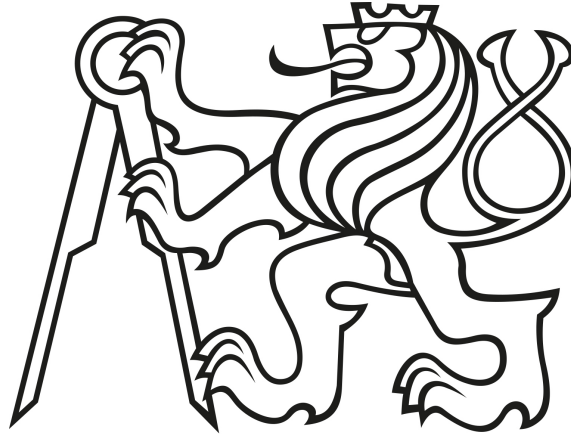


České Vysoké Učení Technické v Praze

Strojní fakulta

Ústav letadlové techniky



Návrh křídélka malého sportovního letounu

A small sport aircraft aileron design

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Matouš Hrnčír

Vedoucí práce: Ing. Jiří Brabec Ph.D.

2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hrnčíř** Jméno: **Matouš** Osobní číslo: **420485**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh křídélka malého sportovního letounu

Název bakalářské práce anglicky:

A Small Sport Aircraft Aileron Design

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

- 1) Konstrukční návrh křídélka
- 2) Stanovení zatížení křídélka
- 3) Dimenzování základních konstrukčních prvků křídélka
- 4) Hmotový rozbor křídélka

Seznam doporučené literatury:

- Mikula, J.: Konstrukce a projektování letadel II, ČVUT v Praze, 2005
- ŠPUNDA, J.: Stavebná mechanika a pevnost letadel, Požadavky pro dosažení letové způsobilosti podle pevnostních předpisů a výpočet zatížení letounu a jeho částí, skripta VAAZ, 1961
- ŠPUNDA, J.: Stavebná mechanika a pevnost letounu, Část VI, skripta VAAZ, 1971
- ŠPUNDA, J.: Pevnost leteckých konstrukcí: Nosná soustava - křídla letounu, VAAZ, 1955
- Stavební předpis UL-2, LAA ČR

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jiří Brabec Ph.D., ústav letadlové techniky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **28.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **07.08.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem křídélka na malý sportovní letoun. V úvodní pasáži je vymezen pojem malý sportovní letoun, dochází k jeho zařazení do příslušné kategorie letounů s odkazem na platnou legislativu a v krátkosti je představen stavební předpis, podle něhož se při návrhu postupuje. Dále je pojednáno o kormidlech, kterými se letoun ovládá. Hluběji jsou popsána křídélka a jejich možná konstrukční provedení. Druhá část práce je věnována vlastnímu konstrukčnímu návrhu. Je stanoveno zatížení křídélek, provedena pevnostní kontrola a zpracován hmotový rozbor.

Klíčová slova: křídélko, ultralehký letoun, konstrukční návrh, výpočet zatížení, pevnostní výpočet, hmotový rozbor

Abstract

This bachelor thesis deals with a design of a small sport aircraft aileron. The first part defines a small sport aircraft. It is assigned to the appropriate aircraft category with reference to the valid legislation, and the author briefly introduces the construction regulation the design is based on. This part also describes rudders controlling the aircraft. It takes a deeper look into ailerons and their possible designs. The second part of the thesis is dedicated to the design itself. The aileron load is specified, a strength test is carried out, and the weight is analyzed.

Key words: aileron, ultralight aircraft, design, load, strength calculation, weight analysis

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literárních pramenů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

Datum:

.....
podpis

Poděkování

Děkuji Ing. Jiřímu Brabcovi, Ph.D. za jeho odbornou pomoc, cenné rady, poskytnuté materiály, čas a trpělivost při vedení bakalářské práce.

Obsah

1	Úvod	7
2	Ultralehké letectví	9
2.1	LAA ČR	9
2.2	Sportovní létající zařízení	9
2.3	Ultralehký letoun	10
2.4	Předpis UL-2	10
3	Primární řízení letounu a účinky kormidel	11
4	Kormidla příčného řízení	13
4.1	Účel a funkce	13
4.2	Typy kormidel příčného řízení	13
4.3	Křídélka v klasickém provedení	14
4.3.1	Konstrukce křidélek	14
4.3.2	Zavěšení a ovládání křidélek	16
5	Konstrukční návrh	20
5.1	Popis křídélka	20
5.2	Konstrukce	20
5.2.1	Způsob výroby	21
6	Zatížení křídélka	22
6.1	Výpočet reakcí	25
6.2	Průběh posouvající síly a ohybového momentu	26
6.3	Průběh kroutícího momentu	28
7	Pevnostní kontrola	29
7.1	Kontrola pásnic	30
7.2	Kontrola stojiny	32
7.3	Kontrola potahu	33
8	Hmotový rozbor	35
9	Závěr	37
	Seznam použité literatury	38

1 Úvod

Uplynulo již více než 100 let od události, kdy se bratrům Wrightům na počátku dvacátého století podařilo dostat nad zem stroj těžší než vzduch a uskutečnit tak historicky první úspěšný pilotem řízený let s motorově poháněným letadlem. Od té doby prošla letadlová technika velmi dynamickým vývojem.

Prvním zásadním milníkem v rozvoji letadel bylo období 1. světové války, kdy už nešlo jen o to „jak postavit letadlo, aby vůbec letělo“. Zvyšoval se letový výkon, zkoumaly se nové materiály, konstrukce musela být tuhá a pevná, aby byla letadla bojeschopná. V meziválečném období se postupem času měnila dvojplošňíková koncepce letounu na jednoplošňíkovou a dřevo začaly nahrazovat slitiny lehkých kovů, které umožnily použití samonosné konstrukce.

Druhá světová válka přinesla další velké technologické pokroky. Snaha o snižování odporu vzduchu aerodynamičtější konstrukcí vedla ke vzniku laminárních profilů. Výrazně se zvýšil výkon leteckých motorů, maximální rychlost se blížila rychlosti zvuku a pístové motory dosáhly hranice svých výkonových možností. V tomto důsledku se na bojových letounech poprvé začínaly používat motory proudové.

V poválečném období docházelo k rozvoji civilních letounů. Proudový motor byl poprvé použit i u dopravního letadla. Došlo však k několika tragédiím vlivem únavy materiálu, proto jsou padesátá léta spjata především s výzkumem únavové pevnosti. Vojenské letouny již byly schopny překonávat nadzvukovou rychlost, rodily se tak nové poznatky z transsonické aerodynamiky. Současně se vyvíjely materiály a docházelo k používání prvních kompozitů, které se postupně aplikovaly na stále více částech konstrukce.

V 60. až 80. letech došlo k velkému boomu dopravních letadel. Mimo jiné byl do provozu uveden letoun Boeing 737, který v různých modifikacích slouží dodnes a stal se nejrozšířenějším dopravním letounem na světě. Mění se návrh konstrukce z hlediska životnosti, u většiny letounů se začíná používat tzv. „fail safe“ konstrukce neboli konstrukce bezpečná po poruše. Zavádí se nové elektrotechnické systémy, přímé mechanické ovládání kormidel pilotem začíná být nahrazováno řízením umělým přes počítač. V oblasti používaných materiálů se zlepšují pevnostní, tuhostní i únavové vlastnosti kovů a vznikají nové slitiny na bázi titanu, lithia apod. Kompozitní materiály disponují lepšími vlastnostmi matric i výtuh, zvyšuje se kvalita výrobních technologií, což umožňuje vyrábět díly podle tuhostních potřeb pro požadovanou deformaci.

V současnosti se využívají různé formy aktivního řízení letadel. Aktivní řízení dokáže automaticky reagovat na nepříznivé vlivy snímaných poruch a eliminovat je. To umožňuje plynulejší trajektorii letu a konstrukce je méně zatěžována. [7]

Za svou více než stoletou existencí prošlo letectví a letadlová technika opravdu mohutným vývojem. Dnes jsou letadla používána po celém světě především k přepravě

pasažerů nebo nákladu na delší vzdálenosti. Jde o nejrychlejší, nejefektivnější a zároveň nejbezpečnější druh dopravy.

Ale nejsou to jen obrovská dopravní letadla nebo vojenské speciály, které se vyskytují ve vzdušném prostoru. Stále více roste zájem o rekreační a sportovní létání. K tomuto účelu slouží takzvaná sportovní létající zařízení, která jsou u nás zastřešována pod Leteckou amatérskou asociací České Republiky. Ta umožňuje nadšencům a amatérským stavitelům za splnění určitých bezpečnostních podmínek a pravidel, která jsou uvedena v příslušných předpisech, snadnější vývoj, certifikaci a levnější provoz jednotlivých typů ultralehkých letadel.

Cílem této práce je navrhnout křídélko malého sportovního letounu, stanovit zatížení křídélka, nadimenzovat a provést pevnostní kontrolu základních konstrukčních prvků a zpracovat hmotový rozbor.

2 Ultralehké letectví

2.1 LAA ČR

Létání na různých lehkých a amatérsky stavěných letadlech se u nás těšilo oblibě již v období bývalého Československa a jeho dlouhá tradice sahá až do prvních desetiletí 20. století. Avšak za socialismu byl přístup k létání, zejména k motorovému, značně omezený. Až po revoluci v roce 1989 se situace obrátila k lepšímu. Mnoho lidí, kteří byli za dob socialismu omezováni předchozími pravidly, kdy bylo rekreační létání složitě uskutečnitelné, získalo mnohem volnější ruku a větší možnost realizace ve stavbě vlastního letadla. Byla totiž založena Letecká amatérská asociace České republiky, která začala zastřešovat piloty, stavitele, konstruktéry, výrobce a provozovatele kategorie takzvaných SLZ ("sportovních létajících zařízení"). Od Ministerstva dopravy získala pověření ke správě této kategorie. LAA umožnila občanům ČR stavět ultralehká letadla, závěsné kluzáky, motorové závěsné kluzáky, motorové a bezmotorové paraglidy, vírníky a vrtulníky. Hlavní výhodou se stalo to, že certifikační systém LAA ČR nabízí jednoduchost certifikace při zachování přijatelné míry bezpečnosti konstrukce letadla, stavby a provozu. Po létání začal být velký hlad a stavitelé zakládali první firmy. Došlo tak ke zrodu nového českého lehkého letectví. [6]

2.2 Sportovní létající zařízení

Sportovním létajícím zařízením bývá rozuměno takové zařízení, které má obvykle jednoduchou a velmi lehkou konstrukci a umožňuje létání, které je svým charakterem považováno za amatérskou sportovní činnost. Nepodléhá tak mezinárodním leteckým předpisům, nýbrž zákonům jednotlivých zemí, které se mohou v každém státu lišit.

V české právní úpravě definuje pojem „Sportovní létající zařízení“ § 81 zákona č. 49/1997 Sb. Ten říká, že SLZ je „*maximálně dvoumístné letadlo nebo sportovní padák, určené k létání pro vlastní potřebu nebo potřebu jiných osob za účelem rekreace, individuální osobní dopravy, sportu nebo výcviku pilotů, které není uskutečňováno za účelem dosažení zisku, s výjimkou výcviku pilotů, letů závěsných a padákových kluzáků s pasažérem a seskoků sportovních padáků s pasažérem.*“ [9]

Tento zákon dále uvádí jednotlivé druhy SLZ, které mohou být jak motorové, tak bezmotorové. Jsou to různé typy padáků, padákových kluzáků, závěsných kluzáků, ultralehkých kluzáků a letounů, vrtulníků a vírníků. [9] Vymezení jednotlivých druhů SLZ popisuje vyhláška č.108/1997 Sb. Ministerstva dopravy a spojů, kterou se provádí zákon č. 49/1997 Sb. Jelikož se tato práce zabývá návrhem křídélka na malý sportovní letoun, tedy ultralehký letoun (ultralight, ULL), bude zde uvedena charakteristika pouze tohoto typu SLZ.

2.3 Ultralehký letoun

Jak napovídá název, ultralehký letoun se od klasického letadla liší především nižší hmotností a také rychlostí. Těmito dvěma veličinami je zároveň vymezen v § 24 prováděcí vyhlášky č.108/1997 Sb. zákona o civilním letectví. Ta tvrdí, že ultralehký letoun je letoun konstruovaný maximálně pro dvě osoby, řízený buď přesouváním těžiště pilota, nebo aerodynamickými prostředky, jehož maximální vzletová hmotnost nepřevyšuje 450 kg a pádová rychlost nepřevyšuje 65 km/h. [8] Hmotnost 450 kg představuje maximální povolenou celkovou vzletovou hmotnost letounu, do které se musí započítat i hmotnost pilota (případně druhé osoby), paliva atd. Z toho vyplývá, že samotný letoun musí vážit ještě o několik desítek kilogramů méně. Definice UL letounu a tyto limity se v jednotlivých zemích liší. To tvoří největší komplikaci pro mezinárodní obchod a často znemožňuje uskutečňovat mezistátní lety. V České republice se návrh a stavba UL letounu řídí předpisem UL-2, který vydala LAA ČR.

