ψ_R [-]	0,3

Tab. 9.: Výsledné mechanické vlastnosti laminátu vyrobeného vákuovým lisovaním

σ_t [MPa]	711
σ_c [MPa]	604
E [GPa]	34,53

4.3 Pásnice

Bežnou praxou v leteckých konštrukciách je použitie nesymetrického nosníka s rozdielnymi rozmermi pásníc na hornej a dolnej strane, respektíve na tlačenej a ťahanej strane. Z hľadiska technológie výroby to však prináša komplikácie a z toho dôvodu budú mať obe pásnice rovnaké rozmery. Jedinou možnosťou na ušetrenie hmotnosti a optimalizácie rozloženia napätia je zmenšovanie ich hrúbky.

Pásnice sú namáhané ohybovým momentom a preto je vhodné využiť plnú stavebnú výšku profilu. Zároveň je nutné zvoliť vhodný typ tkaniny, ktorý zachytí čo možno najväčšiu časť namáhania.

Pásnice budú dimenzované na základe bodu D z letovej obálky, v ktorom je krídlo namáhané najvyšším ohybovým momentom. Zároveň sa kontroluje tlačaná pásnica kvôli nižšej pevnosti materiálu v tlaku. Vzhľadom na povahu namáhania bol ako najvhodnejší materiál zvolený sklený jednosmerný kompozitný materiál s epoxidovou matricou. Kvôli očakávanej hrúbke pásnice bola snaha vybrať jednosmernú tkaninu s čo najvyššou plošnou hmotnosťou.

Všetky nasledujúce výpočty sú vzorové pre bod D letovej obálky a interval medzi koreňovým a druhým rebrom, čiže zaťaženie v celom intervale sa uvažuje také, aké je na koreňovom rebre.

Vynásobením prevádzkového ohybového momentu získame výpočtový ohybový moment

$$M_{ovyp} = M_o \cdot f_U = 8786,94 \cdot 2,25 = 19770,62 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (4-7)$$

Následne je možné vyjadriť minimálnu plochu prierezu tlačenej pásnice

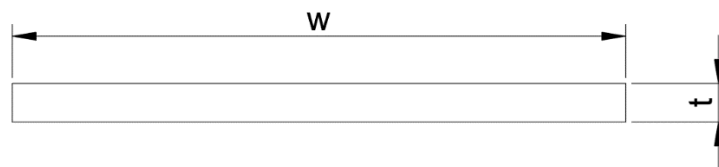
$$A_{min} \geq \frac{M_{ovyp}}{h \cdot Rm}$$

$$A_{min} \geq \frac{19770,62 \cdot 1000}{142 \cdot 705,5} \quad (4-8)$$

$$A_{min} \geq 241,347 \text{ mm}^2$$

Rebro	Dĺžka intervalu	z	M _o	M _{ovyp}	A _{min}
1-2	450	350	8786,94	19770,62	204,67
2-3	500	800	7113,95	16006,39	165,70
3-4	500	1300	5237,95	11785,40	122,00
4-5	500	1800	3512,15	7902,34	81,81
5-6	480	2300	2155,45	4849,77	50,21
6-7	598	2780	1154,46	2597,54	26,89
7-8	622	3378	510,64	1148,95	11,89

Symetrický nosník poskytuje zásadné zjednodušenie výroby a výpočtov. Ohľad sa bral ako na vhodné prierezové charakteristiky pásnic tak aj na vyrobiteľnosť. Bolo potrebné nájsť dostatočne hrubú pásnicu pre dobrú únosnosť v tlaku, avšak bez prekročenia technologických limitov. Na Obr. 6 je znázornený obdĺžnikový prierez navrhutej pásnice v mieste koreňového rebra. V Tab. 10 je uvedený prepočet plochy pásnice na použitú tkaninu možné a zmešovanie jej hrúbky pre optimalizáciu zaťaženia a váhy.



Obr. 6.: Tvar a rozmery pásnic

Tab. 10.: Geometrické charakteristiky pásnic

Interval (medzi rebrami)	A [mm ²]	w [mm]	t [mm]	n [-]
1-2	255	85	3	12
2-3	212,5	85	2,5	10
3-4	170	85	2	8
4-5	106,25	85	1,25	5
5-6	63,75	85	0,75	3
6-7	42,5	85	0,5	2
7-8	42,5	85	0,5	2

Kontrola istôt pásnic

Vzťahy pre výpočet napätí pásnic sú totožné pre obe strany. Neutrálna os nosníka sa teda nachádza presne v strede jeho výšky.

$$\sigma_{t,c} = \frac{M_{o_{výp}}}{A \cdot r} = \frac{8786,94 \cdot 1000 \cdot 2,25}{255 \cdot 68,5} = 565,93 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (4-9)$$

Výpočtová istota pásnic

$$j_t = \frac{R_m}{\sigma_t} = \frac{830}{565,93} = 1,47 \quad (4-10)$$

$$j_c = \frac{R_m}{\sigma_c} = \frac{705,5}{565,93} = 1,25 \quad (4-11)$$

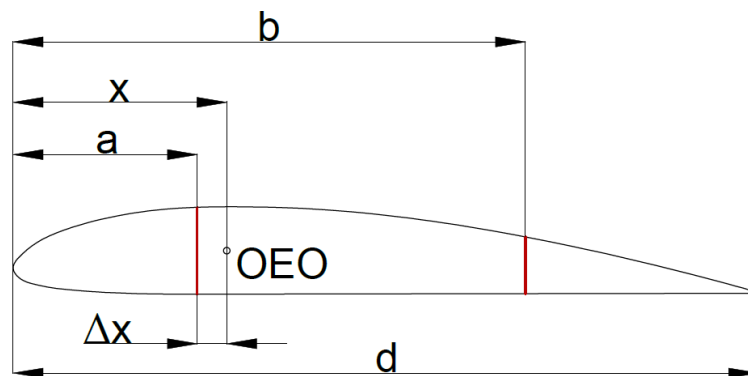
Tab. 11.: Výpočtové istoty pásnic v bode D

Rebrá	D		E	
	j_t	j_c	j_t	j_c
1-2	1,47	1,25	4,94	4,87
2-3	1,56	1,25	6,11	5,19
3-4	1,54	1,33	6,04	5,13
4-5	1,44	1,31	5,64	4,80
5-6	1,52	1,22	5,99	5,09
6-7	1,53	1,29	6,04	5,13
7-8	3,46	1,30	13,68	11,63

4.4 Stojiny

Tak ako pásnice, aj stojina je najviac namáhaná v bode D, kde na ňu pôsobí najvyššia posúvajúca sila. Tá v stojine indukuje napätia pôsobiace pod uhlom 45° , teda šmykové namáhanie. Z toho dôvodu bol zvolený laminát so skladbou $\pm 45^\circ$. Nakoľko konštrukcia disponuje hlavným a pomocným nosníkom, prítomná posúvajúca sila bude rozdelená na základe pomeru tuhostí medzi hlavným a pomocným nosníkom. Pre vyjadrenie síl v oboch nosníkoch je potrebné vypočítať polohu ohybovo elastickej osi z rovnice (4-12) podľa [8]. Poloha nosníkov, ich kvadratický moment prierezu a tuhosti materiálu sú uvedené v Tab. 12. Rozhodujúci prípad zaťaženia stojiny je v bode D.

Obr. 7.: Poloha nosníkov a OEO



Tab. 12.: Pozícia nosníkov a ich mechanické vlastnosti

	Hlavný nosník	Pomocný nosník
a [mm]	309	-
b [mm]	-	859
E [GPa]	23,1	16,3
J [mm ⁴]	1571415	91804

$$x = \frac{J_{Hx} \cdot E_H \cdot a + J_{Px} \cdot E_P \cdot b}{J_{Hx} \cdot E_H + J_{Px} \cdot E_P} \quad (4-12)$$

$$x = \frac{2571415 \cdot 23,1 \cdot 309 + 91804 \cdot 16,32 \cdot 859}{2571415 \cdot 23,1 + 91804 \cdot 16,32} = 327,96 \text{ mm}$$

Posúvajúca sila v hlavnej stojine je vyjadrená rovnicou (4-13).

$$T_H = T \cdot \left(\frac{x - b}{a - b} \right) = 4511,63 \cdot \left(\frac{327,96 - 859}{309 - 859} \right) = 4356,11 \text{ N} \quad (4-13)$$

Zvyšná časť posúvajúcej sily je vyjadrená jednoducho pomocou silovej rovnováhy (4-14)

$$T_P = T - T_H = 4511,62 - 4356,11 = 155,52 \text{ N} \quad (4-14)$$

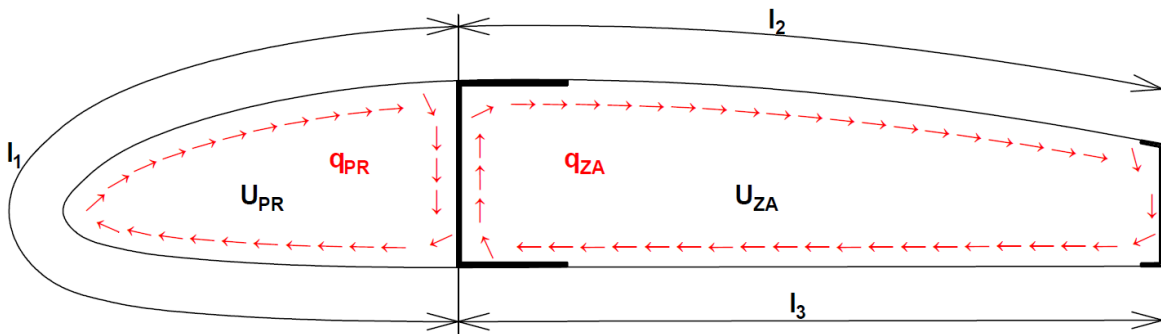
Z výsledných hodnôt zaťaženia posúvajúcou silou je možné vyjadriť šmykové toky na stojinách oboch nosníkov prostredníctvom rovníc (4-15) a (4-16)

$$q_H = \frac{T_H}{H_H} = \frac{4356,11}{137} = 31,8 \text{ N/mm} \quad (4-15)$$

$$q_P = \frac{T_P}{H_P} = \frac{155,52}{90} = 1,73 \text{ N/mm} \quad (4-16)$$

4.5 Poťah

Krídlo lietadla je najviac namáhané na krut pri zápornom násobku a v prípade navrhovaného nosníka pri maximálnej rýchlosti, teda v bode E. Na jeho prenose sa podieľajú všetky poťahy spolu so stojinami nosníkov. Poťah spolu so stojinami tvorí torzné dutiny krídla, ktoré prenášajú krútiaci moment. V prípade dvojdutinovej konštrukcie musí byť splnená deformačná podmienka, keďže ide o jedenkrát staticky neurčitú úlohu. Na Obr. 8 sú schematicky znázornené uvažované torzné dutiny.



Obr. 8.: Rez krídlom - zobrazenie torzných komôr

Celkový krútiaci moment pôsobiaci v OEO krídla je súčtom aerodynamických síl a príspevku od klopivého momentu .

$$M_z = M_k + \Delta M_k = -518223 + 69745,7 = -448477,3 \text{ N. mm} \quad (4-17)$$

Krútiaci moment od posúvajúcej sily pôsobí na ramene Δx a je vyjadrený rovnicou (4-18)

$$\Delta M_k = T \cdot \Delta x_{AC-OEO} = 4511,63 \cdot 15,46 = 69745,7 \text{ N. mm} \quad (4-18)$$

Rovnica (4-19), tzv. Bredtov vzťah podľa [8] vyjadruje krútiaci moment pomocou šmykových tokov pôsobiacich v stenách dutín.

$$M_k = q_{pr} \cdot 2 \cdot U_{pr} + q_{za} \cdot 2 \cdot U_{za} \quad (4-19)$$

Vychádzajúc z podmienky, že skrútenie oboch dutín je rovnako veľký, dostávame

$$\frac{1}{2 \cdot U_{př}} \oint \frac{q_{př} \cdot dl}{G_{př} \cdot t_{př}} = \frac{1}{2 \cdot U_{za}} \oint \frac{q_{za} \cdot dl}{G_{za} \cdot t_{za}} \quad (4-20)$$

Po integrácii a úprave

$$\begin{aligned} \frac{U_{za}}{U_{př}} \cdot \left[\frac{q_{př} \cdot l_1}{t_1} + \frac{(q_{př} + q_h - q_{za}) \cdot H_H}{t_H} \right] \\ = \\ \frac{q_{za} \cdot l_2}{t_2} + \frac{q_{za} \cdot l_3}{t_3} + \frac{(q_{za} + q_P) \cdot H_P}{t_P} + \frac{(q_{za} - q_{př} - q_H) \cdot H_H}{t_H} \end{aligned} \quad (4-21)$$

Následnou úpravou (4-20) a (4-21) sa dostáva vyjadrenie šmykového toku v zadnej dutine (4-22)

$$\begin{aligned} q_{za} = \\ \frac{\left(-\frac{U_{př} \cdot H_P}{t_P} \cdot q_P + \frac{M_z \cdot H_H}{2 \cdot t_H} + \frac{U_{př} \cdot H_H}{t_H} \cdot q_H + \frac{U_{za} \cdot l_1 \cdot M_z}{2 \cdot U_{př} \cdot t_1} + \frac{U_{za} \cdot H_H}{t_H} \cdot q_H + \frac{U_{za} \cdot H_H \cdot M_z}{2 \cdot U_{př} \cdot t_H} \right)}{\left(\frac{U_{za} \cdot U_{za} \cdot l_1}{U_{př} \cdot t_1} + \frac{U_{za} \cdot U_{za} \cdot H_H}{U_{př} \cdot t_H} + \frac{U_{za} \cdot H_H}{t_H} + \frac{U_{př} \cdot l_2}{t_2} + \frac{U_{př} \cdot l_3}{t_3} + \frac{U_{př} \cdot H_P}{t_P} + \frac{U_{př} \cdot H_H}{t_H} + \frac{U_{za} \cdot H_H}{t_H} \right)} \end{aligned} \quad (4-22)$$

$$q_{za} = -1,31 \text{ N/mm}$$

Následne je možné vyjadriť šmykový tok v prednej dutine z rovnice (4-23)

$$\begin{aligned} q_{pr} &= \frac{M_z - 2 \cdot U_{za} \cdot q_{za}}{2 \cdot U_{pr}} \\ q_{pr} &= \frac{-448477,4 - 2 \cdot 71650,4 \cdot (-1,31)}{2 \cdot 35036,1} = -3,71 \text{ N/mm} \end{aligned} \quad (4-23)$$

Kontrola istoty stojiny hlavného nosníka

Keďže stojina hlavného nosníka sa okrem prenosu posúvajúcej sily ako súčasť torznej dutiny podieľa aj na prenose krútiaceho momentu, kontrola jej istoty mohla byť vykonaná až po výpočte šmykových tokov.

Výpočet šmykového napätia na stojine hlavného nosníka

$$\tau_H = \frac{q_{pr} + q_H - q_{za}}{t_H} = \frac{-2,62 - 8,17 + 4,24}{2} = 14,7 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (4-24)$$

Medzným stavom stojiny namáhanej šmykom s rozumie strata stability, preto je potrebné určiť kritické napätie, pri ktorom pre daný materiál, rozmery a uloženie telesa tento stav nastane. Najpresnejší výpočet dáva vzťah(4-25), kde je potrebné určiť Poissonovo číslo μ materiálu podľa vzťahu (4-25). [9] [10]

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_f \cdot \psi_f + \mu_m \cdot \psi_m = 0,22 \cdot 0,6012 + 0,33 \cdot 0,3988 \\ &= 0,2639 \end{aligned} \quad (4-25)$$

Výpočet kritického šmykového napätia straty stability tenkej dosky podľa [10]

$$\tau_{kr} = K_S \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t_H}{b}\right)^2$$

$$\tau_{kr} = 10,65 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 17,7 \cdot 1000}{12 \cdot (1 - 0,2639^2)} \cdot \left(\frac{2}{137}\right)^2 = 34,79 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (4-26)$$

Pre porovnanie, dostatočne presný výsledok dáva aj zjednodušený vzťah (4-27) [10]

$$\tau_{kr} = 0,9 \cdot K_S \cdot E \cdot \left(\frac{t_H}{b}\right)^2$$

$$\tau_{kr} = 0,9 \cdot 10,65 \cdot 17,7 \cdot 1000 \cdot \left(\frac{2}{137}\right)^2 = 36,15 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (4-27)$$

Prevádzková istota stojiny hlavného nosníka

$$j_{prH} = \frac{\tau_{kr}}{\tau_H} = \frac{36,15}{14,7} = 2,41 \quad (4-28)$$

Výpočtová istota stojiny hlavného nosníka

$$j_{pH} = \frac{\tau_m}{\tau_H \cdot f} = \frac{622,14}{14,7 \cdot 2,25} = 19,14 \quad (4-29)$$

Výpočet šmykového napätia na stojine pomocného nosníka

$$\tau_p = \frac{q_{za} + q_{pr}}{t_p} = \frac{-1,14 - 4,06}{2} = -2,6 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (4-30)$$

Výpočty istôt pomocného nosníka prebehnú analogicky so vzťahmi pre hlavný nosník (4-26) až (4-29)

$$\tau_{kr} = K_S \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t_P}{b}\right)^2$$

$$\tau_{kr} = 9,8 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 17,7}{12 \cdot (1 - 0,2639^2)} \cdot \left(\frac{2}{90}\right)^2 = 77,25 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (4-31)$$

$$j_{prP} = \frac{\tau_{kr}}{\tau_P} = \frac{77,25}{2,5} = 29,7 \quad (4-32)$$

$$j_{pP} = \frac{\tau_m}{\tau_P \cdot f} = \frac{590,11}{2,51 \cdot 2,25} = 106,31 \quad (4-33)$$

Tab. 13.: *Prevádzkové a výpočtové istoty stojín hlavného a pomocného nosníka*

Rebrá	j_{prH}	j_{pH}	j_{prP}	j_{pP}
1-2	2,41	19,14	29,70	106,31
2-3	2,90	22,57	33,52	123,11
3-4	3,14	28,04	38,30	149,29
4-5	4,12	36,81	48,34	188,41
5-6	5,72	51,17	68,44	266,74
6-7	9,24	82,22	104,92	408,93
7-8	27,36	253,53	307,68	1199,18

Kontrola istôt pot'ahov

Rozhodujúcim prípadom pri dimenzovaní pot'ahov je bod E.