2.4 Předpis UL-2

Předpis UL-2 je stavebním předpisem pro ultralehké letouny řízené aerodynamicky. Hlavním účelem předpisu je stanovení minimálních požadavků letové způsobilosti, které je potřeba dodržet, aby použití těchto letounů bylo bezproblémové a neohrožovalo bezpečnost letového provozu ani bezpečnost třetích osob. Použití těchto požadavků letové způsobilosti se uplatňuje pro aerodynamicky řízené ultralehké letouny, jejichž vzletová hmotnost u dvoumístných letounů nepřesáhne 450 kg a u jednomístných 300 kg, přičemž minimální pádová rychlost V_{S0} nemůže být vyšší než 65 km/h.

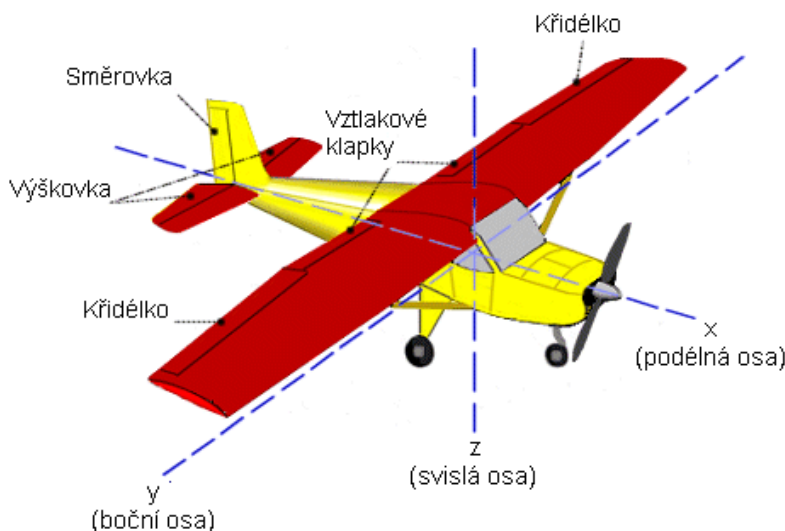
Předpis dále udává, že UL letounům je povolen jen neakrobatický provoz, v němž jsou zahrnuty obraty potřebné pro normální létání, nácvik pádu a ostré zatáčky s náklonem do 60°. [5]

Celý je rozdělen do deseti kapitol značených písmeny A až K, v nichž postupně pojednává o tom, jaké podmínky musí být splněny u jednotlivých prvků letounu a jaké letové vlastnosti musí být dodrženy.

Pro návrh křídélka, který bude v této práci proveden, musí být tedy postupováno v souladu s požadavky stavebního předpisu UL-2.

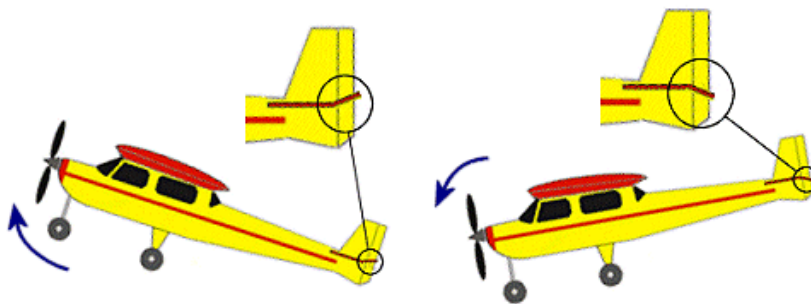
3 Primární řízení letounu a účinky kormidel

Kormidlo výškové, kormidlo směrové a kormidla příčného řízení jsou hlavní prvky, kterými pilot prostřednictvím řízení ovládá letadlo. Toto řízení umožňuje pohyb letounu kolem všech tří os letadlového souřadnicového systému znázorněného na **Obr.1**. Označuje se jako řízení primární (hlavní) a je nezbytnou částí každého letounu.



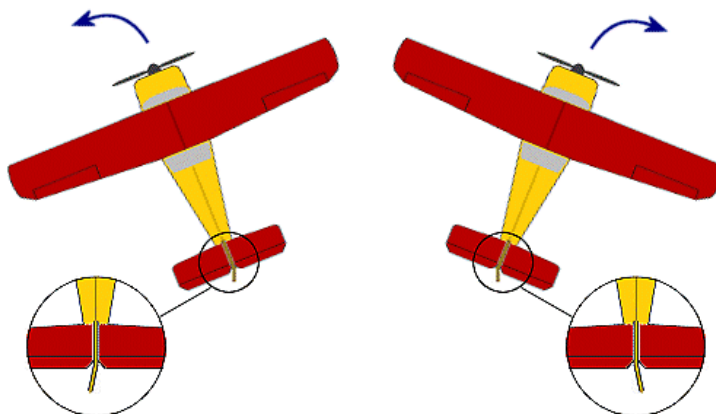
Obr. 1: Letadlový souřadnicový systém a ovládací prvky [1]

Vychýlením výškového kormidla, které bývá nejčastěji umístěno na odtokové hraně vodorovných ocasních ploch, dochází ke změně sklonu letounu ve směru letu, tedy otáčení letounu kolem boční osy y (**Obr.2**). Dochází k vyvolání klopivého momentu a proto se tato rotace nazývá klopení.



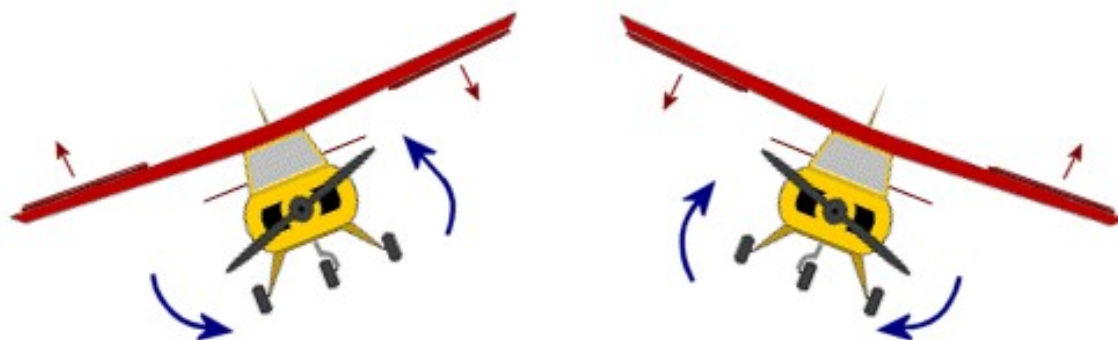
Obr. 2: Klopení letounu [1]

Kormidlem směrovým, jež bývá umístěno na svislé ocasní ploše, se ovládá otáčení letounu kolem svislé osy z . Vychýlením kormidla dochází v důsledku vzniku zatáčivého momentu k zatáčení viz. **Obr.3**.



Obr. 3: Zatáčení letounu [1]

Poslední rotací je otáčení letounu kolem podélné osy x . To je způsobeno vznikem klonivého momentu v důsledku vychýlení kormidel příčného řízení, která bývají nejčastěji umístěna na odtokové hraně vnějších částech křídel, přičemž při vychýlení jednoho kormidla směrem nahoru se druhé kormidlo vychýlí vždy opačným směrem (**Obr.4**).



Obr. 4: Klonění letounu [1]

Všechny výše popsané a na obrázcích názorně ilustrované manévry vykonává pilot prostřednictvím řízení. K tomu obvykle využívá ruce i nohy, přičemž ručním řízením bývá ovládáno výškové kormidlo a kormidla příčného řízení a nožním řízením směrové kormidlo. Řízení je provedeno tak, aby bylo pro piloty přirozené. To znamená, že pokud chce pilot s letadlem stoupat, přitáhne ruční řízení směrem k sobě, čímž vyklopí výškové kormidlo nahoru a v důsledku vzniku klopivého momentu se před letadla zvedne a to stoupá. Opačně při pohybu ručního řízení od sebe musí letoun klesat. Obdobně natočení řízení doprava vyvolá naklonění doprava (na pravé křídlo) a pohyb pravé nohy dopředu způsobí zatočení doprava a opačně.

Ve skutečnosti jsou tyto pohyby vzájemně ovlivňovány, proto je zásadní pro správnou a bezpečnou pilotáž pomocí kormidel sladit vše tak, aby letadlo letělo, kam pilot potřebuje. Například správné zatáčení bývá realizováno pomocí vychýlení směrovky i kormidel příčného řízení zároveň.

4 Kormidla příčného řízení

4.1 Účel a funkce

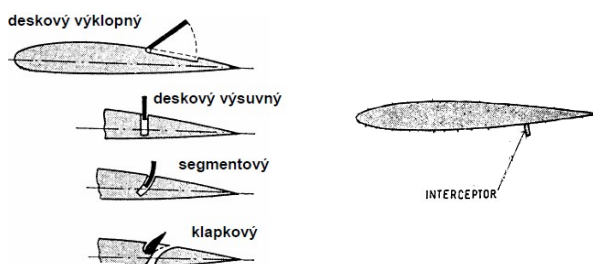
Za určitých podmínek lze letoun ovládat pouze výškovým a směrovým kormidlem, avšak obratnost a manévrování takového letounu budou při nejmenším značně omezené a ve většině situací nedostačující. Proto se používají také kormidla příčného řízení, jejichž ovládnutím je pilotovi umožněno řídit klonění, to znamená měnit úhel příčného sklonu letounu. Může tak naklánět letoun do potřebných poloh při provádění obrátů nebo vyrovnávat nežádoucí náklony letounu, které způsobí např. porыв.

Důležitou funkcí kormidel příčného řízení je vyvození dostatečně velkých klonivých momentů při malých rychlostech, které se blíží rychlosti minimální. To zajistí udržení správné polohy při přistávání. Naopak při vysokých rychlostech, zejména u stíhacích letounů, musí kormidla zajistit dostatečně velkou úhlovou rychlost klonění. Ta umožní stíhačům dobrou manévrovatelnost a rychlé výkruty při prudkém stoupání. [2]

4.2 Typy kormidel příčného řízení

V dnešní době se v praxi výhradně používají dva mechanismy kormidel příčného řízení. Nejrozšířenějším typem používaným téměř na všech druzích letadel jsou křídélka v klasickém provedení. Ta umožňují nejsnáze splnit požadavky, které jsou na kormidla příčného řízení kladeny. Jedná se o opačně vychylované klapky na koncích křídel letounu. Jsou konstrukčně jednoduchá a při správném navržení velmi účinná. Letoun na jejich vychýlení reaguje téměř okamžitě a v požadované době dosáhne maximální hodnoty zrychlení klonění. Klonivý moment je obvykle přímo úměrný vychýlce křídélek. [2]

Druhým používaným typem kormidel příčného řízení jsou spoilery a interceptory. Ty slouží především jako rušiče vztlaku. Jelikož se jedná o samostatně vychylované desky na jednom či druhém polokřídle, způsobují momentovou nerovnováhu k podélné ose. Spoilery se vychylují na horní straně křídla, čímž snižují vztlak na tomto křídle (**Obr.5**). Interceptory jsou plochy na straně spodní, které naopak vztlak zvyšují (**Obr.6**).

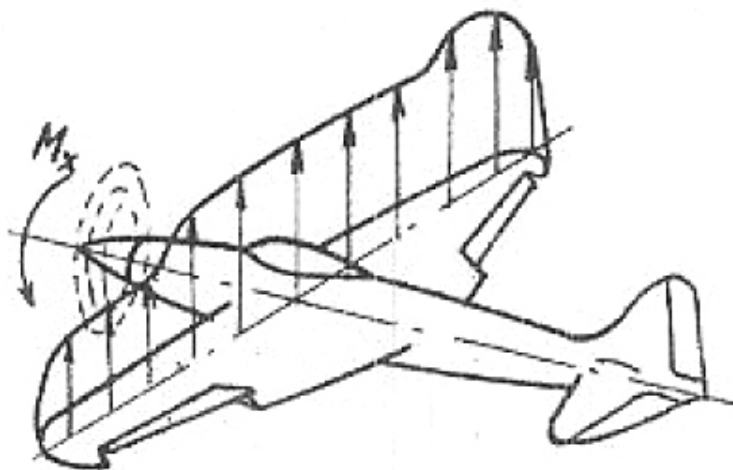


Obr. 5: Typy spoilerů [7] Obr. 6: Interceptor [7]

Další vyvíjené typy kormidel příčného řízení se v praxi příliš nerozšířily. Jedná se především o různé druhy křidélek, které se od klasických liší hlavně polohou nebo tvarem. Tato měla oproti křídélkům v klasickém provedení vždy některé velké nevýhody. Ať už zpožděný účinek, nižší účinnost při různých druzích letu, zvětšený odpor, nebo byla příliš náročná konstrukčně. Klasická křídélka se tak i přes některé své nevýhody, které se ovšem vhodnými úpravami dají zcela nebo do určité míry odstranit, ukázala jako nejlepší řešení pro řízení příčné obratnosti. [2]

4.3 Křídélka v klasickém provedení

Křídélka v klasickém provedení (dále jen křídélka) jsou klapky umístěné na koncích křídel u odtokové hrany. Při vychýlení řízení dochází k vyklopení jednoho křídélka nahoru a druhého dolů, čímž vznikají kladné a záporné přírůstky vztlaku na vnějších částech křídel. Ty způsobí změnu rozložení vzdušných sil po rozpětí a vznik počátečního klonivého momentu M_x , který způsobuje rotaci kolem podélné osy (**Obr.7**).



Obr. 7: Vznik klonivého momentu [2]

4.3.1 Konstrukce křidélek

Konstrukce křidélek je dána jejich zatížením. Zatížení, stejně jako u křídla, způsobují jak vnější síly, tak hmotové síly od vlastní váhy křídélka. Ty jsou však v porovnání s vnějšími silami zanedbatelné a ve výpočtech se neuvažují, jelikož působí opačně a odlehčují letoun. Jejich zanedbáním se tak výpočty pohybují na bezpečné straně. Velikost a rozložení vnějších sil udává stavební předpis.

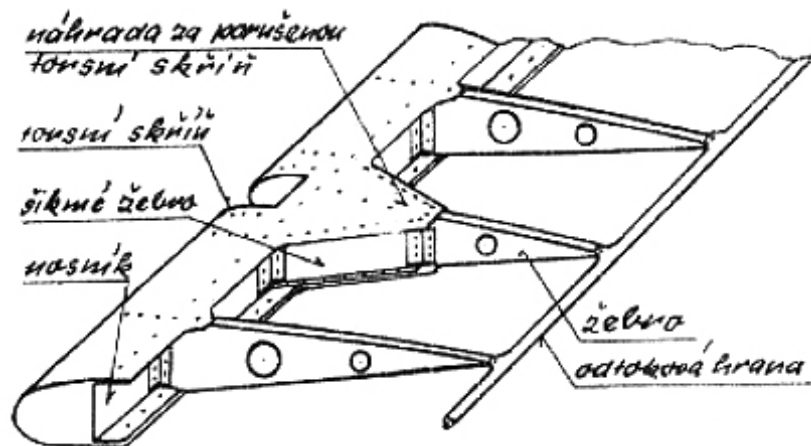
Křídélka jsou namáhána jak ohybem, který je tvořen ohybovým momentem a posouvající silou, tak krutem.

Konstrukce křidélek musí být taková, aby dokázala toto namáhání zachytit. Vzhledem ke geometrické podobnosti křídla a křídélka je podobné jejich namáhání, proto

i konstrukce je podobná. Základními prvky tak jsou nosníky, žebra a potah, přičemž obvykle jsou křídélka jednonosníková. Součástí křidélek jsou i závěsná kování, která slouží k otočnému uchycení na křídlo a ovládací páky na připojení táhel či lan převodu řízení.

V zásadě lze rozlišovat dva typy nosníkových konstrukcí křidélek. Konstrukce křidélek s torzní skříní v náběžné části nebo konstrukce křidélek s nosníkem zavřeného průřezu bez torzní skříně. [2]

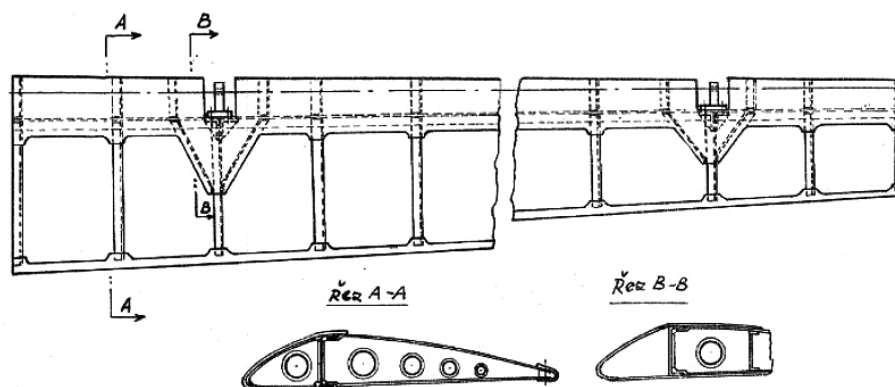
Konstrukce křidélek s torzní skříní v náběžné části je tvořena nosníkem, nejčastěji tvaru "C" a nosným potahem náběžné části, které vytvářejí nosný dutý průřez. Ten zachycuje ohybové momenty, posouvající síly i krouticí momenty a dokáže zajistit potřebnou tuhost. Schéma takového křídélka zobrazuje **Obr.8**.



Obr. 8: Křídélko s torzní skříní v náběžné části [2]

Zbytek křídélka od nosníku k odtokové hraně lze potáhnout plátěným potahem nebo se používá nosný potah po celé hloubce křídélka. [2]

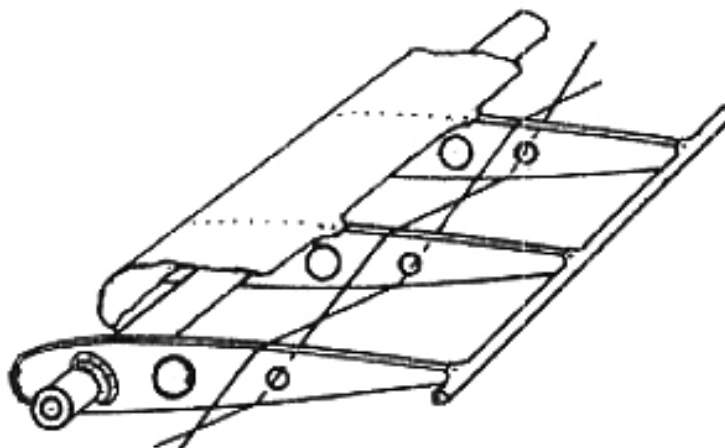
Plátěný potah se využíval především v minulosti, v dnešní době se upřednostňují kompozitové materiály nebo slitiny lehkých kovů. Možné konstrukční provedení kovového křídélka s torzní skříní v náběžné části je zobrazeno na **Obr.9**.



Obr. 9: Konstrukce křídélka s torzní skříní v náběžné části [2]

Jak je z **Obr.8** a **Obr.9** patrné, v místě uchycení závěsů je vzhledem k porušení torzní skříně nutné vytvořit náhradní dutinu za nosníkem, protažením nosného potahu do dostatečné vzdálenosti a použitím šikmých žeber.

Konstrukce křídélek bez torzní skříně je znázorněna na **Obr.10**. Nosným prvkem je v tomto případě trubka kruhového průřezu, která zachycuje jak ohyb, tak krut. Náběžná část je potažena tuhým potahem, na zbytku hloubky může být potah plátěný.



Obr. 10: Křídélko s trubkovým nosníkem bez torzní skříně [2]

U konstrukce s trubkovým nosníkem není potřeba v místech závěsů nahrazovat případné výřezy v potahu. Tato konstrukce je výrobně jednodušší oproti konstrukci s torzní skříní, avšak je nevýhodná z hlediska hmotnosti, protože trubkový nosník není hmotnostně vhodný jako ohybový prvek a tuhý potah na náběžné hraně není tolik pevnostně využitý a znamená tak další hmotnostní přírůstek. Torzní tuhost této konstrukce je při stejné váze obou konstrukcí nižší než u konstrukce s torzní skříní, jelikož je průřez trubkového nosníku menší oproti průřezu torzní skříně. Proto se upřednostňují konstrukce s torzní skříní v náběžné části. [2]

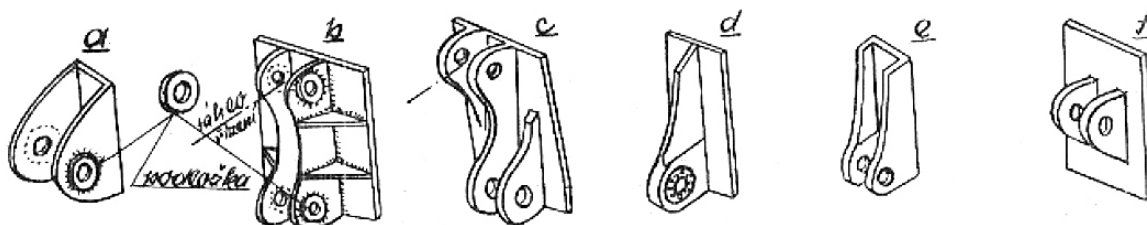
4.3.2 Zavěšení a ovládání křídélek

Křídélka jsou na koncích křídel zavěšena otočně. Jsou opatřena ovládací pákou, která je s řízením propojena pomocí táhla či lan. Tu je dobré s ohledem na kroucení křídélka umístit do místa jeho zavěšení, nejlépe okolo poloviny jeho rozpětí. Přitom je třeba uvážit celkovou koncepci křídla a možnosti vedení táhel či lan.

Řízení musí být provedeno tak, aby výchylinky křídélek způsobovaly klonění letounu na správnou stranu. Při vychýlení řízení vpravo musí letoun klonit na pravé křídlo, nikdy ne opačně.

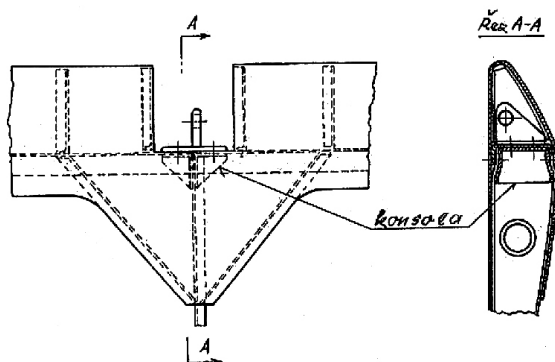
Zavěšení bývá realizováno závěsným kováním, které je prováděno jako svařenec z ocelových plechů nebo odlité z lehkých slitin. U ultralehkých letounů bývají závěsy

především z ekonomických důvodů často frézovány z Al-slitin nebo jsou pouze ohýbány. Rovněž je možné použití závěsů kompozitových. U křídelek s torzní skříní v náběžné části jsou možné případy provedení zobrazeny na **Obr.11**, kde **a,b** jsou kování svařovaná, **c až f** odlévaná. Na **Obr.11 b,c** je rovněž znázorněna kombinace závěsu s ovládací pákou. [2]

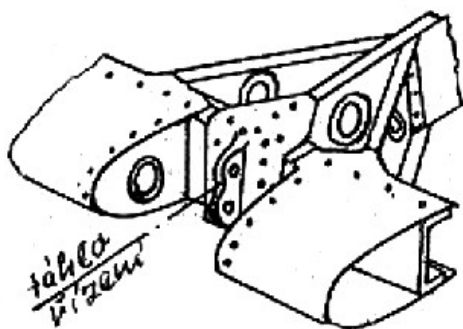


Obr. 11: Závěsná kování [2]

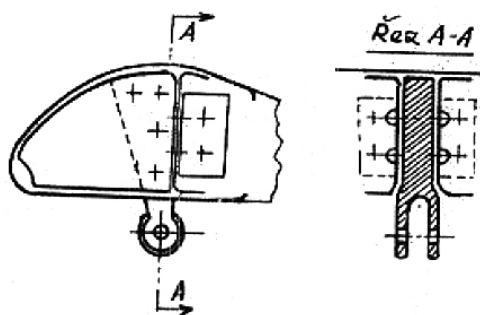
Spojení kování a křídelka je řešeno pomocí šroubu či nýtů. U silněji namáhaných závěsů je třeba brát v potaz, že kování je nosníkem, který je zatížen osamělou silou v ose čepu a vetknutý v místě spojení. Proto je třeba zavést posouvající sílu do stojiny spojením kování se stojinou a moment ve vetknutí do žebra v torzní skříní. To lze učinit prostřednictvím různých úhelníků či konsol (**Obr.12**) nebo přímo vhodným kovááním (**Obr.13, Obr.14**). [2]



Obr. 12: Zavedení momentu pomocí konsoly [2]