Šmykové napätie v jednotlivých torzných dutinách

$$\begin{aligned}
 \tau_1 &= -\frac{q_{pr}}{t_1} = -\frac{-2,57}{0,68} = 3,85 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \\
 \tau_2 &= \frac{q_{za}}{t_2} = \frac{-4,27}{0,68} = -6,24 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \\
 \tau_3 &= \frac{q_{za}}{t_3} = \frac{-4,27}{0,68} = -6,24 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}
 \end{aligned} \tag{4-34}$$

Výpočet kritického napätia straty stability tenkej dosky

Kritické napätie pre tenkú zakrivenú dosku sa vypočíta podľa vzťahu (4-35) [8]

$$\begin{aligned}
 \tau_{kr1} &= 0,1 \cdot \frac{t}{r_1} \cdot E + k \cdot E \cdot \left(\frac{t}{l}\right)^2 \\
 \tau_{kr1} &= 0,1 \cdot \frac{0,68}{45} \cdot 34500 + 7,5 \cdot 34500 \cdot \left(\frac{0,68}{741,25}\right)^2 \\
 &= 52,41 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}
 \end{aligned} \tag{4-35}$$

Kritické napätie pre pot'ahový segment 2 sa vypočíta podľa vzťahu (4-36) [10] pre teoreticky rovnú dosku, čo je v prípade tohto segmentu na strane bezpečnosti. Zároveň sa počíta s rozpolením intervalu pomocným rebrom.

$$\begin{aligned}
 \tau_{kr2} &= 0,9 \cdot k \cdot E \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \\
 \tau_{kr2} &= 0,9 \cdot 13,1 \cdot 34500 \cdot \left(\frac{0,68}{\frac{450}{2}}\right)^2 = 3,72 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}
 \end{aligned} \tag{4-36}$$

Kritické napätie pre poťahový segment 3 sa vypočíta podľa vzťahu pre teoreticky rovnú dosku (4-37). Tak isto ako pri segmente 2, aj v tomto segmente sa do vzorca zahrnie vplyv rozdelenia intervalu.

$$\tau_{kr3} = 0,9 \cdot k \cdot E \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

$$\tau_{kr3} = 0,9 \cdot 13,1 \cdot 345000 \cdot \left(\frac{0,68}{\frac{450}{2}}\right)^2 = 3,72 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (4-37)$$

Výpočet prevádzkovej a výpočtovej istoty jednotlivých poťahových segmentov

Prevádzková istota určuje, pri akom podiele z aktuálneho násobku nastane zvlnenie poťahu. Vzhľadom na nízku hodnotu modulu pružnosti materiálu vychádzajú prevádzkové istoty pomerne malé. Vloženie pomocného rebra a rozpolenie intervalu by tieto problémy zmiernilo a istota by sa dostala na vyššiu úroveň. Zároveň by sa však zvýšila hmotnosť kvôli množstvu lepidla, ktoré by sa použilo na prilepenie prídavných rebier s poťahom.

$$j_{PR1} = \frac{\tau_{kr1}}{\tau_1} = \frac{52,41}{3,85} = 13,6$$

$$j_{PR2} = \frac{\tau_{kr2}}{\tau_2} = \frac{3,72}{|-6,24|} = 0,60$$

$$j_{PR3} = \frac{\tau_{kr3}}{\tau_3} = \frac{3,72}{|-6,24|} = 0,60 \quad (4-38)$$

$$j_{P1} = \frac{\tau_m}{\tau_1 \cdot k} = \frac{622}{3,85 \cdot 2,25} = 71,74$$

$$j_{P2} = \frac{\tau_m}{\tau_1 \cdot k} = \frac{622}{|-6,24| \cdot 2,25} = 44,29$$

$$j_{P3} = \frac{\tau_m}{\tau_1 \cdot k} = \frac{622}{|-6,24| \cdot 2,25} = 44,29 \quad (4-39)$$

Tab. 14.: Prevádzkové a výpočtové istoty poťahov v bode D

D						
Rebrá	j_{pr1}	j_{pr2}	j_{pr3}	j_{p1}	j_{p2}	j_{p3}
1-2	9,60	1,93	1,93	50,63	143,13	143,13
2-3	11,19	1,89	1,89	59,04	162,23	162,23
3-4	13,70	2,23	2,23	72,29	191,17	191,17
4-5	11,24	1,00	1,00	79,17	153,04	153,04
5-6	15,53	1,41	1,41	109,34	202,83	202,83
6-7	24,15	1,58	1,58	170,05	301,28	301,28
7-8	71,87	4,14	4,14	506,13	856,44	856,44

Tab. 15.: Prevádzkové a výpočtové istoty poťahov v bode E

E						
Rebrá	J_{pr1}	J_{pr2}	J_{pr3}	J_{p1}	J_{p2}	J_{p3}
1-2	13,60	0,60	0,60	71,74	44,29	44,29
2-3	15,66	0,60	0,60	82,62	51,28	51,28
3-4	18,85	0,72	0,72	99,45	62,15	62,15
4-5	12,97	0,39	0,39	91,36	59,61	59,61
5-6	17,56	0,57	0,57	123,65	81,29	81,29
6-7	26,69	0,65	0,65	187,93	124,61	124,61
7-8	77,57	1,77	1,77	546,29	365,39	365,39

Ako ukazujú výpočty, nižší modul pružnosti materiálu zapríčinil vyššie nároky poťah. Kritický bod obálky, bod E si vyžiadal dimenzovanie poťahu až na hrúbku 0,68 mm. Kvôli výraznej úspore hmotnosti bolo zvolené vákuové lisovanie, ktoré síce zvýši náklady, no zároveň zníži náklady na materiál a usporí sa drahocenná hmotnosť. Rozporenie intervalu medzi aktuálnymi rebrami pomohlo zvýšiť ich únosnosť, no zároveň narástla hmotnosť kvôli množstvu nových lepených plôch.

Potrebná hrúbka poťahu oproti predpokladanej hrúbke vychádza podstatne vyššia. Pred samotnou výrobou je potrebné vykonať skúšky, či je možné takto hrubý laminát ohnúť okolo nábežnej hrany a predovšetkým si overiť mechanické vlastnosti materiálu.

4.6 Krídelko

Konštrukcia krídelka bola oproti krídlu zjednodušená použitím duralovej trubky. Podieľa sa na prenose ohybového a zároveň aj krútiaceho momentu. Výhodou je jednoduchšie umiestnenie uchytenia závesu. Nosník prenáša pohyb od pák, ktoré sú umiestnené na jeho koncoch na konštrukciu krídelka. Ďalej sa skladá zo šiestich rebier, konštrukčne totožných s rebrami krídla a z poťahu.

Výpočet zaťaženia krídelka je rozobratý v kapitole 5.1. Pri výpočte sa bude vychádzať z týchto hodnôt.

4.7 Krakorec

Voľbou takéhoto pripojenia krídel k trupu, respektíve ich vzájomným prepojením sa výrazne odľahčilo namáhanie trupu a znížili sa požiadavky na pevnosť materiálov. Nie je potrebné dimenzovať kovania na veľké osamotené sily.

Vzdialenosť čapov

$$r = 440 \text{ mm}$$

Maximálna posúvajúca sila pôsobiaca po celej dĺžke krakorca vychádza z maximálneho ohybového momentu pôsobiaceho v koreňovom rebre

$$T_K = \frac{M_{o_{max}}}{r} = \frac{8787}{0,44} = 44933 \text{ N} \quad (4-40)$$

Šmykový tok v stojine krakorca

$$q_{Kr} = \frac{T_K}{h_e} = \frac{44933}{142} = 328 \text{ N/mm} \quad (4-41)$$

Šmykové napätie v stojine krakorca

$$\tau_{Kr} = \frac{q_K}{t_K} = \frac{328}{2} = 164 \text{ N/mm}^2 \quad (4-42)$$

Kontrola výpočtovej istoty

$$j_P = \frac{\tau_m}{k \cdot \tau_K} = \frac{590,11}{2,25 \cdot 164} = 1,6 \quad (4-43)$$

Napätie pôsobiace na plochu čapu v krakorci

$$\sigma = \frac{T_K \cdot k}{d \cdot t} = \frac{44933 \cdot 1,5}{20 \cdot 17} = 198 \text{ N/mm}^2 \quad (4-44)$$

Dovolené napätie v tlaku pre lícovanú skrutku ISO 7379 pevnostnej triedy 12.9 je podľa [11] $\sigma_D = 595 \text{ MPa}$.

Kontrola otláčenia čapov

$$k = \frac{\sigma_D}{\sigma} = \frac{595}{198} = 3 \quad (4-45)$$

4.8 Koreňové rebro

Koreňové rebro je navrhnuté z bukovej preglejky. Prenáša šmykové napätie z poľahu a sú doň zavedené osamelé sily prostredníctvom dvoch čapov, ktoré prenášajú krútiaci moment. Koreňové rebro je delené na tri časti, pričom nosné sú len časti medzi nábežnou hranou a hlavným nosníkom a hlavným nosníkom a pomocným nosníkom.

Šmykové napätie v segmente koreňového rebra

$$\tau_{i_{Reb}} = \frac{k_u \cdot q_i}{15} = \frac{2,25 \cdot (-4,16)}{15} = 0,7 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (4-46)$$

Istota segmentu koreňového rebra

$$j_p = \frac{\tau_D}{\tau_{iReb}} = \frac{1,8}{0,7} = 2,6 \quad (4-47)$$

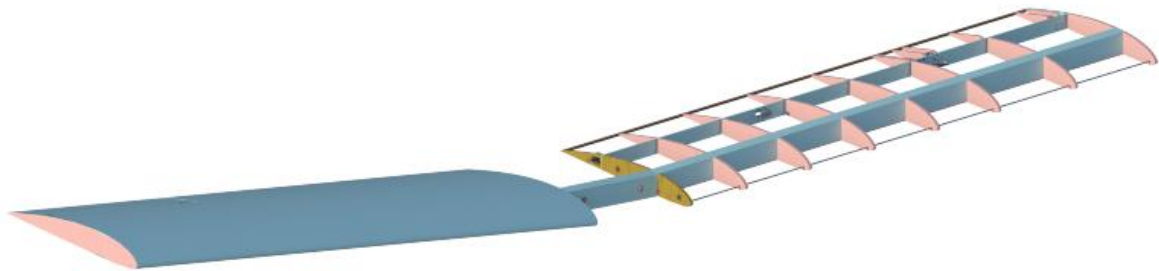
Výpočet síl v čapoch

$$F_1 = \frac{T_i \cdot x_2 + M_{k_i}}{x_1 + x_2} \quad (4-48)$$

$$F_1 = \frac{11358 \cdot 384,5 - 572544}{202,5 + 384,5} = 6464,41 \text{ N}$$

$$F_2 = \frac{T_i \cdot x_1 + M_{k_i}}{x_1 + x_2} \quad (4-49)$$

$$F_2 = \frac{11358 \cdot 202,5 - 572544}{202,5 + 384,5} = 3135,12 \text{ N}$$



Obr. 9.: Zostava ľavého a pravého krídla

5 Riadenie

Boli zvolené jednoduché krídelká s diferencovanou výchylkou z dôvodu zamedzenia zatáčavého momentu. Výchylka smerom dole spôsobuje vyšší odpor a tým spôsobuje nežiadúce zatáčanie. Bežne sa pomer výchylky kormidla smerom hore ku výchylke smerom dole uvádza 2:1. [12] Od mechanizmu riadenia v lietadle sa očakáva predovšetkým presná a správna funkcia bez vôlí. Znamená to, že v každej konfigurácii letúna a v každom režime letu vykoná rovnaký povel pilota rovnakú odozvu. Zároveň v správne fungujúcom riadení musia byť všetky vplyvy, ktoré by mohli obmedziť jeho spôsobilosť, potlačené na prijateľnú mieru. To znamená, že ani pri deformáciách draka a riadenia nesmie dochádzať ku styku častí s konštrukciou draku, či s časťami iných systémov. [2]

5.1 Zat'azenie krídeliek

Výpočet vychádza z predpisu UL-2 [4], kde je uvedený zjednodušený vzťah (5-1).

$$\bar{W} = 17,24 \cdot \frac{MTOM}{S} = 17,24 \cdot \frac{300}{10} = 517,2 Pa \quad (5-1)$$

Pričom minimálna hodnota je $\bar{W} = 575 Pa$

Minimálna podmienka nebola splnená ($\bar{W} = 517 Pa$), preto sa bude ďalej vo výpočte uvažovať minimálna hodnota z predpisu. [4]

Nasledujúce výpočty boli prevzaté z diplomovej práce [13].

Spojité zat'azenie po rozpätí kormidla

$$q = \bar{W} \cdot b_{kr} = 575 \cdot 0,326 = 187,45 N/m \quad (5-2)$$

Sila pôsobiaca na krídelko

$$F_{kr} = q \cdot l_{kr} = 187,45 \cdot 1,2 = 224,94 N \quad (5-3)$$

Spojité zat'azenie po hĺbke krídelka

$$W = \frac{2 \cdot \bar{W} \cdot b_{kr}}{b_1 + b_{kr}} = \frac{2 \cdot 575 \cdot 0,326}{0,03 + 0,326} = 1053,09 N/m^2 \quad (5-4)$$

$$q_1 = W \cdot b_1 = 1053,09 \cdot 0,03 = 31,59 N/m \quad (5-5)$$

$$q_2 = \frac{W \cdot (b_{kr} - b_1)}{2} = \frac{1053,09 \cdot (0,326 - 0,03)}{2} = 155,86 N/m \quad (5-6)$$

Vzdialenosť pôsobiska vztlakovej sily od nábežnej hrany

$$r_1 = \frac{b_1}{2} = \frac{0,03}{2} = 0,015 \text{ m} \quad (5-7)$$

$$r_2 = b_1 + \frac{b_{kr} - b_1}{2} = 0,03 + \frac{0,326 - 0,03}{2} = 0,13 \text{ m} \quad (5-8)$$

$$r_0 = \frac{r_1 \cdot q_1 + r_2 \cdot q_2}{q} = \frac{0,015 \cdot 31,59 + 0,13 \cdot 155,86}{187,45} = 0,11 \text{ m} \quad (5-9)$$

Vzdialenosť pôsobiska vztlakovej sily od osi otáčania

$$r = r_0 - b_1 = 0,11 - 0,03 = 0,08 \text{ m} \quad (5-10)$$

Závesový moment

$$M_H = F_{kr} \cdot r = 224,94 \cdot 0,08 = 17,88 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5-11)$$

Posúvajúca sila

$$T = \frac{q \cdot l}{2} - q \cdot z = \frac{187,45 \cdot l}{2} - 187,45 \cdot 0 = 112,47 \text{ N} \quad (5-12)$$

Ohybový moment

$$M_o = \frac{q \cdot l}{2} \cdot (z - z^2) = \frac{187,45 \cdot l}{2} \cdot 0 = 0 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5-13)$$

Pre zjednodušenie výroby bol kompozitný nosník nahradený duralovou trúbkou, ktorá bude prenášať ohyb aj krut. Potrebné mechanické vlastnosti sú uvedené v Tab. 16.

Tab. 16.: Mechanické vlastnosti polotovaru z hliníkovej zliatiny

Materiál	Rozmery [mm]	R _m [N.mm ⁻²]	R _p [N.mm ⁻²]	E [MPa]	J [mm ⁴]
6060 T6	Tr 30x2	190	150	70 000	43215

Redukovaný moment podľa hypotézy τ_{MAX}

$$M_{red} = \sqrt{M_o^2 + M_H^2} = \sqrt{0^2 + 17,88^2} = 17,88 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5-14)$$

Redukované napätie v najnamáhanejšom mieste

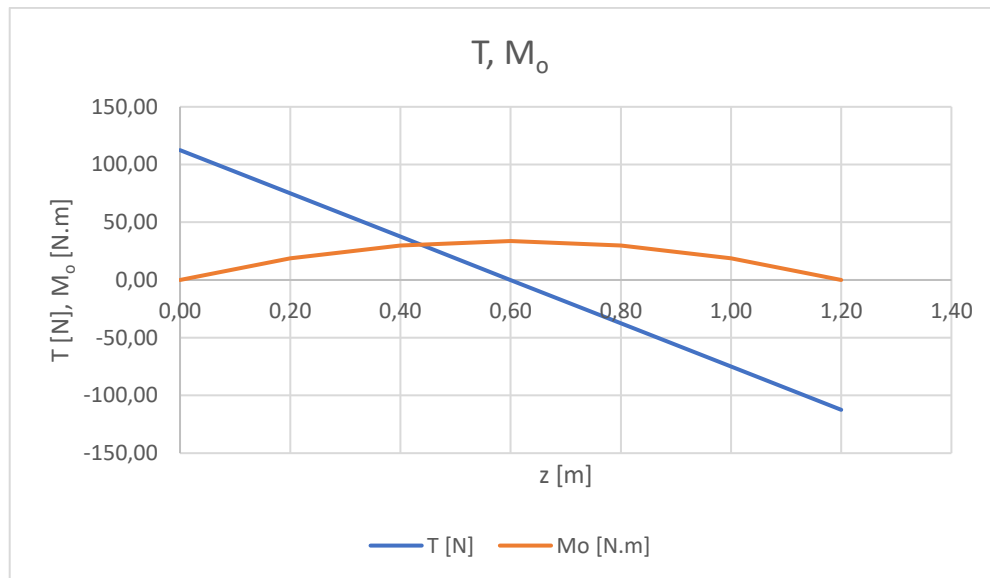
$$\sigma_{red} = \frac{M_{red}}{J} \cdot r = \frac{M_{red}}{W_o} = \frac{38190}{2160} = 17,68 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (5-15)$$

Výpočet istoty nosníka krídelka

$$j = \frac{\sigma_D}{k \cdot \sigma_{red}} = \frac{150}{1,5 \cdot 17,68} = 5,66 \quad (5-16)$$

Tab. 17.: Výsledné zaťaženie a istoty výpočtu nosníka krídelka

z [m]	T [N]	M _o [N.m]	M _k [N.m]	M _{red} [N.m]	σ _{red} [N.mm ⁻²]	j [-]
0,00	112,47	0,00	17,88	17,88	8,28	5,64
0,20	74,98	18,75	17,88	25,91	11,99	3,89
0,40	37,49	29,99	17,88	34,92	16,17	2,89
0,60	0,00	33,74	17,88	38,19	17,68	2,64
0,80	-37,49	29,99	17,88	34,92	16,17	2,89
1,00	-74,98	18,75	17,88	25,91	11,99	3,89
1,20	-112,47	0,00	17,88	17,88	8,28	5,64



Obr. 10.: Priebeh zaťažujúcich účinkov na nosník krídelka

5.2 Návrh trasy riadenia krídeliek

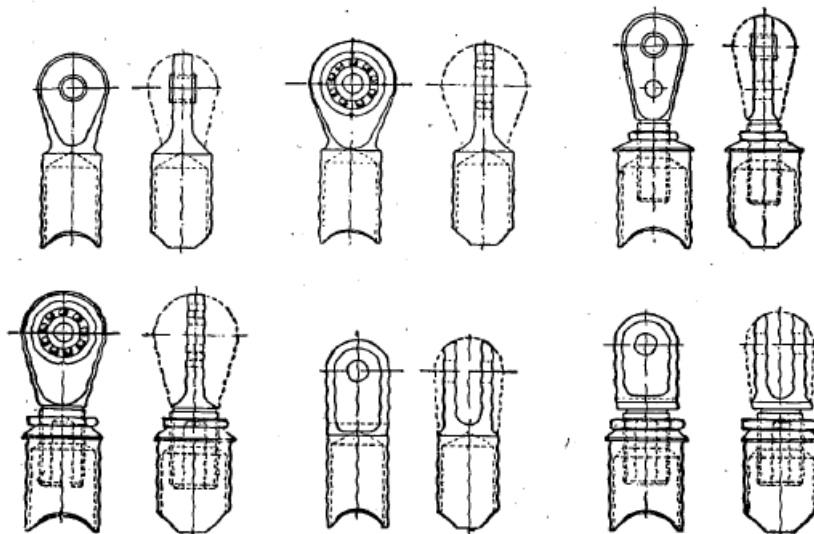
Trasa riadenia je namáhaná silou od pilota danou predpisom a závesovým momentom vznikajúcim na krídelku. Sily, ktorými pilot môže pôsobiť dlhodobo alebo krátkodobo na trasu riadenia, sú uvedené v Tab. 18. Skladá sa zo sústavy pák a tiahel, ktoré sú zakončené vidlicou alebo okom. Tieto koncové prvky sú spojené s tiahom závitovým spojom.

Tab. 18.: Sily v riadení od pilota potrebné na dimenzovanie trasy riadenia

	Dlhodobá sila [N]	Krátkodobá sila [N]	Závesový moment [N.m]
Priečne riadenie	15	100	17,88

5.2.1 Tiahla

Najčastejšie sa vyrábajú z duralových trubiek a prakticky sa nepoužívajú väčšie dĺžky ako 2 m. Takéto obmedzenie minimalizuje možnosť vzniku vibrácií. Oba konce duralovej trubky sú opatrené koncovkami, ktoré majú integrované oko alebo vidlicu, prípadne má koncovka závit, do ktorého sa oko alebo vidlica umiestni. Rôzne možnosti prevedenia koncoviek sú na Obr. 11. [14]



Obr. 11.: Možnosti vyhotovenia koncoviek tiahel [14]

Navrhované tiahla sa skladajú z duralovej trubky a ich konce sú opatrené koncovkami so závitom. Koncovky sú uchytené lepeným spojom na vnútornom povrchu trubiek a štyrmi nitmi. Materiál tiahel je totožný s nosníkom krídelka a jeho mechanické vlastnosti sú uvedené v Tab. 16. Vzhľadom na rozmery krídla a konštrukčné obmedzenia tiahel budú v krídle dve tiahla vedené poza pomocný nosník.

Ťahové/tlakové namáhanie tiahel

$$\sigma_c = \frac{F}{S} = \frac{296,67}{51,69} = 5,74 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (5-17)$$

$$S = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (20^2 - 18^2)}{4} = 2 \cdot 4 \cdot 1 = 51,69 \text{ mm}^2 \quad (5-18)$$

Kontrola istoty na ťah/tlak

$$j = \frac{R_p}{k \cdot \sigma_c} = \frac{150}{1,5 \cdot 5,74} = 17,42 \quad (5-19)$$

Napätie úmernosti materiálu je dané empirickým vzťahom

$$\sigma_u = 0,63 \cdot R_m = 0,63 \cdot 190 = 119,7 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (5-20)$$

Polomer zotrvačnosti

$$i = \sqrt{\frac{J}{S}} = \sqrt{\frac{2700}{51,69}} = 7,23 \text{ mm}^2 \quad (5-21)$$

Medzná štíhlosť

$$\lambda_m = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_u}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot 70000}{119,7}} = 79,97 \quad (5-22)$$

Štíhlosť nosníka

Kontrolovať stačí dlhšiu trubku, teda tiaho č. 2

$$\lambda = \frac{l_{kr}}{i} = \frac{1046}{7,23} = 144,67 \quad (5-23)$$

$$\lambda > \lambda_m \quad (5-24)$$

Pre overenie platnosti Eulerovej oblasti vzperu musí byť splnená podmienka (5-24). V tomto prípade je podmienka splnená, vzper je teda v pružnej oblasti.