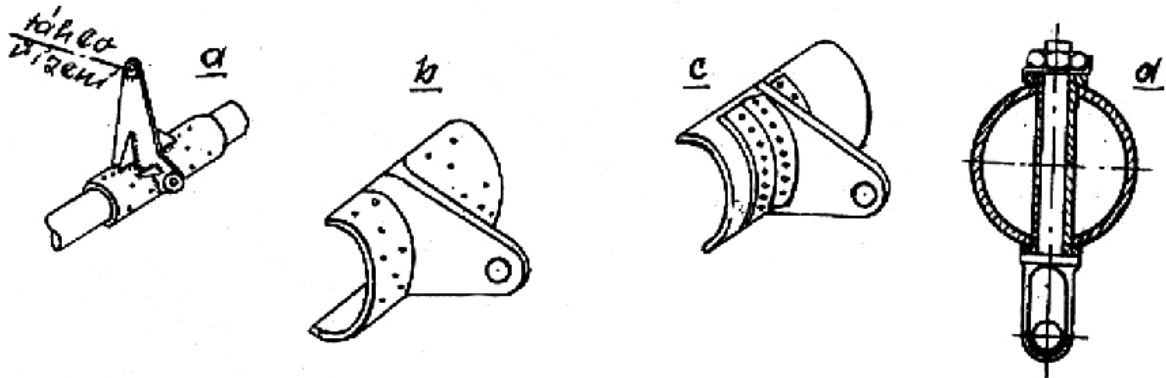


Obr. 13: Zavedení momentu přímo [2]



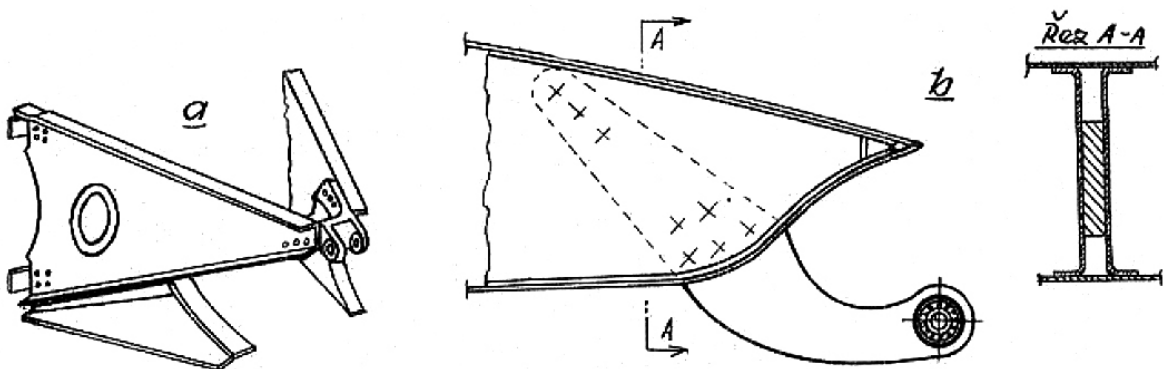
Obr. 14: Zavedení momentu přímo [2]

U křidélek s trubkovým nosníkem je závěsné kování obdobné jako u křidélek s torzní skříní v náběžné části (viz. **Obr.15 a, b, c**), ale může být provedeno i jinak, např. způsobem patrným z **Obr.15 d**.

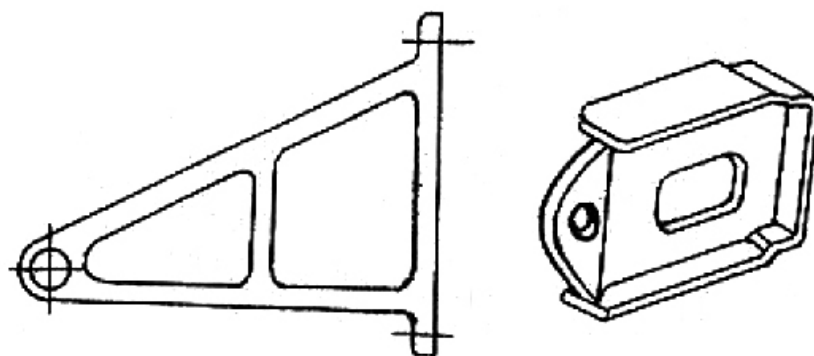


Obr. 15: Závěsná kování křidélek s trubkovým nosníkem [2]

Zavěšení na křídlo je obdobné. Opět se používají závěsná kování svařovaná nebo odlévaná. Ta se připevňují na zesílená žebra (**Obr.16**) nebo přímo na zadní nosník křídla (**Obr.17**).

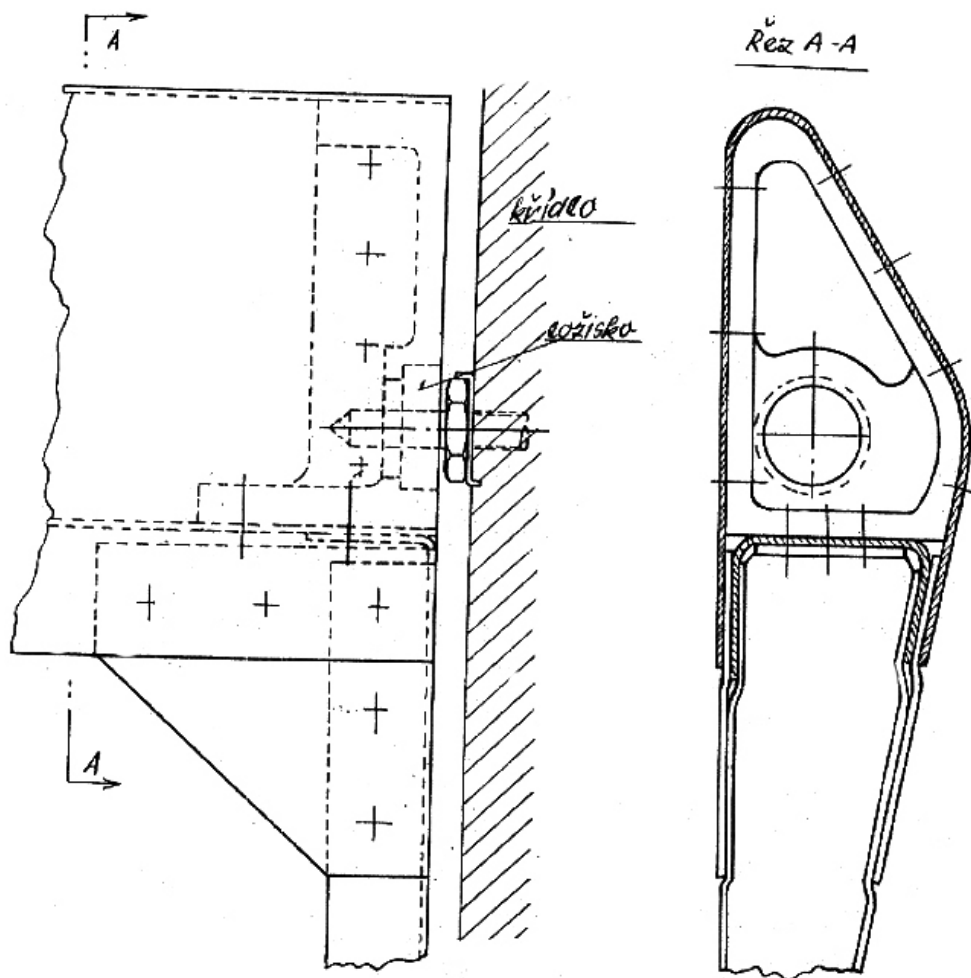


Obr. 16: Provedení závěsu s uchycením na žebra [2]



Obr. 17: Provedení závěsu na nosníku [2]

Uchycení se provádí stejně jako na křídélko. Do závěsného kování na křídle je obvykle našroubován čep, kterým se propojí křídélko s křídlem (**Obr.18**).



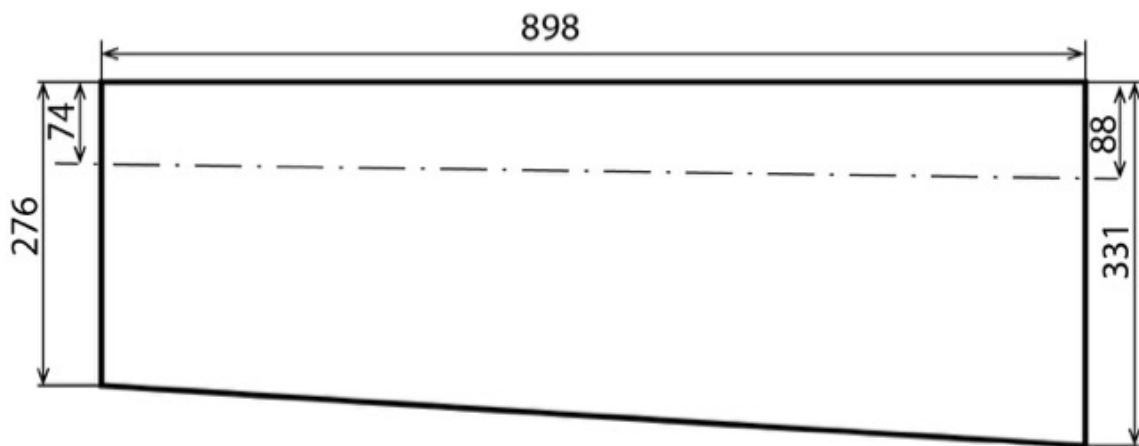
Obr. 18: Konstrukční provedení koncového zavěšení [2]

5 Konstrukční návrh

5.1 Popis křídélka

Navrhované křídélko má jediný hlavní nosník, který zachycuje posouvající sílu a ohyb od zatížení. Spolu s nosným potahem vytváří tuhý tenkostěnný nosný průřez, který disponuje značnou pevností v kroucení a zachycuje kroučící moment od výsledného zatížení.

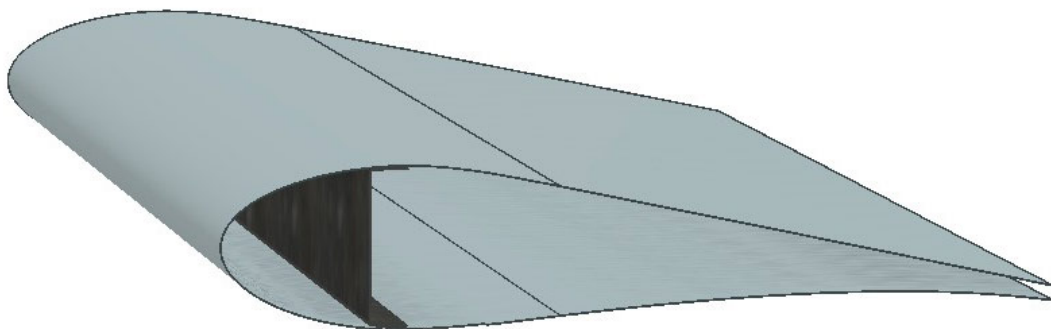
Křídélko je dlouhé 898 mm, jeho hloubka u kořene je 331 mm a na konci křídélka 276 mm. Vzdálenost osy otáčení od náběžné hrany je u kořene 88 mm a na konci křídélka 74 mm. Hodnoty jsou odečítány z 3D modelu, který byl vytvořen v programu Autodesk Inventor.



Obr. 19: Schéma křídélka

5.2 Konstrukce

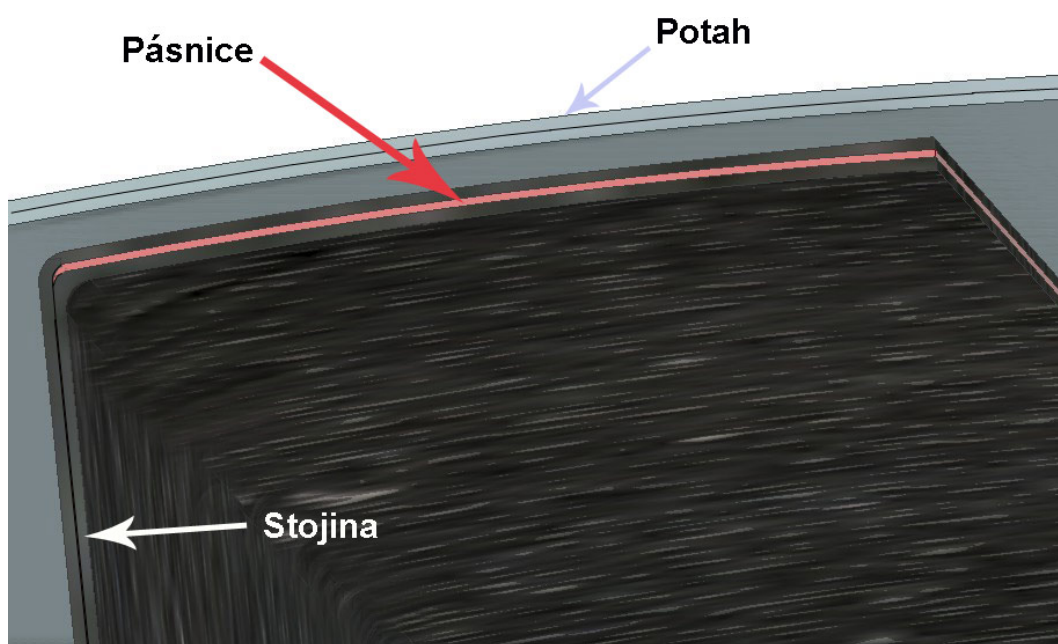
V programu Autodesk Inventor byly vytvořeny základní konstrukční prvky křídélka. Jedná se o nosník tvaru "C", který je tvořen stojinou a pásnicemi, a nosný potah křídélka (Obr.20).