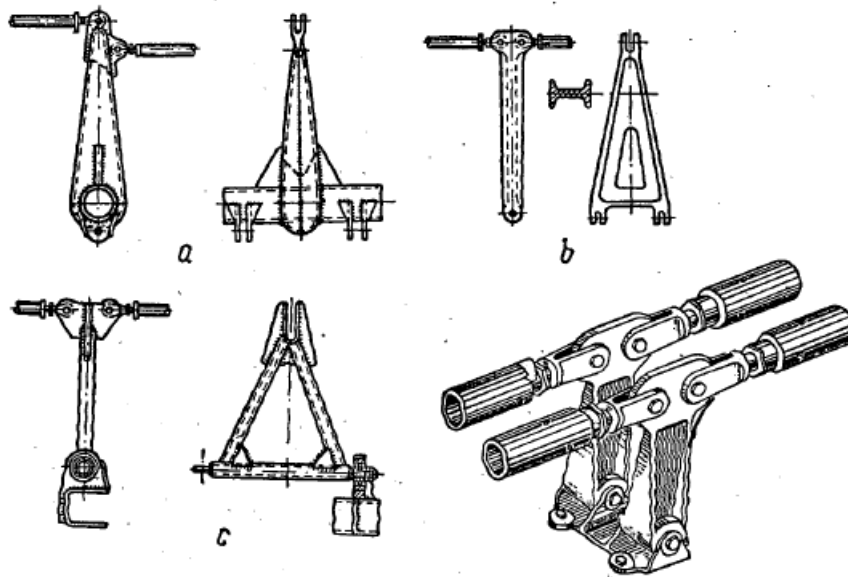
5.2.2 Vidlice a oká

Vidlice a oká sú pripojené závitovými spojmi ku koncovkám tiahel. Na základe deformácií, ktoré vznikajú v konštrukcii krídla je dôležité, aby bola sústava tiahel schopná sa im prispôbiť. Preto sú oká pri použití v exponovaných miestach vybavené sférickými ložiskami, ktoré takúto deformáciu dovoľujú.

Je potrebné ich skontrolovať na odtrhnutie, vyšmyknutie čapu, roztrhnutie oka a otláčenie oka. Zároveň sa berie do úvahy aj jeho deformácia. [8] Takéto kontroly je dobré vykonávať pre kompletnú trasu riadenia. Okrem toho, podrobný návrh riadenia nie je predmetom tejto záverečnej práce.

5.2.3 Páky

Spojenie jednotlivých tiahel v sústave riadenia zabezpečujú páky, ktoré prenášajú ohybový moment. Zároveň slúžia na zmenu prevodu riadenia a sú základným prvkom pri návrhu diferenciacie výchylky krídeliek. Najčastejšie sú páky zvarané z oceľových trubiek, ale používajú sa aj lisované alebo zvarané. Jednotlivé typy sú zobrazené na Obr. 12.



Obr. 12.: a) Páka zvaraná z dvoch polovic b) Lisované c) Zvarané z trubiek [14]

Vzhľadom na výrobu v domácich podmienkach boli zvolené páky zvarané z oceľových trubiek a výpalkov z plazmovej rezačky.

6 Technologický návrh

Nasledujúca kapitola popisuje technológiu výroby jednotlivých častí konštrukcie krídla. Vychádza sa zo základnej myšlienky o stavbe dostupného letúna v domácich podmienkach. To samozrejme zahŕňa mnoho obmedzení. Základnou požiadavkou je dostupnosť vhodných priestorov. Je potrebné, aby boli zabezpečené aspoň základné požiadavky pre výrobu kompozitných materiálov. Pre dostatočnú kvalitu výsledného materiálu je nutné zabezpečiť čisté prostredie, nástroje a optimálnu teplotu podľa použitej živice. Čistota prostredia, tak isto ako čistota nástrojov, môže mať zásadný vplyv na kvalitu spojov jednotlivých vrstiev laminátu. Okrem nástrojov treba dbať aj na čistotu rúk, respektíve používanie ochranných pomôcok. Tie chránia jednak pokožku rúk od vplyvu chemikálií, ale zároveň chránia textílie pred masťou a inými nečistotami z rúk. V prípade nízkej teploty by nemuselo dôjsť ku kvalitnému vytvrdnutiu laminátu a v opačnom prípade, pri vysokej teplote, by mohlo dochádzať k značnému skráteniu doby spracovateľnosti živice. Vzhľadom na rozmery vyrábaných súčastí je dôležité tieto podmienky splniť.

Ako plynie z konštrukčného návrhu, v danej konštrukcii sa nepodarí vyhnúť použitiu kovových materiálov. Pôvodný návrh počítal len s použitím kompozitných materiálov a absenciou sústruhu, frézky a iných kovoobrábacích strojov. Vybavenie dielne sa nezmení a stále bude obsahovať len základné a jednoduché stroje a nástroje. No vzhľadom na dostupnosť niektorých technológií z externých zdrojov by toto obmedzenie len zbytočne skomplikovalo výrobu.

Nároky na vybavenie takejto dielne nie sú vôbec vysoké. Zo strojného vybavenia je bezpodmienečne potrebné, aby bola dielňa vybavená nasledovnými zariadeniami:

- Pokosová píla
- Stolná pásová píla
- Odporová píla
- Uťahovačka a vrtačka
- Stolová vrtačka
- Vákuová pumpa alebo výkonnejší priemyselný vysávač schopný dlhodobej prevádzky pod záťažou. Ďalšou možnosťou je prestavba starého kompresoru z chladničky podľa niektorého návodu z internetu.
- Vysokootáčková vrtačka/brúska
- Zváračka (ideálne MIG/MAG)

Potrebné nástroje a príslušenstvo:

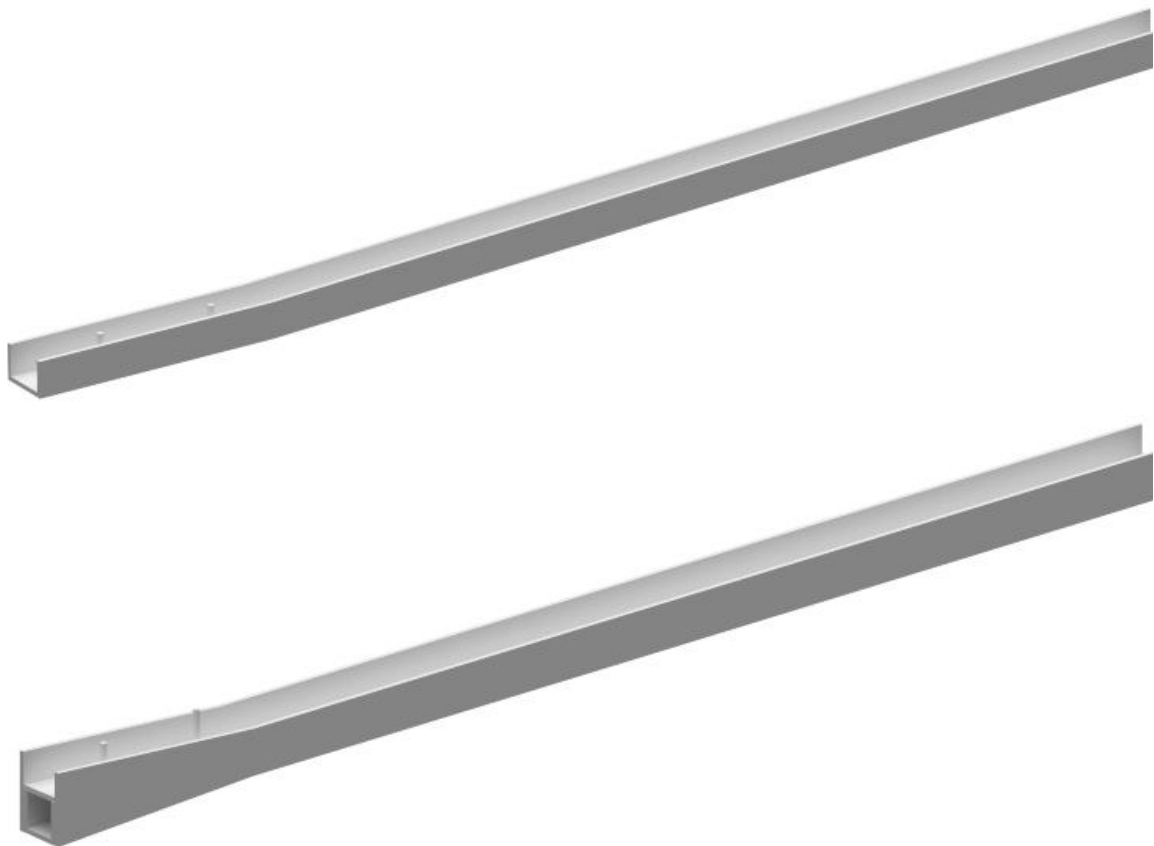
- Vrtáky do dreva a bity na uťahovanie – bežné príslušenstvo
- Rezný kotúč do vysokootáčkovej vrtačky/brúsky vhodný na rezanie kompozitných materiálov
- Štetce a plastové stierky
- Odihlovací nástroj
- Lámacie nože a kvalitné nožnice vhodné na strihanie skleneného vlákna
- Plastové nádoby na miešanie chemikálií

6.1 Nosník

Z konštrukčného návrhu a pevnostnej kontroly vyplývajú jasné rozmery a tvar nosníka. Čo z tohto návrhu nemusí byť na prvý pohľad jasné, je technologické usporiadanie. Nosník bude vyrábaný ako jeden celok, obsahujúci pásnice, stojiny a zakončený bude krakorcom. Vzhľadom na dôležitosť nosníka v nosnej konštrukcii krídla a požiadavky na jeho presnosť bola zvolená nutnosť použitia technológie ručného laminovania s vákuovým lisovaním. Vakuovací materiál a príslušenstvo síce stavbu predraží, no zabezpečí potrebné vlastnosti laminátu.

6.1.1 Výroba formy

Najjednoduchšia cesta k dostatočne tuhej a odolnej forme, ktorá pri vhodnom zaobchádzaní a dodržaní technológie môže vydržať výrobu hneď niekoľkých nosníkov, je výroba z hladkých drevotrieskových dosiek. Dá sa zabezpečiť rozobrateľnosť a tak uľahčiť vyťahovanie hotového výrobku z formy. Drevotrieskové dosky sú dostupné v každej hobby predajni, no väčšinou sú krehké a treba s nimi pracovať opatrne. Kvalitnejší materiál je dostupný v špecializovaných predajniach s drevom a polotovarmi pre výrobu nábytku. V týchto predajniach je možné objednať presný nárez dosiek na kvalitnejších formátovacích pílach ako v hobby predajniach. Nedochoádza k vytrhávaniu materiálu na hranách, čo výrazne uľahčí dokončovacie práce na forme.



Obr. 13.: Forma nosníka. Zhora: pravý a ľavý

Kvôli integrácii krakorca do nosníka nebude forma len priama, ale je potrebné počítať s jej lomením pre zabezpečenie vzopätia krídla, viď Obr. 13. Konečné rozmery nosníka, potrebné pre výrobu foriem, sú uvedené v Príloha 2 a v Príloha 3.

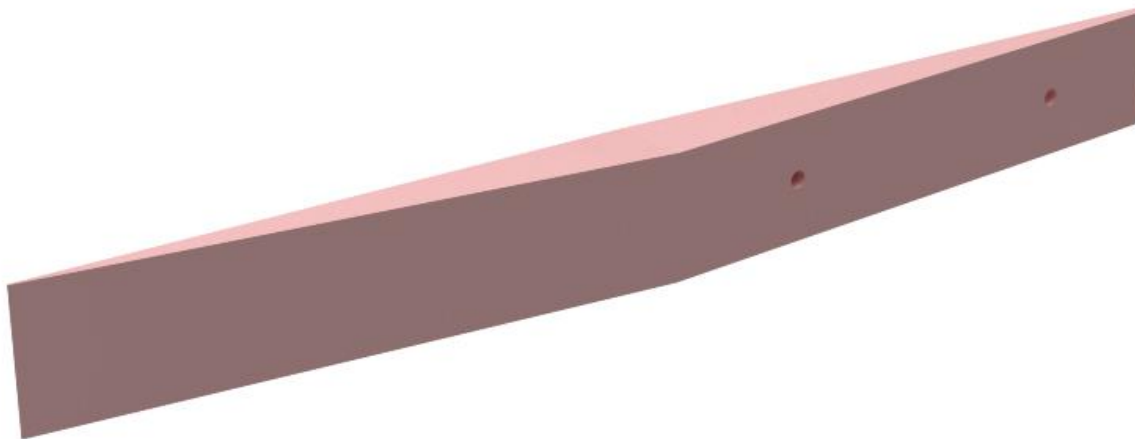
- Časti formy, ktoré boli na hrubo napílené sa dokončia na pokosovej píle.
- Začne sa s montážou priamej časti formy. Pomocou pravouhlých svoriek sa zabezpečí pozícia bočných stien voči dnu.
- Vyvrtávajú sa otvory pre skrutky vo vyznačených miestach, do takto pripravených otvorov sa umiestnia skrutky a utiahnu sa.
- Podobne sa zmontuje aj časť formy, v ktorej bude laminovaný krakorec.
- Pri ľavom a pravom krídle sa postupuje obdobne. Ide o zložitejšiu konštrukciu kvôli niekoľkonásobnému lomeniu.

6.1.2 Jadro krakorca

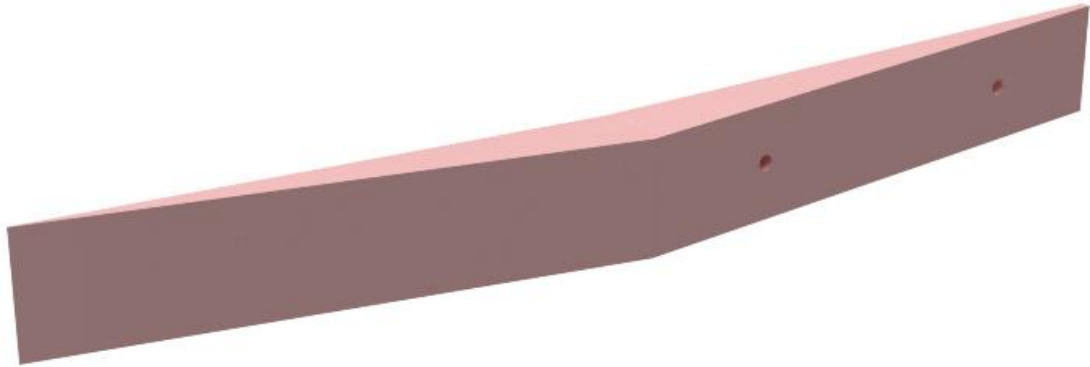
Jadro krakorca bolo navrhnuté z peny Styrodur, ktorý je dostupný v hrúbkach do 50 mm. Preto bude jadro zlepené z dvoch dosiek a následne orezané odporovou pílou. Pomocou šablón sa dosiahne požadovaný tvar a rovnakým spôsobom budú vyrezané otvory pre vloženie vložiek čapov.

Časť krakorca v krídle a časť v trupe budú vyrábané samostatne a až po konečnom orezaní sa môžu zlepíť, prípadne sa tak stane až po umiestnení do formy. Zabezpečí sa tak jednoduchšia manipulácia a prípadné úpravy. Rozmery jadier krakorcov sú uvedené v Príloha 4 a Príloha 5.

- Nárez polotovaru rozmerov a následné zlepenie pre získanie požadovanej hrúbky.
- Orez požadovaných uhlov na konečnú dĺžku segmentu.
- Vyrezanie dier podľa šablóny.
- Orez odporovou pílou podľa šablóny na požadované zúženie a maximálnu hrúbku.
- Lepenie častí jadra prebehne až pri umiestňovaní do formy.



Obr. 14.: Penové jadro krakorca pravého krídla


Obr. 15.: Penové jadro krakorca ľavého krídla

6.1.3 Nosník

Podľa rámcových hodnôt z Tab. 2 bol zvolený materiál vo forme plátna s plošnou hmotnosťou 220g/m² a jednosmerná textília s plošnou hmotnosťou 220g/m². Dostatočnou hrúbkou tkanín sa eliminuje prácnosť pri laminovaní. Samozrejme, je možné zvoliť textíliu s vyššou plošnou hustotou, no predovšetkým pri plátne je potrebné zvážiť technologické limity hrubšej tkaniny. V prípade jednosmernej textílie sa odporúča voliť netkanú textíliu spojenú polymérou mriežkou, ktorá výrazne zjednoduší manipuláciu. Pred nástrihom predpísaného počtu vrstiev je dobré si overiť pomocou posuvného meradla skutočnú hrúbku jednej alebo viacerých vrstiev tkaniny.

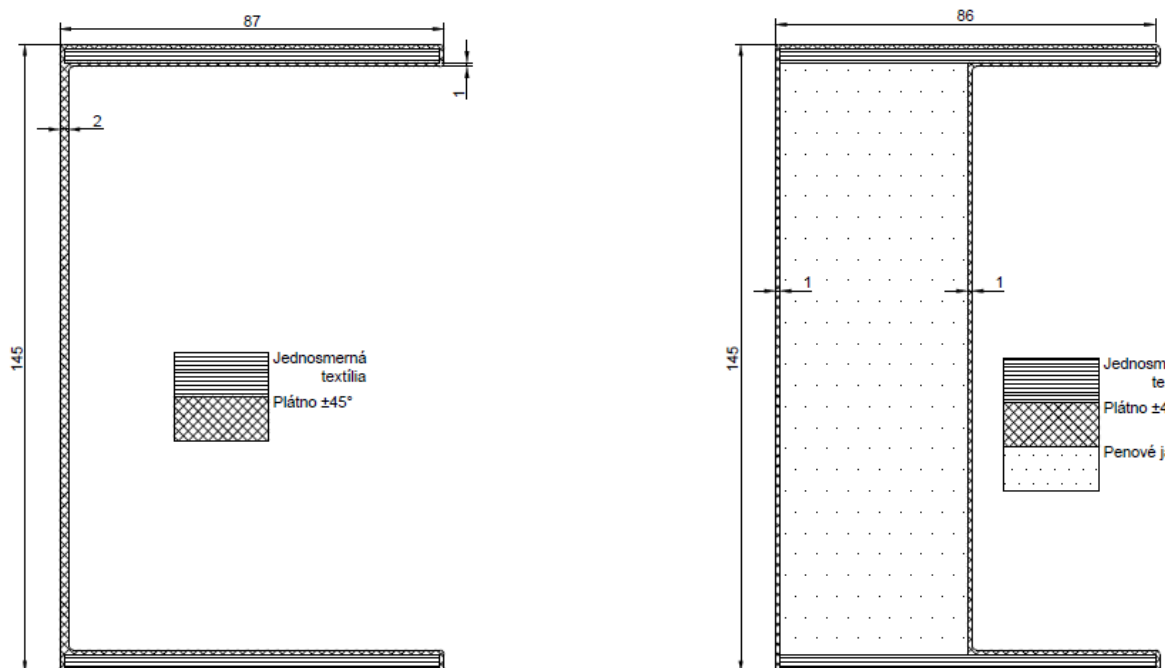
Tab. 19.: Potrebný materiál na výrobu oboch hlavných nosníkov

Materiál	Celkové množstvo	Počet vrstiev / Hrúbka
Sklená textília jednosmerná 220 g/m ² [m ²]	3,8	12 / 3 mm
Sklená textília plátno 220 g/m ² [m ²]	14	12 / 2,04 mm
Epoxidová živica LH 289 + tužidlo H 146 [kg]	5	-
Nekonečný PE rukáv 0,1x1000 mm [kg]	4	-
Tesniaca hmota [m]	5	-

V Tab. 20 sú bližšie rozpísané potrebné množstvá živice na výrobu oboch nosníkov. Staviteľ samozrejme môže zmeniť odporúčanú živicu za inú. V každom prípade je potrebné sa riadiť technickým listom ku konkrétnej živici.

Tab. 20.: Bližšie špecifikované vlastnosti a množstvo matrice

Živica	Tužidlo	Hmotnostný podiel živice v lamináte [%]	Hmotnostný pomer živice k tužidlu [-]	Doba spracovateľnosti [min]	LH 385 + H 286 [kg]
LH 385	H 286	65%	100:40	90	10129 + 3545



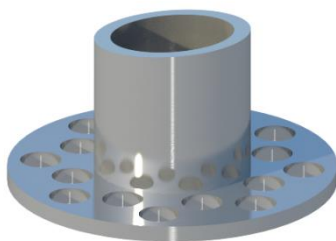
Obr. 16.: Zľava: a) Skladba nosníka v miestach bez krakorca b) Skladba nosníka s krakorcom

Keď už sú všetky operácie na forme dokončené, môže sa začať príprava laminácie.

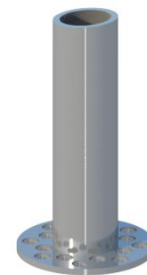
- V prvom rade je potrebné formu odmastiť vhodným rozpúšťadlom, napríklad acetónovým riedidlom.
- Následne naniesť separačnú vrstvu pre zabezpečenie bezproblémového vytiahnutia nosníka z formy. V závislosti na použitej separačnej látke sa postupuje podľa inštrukcií na obale. V tomto prípade je najvhodnejšie použiť akýkoľvek separačný vosk, ktorý v prípade potreby vyhladí menšie nedokonalosti formy.
- Následne sa pokračuje nástrojom jednotlivých vrstiev tkanín. Zamieša sa potrebné množstvo živice podľa doporučení na obale v závislosti na okolitej teplote a predpokladanom čase laminovania.
- Začne sa položením prvých 6 vrstiev plátna, ktoré tvoria časť stojiny a jej spojenie s pásnicami. Každá vrstva sa musí dostatočne presýtiť živicom tak, aby nezostalo žiadne miesto suché. Tkanina sa ukladá vláknami orientovanými pod uhlom $\pm 45^\circ$.
- Následne sa ukladajú pásnice z jednosmernej tkaniny
- Vloží sa jadro krakorca a zafixuje sa do otvorov. Všetky styčné plochy krakorca sa musia dostatočne natrieť živicom, aby sa zabezpečilo dobré prepojenie jadra s textíliami. Po jeho umiestnení sa položia zvyšné vrstvy tkaniny s orientáciou $\pm 45^\circ$.

- Po dokončení laminácie sa pokračuje prípravou materiálu na vákuovanie. Pre zníženie nákladov sa nebude uvažovať použitie odtrhávacej a odsávacej tkaniny, avšak jej použitie môže výsledné mechanické vlastnosti len zlepšiť. Uvažuje sa použitie len vákuovacej fólie vo forme rukávu. Pre ľahšiu manipuláciu sa nechá presah oproti dĺžke nosníka aspoň 20%. Pri vkladaní formy do rukáva treba byť opatrný, aby sa rukáv nepotrhal, preto je dobré tento úkon vykonávať aspoň dvom osobám, kde jedna bude manipulovať s nosníkom a jedna s rukávom. Po vložení formy do rukáva sa na jednej strane úplne uzavrie pomocou tesniacej hmoty. Druhá strana sa uzavrie až po zavedení hadičky zabezpečujúcej vákuum. Hadička musí byť umiestnená vhodne tak, aby do seba nenasávala živicu a zároveň zabezpečila odsávanie v celom objeme. Pri takýchto rozmeroch je na mieste použiť aspoň tri hadičky, na každom konci jednu a ešte jednu v strede. Po starostlivom uzavretí všetkých medzier je možné pripojiť zdroj atmosférického podtlaku. Pri odsávaní sa musí dbať na to, aby bolo v rohoch a zlomoch dostatočné množstvo fólie a nevznikali previsy. Pomocou sluchu sa hľadajú prípadné netesnosti a dodatočným zatláčaním tesniacej hmoty sa zabezpečuje tesnosť. Po kontrole, keď nikde do formy nevniká vzduch, sa nechá zdroj atmosférického podtlaku zapnutý po dobu vytuhnutia živice.
- Po uplynutí predpísanej doby je možné nosník bezpečne vybrať z formy. Táto operácia sa vykoná buď jednoduchým vytiahnutím nosníka smerom hore, alebo sa forma rozoberie.
- Orezanie prebytočného materiálu vysokootáčkovou vrtačkou s rezným kotúčom na konečný rozmer podľa výkresovej dokumentácie
- Vlepenie kovových vložiek na Obr. 17 a Obr. 18 do dier krakorca vnorením do vrstvy lepidla. Túto operáciu treba vykonať až na konci pre oba nosníky naraz tak, ako budú spájané v prevádzke. Zabezpečí sa tak súososť vložiek.

Návrhy vložiek vychádzajú zo spojovacích prvkov od spoločnosti BIGHEAD® [15]. Sú navrhované pre náročné použitie, pričom spojovací prvok, či už matica alebo skrutka, sa nachádza nad povrchom súčasti. V prípade vložiek by bolo použitie opačné, teda zaťaženie príruby omnoho menšie. V požadovaných rozmeroch však tieto vložky nie sú dostupné, preto je potrebné ich vyrobiť.



Obr. 17.: Vložka krátka



Obr. 18.: Vložka dlhá

6.2 Pomocný nosník

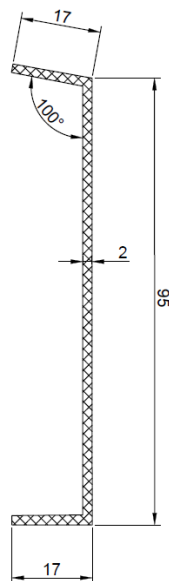
Podľa rámcových hodnôt z Tab. 2 bol vybraný materiál vo forme plátna s plošnou hmotnosťou 220g/m², tak isto ako pri hlavnom nosníku z dôvodu dostatočnej plošnej hmotnosti, čo eliminuje počet vrstiev a tým pádom prácnosť výroby. Rozmery pomocného nosníka a pozície otvorov sú uvedené na výkrese v Príloha 6.

Tab. 21.: Potrebný materiál na výrobu oboch hlavných nosníkov

Materiál	Celkové množstvo	Poznámka
Sklené plátno AEROGLOSS 220g/m ²	5,5	12 vrstiev
Epoxidová živica + tužidlo [g]	1874	1340+534 (živica + tužidlo)
Nekonečný PE rukáv 0,1x1000 mm [kg]	4	-
Tesniaca hmota [m]	5	-

Tab. 22.: Bližšie špecifikované vlastnosti a množstvo matrice

Živica	Tužidlo	Hmotnostný podiel živice v lamináte [%]	Hmotnostný pomer živice k tužidlu [-]	Doba spracovateľnosti [min]	LH 385 + H 286 [kg]
LH 385	H 286	65%	100:40	90	1340+534



Obr. 19.: Rez pomocným nosníkom

Oproti hlavnému nosníku ide o konštrukčne jednoduchšie riešenie. Neobsahuje krakorec a vzhľadom na prenášané zaťaženie je možné ho vyrobiť z jedného druhu textílie, v tomto prípade plátna. Forma bude vyrobená tak isto z drevotrieskových dosiek a použije sa technológia ručnej laminácie s vákuovým lisovaním. V tomto prípade sa musí brať do úvahy aj umiestnenie páky prenášajúcej pohyb tiahel ovládajúcich krídelká a tak isto ich zavesenie.

- Výroba formy – obdobne ako pri hlavnom nosníku
- Odmastenie formy vhodným rozpúšťadlom
- Separácia formy
- Laminovanie nosníka
- Vákuové lisovanie
- Vytiahnutie z formy a orezanie na konečné rozmery podľa výkresovej dokumentácie

6.3 Rebrá

Tab. 23.: Rozpis potrebného materiálu - rebrá

Materiál	Potrebné množstvo	Poznámka
Styrodur 20 mm	2 m ²	1
Sklená tkanina 220 g/m ²	4,1 m ²	2 z oboch strán
Epoxidová živica + tužidlo	1400 g	1000+400 (živica + tužidlo)



Obr. 20.: Tvar segmentov rebra a požadovaný smer vlákien poťahovej sklenej textílie

Rebrá sú tvorené zo sendvičového materiálu s jadrom z peny Styrodur a z oboch strán sú olaminované dvoma vrstvami sklenej tkaniny s orientáciou $\pm 45^\circ$. Každé rebro je rozdelené na tri časti, delené sú hlavným a pomocným nosníkom. Tvar delenia je uvedený na Obr. 20. Technológia bola zvolená prirodzene najjednoduchšia, ručná laminácia.

V prvom rade je potrebné vyrobiť šablóny na jednotlivé rebrá podľa výkresovej dokumentácie. Rovnako treba brať do úvahy aj výsledné rozmery nosníka, ktorého rozmery môžu narásť vzhľadom na použitú technológiu. Podľa šablón sa na odporovej píle vyrežú penové jadrá rebier. Následne sa tieto jadrá z oboch strán olaminujú sklenou tkaninou. Požadovaná orientácia vlákien textílie je zobrazená na Obr. 20. Orientáciu treba samozrejme rešpektovať, aj keď v skutočnosti sú rebrá delené. Počet vrstiev tkaniny je z oboch strán totožný s laminátom, ktorý bude použitý na poťahy. Šablóny pre výrobu jednotlivých rebier krídla sú uvedené v Príloha 7 a pre krídelko v Príloha 9.

6.4 Koreňové rebro

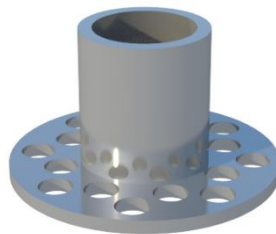
Tab. 24.: Rozpis potrebného materiálu – koreňové rebro

Materiál	Celkové množstvo	Poznámka
Preglejka buk 1250x2200x15	1 ks	1
Sklená tkanina 230 g/m ²	0,7 m ²	2 z oboch strán
Epoxidová živica + tužidlo	242 g	172,5 + 69,5 (živica + tužidlo)

Okrem prenosu krútiaceho momentu z celého krídla zabezpečuje tuhosť prenosu pohybov v riadení. Preto bola za jadro koreňového rebra zvolená preglejka. Podobne ako ostatné rebrá, aj toto bude olaminované z oboch strán sklenou tkaninou. V tomto prípade je dôvodom zamedzenie vnikaniu vlhkosti do štruktúry dreva.

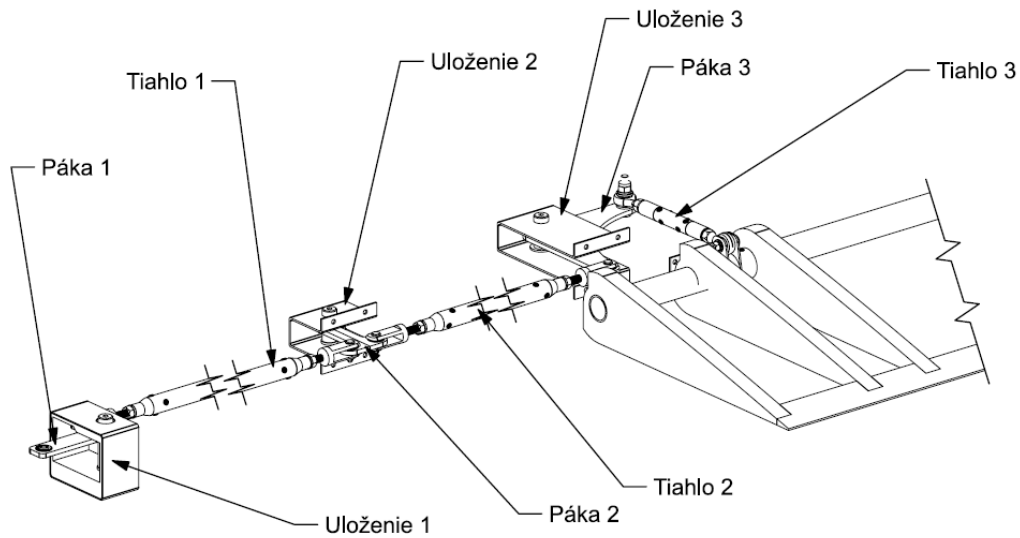
Koreňové rebro je zložené z troch častí. Predná časť, od nábežnej hrany po hlavný nosník a časť medzi nosíkmi sú nosné. Zadná časť tvoriaca odtokovú hranu profilu nie je súčasťou nosnej konštrukcie, zabezpečuje tak len stály geometrický obrys.

Krútiaci moment je prenášaný pomocou dvojice čapov umiestnených v trupe, ktoré sú zavedené do koreňového rebra. Z tohto dôvodu je potrebné vybaviť otvory v rebre vložkami z odolného materiálu. Možnosť, ako jednoducho vystužiť diery, sú oceľové vložky, ktoré sa fixujú vnorením perforovanej príruby do lepidla rovnako ako v prípade vložiek v krakorci.



Obr. 21.: Vložka s prírubou

6.5 Riadenie



Obr. 22.: Schéma sústavy riadenia kridelka

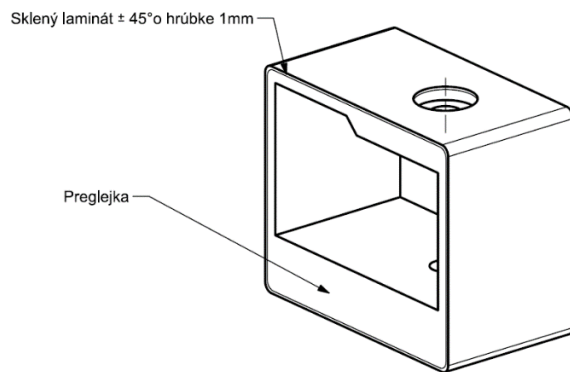
6.5.1 Uloženie pák

Jednotlivé páky sú uložené pomocou lícovaných skrutiek v nasledujúcich úchytoch, ktoré zabezpečujú, aby sa mohli páky podľa potreby otáčať. Uloženia sú navrhnuté tak, aby boli dostatočne tuhé. Nutnou súčasťou výroby bude vŕtanie do laminátu, čo vyžaduje aspoň vrták do dreva. V prípade použitia vrtáku do kovu je vyššia pravdepodobnosť delaminácie pri výstupe vrtáku z materiálu. Je potrebné si uvedomiť, že bežné nástroje do dreva sa pri vŕtaní do skleneného laminátu veľmi rýchlo opotrebovávajú.

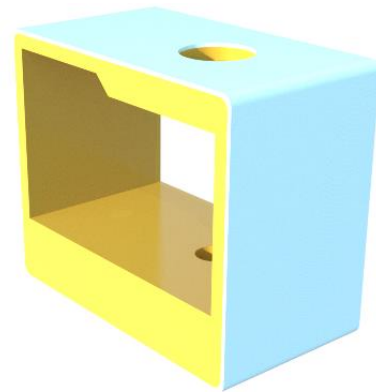
Na Obr. 24 je zobrazený domček páky koreňového rebra, ktorý sa nachádza v najnamáhanejšom priereze krídla. Je vyrobený z preglejky a následne olaminovaný pre vyššiu pevnosť spojov.

Tab. 25.: Rozpis potrebného materiálu – uloženia pák

Materiál	Celkové množstvo	Poznámka
Sklená tkanina	0,33 m ²	Uloženie 1 – 4 vstrvy Uloženie 2 a 3 – 7 vrstiev
Epoxidová živica + tužidlo	113 g	81+32 g (živica + tužidlo)
Preglejka	Rozmery podľa výkresu	



Obr. 23.: Schéma skladby materiálov Uloženia 1



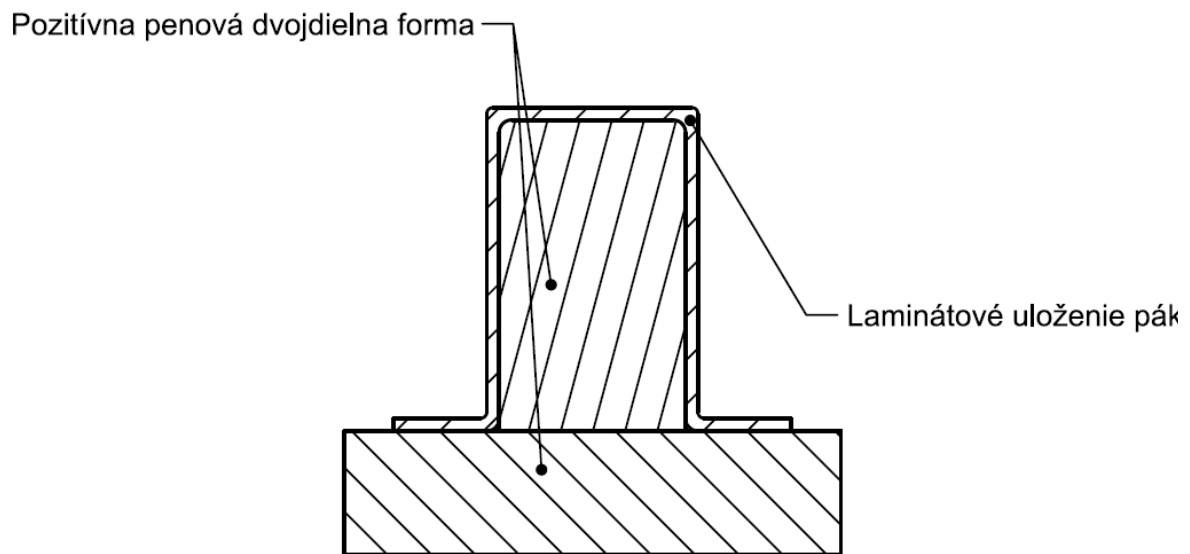
Obr. 24.: Uloženie 1

- Lepenie konštrukcie z narezaných dielov z preglejky
- Obrúsenie a očistenie povrchu – príprava na laminovanie vrchnej vrstvy Uloženia 2
- Laminácia 4 vrstiev
- Orezanie/obrúsenie presahujúceho laminátu na požadované rozmery
- Vrtanie priebežných dier na stojanovej vrtačke

Uloženie 2 Obr. 26 má profil omega a je vyrobený zo skleneného laminátu s orientáciou vlákien $\pm 45^\circ$ na pozitívnu penovú formu. Táto forma sa skladá z dvoch kvádrov izolačnej peny, ktoré boli zlepené do zodpovedajúceho profilu. Aby bolo možné výrobok od formy oddeliť, je potrebné aplikovať odolnú povrchovú vrstvu, na ktorú bude možné naniesť separátor. Tú môže predstavovať niekoľko vrstiev vybrúsenej epoxidovej živice, alebo sa povrch oblepí priesvitnou lepiacou páskou. Je nutné zabezpečiť dostatočne kvalitný povrch na oboch stranách uloženia kvôli dosadnutiu spojovacieho materiálu.

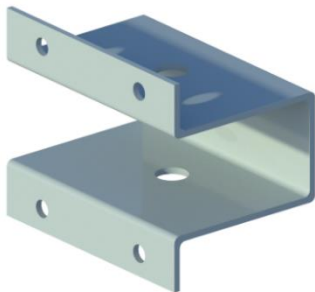
Schematicky zobrazená výroba uložení 1 a 2 je na Obr. 25. Vzhľadom na to, že uloženia budú laminované na pozitívnu formu, je dobré nechať dostatočné okraje na orezanie, v prípade menších rozmerov postačuje 15 mm z každej strany, alebo podľa uváženia staviteľa.

Diery, cez ktoré bude prechádzať os otáčania páky, je potrebné vyvrtáť z jednej strany, aby sa zabezpečila ich súososť. Túto operáciu je treba vykonať ešte pred odstránením výrobku z formy, ktorá poskytne oporu pri vrtaní.

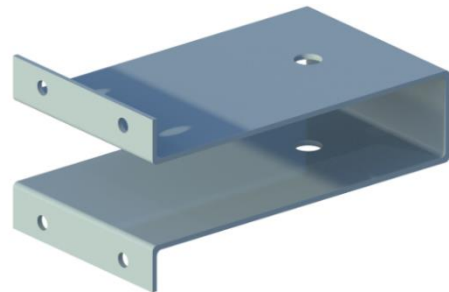


Obr. 25.: Schematické zobrazenie výroby uloženia 2 a 3

Rovnako je vyrobené Uloženie 2 pri krídelku na Obr. 27, ktoré má však väčšiu hĺbku kvôli prenosu požadovanej konečnej uhlovej výchylky.