Obr. 20: 3D model křídélka

Nosník křídélka je umístěn tak, aby jeho stavební výška v dutině byla co nejvyšší. U kořene je to 61,8 mm a na konci křídélka 51,9 mm. Stojina nosníku je tvořena dvěma vrstvami, kde tloušťka jedné vrstvy je 0,2 mm. Tloušťka jedné vrstvy pásnic je 0,13 mm. Z pevnostních výpočtů provedených dále je patrné, že k zachycení ohybového momentu je jedna vrstva pásnic dostačující.

Potah křídélka je stejně jako stojina nosníku tvořen dvěma vrstvami o tloušťce jedné vrstvy 0,2 mm. Obrys potahu křídélka byl poskytnut vedoucím bakalářské práce. Nosník bude s potahem spojen pomocí lepidla, jehož tloušťka je 0,6 mm. Při návrhu je tak nutné uvažovat mezeru mezi nosníkem a potahem právě na vrstvu lepidla. Na **Obr.21** je zobrazen detail horní části nosníku.



Obr. 21: Detail horní části nosníku

Vzhledem k omezeným časovým možnostem při návrhu byla zpracována jen základní konstrukce bez závěsů. Pro kompletní návrh by bylo třeba dořešit ještě zavěšení a ovládání křidélek. Poloha závěsů se předpokládá na kompozitových žebrech, která jsou umístěna u kořene a na konci křídélka.

5.2.1 Způsob výroby

Potah i nosník jsou vyráběny z kompozitních materiálů - prepregů. Prepregy jsou listové polotovary, nejčastěji vrstva vláken předimpregnovaná pryskyřicemi. Postupně se vrství do formy až na požadovanou tloušťku. Za zvýšeného tlaku a teploty se vytvrzují v autoklávu. Vzniklý kompozitní díl disponuje výbornými mechanickými vlastnostmi. Vhodnou orientací prepregu při skladbě materiálu je možné tyto vlastnosti měnit v závislosti od směru namáhání, proto je tato technologie vhodná pro kusovou výrobu mechanicky namáhaných dílů. [10]

6 Zatížení křídélka

Dle přílohy I. stavebního předpisu UL-2 [5] je průměrné provozní zatížení plochy křídélka stanoveno následovně:

$$W^{\bar{}} = 17,24 \cdot \frac{G}{S} = 17,24 \cdot \frac{472}{8,82} = 922,6 \text{ Pa} \quad (6.1)$$

kde:

$W^{\bar{}}$ je průměrné provozní zatížení plochy v Pa;

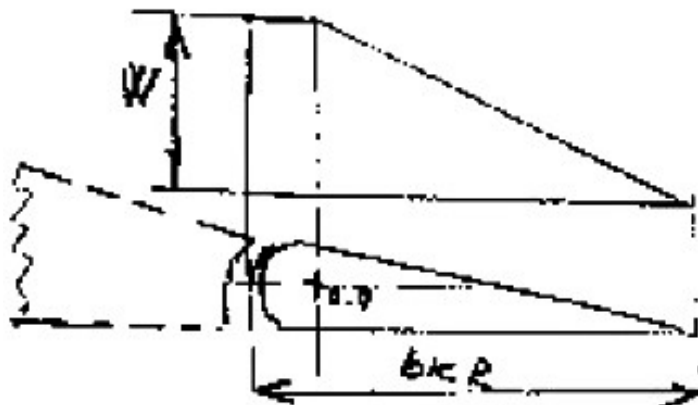
G je maximální vzletová hmotnost letounu v kg;

S je plocha křídélka v m^2 .

Podle [5] musí platit:

$$W^{\bar{}} > 575 \text{ Pa} \quad \rightarrow \quad \text{vyhovuje} \quad (6.2)$$

Průběh velikosti měrného zatížení W po hloubce křídélka b má dle předpisu [5] tvar:



Obr. 22: Velikost měrného zatížení po hloubce křídélka [5]

Liniové zatížení se stanoví:

$$q_{(y)} = W^{\bar{}} \cdot b_{(y)} \quad (6.3)$$

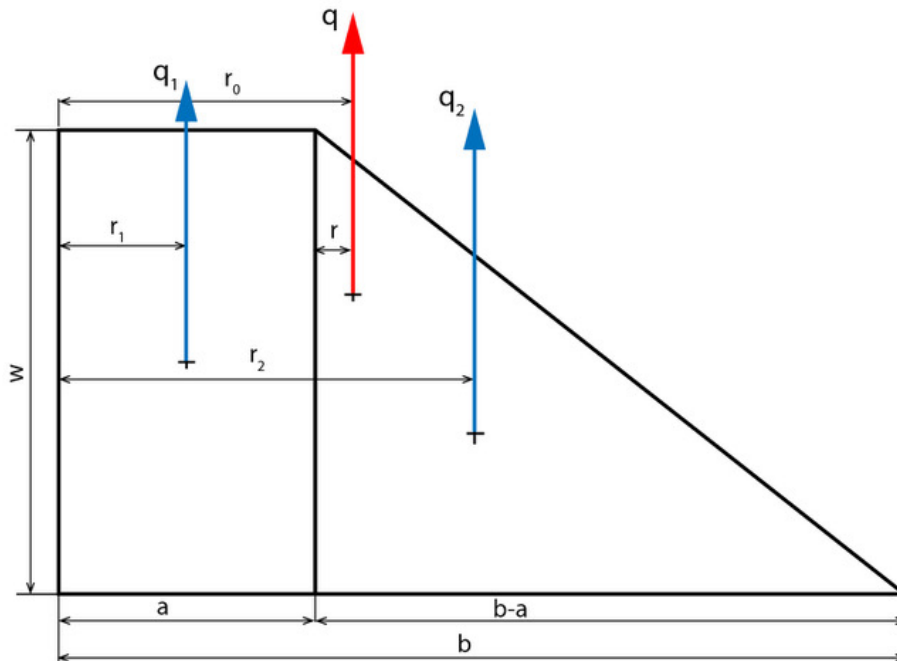
U kořene je jeho velikost:

$$q_{(k)} = W^{\bar{}} \cdot b_{(k)} = 922,6 \cdot 0,331 = 305,19 \text{ N/m} \quad (6.4)$$

Na konci křídélka:

$$q_{(0)} = W^{\bar{}} \cdot b_{(0)} = 922,6 \cdot 0,276 = 254,36 \text{ N/m} \quad (6.5)$$

Stanovení velikosti zatížení v jednotlivých řezech a poloha působišť vychází z Obr.23.



Obr. 23: Polohy působišť jednotlivých zatížení po hloubce křídélka

kde:

a je poloha osy otáčení od náběžné hrany;

b je hloubka křídélka;

r_0 je poloha působišť výsledného zatížení od náběžné hrany;

r je poloha působišť výsledného zatížení od osy otáčení.

Příklad výpočtu pro kořenový řez:¹

$$q = W^= \cdot b = q_1 + q_2 = W \cdot a + W \cdot \frac{(b - a)}{2} \quad (6.6)$$

$$W^= \cdot b = W \cdot a + W \cdot \frac{(b - a)}{2} \Rightarrow W = \frac{2 \cdot W^= \cdot b}{a + b} = \frac{2 \cdot 922,6 \cdot 0,331}{0,088 + 0,331} = 1455,86 \text{ Pa} \quad (6.7)$$

$$q_1 = W \cdot a = 1455,86 \cdot 0,088 = 128,79 \text{ N/m} \quad (6.8)$$

$$q_2 = W \cdot \frac{(b - a)}{2} = 1455,86 \cdot \frac{(0,331 - 0,088)}{2} = 176,4 \text{ N/m} \quad (6.9)$$

$$q = q_1 + q_2 = 128,79 + 176,4 = 305,19 \text{ N/m} \quad (6.10)$$

¹Přehled výsledků pro všechny řezy udává **Tab.1**.

Polohy působišť:

$$r_1 = \frac{a}{2} = \frac{0,088}{2} = 0,044 \text{ m} \quad (6.11)$$

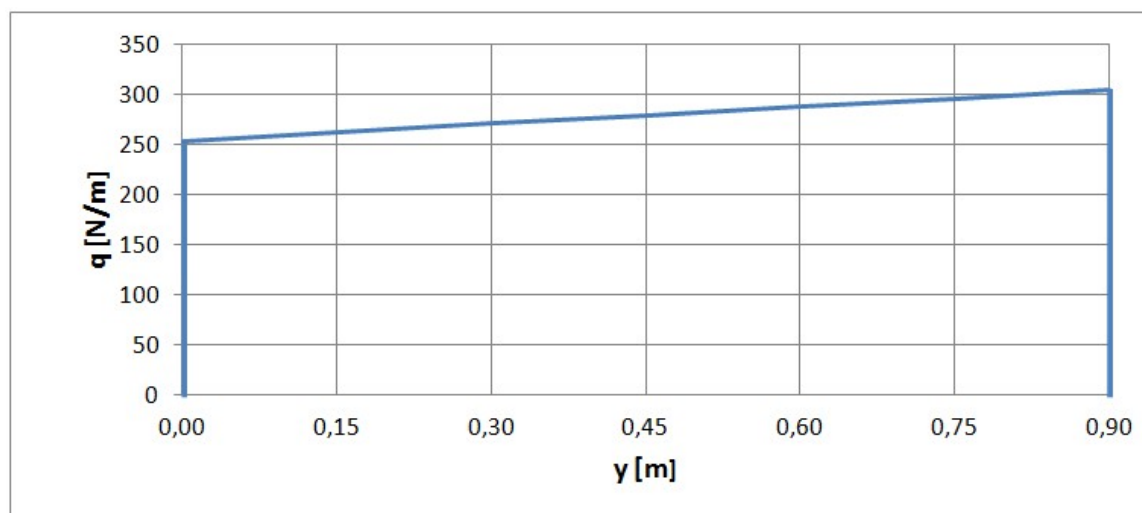
$$r_2 = a + \frac{1}{3} \cdot (b - a) = 0,088 + \frac{1}{3} \cdot 0,242 = 0,169 \quad (6.12)$$

$$r_0 = \frac{r_1 \cdot q_1 + r_2 \cdot q_2}{q_1 + q_2} = \frac{0,044 \cdot 128,79 + 0,169 \cdot 176,4}{128,79 + 176,4} = 0,116 \text{ m} \quad (6.13)$$

Tab. 1: Výsledné zatížení v jednotlivých řezech a polohy působišť

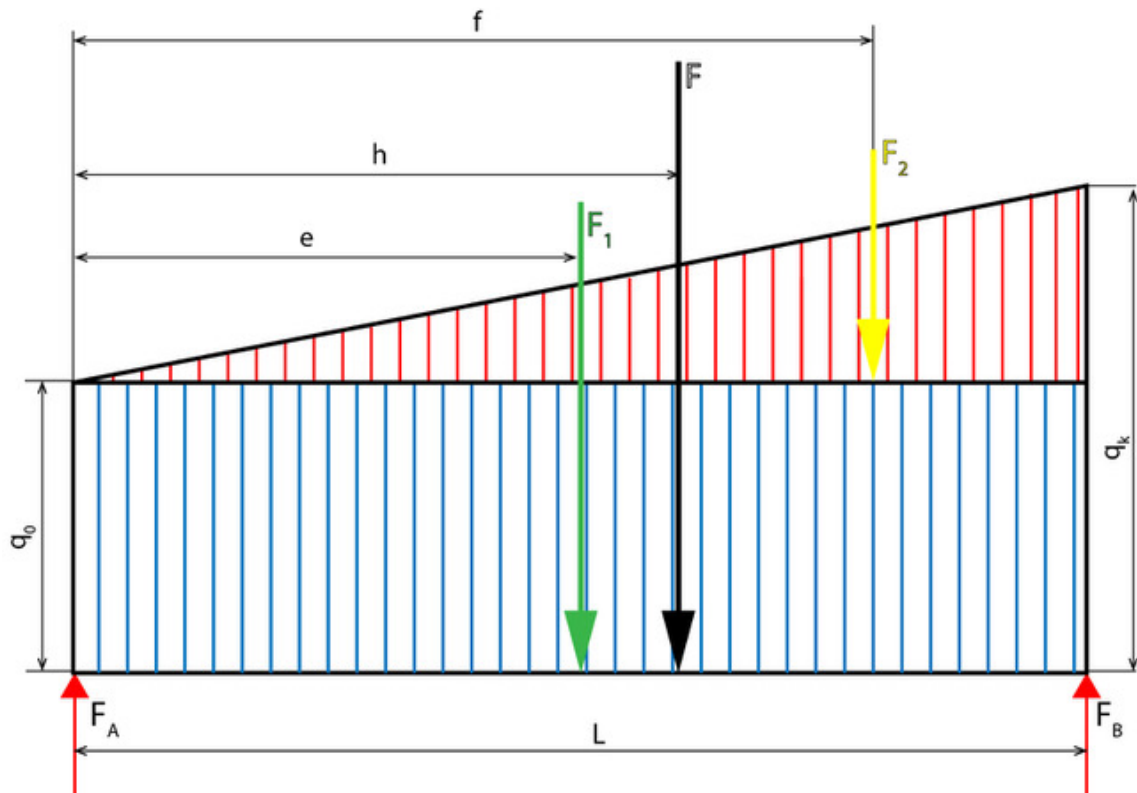
y [m]	b [m]	a [m]	r ₁ [m]	r ₂ [m]	r ₀ [m]	W [Pa]	q ₁ [N/m]	q ₂ [N/m]	q [N/m]
0	0,276	0,074	0,037	0,141	0,097	1455,78	107,36	147,00	254,36
0,150	0,285	0,076	0,038	0,146	0,100	1455,79	110,93	151,91	262,85
0,300	0,294	0,079	0,039	0,150	0,104	1455,81	114,52	156,82	271,34
0,450	0,303	0,081	0,041	0,155	0,107	1455,82	118,10	161,74	279,83
0,463	0,304	0,081	0,041	0,156	0,107	1455,83	118,45	162,16	280,57
0,600	0,313	0,084	0,042	0,160	0,110	1455,84	121,68	166,65	288,33
0,750	0,322	0,086	0,043	0,165	0,113	1455,85	125,26	171,56	296,82
0,898	0,331	0,088	0,044	0,169	0,116	1455,86	128,80	176,40	305,19

Průběh zatížení po délce křídélka je zobrazen na **Obr.24**.