Obr. 26.: Uloženie 2



Obr. 27.: Uloženie 3

6.5.2 Tiahla

Tab. 26.: Rozpis potrebného materiálu - tiahla

Materiál	Celkové množstvo
Trubka Tr Φ 20 x 1 - 6060	3 m
Trubka Tr Φ 16 x 2 - 6060	1 m
Závitová vložka 20/18 M8	2 ks
Závitová vložka 20/18 M8L	2ks
Závitová vložka 16/12 M8	1ks
Závitová vložka 16/12 M8L	1ks
Epoxidové lepidlo Araldite 2011	Na vlepene koncoviek
Nity	24 ks

Vyššia tuhosť tiahel oproti lanám v ovládaní krídeliek je vykúpená vyššou technologickou náročnosťou výroby. Pôvodne boli uvažované trubky z hliníkovej zliatiny 6082, čo je dobrá náhrada za zliatinu 6061 často používanú v zahraničných konštrukciách. Uvádza sa jej zlá obrobitelnosť, ktorá sa prejavuje dlhými trieskami. Na vrtanie predovšetkým plytkých však dier vhodná je. Zároveň sa vyznačuje výbornou odolnosťou voči korózii. [16] Nakoľko v čase písania tejto záverečnej práce nebola v maloobchodných množstvách dostupná ani zliatina 6061 ani 6082, prvky boli dimenzované z dostupnej zliatiny 6060. V prípade možnosti nákupu zliatiny 6061 alebo 6082 sa odporúča použiť jednu z nich.

Koncovka tiahla so závitom je dostupná od výrobcu Kašpar a synové, ktorý sa špecializuje na výrobu a predaj súčastí pre letecké konštrukcie. [17]

- Delenie trubiek na pásovej píle
- Odihľovanie – táto operácia vychádza z poznatkov, že únavové poškodenie vzniká v miestach s vrubom, trhlinou, alebo iným drobným poškodením. Po hrubom delení materiálu je nová hrana plná takýchto poškodení. Zároveň vzniknuté otrepy sťažujú montáž ďalších súčastí.
- Zbrúsenie povrchovej vrstvy – pre zabezpečenie čo najlepšieho lepeného spoja je dobré zbrúsiť vrchnú vrstvu materiálu v trubke. Jednoduchý nástroj na upnutie do vrtačky je zobrazený na Obr. 28 a). Do drážky sa vloží pás brúsneho papiera a obrúsi sa vnútorná plocha trubky tiahla.

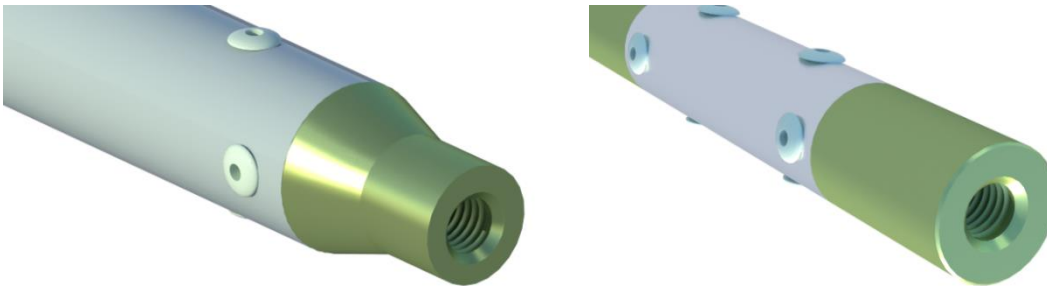


Obr. 28.: Zľava: a) Držiak brúsneho papiera b) Upínací prvok pre koncovku tiahla



Obr. 29.: Zľava: a) Koncovka tiahla 1 a 2 b) Koncovka tiahla 3

- Zbrúsenie koncoviek na Obr. 29 tak, aby šli jednoducho nasadiť do trubky tiahla. Jednoduchý prípravok na upnutie do vrtačky je zobrazený na Obr. 28 b). Po upnutí do vrtačky je možné brúsnym papierom rovnomerne obrúsiť lepenú plochu.
- Lepenie koncoviek – v prvom rade je potrebné všetky lepené plochy očistiť a odmastiť. Dvojzložkové lepidlo Araldite 2011 sa mieša podľa pokynov na obale. Nanáša sa rovnomerná vrstva lepidla na obe lepené plochy. Po vsunutí koncovky do trubky tiahla sa očistí vytlačené lepidlo rozpúšťadlom a nechajú sa vytvrdnúť.
- Vrtanie dier pre nity – po vytuhnutí lepidla, spravidla po 24 hodinách. Diery sa vrtajú na stojanovej alebo stolovej vrtačke cez celé tiahlo tak, aby vznikli dva páry dier pre nity. Tak isto ako po delení materiálu, je potrebné vyvrtané diery odihlovať. Zrazenie hrany diery výrazne zlepši dosadnutie hlavičky nitu.
- Nitovanie koncoviek.



Obr. 30.: Detail konštrukčného riešenia tiahel

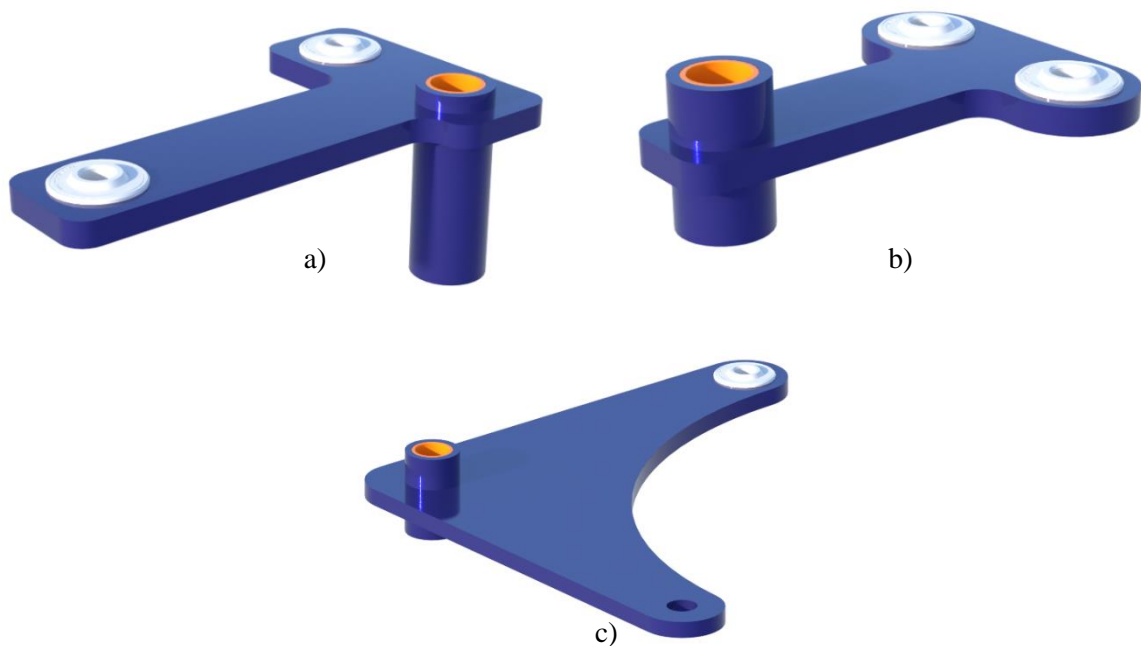
6.5.3 Páky a pánty

Najjednoduchšou možnosťou na výrobu vyhovujúcich pák a pántov je kombinácia zvarovania trubiek a prvkov vypálených plazmovým lúčom. Technológia rezania plazmovým lúčom je v dnešnej dobe rozšírená a dostupná. Mierne problematická časť výroby môže byť pri zvaraní, ktorá vyžaduje dávku skúseností a dodržanie základných technologických zásad.

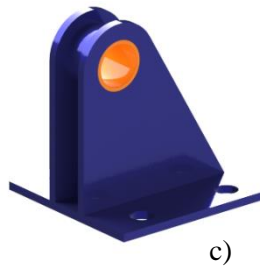
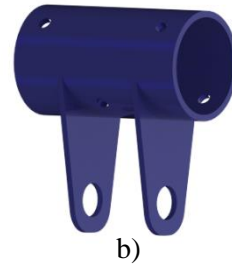
Tab. 27.: Rozpis potrebného materiálu - páky

Materiál	Celkové množstvo
Oceľový výpalok z plechu 4 mm	Podľa výkresu
Oceľová trubka	Podľa výkresu
Klzné puzdro bronzové	6 ks
Kĺbové klzné ložisko ZKL GE6-DO	5 ks

Na otáčanie okolo vlastnej osi sú páky vybavené samomaznou klznou vložkou z bronzu. Úchytné otvory na pripevnenie tiahel, respektíve ich koncoviek, sú vybavené kĺbovými ložiskami, ktoré dokážu vyrovnať nesúososť sústavy riadenia. Kĺbové ložiská sa môžu umiestniť do otvoru buď rozlisovaním materiálu páky na niekoľkých miestach alebo zalisovaním do otvoru. Na toto bude potrebný príslušný výstružník podľa špecifikácie výrobcu ložiska.



Obr. 31.: Zhora zľava: a) Páka 1 b) Páka 2 c) Páka 3



Obr. 32.: Zhora zľava: a) Pánt pri koreni krídelka s riadením b) Pánt na konci krídelka c) Pánt na nosníku

6.6 Poťahy

Tab. 28.: Rozpis potrebného materiálu

Materiál	Celkové množstvo	Poznámka
Sklená tkanina 220 g/m ²	42	4 vrstvy
Epoxidová živica + tužidlo	13	9,3+3,7 (živica+tužidlo)

Poťahy budú vyrábané po segmentoch medzi jednotlivými rebrami. Orientácia vrstiev laminátu bola zvolená podľa prevažujúceho zaťaženia pod uhlom $\pm 45^\circ$. Dôležité je vybrať tkaninu, ktorá má rovnaký počet vlákien ako v osnove, tak v útku.

Tab. 29.: Finálne rozmery lepených poťahov podľa zvolených segmentov

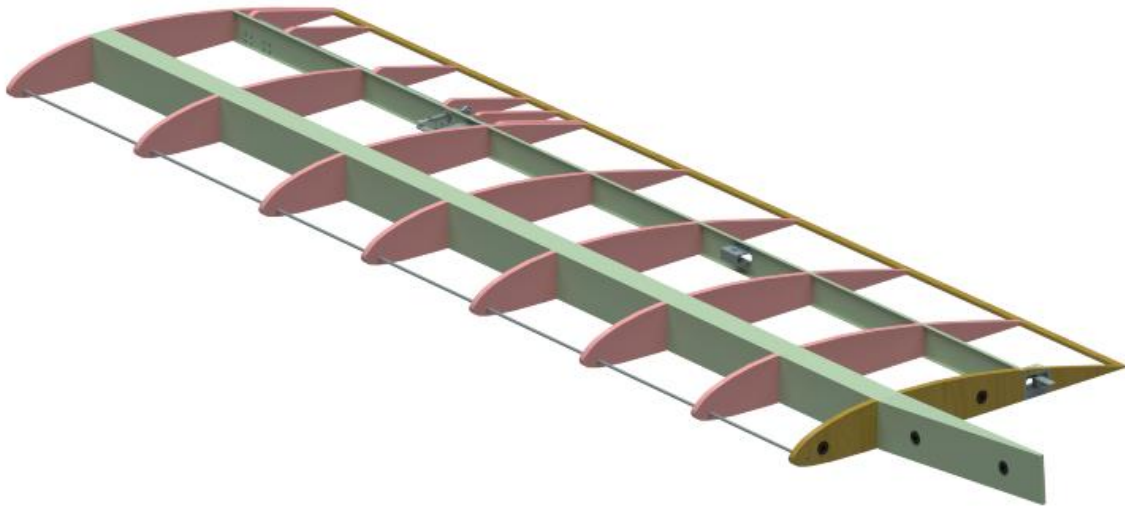
Segment podľa Obr.	Rebrá	Rozmery [mm]	Hrúbka [mm]/Počet vrstiev
53			
1	6-8	2900x1240	0,51/3
2	4-6	2900x1000	0,51/3
3	2-4	2900x1020	0,68/4
4	1-2	2900x450	0,68/4

Hrúbka poťahu bola určená na základe medze straty stability, hodnoty sú uvedené v Tab. 29. Rozmiestnenie uvažovaných poťahových segmentov je na Obr. 53. Vzhľadom na nižšie hodnoty mechanických vlastností skleneného laminátu vychádza hrúbka poťahu v najnamáhanejšom mieste 0,68 mm, čo odpovedá 4 vrstvám tkaniny 220 g/m². Odporúča sa overiť, či je možné laminát takejto hrúbky ohnúť na nábežnej hrane na požadovaný rádius. V prípade, že by to možné nebolo, dá sa použiť najhrubší možný poťah, ktorý dovoľuje požadované ohýbanie a zároveň sa pridajú pomocné rebrá, ktorými sa rozpolia aktuálne intervaly medzi rebrami. Takýmto opatrením sa zvýši medza stability jednotlivých poťahov.

Laminácia bude prebiehať na odmastených a odseparovaných hladkých drevotriekových doskách. Vzhľadom na značnú hrúbku poťahov je dobré jednotlivé poťahy vákuovo lisovať spolu so strhávacou a odsávacou tkaninou. Pri opatrnom zaobchádzaní a šetrnom sytení tkaniny živicom je možné vakuovací materiál použiť opakovane.

Vzhľadom na rozmery vyrábaných poťahov je potrebné počítat s prídavkom aspoň 100 mm v každom smere alebo podľa schopností staviteľa. Treba brať do úvahy, že pri takto rozmerných nástrihoch sklenej tkaniny s orientáciou vlákien $\pm 45^\circ$ je s ňou nutné manipulovať veľmi opatrne. Na konečný formát bude každý poťah orezaný až po vytvrdnutí.

7 Zostavovanie



Obr. 33.: Zostava konštrukcie pravého krídla

Kompletizácia krídla v domácich podmienkach vyžaduje plnú pozornosť staviteľa či už pri samotnom zostavovaní krídla alebo pri výrobe vhodných prípravkov. V tejto časti sa môžu zásadne prejaviť všetky nedokonalosti a nepresnosti, ktorých sa stavitel' počas výroby jednotlivých dielov dopustil. Zostavovanie draka pozostáva z etáp ustavovania a zostavovania.

Rozlišujú sa dva základné druhy prípravkov:

- Stabilné – vzhľadom k okoliu sú pevne umiestnené, zostavované časti a náradie sa k nim dopravujú.
- Mobilné – sú do nich ustavené a upnuté súčasti, ktoré sa dopravujú k strojom, kde sa obrábajú. [12]

7.1 Ustavovanie

Rozumie sa tým spôsob ustavovania dielov a častí konštrukcie vzhľadom k obrysu alebo súradnicovému systému, alebo ich navádzanie do presnej vzájomnej polohy pre výrobu spojov. Podľa požiadaviek na presnosť a predovšetkým podľa možností výrobcu existuje niekoľko filozofií, ako ustavovanie vykonať. V dnešnej dobe existujú 4 základné spôsoby ustavovania:

- Podľa rozmerania
- Na ustavovacie otvory
- Na kostru
- Na poťah

Podľa možnosti výrobcu musia byť jednotlivé diely postavené do presnej vzájomnej polohy a behom výroby spoju túto polohu aj udržať. V prípade kompozitných konštrukcií sa jedná o dlhšiu

dobu ako pri nitovaní. Preto je potrebné dbať na to, aby sa pri vytváraní lepeného spoja nemenili akékoľvek okolité podmienky. [12]

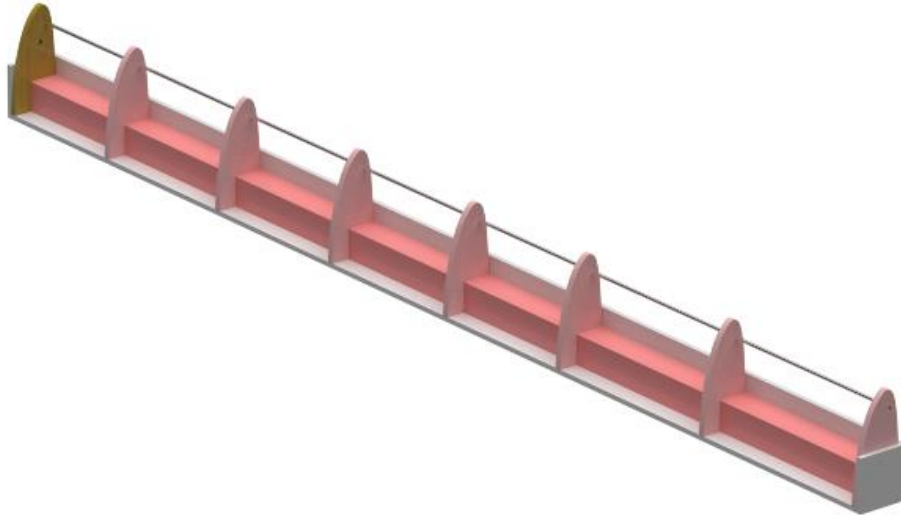
Vzhľadom na domáce možnosti prichádzajú do úvahy iba tie najjednoduchšie formy ustavovania, ktoré však aj tak dokážu zaručiť uspokojivé výsledky pri správnom prevedení. Z vyššie zmienených spôsobov tak prichádzajú do úvahy len prvé tri spôsoby. Ustavovanie prvkov primárnej konštrukcie bude prebiehať podľa rozmerania, keďže presné polohy rebier a nosníkov sú dobre známe a ľahko sa dajú premietnuť na rovinnú podložku. Prvky ako držiaky pák riadenia budú ustavované na ustavovacie otvory a poťah na kostru.

7.2 Lepenie

Pri spojovaní lepením treba dbať na vhodnú úpravu lepených povrchov a konštrukciu lepeného spoja. Povrchy je dobré zbrúsiť a očistiť ako od vzniknutého prachu, tak aj od možných zvyškov separačnej látky. Pozornosť treba venovať predovšetkým povrchom, ktoré prišli do styku napríklad s formou a sú tak príliš hladké.

Tieto zásady platia rovnako pre lepenie kompozitnej konštrukcie, aj pre lepenie kovu. Pre lepenie kompozitného materiálu sa bude používať epoxidový systém zhodný s laminačným systémom. Navyše bude zahustený bavlnenými vločkami, aby malo výsledné lepidlo schopnosť vyplňať prípadné nerovnosti a nestekalo. Všetky kovové časti budú lepené lepidlom Araldite 2011 bez dodatočných úprav.

7.3 Nábežná hrana



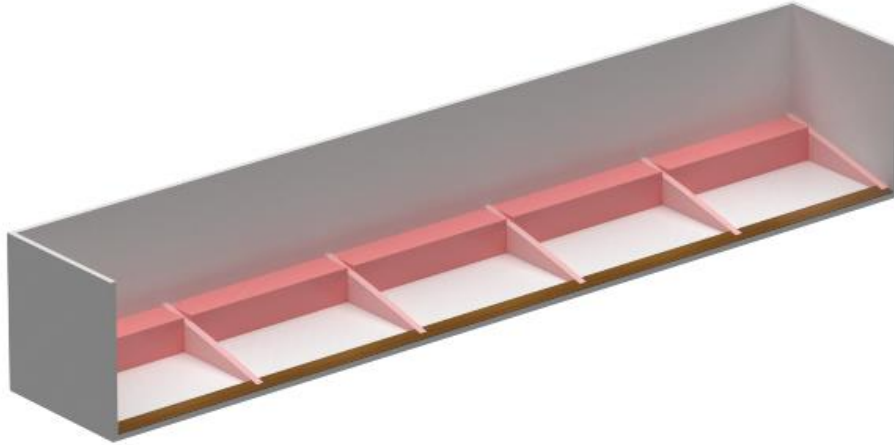
Obr. 34.: Nábežná hrana osadená v prípravku

Tento jednoduchý prípravok sa skladá zo skeletu vyrobeného z hladkej drevotrieskovej dosky, následne sú do neho striedavo vkladané segmenty rebier a vymedzovacích prvkov, ktoré môžu byť vyrobené z izolačnej peny, z ktorej sú vyrobené aj jadrá rebier.

- Suchá montáž – montáž bez lepenia. Zistia sa tak prípadné rozmerové nedokonalosti vymedzovacích prvkov alebo zásadná nesúososť dier.
- Pred konečným zostavením musí byť jasné, že sedí rozteč rebier podľa výkresovej dokumentácie a hliníková trubka ide jednoducho prevliecť všetkými otvormi.
- Akonáhle prebehla takáto kontrola, je možné zaistiť vymedzovacie prvky lepidlom. Potom stačí prevliecť trubku všetkými dierami, naniesť lepidlo a nechať vytvrdnúť.

Prípravok je použiteľný pre pravé aj ľavé krídlo bez akýchkoľvek zásahov.

7.4 Odtoková hrana



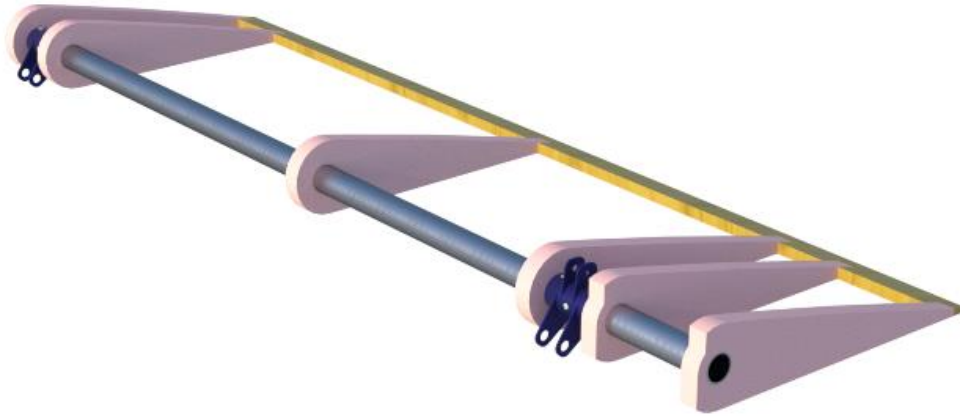
Obr. 35.: Přípravok osadený segmentom odtokovej hrany

Zostavenie odtokovej hrany bude prebiehať podobne ako zostavenie nábežnej hrany. Väčšie rozmery prípravku majú dôvod v použití jedného prípravku na obe krídla.

- Suchá montáž pre overenie správnosti rozmerov vymedzovacích prvkov.
- Po overení stačí do prípravku upevniť rebrá, na dosku odtokovej hrany naniesť lepidlo a umiestniť ju do pripravených drážok v rebrách. Odtokovú hranu je dobré zaistiť svorkami proti pohybu.
- Vyňatie z prípravku až po vytvrdnutí lepidla.

Prípravok je tiež použiteľný pre pravé aj ľavé krídlo.

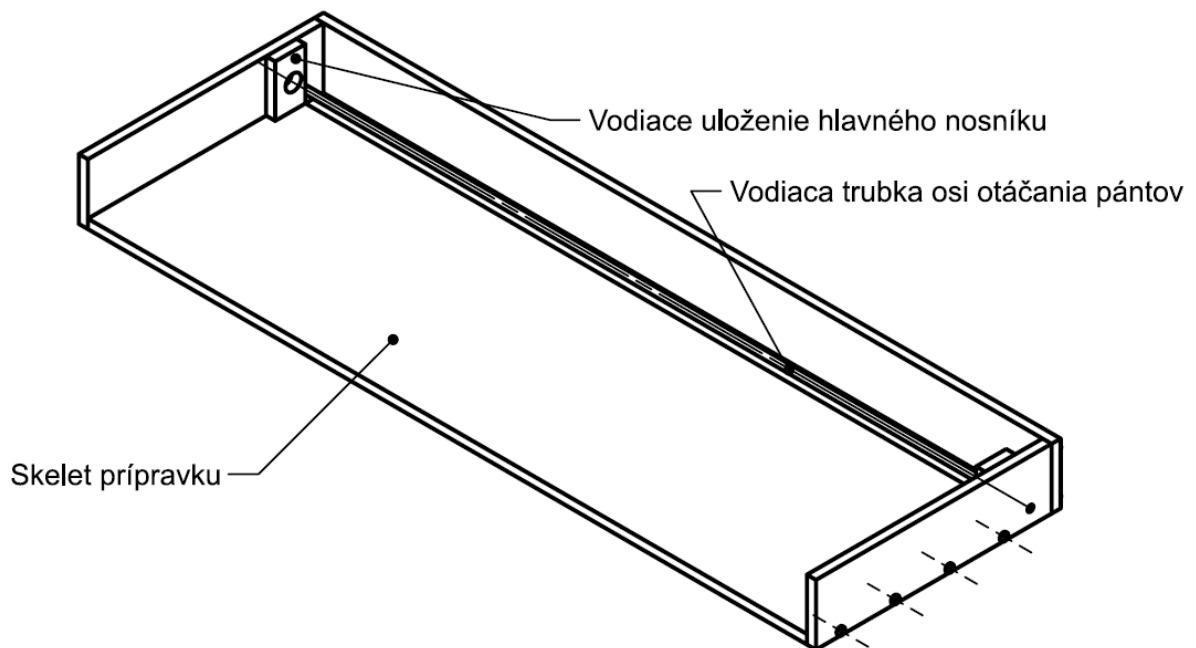
7.5 Krídelko



Obr. 36.: Zostava krídelka s pántami

Na Obr. 36 je zobrazená zostava krídelka, rozmery a rozmiestnenie jednotlivých prvkov sú uvedené v Príloha 8.

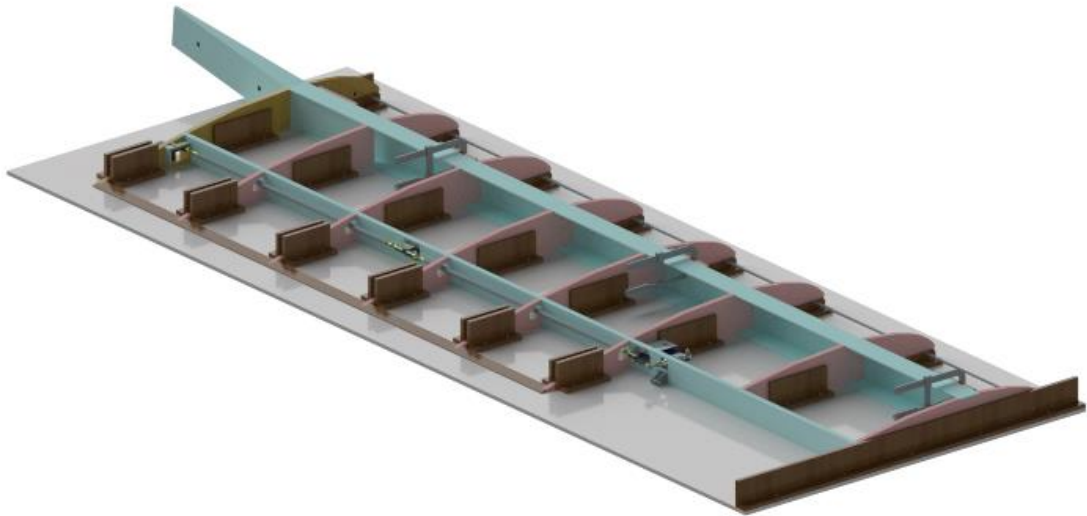
7.5.1 Zostavenie primárnej konštrukcie



Obr. 37.: Prípravok pre zostavenie nosníka s pántami

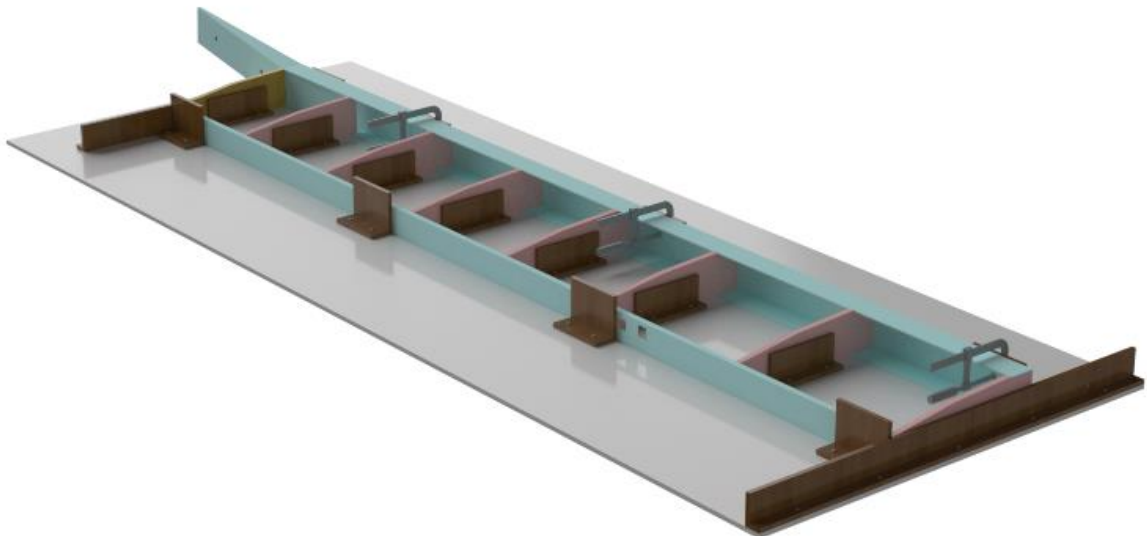
- Zostavenie nosníka a pántov. Princíp spojenia je obdobný ako pri tiahloch, kde sa pánty najskôr voľne nasunú na trubku nosníka, v prípravku sa zalepia a až následne sa vrtajú diery a nitujú.
- Ako prvé sa osadia pánty v požadovanej orientácii, na to sa použije prípravok na Obr. 37. Na nosník sa postupne navlečú všetky rebrá medzi pánty a samotné pánty. Pánty by sa mali dať jednoducho posúvať po nosníku, ak tomu tak nie je, použije sa nástroj na Obr. 28 a).
- Následne sa na konce nosníka navlečú vodiace uloženia nosníka. Takto zostavená časť krídelka sa vloží do prípravku a cez otvory v prípravku a diery v pántoch sa prevlečie vodiaca trubka.
- Liehovou fixkou sa vyznačia hranice pántu v zmontovanom stave, rovnomerne sa naniesie lepidlo a pánty sa presunú do tejto oblasti. V prípade potreby sa pridá lepidlo a pohne sa s pántami, prípadne s nosníkom tak, aby bolo lepidlo rozotreté rovnomerne po celej lepenej ploche. Skontroluje sa pozícia pántov a prebytočné lepidlo sa zotrie. V tejto pozícii sa nechá zostava vytvrdnúť.
- Po vytvrdnutí lepidla sa na stojanovej vrtačke navrtávajú diery na nity a zanitujú sa. Vrta sa ešte v prípravku, aby boli zabezpečené rovné oporné plochy. Po zanitovaní sa táto zostava vyberie z prípravku, odstráni sa vodiace uloženia, ktoré sa nahradia zvyšnými rebrami.
- Nová zostava sa vloží do prípravku a obdobne ako pri pántoch sa naniesie lepidlo a rebrá sa zlepia s nosníkom. Pozíciu rebier určujú výrezy v odtokovej hrane krídelka, do ktorých sa rebrá tak isto vlepia.

7.6 Krídlo

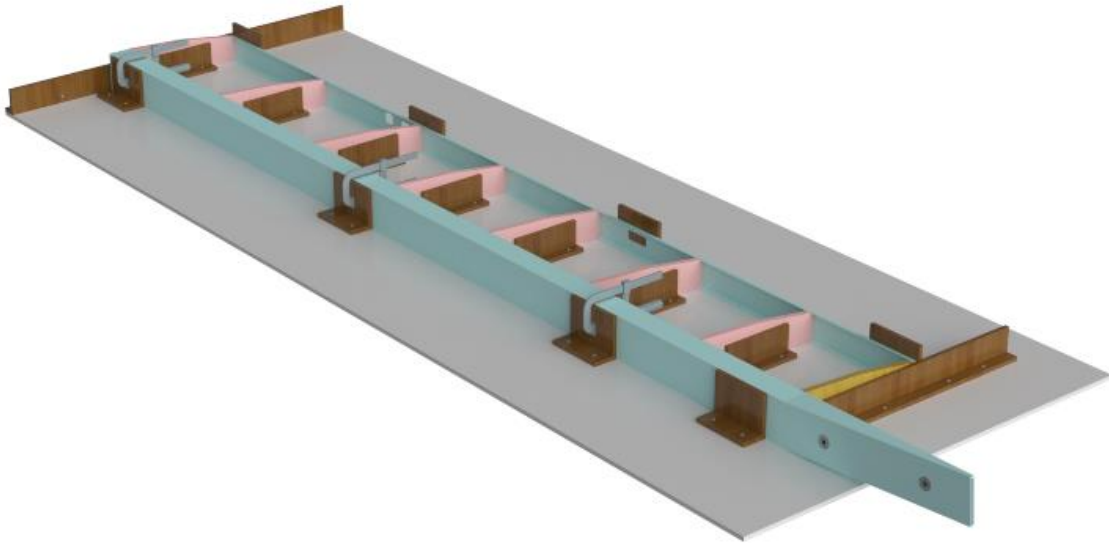


Obr. 38.: Přípravok osadený konštrukciou krídla s riadením

7.6.1 Zadná torzná komora



Obr. 39.: Pohľad od odtokovej hrany na ustavenú zadnú torznú komoru v prípravku



Obr. 40.: Pohľad od nábežnej hrany na ustavenú zadnú torznú komoru v prípravku

Prvý krok je výroba základne, na ktorú sa budú pripevňovať všetky vodiace prvky a krídlo. Je potreba pracovať veľmi obozretne a neustále kontrolovať správnosť umiestnenia upínacích prvkov alebo dier upínacích prvkov. Ich výroba má zásadný vplyv na ustavovanie jednotlivých dielov kostry.

- Pripevnenie koncového prvku – zarovnanie s hranami základne.
- Vrtanie dier pomocou prípravku – vrtajú sa len vyznačené diery, na vnútornej strane rebra.
- Pomocou toho istého prípravku sa pripevnia ustavovacie prvky hlavného nosníka v približne vyznačených rozostupoch – dávať pozor na neskoršiu kolíziu zvierky s rebrom.
- Pripevnenie hlavného nosníka pomocou zvierok k ustavovacím prvkom – neustále kontrolovať doliehanie nosníka k ustavovacím prvkom.
- Pripevnenie ustavovacích prvkov rebier do predvrtaných otvorov.

Nasleduje suchá montáž

- Prikladajú sa jednotlivé rebrá k ustavovacím prvkom do finálnej polohy. Pri rebrách 2-8 kontrolovať spoj rebro – hlavný nosník. V prípade potreby zbrúsiť.
- Pokiaľ sa rebro ľahko vsunie do nosníka, priloží sa ustavovací prvok rebra na druhú stranu a pritlačí sa o rebro tak, aby nešlo ľahko vytiahnuť a pripevní sa skrutkami o základňu.
- Následne sa priloží pomocný nosník a opäť sa kontroluje spoj pomocný nosník – rebro. V prípade potreby sa zbrúsi na vyhovujúci rozmer.
- Zaisť sa pohyb pomocného nosníka v osi x ustavovacími prvkami podobne ako pri hlavnom nosníku.
- Kontrola dosadnutia konštrukcie na dosku základne.
- Ak je všetko v poriadku, môže sa konštrukcia rozobrať a pripraviť na lepenie.

Príprava na lepenie

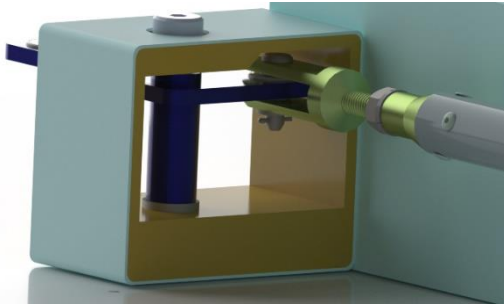
- Všetky lepené plochy sa obrúsia a očistia od prachu. Ak je to možné, odmastiť rozpúšťadlom – pozor, pri rebrách to nie je možné.
- Príprava lepidla – pre lepenie kompozitnej konštrukcie sa použije laminovacia živica zahustená bavlnenými vložkami. Pomer živice a tvrdidla sa zvolí podľa obalu. Množstvo bavlnených vložiek voliť také, aby výsledné lepidlo nestekalo, ale zároveň bolo dostatočne tekuté na to, aby nebránilo svojimi vlastnosťami v zostavovaní.

Lepenie

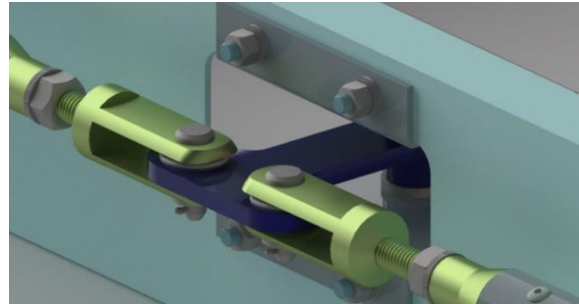
- Hlavný nosník sa upevní do prípravku. Lepidlo sa nanesie len na spodnú horizontálnu lepenú plochu.
- Na horizontálnu hornú a vertikálnu lepenú plochu rebra sa nanesie vrstva lepidla,
- Rebro s naneseným lepidlom sa vsunie na svoje miesto medzi ustavovacie prvky a následne do nosníka.
- Analogicky sa postupuje aj pri lepení pomocného nosníka – nosník sa nasúva na rebrá.
- Kontrola lepených spojov, v prípade potreby sa lepidlo v rohoch rozotrie alebo pridá.
- Takto ustavená a zlepená torzná komora 2 sa nechá vytvrdnúť.

7.6.2 Montáž riadenia

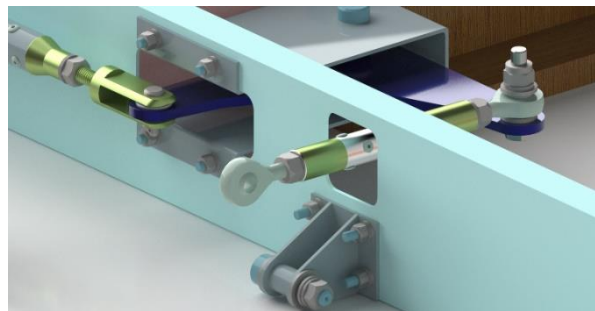
- Zostavia sa uloženia pák s pákami.
- Do pripravených otvorov sa namontujú takto zostavené časti sústavy riadenia. Plochou sa prilepia k pomocnému nosníku a ešte sa zaistia.



Obr. 41.: Zostava v Uložení 1

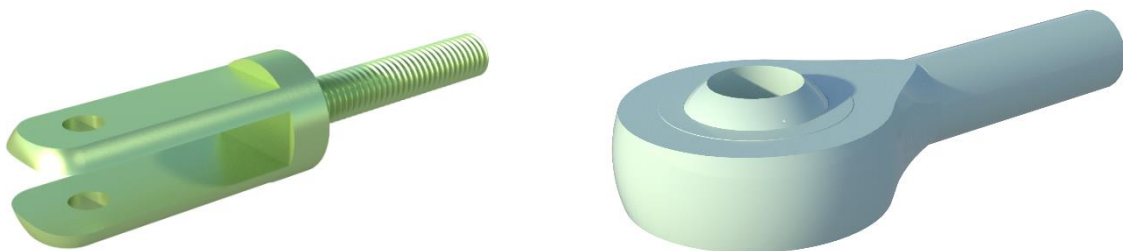


Obr. 42.: Zostava v Uložení 2



Obr. 43.: Zostava v Uložení 3

- Do hotových tiahel sa naskrutkujú vidlicové koncovky spolu s maticami a podložkami – zatiaľ sa nepríťahujú.



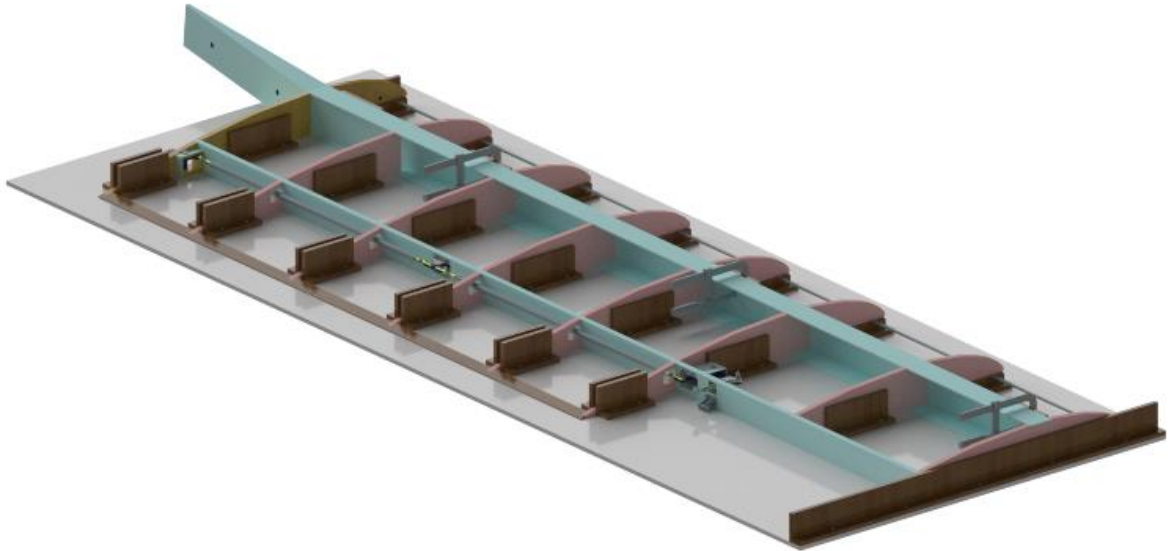
Obr. 44.: Koncovky tiahel - vidlica a klbové oko

- Zostavené tiahla sa namontujú medzi jednotlivé páky – poistia sa čapmi.
- Páka č. 1 sa ustaví do neutrálnej polohy (bude zvierat' uhol 90° s koreňovým rebrom) a v tejto polohe sa zaistí.
- Otáčaním tiahla 1 sa dosiahne ustavenie páky 2 do neutrálnej polohy (ramená zvierajú s pomocným nosníkom uhol 0°). V tejto polohe sa tiahlo zaistí.
- Otáčaním tiahla 2 sa nastaví páka 3 do neutrálnej polohy a zaistí sa.