Obr. 24: Výsledné zatížení po délce křídélka

6.1 Výpočet reakcí



Obr. 25: Poloha působišť zatěžujících síly po délce křídélka

$$e = \frac{1}{2} \cdot L = \frac{1}{2} \cdot 0,898 = 0,449 \text{ m} \quad (6.14)$$

$$F_1 = q_0 \cdot L = 254,36 \cdot 0,898 = 228,415 \text{ N} \quad (6.15)$$

$$f = \frac{2}{3} \cdot L = \frac{2}{3} \cdot 0,898 = 0,599 \text{ m} \quad (6.16)$$

$$F_2 = \left(\frac{q_k - q_0}{2} \right) \cdot L = \left(\frac{305,19 - 254,3}{2} \right) = 22,825 \text{ N} \quad (6.17)$$

$$F = F_1 + F_2 = 228,415 + 22,825 = 251,239 \text{ N} \quad (6.18)$$

$$F_1 \cdot e + F_2 \cdot f = F \cdot h \quad (6.19)$$

$$h = \frac{F_1 \cdot e + F_2 \cdot f}{F} = \frac{228,415 \cdot 0,449 + 22,825 \cdot 0,599}{251,239} = 0,463 \text{ m} \quad (6.20)$$

Reakce F_A a F_B vyplývají ze silové a momentové rovnováhy:

$$\sum F = 0 : F_A + F_B - F = 0 \Rightarrow F_A = F - F_B = 251,239 - 129,424 = 121,816 \text{ N} \quad (6.21)$$

$$\sum M_A = 0 : F_B \cdot L - F \cdot h = 0 \Rightarrow F_B = \frac{F \cdot h}{L} = \frac{251,239 \cdot 0,463}{0,898} = 129,424 \text{ N} \quad (6.22)$$

6.2 Průběh posouvající síly a ohybového momentu

Průběh posouvající síly (**Obr.26**):

$$T_{(y)} = F_A - q_0 \cdot y - \left(\frac{q_k - q_0}{2} \right) \cdot y \quad (6.23)$$

Velikost posouvající síly na konci křídélka:

$$T_{(0)} = F_A = 121,816 \text{ N} \quad (6.24)$$

Velikost posouvající síly u kořene křídélka:

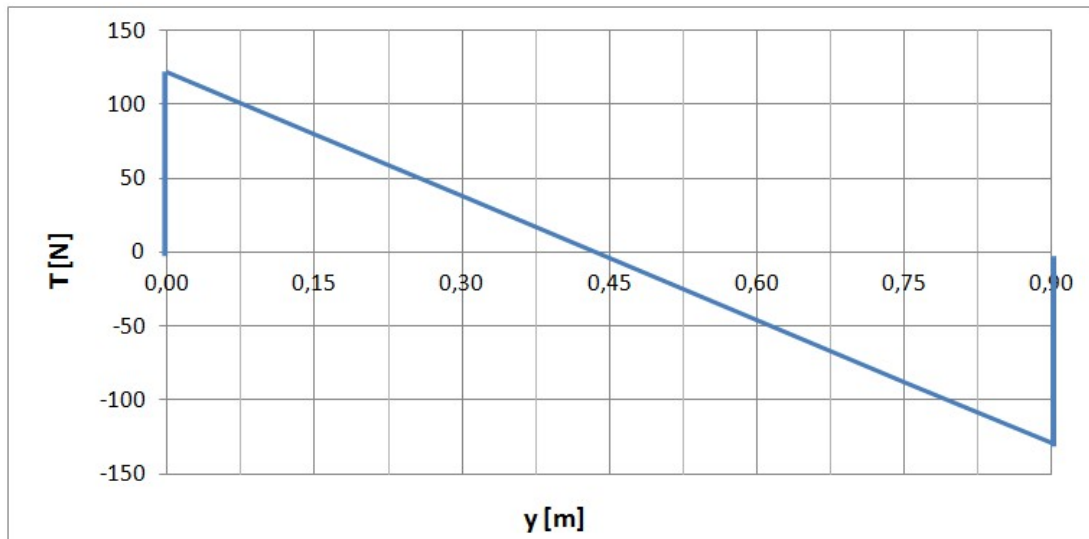
$$T_{(L)} = F_A - q_0 \cdot L - \left(\frac{q_k - q_0}{2} \right) \cdot L = -F_B = -129,424 \text{ N} \quad (6.25)$$

Průběh ohybového momentu (**Obr.27**):

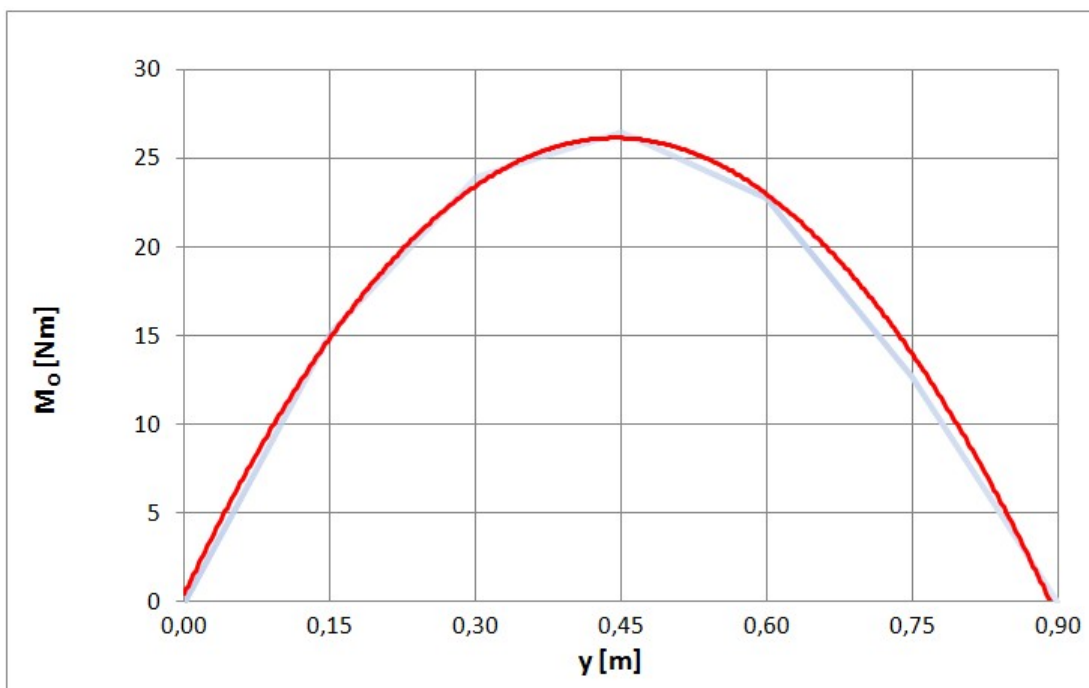
$$M_{o(y)} = F_A \cdot y - \frac{q_0 \cdot y^2}{2} - \left(\frac{q_k - q_0}{2} \right) \cdot \frac{2}{3} \cdot y^2 \quad (6.26)$$

Tab. 2: Výsledné hodnoty posouvající síly a ohyb. momentu v jednotlivých řezech

y [m]	q [N/m]	T [N]	M _o [Nm]
0	254,36	121,82	0
0,150	262,85	79,85	15,13
0,300	271,34	37,88	23,96
0,450	279,83	-4,08	26,50
0,600	288,33	-46,05	22,73
0,750	296,82	-88,02	12,67
0,898	305,19	-129,42	0



Obr. 26: Průběh posouvající síly



Obr. 27: Průběh ohybového momentu

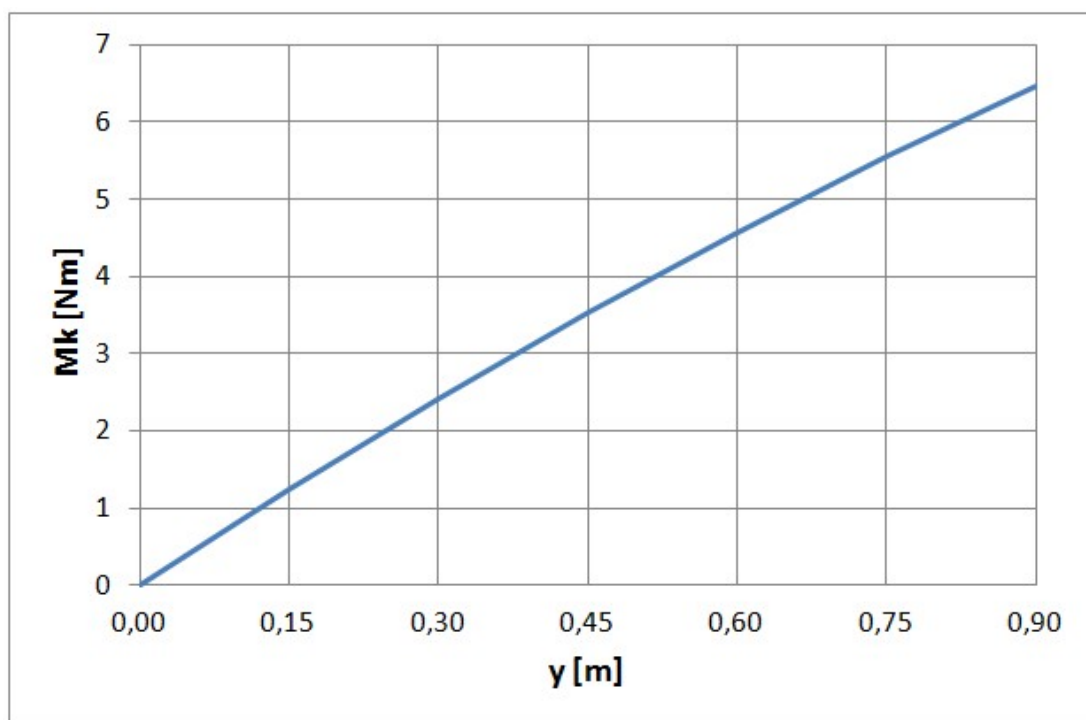
6.3 Průběh kroutícího momentu

Kroutící moment je pro zjednodušení a základní dimenzování jednotlivých konstrukčních prvků uvažován k ose otáčení křídélka a je určen vztahem:

$$M_K = \int_0^L q(y) \cdot r(y) \cdot dy \quad (6.27)$$

Tab. 3: Výsledné hodnoty kroutícího momentu v jednotlivých řezech

y [m]	r ₀ [m]	a [m]	r [m]	q [N/m]	M _K [Nm]
0	0,097	0,074	0,023	254,36	0
0,150	0,100	0,076	0,024	262,85	1,232
0,300	0,104	0,079	0,025	271,34	2,411
0,450	0,107	0,081	0,026	279,83	3,523
0,600	0,110	0,084	0,026	288,33	4,568
0,750	0,113	0,086	0,027	296,82	5,550
0,898	0,116	0,089	0,028	305,19	6,472

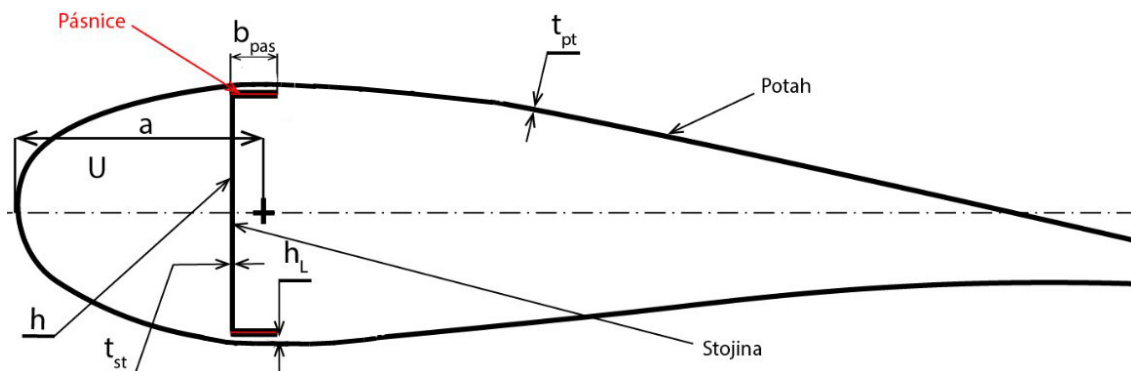


Obr. 28: Průběh kroutícího momentu

7 Pevnostní kontrola

Ohybový moment od zatížení je zachycen pásnicemi nosníku, stojina zachycuje posouvající sílu. Kroutící moment je zachycen dutým tenkostěnným průřezem, který tvoří stojina nosníku a potah náběžné části nosníku.