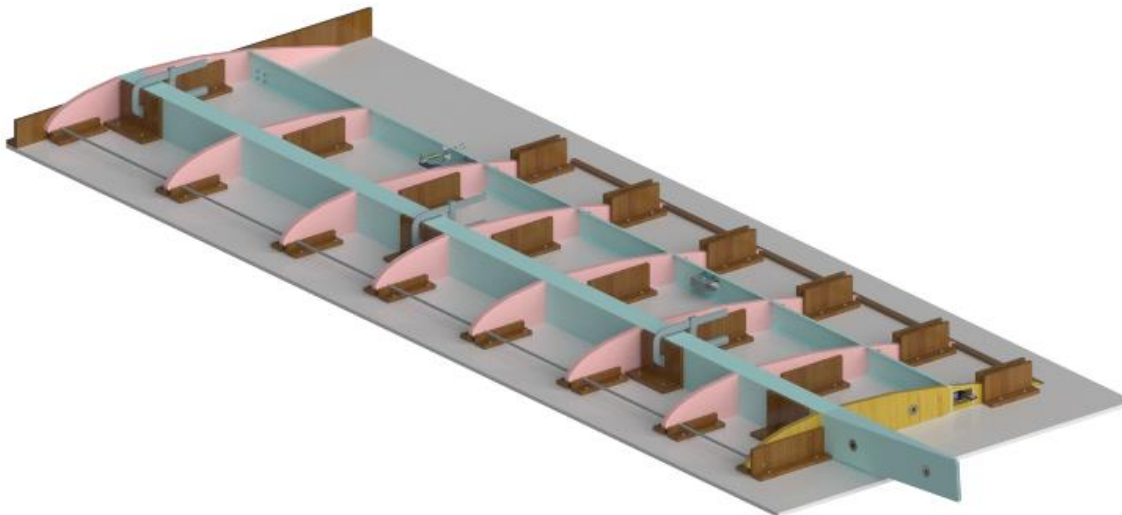
- Tiahlo 3 je naskrutkované do páky 3 na doraz. Následne sa zaskrutkuje aj do páky krídelka a oba spoje sa zaistia.

7.6.3 Montáž nábežnej a odtokovej časti krídla

- Postup obdobný ako pri zostavovaní torznej dutiny 2



Obr. 45.: Ustavenie odtokovej časti krídla v prípravku



Obr. 46.: Ustavenie nábežnej časti krídla v prípravku

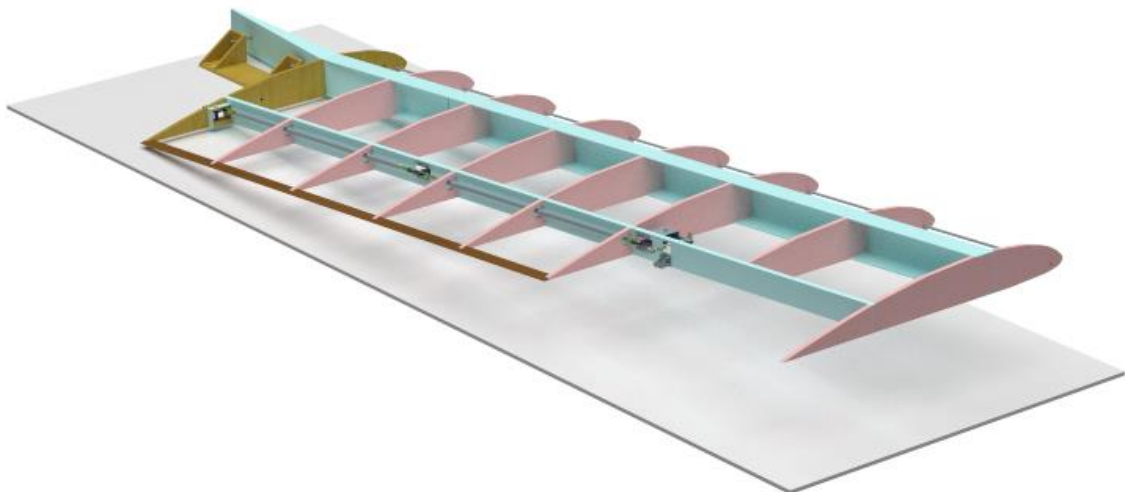
7.6.4 Poťah

Pred lepením poťahu je nutné skontrolovať správnosť prevedenia lepených spojov a funkčnosť riadenia. Po dokončení lepenia je potrebné očistiť prípadné zatečené lepidlo a skontrolovať kontúry krídla. Treba sa vyhnúť akýmkoľvek nerovnostiam a skokovým zmenám v rozmeroch.

Pri danej technológii výroby nie je možné efektívne riadiť hrúbku vrstvy lepidla. Najdôležitejšie je dbať na to, aby boli všetky lepené plochy konštrukcie spojené po celej ploche s poťahom. To zaručuje takú únosnosť poťahu, na akú bol navrhnutý.

Lepenie poťahu si vyžaduje prestavbu prípravku na zostavovanie primárnej konštrukcie. Upínacie prvky už nebudú vôbec potrebné, no je nutné zabezpečiť jednoduché zdvíhanie alebo vyklápanie krídla tak, aby sa dali poťahy lepíť po jednom segmente a zároveň by sa nemusel zakaždým prácne ustavovať poťah alebo konštrukcia do ideálnej polohy.

Na Obr. 47 až Obr. 49 je zobrazený prípravok zabezpečujúci vyklápanie krídla. V polohe, v akej je krídlo na Obr. 47, je však veľmi exponované vonkajším silám v smere osi x. Na takéto namáhanie nosník nie je dimenzovaný a prílišným zaťažením koncu krídla v osi x by mohlo dôjsť k poškodeniu nosníka vplyvom vzniknutého ohybového momentu.



Obr. 47.: Odklopené krídlo v prípravku

Preto pri lepení poťahov, keď je krídlo vo vodorovnej polohe, bude zaistené pomocou niekoľkých bodov. Využitie budú diery na čapy v koreňovom rebre a podobný prvok bude uchytený na koncovom rebre.

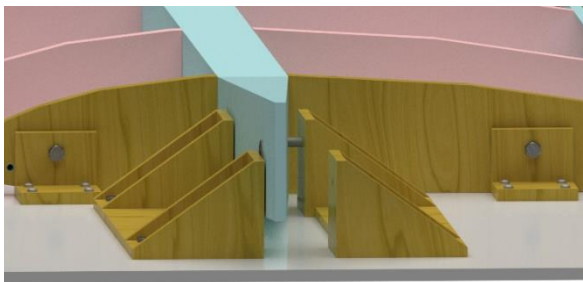


Obr. 48.: Křídlo ležiacie na základni prípravku

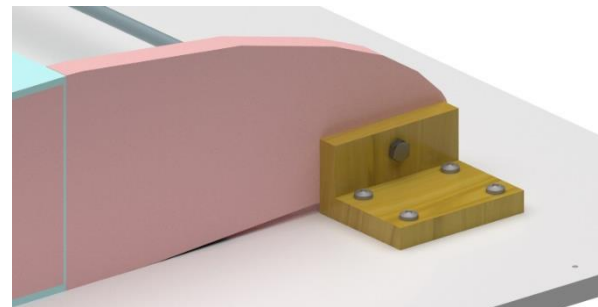


Obr. 49.: Odklopené křídlo zaistené pomocou skrutky

Aj napriek niekoľkonásobnému zaisteniu křídla sa odporúča čo najmenej pôsobiť na křídlo v zmysle osi x. Zaisťovacie prípravky, do ktorých je upevnené křídlo, sú zobrazené na Obr. 50 a Obr. 51.



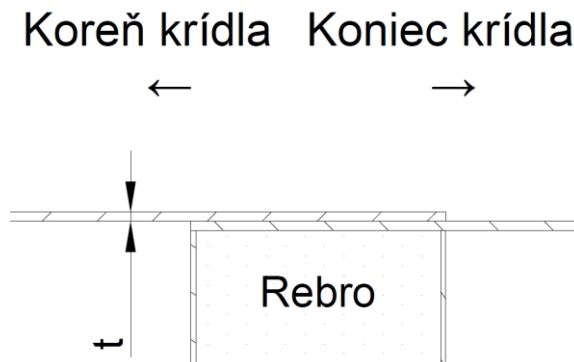
Obr. 50.: Upínacie prvky na koreňovom rebre



Obr. 51.: Upínací prvok na koncovom rebre

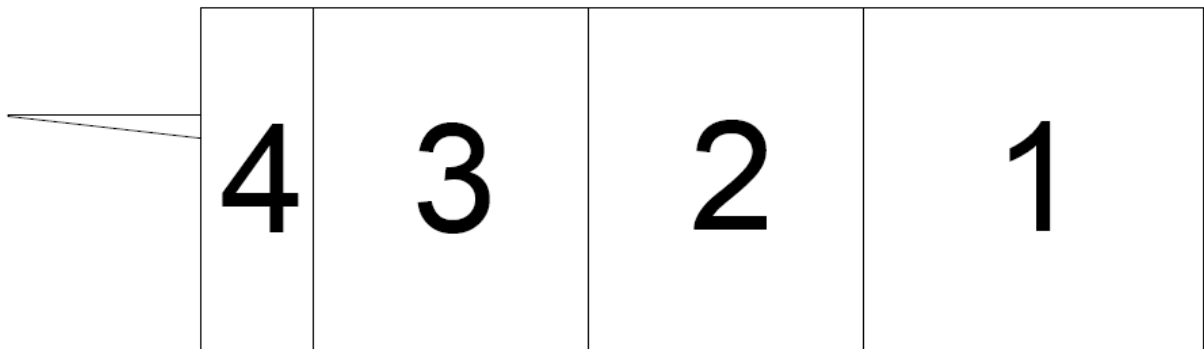
Samotnému lepeniu poťahov predchádza už len obkreslenie jednotlivých rebier na základovú dosku prípravku, aby sa zjednodušilo ustavovanie segmentov poťahu.

Poťahový segment sa berie vždy pre 3 rebrá, jedine pre koreňové rebro a rebro 2 sa berie jeden samostatný segment. Kvôli zvýšeniu únosnosti poťahu medzi koreňovým rebrom a rebrom 2 sa môže medzi ne vložiť ešte jedno pomocné rebro. Poťah sa začína lepiť od koncového rebra a na spojovacom rebro vznikne preklad dvoch poťahov, vid' Obr. 52.



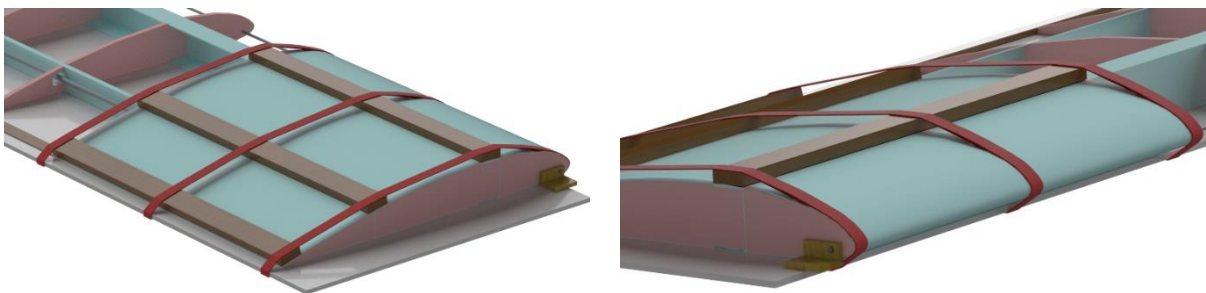
Obr. 52.: Rez krídlom s prilepeným poťahom

Lepenie poťahu prebieha tak, že sa podľa načrtnutých kontúr na základovej doske prípravku ustaví segment poťahu a pri odtokovej hrane sa priskrutkuje. Znova sa obkreslia kontúry konštrukcie krídla, tentokrát na poťah. Do týchto kontúr sa nanesie lepidlo. Následne sa odklopné krídlo spustí a zaistí sa do kotviacich prvkov, čo zabezpečí rovnomerné pritlačenie konštrukcie k poťahu.



Obr. 53.: Členenie poťahových segmentov

Lepidlo sa nanesie na chrbát rebra a prevísajúci poťah sa ohne okolo nábežnej hrany a zvyšku rebra. V tomto okamihu už sú pripravené upínacie pásy a prítlačné dosky. Upínacie pásy sú umiestnené v miestach rebier a prítlačné dosky sú v miestach nosníkov a odtokovej hrany. Podľa potreby sa môžu pridať aj do oblasti nábežnej hrany.



Obr. 54.: Krídlo v prípravku pri lepení poťahu 1, ktorý je stiahnutý upínacími pásmi

Na konci odtokovej hrany sa podobne ako na začiatku poťah priskrutkuje k základovej doske. V tejto polohe sa nechá vytvrdnúť. Následne sa odstránia skrutky a postup sa zopakuje pre ďalší segment.

Segment 4, pri ktorom vychádza najnižšia istota, je možné inštalovať iným spôsobom ako ostatné. Je možné ho rozdeliť na 3 časti tak, ako to bolo pri výpočtoch. Prvé by sa nalepili časti poťahov, ktorým odpovedá označenie 2 a 3 v znázornení na Obr. 8. Až následne by sa nalepila časť poťahu 1, teda nábežná hrana. Týmto spôsobom sa dá dosiahnuť použitie hrubších poťahových segmentov tam, kde to je nevyhnutné.

7.6.5 Predbežná kontrola hmotnosti

Na základe vytvoreného 3D modelu a predpokladaných použitých materiálov bola zostavená predbežná kalkulácia hmotnosti vyrobeného krídla s osadeným riadením. Zavedením vákuového lisovania sa podarilo dosiahnuť značné úspory v konštrukcii, no stále ide o pomerne ťažké krídlo. Presnejšia kalkulácia závisí od znalosti materiálových vlastností, ktoré môžu priaznivo ovplyvniť potrebnú hrúbku poťahu.

Veľmi premenlivou zložkou hmotového rozboru je aj množstvo lepidla, ktoré sa použije na spájanie celej konštrukcie. V tomto prípade záleží predovšetkým na presnosti vyhotovenia jednotlivých lepených spojov.

Položka	Hmotnosť bez vákuovania [kg]	Hmotnosť s vákuovaním [kg]
Hlavný nosník	6,94	4,53
Pomocný nosník	2,17	1,42
Rebrá (započítané aj pomocné)	4,1	4,1
Poťah	16,94	11,06
Riadenie	2	2
Lepidlo	5	5
1 krídlo	37,15	28,11
Obe krídla	74,3	56,22

8 Rozpočet

Celková cena letúna postaveného svojpomocne doma by mala byť podľa predchádzajúceho predbežného návrhu okolo 50 000 Kč. [1] To je naozaj lákavá cena, no treba brať do úvahy, čo do tohto rozpočtu skutočne patrí.

Pre zjednodušenie sa uvažuje len stavebný materiál bez strojového a nástrojového vybavenia. Konštrukcia sa nezaobíde bez kovových súčastí, ktoré sú stále jednoduchšie na výrobu ako obdobné kompozitné prvky. Napríklad časti riadenia je stále jednoduchšie vyrobiť z kovu ako z kompozitného materiálu, ktorý by vyžadoval zložité formy a obrábanie. Pokiaľ sa bude brať do úvahy len cena materiálu, prípadne ceny polotovarov a spojovacieho materiálu, rozpočet na stavbu takéhoto krídla je uvedený v Tab. 30.

Tab. 30.: Rozpis potrebného stavebného a pomocného materiálu [6], [18], [19]

Položka	Množstvo na jedno krídlo	Jed. cena Kč	Cena za jedno krídlo Kč	Množstvo na obe krídla	Cena za obe krídla Kč
Jednosmerná sklená tex. 220 g/m ² (m ²)	3,8	167,89	637,98	7,6	1 275,96
Sklené plátno 220 g/m ² (m ²)	56	42,35	2 371,60	112	4 743,20
Epoxidová živica LH 385 (kg)	9,3	234	2 176,20	18,6	4 352,40
Tužidlo H286 (pre H286) (kg)	3,7	526	1 946,20	7,4	3 892,40
Plnivo bavlnené vložky (kg)	1	309	309	2	618,00
Separáčny vosk Oskar´s WAX (ks)	1	441	441	1	441,00
Vakuovací rukáv PO180 š. 120 cm (m ²)	15	69	1 035	30	2 070,00
Odsávací rohož 200 g/m ² (m ²)	3	60,8	182,4	6	364,80
Strhávací tkanina 83 g/m ² (m ²)	15	41	615	30	1 230,00
Tesniaca hmota LSM1310 15m (ks)	1	198,91	198,91	1	198,91
Hadička 8x6 (m)	10	34,8	348	10	348,00
Lepidlo Araldite 2011 zložka A+B (ks)	1	1 177	1 177	1	1 177,00
Preglejka 1250x2200x15 (ks)	1	1 438,00	1 438,00	1	1 438,00
Drevotrieska 2070x2800 (ks)	2,48	694	1 721,12	2,48	1 721,12
Styrodur 1250x600x20 mm (ks)	2,1	96	201,6	4,2	403,20
Skrutky do dreva (ks)	(200 ks)	103,68	103,68	2	207,36
Klzná vložka (ks)	6	34,44	206,64	12	413,28
Guľové klzné ložisko NHBB ABT4V (ks)	5	72,53	3 62,65	10	725,30
Kíbová hlavica s vonkajším závitom (ks)	2	448	896	4	1 792,00
Vidlice K-501-021 (ks)	2	263,1	526,2	4	1 052,40
Vidlice K-501-023 (ks)	2	263,1	526,2	4	1 052,40
Koncovka tiahla K-501-004 (ks)	2	135	270	4	540,00
Koncovka tiahla K-501-004L (ks)	2	135	270	4	540,00
Koncovka tiahla K-501-001 (ks)	1	135	135	2	270,00
Koncovka tiahla K-501-001L (ks)	1	135	135	2	270,00
Trubka Tr20x18 EN6060 (m)	2,2	22,33	49,13	4,4	98,25
Trubka Tr16x12 EN6060 (m)	0,07	37	2,59	0,14	5,18

Čap 6x22x2 B ISO 2341 – St (ks)	4	66,79	267,16	8	534,32
Závlačka 1,8 x 8 ISO 1234 – St (ks)	4	0,43	1,72	8	3,44
Skrutka M8 x 30 ISO 7379-12.9 (ks)	2	27,15	54,3	4	108,60
Skrutka M8 x 60 ISO 7379-12.9 (ks)	2	45,25	90,5	4	181,00
Podložka 8 ISO 7089 (ks)	7	2,46	17,22	14	34,44
Podložka 8 DIN 127B (ks)	7	0,5	3,5	14	7,00
Matica M8 ISO 7040 (ks)	7	0,97	6,79	14	13,58
Podložka 10 ISO 7089 (ks)	10	3,7	37	20	74,00
Skrutka M5 x 16 DIN 6921 (ks)	16	1,65	26,4	32	52,80
Podložka 5 ISO 7089 (ks)	16	0,27	4,32	32	8,64
Podložka 5 DIN 127B (ks)	16	0,28	4,48	32	8,96
Matica M5 ISO 7040 (ks)	16	0,35	5,6	32	11,20
Skrutka M16 x 90 ISO 7379-12.9 (ks)	2	133,5	267	4	534,00
Podložka 16 DIN 127B (ks)	2	2,26	4,52	4	9,04
Matica M16 ISO 7040 (ks)	2	7	14	4	28,00
Výpalky (páky, vložky)	Individuálna cena podľa možností staviteľa				
Výsledná cena za obe krídla	32 849,2				

Výsledná cena za obe krídla vyšla vyššia ako sa očakávalo, no stále je to suma, ktorá je v porovnaní s komerčne dostupnými ultra ľahkými lietadlami veľmi nízka. Samozrejme, v rozpočte nie je zahrnutá práca staviteľa a tak isto ani cena náradia a strojného vybavenia. Tieto položky už môžu byť vo vybavení dielne, prípadne inak dostupné.

Skutočná cena za obe krídla, respektíve celé lietadlo sa môže líšiť v závislosti od ponuky materiálu a schopností staviteľa. Väčšina stavebného materiálu je zameniteľná, predovšetkým sa to týka spojovacieho materiálu. Tak isto aj ceny a množstvá bežného spojovacieho materiálu sú len informatívne. Najvyššou mierou sa na cene podieľajú stavebné materiály ako je sklenená tkanina a epoxidová živica, ktoré tvoria prakticky polovicu výslednej ceny. Pod výslednú cenu sa podpísali aj špeciálne súčiastky pre letecký priemysel, ako sú koncovky ťiahel.

Veľmi premenlivou zložkou sú aj vyrábané kovové zvarané súčasti, pri nich je rozhodujúca dostupnosť vhodnej technológie a schopnosti staviteľa v tejto oblasti. Tieto položky neboli do rozpočtu započítané.

9 Závěr

V prvej časti diplomovej práce bol vykonaný konštrukčný návrh krídla podľa predchádzajúceho predbežného návrhu, na základe ktorého bolo zvolené krídlo s 8 rebrami zo sendvičového materiálu, s jedným hlavným a jedným pomocným nosníkom. Spojenie krídel s trupom bolo navrhnuté pomocou predĺženia nosníkov, tzv. krakorcom. Poťah krídla bol navrhnutý z tenkej laminátovej dosky. Rozmiestnenie rebier a poloha nosníkov bola zachovaná podľa predchádzajúceho návrhu.

Na základe konštrukčného návrhu boli dimenzované nosné prvky konštrukcie krídla a určené základné tvary nosníkov, ich rozmery a materiálové zloženie. Dôraz bol kladený na jednoduchosť tvarov a výroby. Ďalej boli dimenzované poťahy a krakorce. Kvôli neistote vo výpočte mechanických vlastností použitých materiálov, predovšetkým v prípade poťahov ide o predbežné výsledky, ktoré budú musieť byť podložené materiálovými skúškami. Všetky výpočty boli analytické, založené na dlhodobom známych empirických vzorcach, čo mohlo spôsobiť predimenzovanie konštrukcie.

Následne prebehol návrh riadenia krídeliek. Bolo zvolené riadenie pomocou sústavy tiahel, ktoré prešli základným dimenzovaním na vzper. Súčasne bolo vypočítané zaťaženie krídelka a určené základné parametre pre pokročilejšie dimenzovanie trasy riadenia. Práve trasa riadenia môže byť z technologického hľadiska problematická, nakoľko páky boli navrhnuté ako zvarence. Zvolením lanovej trasy riadenia by sa ušetrila hmotnosť a obmedzilo zváranie, no stále by pri niektorých dieloch bolo nutné.

V ďalšej časti bol navrhnutý spôsob výroby nosných prvkov krídla. Hlavný a pomocný nosník sú vyrábané laminovaním do formy a líšia sa len zložitou konštrukciou. Uvedený je aj návrh výroby uložení pák trasy riadenia krídeliek a spôsob zostavenia tiahel a pák riadenia.

Výroba poťahov si nevyžaduje špeciálne formy, laminujú sa priamo na rovnú hladkú dosku. Prvotný predpoklad na hrúbku poťahu, ktorý bol rádovo 0,4 mm sa podľa výpočtov nepotvrdil a hodnota hrúbky poťahu vyšla 0,68 mm. Pre zachovanie čo najmensej hrúbky bolo nutné nahradiť jednoduchú technológiu ručného laminovania vákuovým lisovaním s odsávacou tkaninou. Navyše bolo potrebné pridať pomocné rebrá, ktoré rozdelia polia medzi rebrami na polovicu. Dosiahli sa tak lepšie mechanické vlastnosti, značná úspora hmotnosti a akceptovateľná hrúbka, ktorej vlastnosti je ešte potrebné potvrdiť materiálovými skúškami a experimentmi.

S ohľadom na podmienky stavby lietadla bola navrhnutá koncepcia prípravkov, kde bola využitá plochá časť profilu CLARK Y. Ide o jednoduchý prípravok so základovou doskou, ku ktorej sa najprv ustavujú upínacie prvky. Následne sa medzi ne upínajú časti konštrukcie a prebieha lepenie. Nakoniec bol navrhnutý spôsob montáže poťahu na hotový drak krídla. K montáži poťahu sú potrebné upínacie pásy a úprava prípravku na jednoduché vyklápanie krídla.

Zároveň bola skontrolovaná hmotnosť krídla, ktorá vyšla vyššia ako predpokladaná. Ide len o odhad na základe použitia predpokladaných materiálov. Neistota spočíva v neznalosti skutočných mechanických vlastností materiálu a hlavne v množstve použitého lepidla na celej konštrukcii.

V poslednom bode bola vykonaná kontrola nákladov, pričom sa cena konštrukcie dostala na vyššie čísla ako sa predpokladalo. Na pomery športových lietadiel je to však stále nízka cena. Do rozpočtu neboli zavedené silne premenné prvky závisiace od staviteľa a jeho zázemia.

Zoznam použitých symbolov

A	$[mm^2]$	Plocha
a	$[mm]$	Poloha hlavného nosníka
b	$[mm]$	Poloha pomocného nosníka
b_0	$[mm]$	Hĺbka koreňového profilu krídla
b_k	$[mm]$	Hĺbka koncového profilu krídla
b_{kr}	$[mm]$	Hĺbka krídelka
C_L	$[-]$	Súčiniteľ vztlaku krídla
E	$[GPa]$	Youngov modul pružnosti
E_M	$[GPa]$	Youngov modul pružnosti matrice
E_F	$[GPa]$	Youngov modul pružnosti vlákna
f	$[-]$	Súčiniteľ bezpečnosti
f_u	$[-]$	Konečný súčiniteľ bezpečnosti
G	$[N]$	Tiažová sila
h	$[mm]$	Stavebná výška profilu
h_e	$[mm]$	Efektívna stavebná výška nosníka
J	$[mm^4]$	Kvadratický modul prierezu
J_{Hx}	$[mm^4]$	Kvadratický modul prierezu hlavného nosníka k ose x
J_{Px}	$[mm^4]$	Kvadratický modul prierezu pomocného nosníka k ose x
j	$[-]$	Istota výpočtu
j_{pr}	$[-]$	Prevádzková istota
j_p	$[-]$	Výpočtová istota
k_{II}	$[-]$	Podiel vláken v danom smere
K	$[-]$	Súčiniteľ uloženia dosky
K_S	$[-]$	Súčiniteľ tvaru dosky a jej uloženia
L	$[N]$	Vztlková sila
l	$[mm]$	Rozpätie krídel
l_1	$[mm]$	Dĺžka poťahu prednej torznej dutiny
l_2	$[mm]$	Dĺžka horného poťahu zadnej torznej dutiny
l_3	$[mm]$	Dĺžka dolného poťahu zadnej torznej dutiny
M_o	$[N \cdot mm]$	Ohybový moment
M_K	$[N \cdot mm]$	Krútiaci moment
M_H	$[N \cdot mm]$	Závesový moment
n	$[-]$	Násobok, Počet vrstiev
q	$[N/mm]$	Šmykový tok
q_0	$[N/mm]$	Merný šmykový tok
q_H	$[N/mm]$	Šmykový tok na stojine hlavného nosníka
q_P	$[N/mm]$	Šmykový tok na stojine pomocného nosníka
q_{pr}	$[N/mm]$	Šmykový tok na prednej torznej dutine
q_{za}	$[N/mm]$	šmykový tok na zadnej torznej dutine
R_m	$[N \cdot mm^{-2}]$	Medza pevnosti materiálu
R_p	$[N \cdot mm^{-2}]$	Medza klzu materiálu

r	[mm]	Poloha výsledného zaťaženia od osi otáčania
r_0	[mm]	Poloha výsledného zaťaženia od nábežnej hrany
r_1	[mm]	Poloha pôsobiska čiastkového zaťaženia
r_2	[mm]	Poloha pôsobiska čiastkového zaťaženia
S	[mm ²]	Plocha krídla
T	[N]	Posúvajúca sila
t	[mm]	Hrúbka materiálu
t_1	[mm]	Hrúbka predného poťahu
t_2	[mm]	Hrúbka zadného horného poťahu
t_3	[mm]	Hrúbka zadného spodného poťahu
t_h	[mm]	Hrúbka stojiny hlavného nosníka
t_p	[mm]	Hrúbka stojiny pomocného nosníka
U_1	[mm ²]	Plocha prednej torznej dutiny
U_2	[mm ²]	Plocha zadnej torznej dutiny
v_c	[m/s]	Cestovná rýchlosť
W	[Pa]	Spojité zaťaženie
\bar{W}	[Pa]	Merné spojité zaťaženie
z	[mm]	Súradnica v smere z
Δx	[mm]	Vzdialenosť OEO od hlavného nosníka
ρ	[kg/m ³]	Hustota
ρ_f	[kg/m ³]	Hustota výstuže
ρ_m	[kg/m ³]	Hustota matrice
ϕ	[-]	Objemový podiel (výstuže/matrice)
ψ	[-]	Hmotnostný podiel (výstuže/matrice)
σ	[N · mm ⁻²]	Normálové napätie
τ	[N · mm ⁻²]	Šmykové napätie
μ	[-]	Poissonova konštanta materiálu

10 Zdroje

- [1] ŠLACHTA, Michal. *Návrh Low-Cost letounu kategorie UL*. Praha, 2019.. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav letadlové techniky.
- [2] MIKULA, Jan. *Konstrukce a projektování letadel II*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-010-3338-4.
- [3] FUNKE, Herbert. *Systematische Entwicklung von Ultra-Leichtbaukonstruktionen in Faserverbund-Wabensandwichbauweise am Beispiel eines Kleinflugzeuges*. Paderborn, 2001.. Dizertační práce. Universität Paderborn.
- [4] UL 2 - Část VI.: *Požadavky letové způsobilosti SLZ - Ultralehké letouny řízené aerodynamicky*. 1. Praha, ČR: Letecká amatérska asociace ČR, 2019.
- [5] LANDESMANN, Alexandre, *Carlos SERUTI a Eduardo BATISTA*. Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polymers Members for Structural Applications. *Materials Research*. 2015, 18(6), 1372-1383. DOI: 10.1590/1516-1439.044615. ISSN 1980-5373.
- [6] Havel composites [online]. *Svésladice: Havel Composites CZ s.r.o.*, 2019 [cit. 2020-02-13]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/cs/>
- [7] GLASS FILAMENT FABRICS *for PLASTICS REINFORCEMENT: PRODUCT SPECIFICATION*. In: R&G Faserverbundwerkstoffe [online]. Erbach: Porcher Industries Germany GmbH, 2014 [cit. 2020-06-30]. Dostupné z: http://www.ezentrumbilder.de/rg/pdf/td_en_style%2092145.pdf
- [8] ČTVERÁK, J., *J. MERTL a Antonín PÍŠTĚK*. Soubor podkladů pro pevnostní výpočty leteckých konstrukcí. Brno: VUT FSI, 1997.
- [9] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů [online]*. 1. Brno: VUT, 2008 [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340
- [10] ŠPUNDA, Jaromír. *Stavební mechanika a pevnost letounu: Část VI*. Brno: Vojenská akademie Antonína Zápotockého, 1971.
- [11] Strojnické tabulky: *pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 3., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2006, s. 54. ISBN 80-7361-033-7.
- [12] MERTL, Vlastimil. *Konstrukce a projektování letadel*. Brno: PC-DIR Real, 2000. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1789-7.
- [13] LONTRAS, Martin. *Výpočet zatížení a konstrukční návrh řízení*. Brno, 2018.. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav.
- [14] ŠUL'ŽENKO, Michail. *Konstrukce letadel. 2. oprav. vyd.* Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954. Knižnice kovoprůmyslu (Státní nakladatelství technické literatury).
- [15] BigHead bonding fasteners [online]. *Verwood: bigHead Bonding Fasteners Ltd*, 2020 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://www.bighead.co.uk/>
- [16] Ing. Petr Spáčil - *kovoobrábění [online]*. Moravské Bránice: SPÁČIL PETR Ing.-KOVOOBRÁBĚNÍ [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <http://www.kovo-spacil.cz/alloys/cz.htm>
- [17] Kašpar [online]. *Praha: Kašpar a synové - strojírna Kalmar s.r.o.*, 2009 [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: [Kašpar a synové - strojírna Kalmar s.r.o.](http://www.kashpar.cz/)

- [18] Spojovaci-material.net [online]. *Hrušovany nad Jev.*: Prumex s.r.o., 2017 [cit. 2020-07-07].
Dostupné z: <http://www.spojovaci-material.net/>
- [19] Dřevoobchod K&C *Karlovy Vary a. s.* [online]. Karlovy Vary: Dřevoobchod K&C Karlovy Vary a. s., 2020 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.drevoobchod-eshop.cz/>

Zoznam použitých obrázkov

Obr. 1.: Systémový výkres krídla [1]	2
Obr. 2.: a) Krídlo s tromi závesmi b) Krídlo so vzperou c) Predĺženie nosníka – krakorec [2]	3
Obr. 3.: Obálka letových násobkov pri MTOW [1]	5
Obr. 4.: Graf priebehu T, Mo a Mk po polorozpätí krídla v bode D	7
Obr. 5.: Graf priebehu T, Mo a Mk po polorozpätí krídla v bode E	7
Obr. 6.: Tvar a rozmery pásnic	14
Obr. 7.: Poloha nosníkov a OEO	16
Obr. 8.: Rez krídlom - zobrazenie torzných komôr	17
Obr. 9.: Zostava ľavého a pravého krídla	24
Obr. 10.: Priebeh zaťažujúcich účinkov na nosník krídelka	27
Obr. 11.: Možnosti vyhotovenia koncoviek tiahel [14]	28
Obr. 12.: a) Páka zvarená z dvoch polovic b) Lisované c) Zvárané z trubiek [14]	30
Obr. 13.: Forma nosníka. Zhora: pravý a ľavý	32
Obr. 14.: Penové jadro krakorca pravého krídla	33
Obr. 15.: Penové jadro krakorca ľavého krídla	34
Obr. 16.: Zľava: a) Skladba nosníka v miestach bez krakorca b) Skladba nosníka s krakorcom ...	35
Obr. 17.: Vložka krátka	36
Obr. 18.: Vložka dlhá	36
Obr. 19.: Rez pomocným nosníkom	37
Obr. 20.: Tvar segmentov rebra a požadovaný smer vlákien potáhovej sklenej textílie	38
Obr. 21.: Vložka s prírubou	39
Obr. 22.: Schéma sústavy riadenia krídelka	40
Obr. 23.: Schéma skladby materiálov Uloženia 1	41
Obr. 24.: Uloženie 1	41
Obr. 25.: Schematické zobrazenie výroby uloženia 2 a 3	42
Obr. 26.: Uloženie 2	42

Obr. 27.: Uloženie 3	42
Obr. 28.: Zľava: a) Držiak brúsneho papiera b) Upínací prvok pre koncovku tiahla	43
Obr. 29.: Zľava: a) Koncovka tiahla 1 a 2 b) Koncovka tiahla 3	44
Obr. 30.: Detail konštrukčného riešenia tiahel	44
Obr. 31.: Zhora zľava: a) Páka 1 b) Páka 2 c) Páka 3	45
Obr. 32.: Zhora zľava: a) Pánt pri koreni krídelka s riadením b) Pánt na konci krídelka c) Pánt na nosníku	46
Obr. 33.: Zostava konštrukcie pravého krídla	48
Obr. 34.: Nábežná hrana osadená v prípravku	50
Obr. 35.: Prípravok osadený segmentom odtokovej hrany	51
Obr. 36.: Zostava krídelka s pántami	52
Obr. 37.: Prípravok pre zostavenie nosníka s pántami	52
Obr. 38.: Prípravok osadený konštrukciou krídla s riadením	54
Obr. 39.: Pohľad od odtokovej hrany na ustavenú zadnú torznú komoru v prípravku	54
Obr. 40.: Pohľad od nábežnej hrany na ustavenú zadnú torznú komoru v prípravku	55
Obr. 41.: Zostava v Uložení 1	57
Obr. 42.: Zostava v Uložení 2	57
Obr. 43.: Zostava v Uložení 3	57
Obr. 44.: Koncovky tiahel - vidlica a kĺbové oko	57
Obr. 45.: Ustavenie odtokovej časti krídla v prípravku	58
Obr. 46.: Ustavenie nábežnej časti krídla v prípravku	58
Obr. 47.: Odklopené krídlo v prípravku	59
Obr. 48.: Krídlo ležiace na základni prípravku	60
Obr. 49.: Odklopené krídlo zaistené pomocou skrutky	60
Obr. 50.: Upínacie prvky na koreňovom rebre	60
Obr. 51.: Upínací prvok na koncovom rebre	60
Obr. 52.: Rez krídlom s prilepeným poťahom	61

Obr. 53.: Členenie počahových segmentov	61
Obr. 54.: Krídlo v prípravku pri lepení počahu 1, ktorý je stiahnutý upínacími pásmi.....	61

Zoznam použitých tabuliek

Tab. 1.: Graf priebehu T, Mo a Mk po polorozpätí krídla v bode D a E.....	8
Tab. 2.: Rámcové hodnoty hrúbky tkaniny v závislosti na type a plošnej hmotnosti [3].....	9
Tab. 3.: Obmedzenia v závislosti a použitej technológii [3].....	11
Tab. 4.: Parametre zložiek jednosmerného laminátu	11
Tab. 5.: Mechanické vlastnosti jednosmerného laminátu	12
Tab. 6.: Parametre laminátu $\pm 45^\circ$	12
Tab. 7.: Výsledné mechanické vlastnosti laminátu $\pm 45^\circ$	12
Tab. 8.: Parametre laminátu $\pm 45^\circ$ vyrobeného vákuovým lisovaním	13
Tab. 9.: Výsledné mechanické vlastnosti laminátu vyrobeného vákuovým lisovaním.....	13
Tab. 10.: Geometrické charakteristiky pásnic	14
Tab. 11.: Výpočtové istoty pásnic v bode D	15
Tab. 12.: Pozícia nosníkov a ich mechanické vlastnosti.....	16
Tab. 13.: Prevádzkové a výpočtové istoty stojín hlavného a pomocného nosníka	20
Tab. 14.: Prevádzkové a výpočtové istoty poťahov v bode D.....	21
Tab. 15.: Prevádzkové a výpočtové istoty poťahov v bode E	22
Tab. 16.: Mechanické vlastnosti polotovaru z hliníkovej zliatiny.....	26
Tab. 17.: Výsledné zaťaženie a istoty výpočtu nosníka krídelka	27
Tab. 18.: Sily v riadení od pilota potrebné na dimenzovanie trasy riadenia	28
Tab. 19.: Potrebný materiál na výrobu oboch hlavných nosníkov	34
Tab. 20.: Bližšie špecifikované vlastnosti a množstvo matrice.....	35
Tab. 21.: Potrebný materiál na výrobu oboch hlavných nosníkov	37
Tab. 22.: Bližšie špecifikované vlastnosti a množstvo matrice.....	37
Tab. 23.: Rozpis potrebného materiálu - rebrá.....	38
Tab. 24.: Rozpis potrebného materiálu – koreňové rebro	39
Tab. 25.: Rozpis potrebného materiálu – uloženia pák	40
Tab. 26.: Rozpis potrebného materiálu - tiahla	43

Tab. 27.: Rozpis potřebného materiálu - páky	45
Tab. 28.: Rozpis potřebného materiálu	47
Tab. 29.: Finálne rozmery lepených potáhov podľa zvolených segmentov	47
Tab. 30.: Rozpis potřebného stavebného a pomocného materiálu [6], [18], [19]	63

Zoznam príloh

Príloha č. 1: Výkres č. 1-00-000

Príloha č. 2: Výkres č. 1-01-000

Príloha č. 3: Výkres č. 2-01-000

Príloha č. 4: Výkres č. 1-01-001

Príloha č. 5: Výkres č. 2-01-001

Príloha č. 6: Výkres č. 1-02-001

Príloha č. 7: Výkres č. 1-03-001

Príloha č. 8: Výkres č. 1-04-000

Príloha č. 9: Výkres č. 1-04-001