Průřez křídélka je zobrazen na **Obr.29**. V **Tab.4** a **Tab.5** jsou uvedeny hodnoty pro kořenový a koncový řez odečtené z 3D modelu.



Obr. 29: Průřezové charakteristiky

Tab. 4: Průřezové charakteristiky pro kořenový řez

Výška nosníku h [mm]	61,8
Plocha přední dutiny U [mm ²]	2755,5
Poloha osy otáčení od náběžné hrany a [mm]	88,5
Tloušťka stojiny nosníku t_{st} [mm]	0,4
Tloušťka potahu t_{pt} [mm]	0,4
Šířka pásnice b_{pas} [mm]	15
Tloušťka jedné vrstvy pásnice h_{pas} [mm]	0,13
Výška vrstvy lepidla h_L [mm]	0,6

Tab. 5: Průřezové charakteristiky pro koncový řez

Výška nosníku h [mm]	51,9
Plocha přední dutiny U [mm ²]	2024,9
Poloha osy otáčení od náběžné hrany a [mm]	73,7
Tloušťka stojiny nosníku t_{st} [mm]	0,4
Tloušťka potahu t_{pt} [mm]	0,4
Šířka pásnice b_{pas} [mm]	15
Tloušťka jedné vrstvy pásnice h_{pas} [mm]	0,13
Výška vrstvy lepidla h_L [mm]	0,6

Při pevnostních výpočtech je pro zjednodušení uvažována jen přední dutina zachycující kroutící moment. Ve skutečnosti dochází i k namáhání zadní dutiny, avšak pro prvotní kontrolu a nadimenzování základní konstrukce lze tuto neuvažovat.

7.1 Kontrola pásnic

Pásnice nosníku zachycují ohybový moment od zatížení. Dle Špundy [4] je velikost norm. napětí v pásnicích dána vztahem:

$$\sigma_N = \frac{M_o}{W_o} \cdot k \leq \sigma_D \quad (7.1)$$

kde:

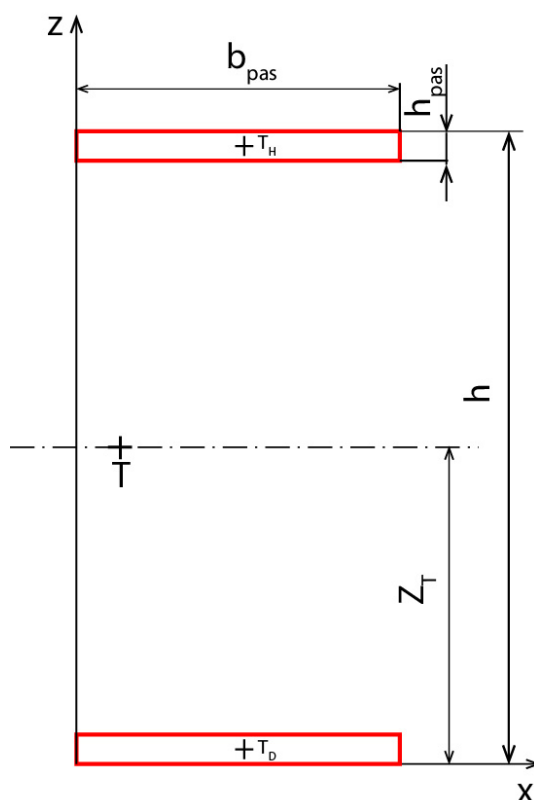
M_o je ohybový moment od výsledného zatížení v Nmm;

W_o je modul průřezu v ohybu v mm^3 ;

$k = 1,875$ je součinitel bezpečnosti;

$\sigma_D = 800 \text{ MPa}$ je maximální dovolené napětí.

Ukázkový výpočet pro řez přibližně uprostřed křídélka ($y = 450 \text{ mm}$), kde je nejvyšší hodnota ohybového momentu:



Obr. 30: Poloha pásnic vzhledem k hlavnímu těžišti nosníku

Kvadratický moment k těžištní ose vychází ze Steinerovy věty:

$$J_{X_T} = \frac{1}{12} \cdot b_{pas} \cdot h_{pas}^3 + A_H \cdot \left(Z_T - \frac{h_{pas}}{2} \right)^2 + \frac{1}{12} \cdot b_{pas} \cdot h_{pas}^3 + A_D \cdot \left(\frac{h_{pas}}{2} - Z_T \right)^2 \quad (7.2)$$

Plocha pásnice:

$$A_H = A_D = b_{pas} \cdot h_{pas} = 15 \cdot 0,13 = 1,95 \text{ mm}^2 \quad (7.3)$$

Poloha těžiště vzhledem k ose Z je v polovině výšky nosníku:

$$Z_T = \frac{h}{2} = \frac{56,86}{2} = 28,43 \text{ mm} \quad (7.4)$$

Velikost kvadratického momentu k těžištní ose je tedy:

$$\begin{aligned} J_{X_T} &= 2 \cdot \left[\frac{1}{12} \cdot b_{pas} \cdot h_{pas}^3 + A_{pas} \cdot \left(Z_T - \frac{h_{pas}}{2} \right)^2 \right] = \\ &= 2 \cdot \left[\frac{1}{12} \cdot 15 \cdot 0,13^3 + 1,95 \cdot \left(28,43 - \frac{0,13}{2} \right)^2 \right] = 3138 \text{ mm}^4 \quad (7.5) \end{aligned}$$

Modul průřezu v ohybu:

$$W_o = \frac{J_{X_T}}{Z_T} = \frac{3138}{28,43} = 110,4 \text{ mm}^3 \quad (7.6)$$

Normálové napětí v pásnicích v místě řezu $y = 450 \text{ mm}$:

$$\sigma_N = \frac{M_o}{W_o} \cdot k = \frac{26490}{110,4} \cdot 1,875 = 450 \text{ MPa} \leq 800 \text{ MPa} \rightarrow \text{vyhovuje} \quad (7.7)$$

Jelikož je normálové napětí ve všech průřezích křídélka menší než maximální přípustné napětí 800 MPa, je k zachycení ohybového momentu jedna vrstva pásnic o tloušťce 0,13 mm dostatečná. V **Tab.6** jsou zobrazeny výsledky pro jednotlivé řezy.

Tab. 6: Normálové napětí v pásnicích v jednotlivých řezech

y [mm]	M_o [mm]	h [mm]	A_{pas} [mm ²]	Z_T [mm]	J_{X_T} [mm ⁴]	W_o [mm ³]	σ_N [MPa]
0	0	51,90	1,95	25,95	2613,1	100,7	0
150	15125	53,55	1,95	26,78	2782,7	103,9	272,9
300	23955	55,21	1,95	27,60	2957,7	107,1	419,2
450	26490	56,86	1,95	28,43	3138,0	110,4	450,0
600	22730	58,51	1,95	29,26	3323,6	113,6	375,2
750	12674	60,17	1,95	30,08	3514,5	116,8	203,4
898	0	61,80	1,95	30,90	3708,1	120,0	0

7.2 Kontrola stojiny

Podle Špundy [4] je výsledná velikost smykového napětí ve stojině dána součtem smykového napětí τ_{st}^I od posouvající síly a smykového napětí τ_{st}^{II} od kroutícího momentu.

$$\tau_{st} = \tau_{st}^I + \tau_{st}^{II} = \frac{T_p}{h_e \cdot t_{st}} + \frac{M_{Kp}}{2 \cdot U \cdot t_{st}} \leq \tau_{\bar{k}} \quad (7.8)$$

kde:

$T_p = T \cdot k$	je posouvající síla násobená součinitelem bezpečnosti $k=1,875$ v N;
$M_{Kp} = M_K \cdot k$	je kroutící moment násobený součinitelem bezpečnosti $k=1,875$ v Nmm;
t_{st}	je tloušťka stojiny v mm;
h_e	je výška stojiny v mm;
U	je plocha přední dutiny v mm^2 , kterou tvoří stojina nosníku s potahem;
$\tau_{\bar{k}}$	je kritické smykové napětí v MPa.

Ukázkový výpočet pro řez na konci křídélka:

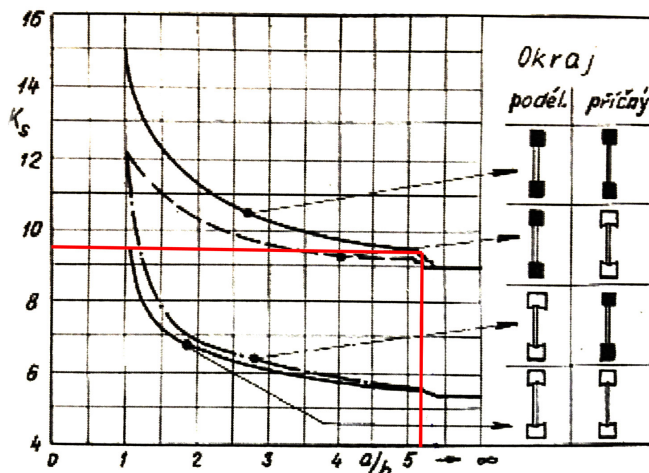
$$\tau_{st} = \tau_{st}^I + \tau_{st}^{II} = \frac{T_p}{h_e \cdot t_{st}} + \frac{M_{Kp}}{2 \cdot U \cdot t_{st}} = \frac{228,405}{51,6 \cdot 0,4} + \frac{0}{2 \cdot 2024,9 \cdot 0,4} = 11,058 \text{ MPa} \quad (7.9)$$

Kritické smykové napětí je dle [3]:

$$\tau_{\bar{k}} = 3 \cdot K_S \cdot E \cdot \left(\frac{t_{st}}{b} \right)^2 \quad (7.10)$$

kde:

K_S	je koeficient odečtený z Obr.31 ² ;
E	je modul pružnosti v tahu v MPa;
t_{st}	je tloušťka stojiny v mm;
b	je výška nosníku v mm.



Obr. 31: Odečtení koeficientu K_S z diagramu [4]

²Poměr a/b je poměr délky křídélka ku výšce nosníku.

Kritické napětí pro řez na konci křídélka:

$$\tau_{\bar{k}} = 3 \cdot K_S \cdot E \cdot \left(\frac{t_{st}}{b}\right)^2 = 3 \cdot 9,5 \cdot 61562 \cdot \left(\frac{0,4}{51,9}\right)^2 = 104,218 \text{ MPa} \quad (7.11)$$

$$\tau_{st} \leq \tau_{\bar{k}} \quad \rightarrow \quad 11,058 \leq 104,218 \quad \rightarrow \quad \text{vyhovuje} \quad (7.12)$$

Tab. 7: Smykové napětí ve stojině v jednotlivých řezech

y [mm]	M_K [Nmm]	M_{Kp} [Nmm]	T [N]	T_p [N]	h_e [mm]	U [mm ²]	τ_{st} [mm]
0	0	0	121,82	228,41	51,6	2024,9	11,058
150	1232	2310	79,85	149,72	53,3	2416,9	8,368
300	2411	4521	37,88	71,03	54,9	2269,0	5,722
450	3523	6606	-4,08	-7,66	56,6	2391,0	3,115
600	4568	8565	-46,05	-86,34	58,3	2513,1	0,555
750	5550	10406	-88,02	-165,03	59,9	2635,1	-1,950
898	6472	12135	-129,42	-242,67	61,5	2755,5	-4,353

Tab. 8: Kritické napětí v jednotlivých řezech

y [mm]	a [mm]	b [mm]	a/b [mm]	K_S [-]	$\tau_{\bar{k}}$ [mm]
0	275,7	51,9	5,31	9,5	104,218
150	284,9	53,6	5,32	9,5	97,881
300	294,1	55,2	5,33	9,5	92,105
450	303,3	56,9	5,33	9,5	86,826
600	312,5	58,5	5,34	9,5	81,987
750	321,7	60,2	5,35	9,5	77,543
898	330,8	61,8	5,35	9,5	73,502

7.3 Kontrola potahu

Dle Špundy [4] kroutící moment M_K vyvodí v tenké stěně dutého průřezu přibližně konstantní smykový tok:

$$(\tau_{pt} \cdot t_{pt}) = \frac{M_{Kp}}{2 \cdot U} \quad (7.13)$$

kde:

τ_{pt} je smykové napětí v potahu v MPa;

t_{pt} je tloušťka potahu v mm;

$M_{Kp} = M_K \cdot k$ je kroutící moment násobený součinitelem bezpečnosti $k=1,875$ v Nmm;

U je plocha přední dutiny v mm², kterou tvoří stojina nosníku s potahem.

Ukázkový výpočet pro kořenový řez:

$$\tau_p = \frac{M_{Kp}}{2 \cdot U \cdot t_{pt}} = \frac{12135}{2 \cdot 2755,5 \cdot 0,4} = 5,50 \text{ MPa} \quad (7.14)$$

Kritické smykové napětí³ se určí stejně jako u stojiny dle [3] a pro jednotlivé řezy je zobrazeno v **Tab.8**:

$$\tau_{\bar{k}} = 3 \cdot K_S \cdot E \cdot \left(\frac{t_{pt}}{b} \right)^2 = 3 \cdot 9,5 \cdot 61562 \cdot \left(\frac{0,4}{51,9} \right)^2 = 104,218 \text{ MPa} \quad (7.15)$$

$$\tau_{pt} \leq \tau_{\bar{k}} \quad \rightarrow \quad 5,50 \leq 104,218 \quad \rightarrow \quad \text{vyhovuje} \quad (7.16)$$

Tab. 9: Smykové napětí v potahu v jednotlivých řezech

y [mm]	M_K [Nmm]	M_{Kp} [Nmm]	U [mm ²]	τ_{pt} [MPa]
0	0	0	2024	0
150	1232	2310	2146,9	1,34
300	2411	4521	2269,0	2,49
450	3523	6606	2391,0	3,45
600	4568	8565	2513,1	4,26
750	5550	10406	2635,1	4,94
898	6472	12135	2755,5	5,50

³Kritické smykové napětí $\tau_{\bar{k}}$ je zjednodušeně uvažováno pro rovnou desku. Reálně by hodnoty $\tau_{\bar{k}}$ vycházely vyšší, tudíž při uvažování rovné desky je výpočet bezpečný.

8 Hmotový rozbor

Potah, stojina i pásnice jsou vyrobeny z uhlíkových prepregů. Plošné hustoty materiálu jsou zobrazeny v **Tab.10**.

Potah i stojina jsou tvořeny dvěma vrstvami, kde tloušťka jedné vrstvy je 0,2 mm. Pásnice nosníku tvoří jedna vrstva o tloušťce 0,13 mm. Plochy jednotlivých vrstev byly odečteny z 3D modelu. V **Tab.10** jsou zobrazeny výsledné hmotnosti jednotlivých dílů.

Tab. 10: Výsledná hmotnost jednotlivých dílů

Díl	Plošná hustota [g/m ²]	Plocha 1 vrstvy [m ²]	Počet vrstev	Výsledná hmotnost [g]
Potah	320	0,559	2	357,76
Stojina	320	0,077	2	49,41
Pásnice	188	0,013	1	2,52

Pro spojení nosníku s potahem křídélka je uvažováno lepidlo s označením Hysol 9394, jehož hustota je 1360 kg/m³. Výška mezery mezi nosníkem a potahem je 0,6 mm.

Celkový potřebný objem lepidla:

$$V_L = 2 \cdot S \cdot h_L = 2 \cdot 13\,393 \cdot 0,6 = 16\,071,6 \text{ mm}^3 = 1,607 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (8.1)$$

Hmotnost lepidla je:

$$m_L = \rho_L \cdot V_L = 1\,360 \cdot 1,607 \cdot 10^{-5} = 0,02185 \text{ kg} = 21,85 \text{ g} \quad (8.2)$$

Celková hmotnost:

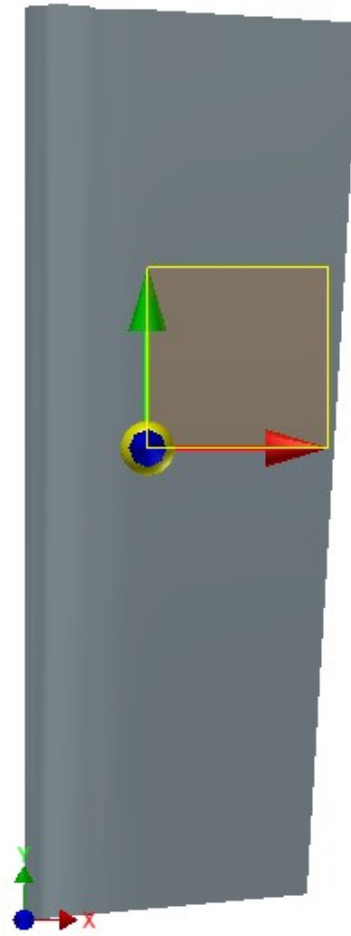
$$m = m_{pt} + m_{st} + 2 \cdot m_{pas} + m_L = 357,76 + 49,41 + 2 \cdot 2,52 + 21,85 = 434,06 \text{ g} \quad (8.3)$$

Poloha těžiště byla určena v programu Autodesk Inventor z 3D modelu (**Obr.32** a **Obr.33**).

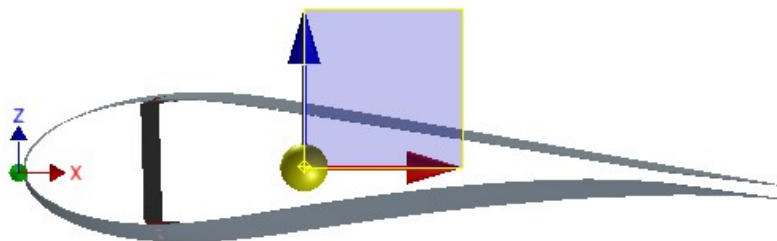
$$x_T = 121,348 \text{ mm} \quad (8.4)$$

$$y_T = 464,291 \text{ mm} \quad (8.5)$$

$$z_T = 0,349 \text{ mm} \quad (8.6)$$



Obr. 32: Poloha těžiště křídélka v rovině xy



Obr. 33: Poloha těžiště křídélka v rovině xz

9 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout křídélko pro malý sportovní letoun. Po úvodní teoretické části, přiblížení problematiky a příkladech možných konstrukcí křídélka byl zpracován vlastní konstrukční návrh. Nejprve bylo dle stavebního předpisu UL-2 stanoveno zatížení od vnějších sil, z něhož pak bylo možné vytvořit 3D model základních konstrukčních prvků a provést pevnostní výpočet. Kroutící moment, jímž je namáhána stojina nosníku a potah křídélka, byl pro zjednodušení a základní n-dimenzování uvažován k ose otáčení křídélka. Z pevnostního výpočtu je zřejmé, že k zachycení ohybového momentu je dostatečná jedna vrstva pásnic o tloušťce 0,13 mm, která je vyrobena z uhlíkového prepregu. Stojina nosníku a potah jsou při porovnání s kritickým smykovým napětím namáhány jen nepatrně. V závěru práce byl zpracován hmotový rozbor křídélka, čímž bylo splněno zadání práce ve všech bodech.

Vzhledem k omezeným časovým možnostem nebylo v této práci řešeno konstrukční provedení závěsů a ovládání křidélek.

Seznam použité literatury

- [1] Australian National Airline College. *Effect of Controls*. Dostupné z: <http://www.flying-school.com/effect-of-controls/>, 2015. [cit. 2017-06-13].
- [2] ZÁLEŠÁK F. *Konstrukce a projektování letadel: Kapitola 6. Kormidla příčného řízení*. Skripta. Vojenská akademie Antonína Zápotockého, 1956.
- [3] FUNKE H. *Systematische Entwicklung von Ultra-Leichtbaukonstruktionen in Faserverbund-Wabensandwichbauweise am Beispiel eines Kleinflugzeuges*. Dostupné z: http://www.r-g.de/w/images/9/99/Dissertation_von_Herbert_Funke.pdf, 2001. [cit. 2017-07-13].
- [4] ŠPUNDA J. *Pevnost leteckých konstrukcí: Nosná soustava - křídla letounu*. Skripta. Vojenská akademie Antonína Zápotockého, 1955.
- [5] LAA ČR. *UL 2 - I. Část: Požadavky letové způsobilosti SLZ. Ultra-lehké letouny řízené aerodynamicky*. Dostupné z: <http://www.laacr.cz/SiteCollectionDocuments/predpisy/UL2-I.pdf>, 2005. [cit. 2017-06-13].
- [6] LAA ČR. *Vývoj ultralehkých letadel od roku 1990 do roku 2011*. Dostupné z: <http://www.laacr.cz/SiteCollectionDocuments/doc/laacr/01-o-nas/05-historie/2011-03-vyvoj-ul-letadel.pdf>, 2011. [cit. 2017-06-13].
- [7] SLAVÍK S. *Stavba letadel*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997.
- [8] Vyhláška č. 108/1997 Sb. Vyhláška ministerstva dopravy a spojů, kterou se provádí zákon č. 49/1997 sb., o civilním letectví a o změně a doplnění zákona č. 455/1991 sb., o živnostenském podnikání (živnostenský zákon), ve znění pozdějších předpisů. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1997-108>, 1997. [cit. 2017-06-13].
- [9] Zákon č. 49/1997 Sb. Zákon o civilním letectví a o změně a doplnění zákona č. 455/1991 sb., o živnostenském podnikání (živnostenský zákon), ve znění pozdějších předpisů. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1997-49>, 1997. [cit. 2017-06-13].
- [10] KOŘÍNEK Z. *Technologie výroby kompozitů*. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/technologie.pdf?redirected=1501141723>. [cit. 2017-07-13].

Seznam obrázků

1	Letadlový souřadnicový systém a ovládací prvky [1]	11
2	Klopení letounu [1]	11
3	Zatáčení letounu [1]	12
4	Klonění letounu [1]	12
5	Typy spoilerů [7]	13
6	Interceptor [7]	13
7	Vznik klonivého momentu [2]	14
8	Křídélko s torzní skříní v náběžné části [2]	15
9	Konstrukce křídélka s torzní skříní v náběžné části [2]	15
10	Křídélko s trubkovým nosníkem bez torzní skříně [2]	16
11	Závěsná kování [2]	17
12	Zavedení momentu pomocí konsoly [2]	17
13	Zavedení momentu přímo [2]	17
14	Zavedení momentu přímo [2]	17
15	Závěsná kování křidélek s trubkovým nosníkem [2]	18
16	Provedení závěsu s uchycením na žebra [2]	18
17	Provedení závěsu na nosníku [2]	18
18	Konstrukční provedení koncového zavěšení [2]	19
19	Schéma křídélka	20
20	3D model křídélka	20
21	Detail horní části nosníku	21
22	Velikost měrného zatížení po hloubce křídélka [5]	22
23	Polohy působišť jednotlivých zatížení po hloubce křídélka	23
24	Výsledné zatížení po délce křídélka	24
25	Poloha působišť zatěžující síly po délce křídélka	25
26	Průběh posouvající síly	27
27	Průběh ohybového momentu	27
28	Průběh krouťícího momentu	28
29	Průřezové charakteristiky	29
30	Poloha pásnic vzhledem k hlavnímu těžišti nosníku	30
31	Odečtení koeficientu K_S z diagramu [4]	32
32	Poloha těžiště křídélka v rovině xy	36
33	Poloha těžiště křídélka v rovině xz	36

Seznam tabulek

1	Výsledné zatížení v jednotlivých řezech a polohy působišť	24
2	Výsledné hodnoty posouvající síly a ohyb. momentu v jednotlivých řezech	26
3	Výsledné hodnoty kroutícího momentu v jednotlivých řezech	28
4	Průřezové charakteristiky pro kořenový řez	29
5	Průřezové charakteristiky pro koncový řez	29
6	Normálové napětí v pásnicích v jednotlivých řezech	31
7	Smykové napětí ve stojně v jednotlivých řezech	33
8	Kritické napětí v jednotlivých řezech	33
9	Smykové napětí v potahu v jednotlivých řezech	34
10	Výsledná hmotnost jednotlivých dílů	35