

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

LETADLOVÁ TECHNIKA

JAKUB VALENTA
2017

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
NÁVRH VZTLAKOVÉ KLAPKY MALÉHO
SPORTOVNÍHO LETOUNU

LETADLOVÁ TECHNIKA
JAKUB VALENTA
2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Valenta** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **439040**
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 vztlakové klapky malého sportovního letounu

Název bakalářské práce anglicky:

Design of a small sport aircraft trailing edge flap

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

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

Seznam doporučené literatury:

- Mikula, J.: Konstrukce a projektování letadel II, ČVUT v Praze, 2005
- ŠPUNDA, J.: Stavební mechanika a pevnost letadel, Požadavky pro dosažení letové způsobilosti podle pevnostních předpisů a výpočet zatížení letounu a jeho částí, skripta VAAZ, 1961
- ŠPUNDA, J.: Stavební 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

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat mé rodině za neúnavnou podporu, kterou mi neustále poskytuje. Velký dík patří mému vedoucímu Ing. Jiřímu Brabcovi Ph.D. za ochotu a pomoc při zpracování této bakalářské práce.

Autor: Jakub Valenta

Název bakalářské práce: Návrh vztlakové klapky malého sportovního letounu

Rozsah práce: 53 str., 49 obr., 6 grafů, 8 tab.

Rok vyhotovení: 2017

Universita: České vysoké učení technické v Praze - fakulta strojní

Ústav: Ústav letadlové techniky

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Brabec, Ph.D.

Klíčová slova: Vztlaková klapka, zatížení, pevnost, stabilita, hmotnost

Anotace:

Úkolem této bakalářské práce je navrhnout vztlakovou klapku letounu UL-39 Albi. Po obecném přehledu principů vztlakových mechanizací následuje část popisující používaná konstrukční řešení, z kterých jsou zvoleny principy použité v řešené klapce. Dále se nachází část zabývající se pevností, kde je určeno zatížení klapky, na jehož základě jsou provedeny pevnostní a kontrolní výpočty. Na závěr je vypočítán hmotnostní rozbor klapky.

Author: Jakub Valenta

Title of bachelor thesis: Design of a small sport aircraft trailing edge flap

Extent: 53 pg., 49 fig., 6 graphs, 8 tab.

Academic year: 2017

University: Czech Technical University in Prague - Faculty of mechanical engineering

Department: Department of Aerospace Engineering

Supervisor: Ing. Jiří Brabec, Ph.D.

Key words: Trailing edge flap, load, strength, stability, weight

Annotation:

The task of this bachelor thesis is a design of trailing edge flap for U1-39 Albi airplane. After general summary of flap principles continues part, which describes a typical construction variants. From this construction tips are chosen variants used in solved flap. Next part is about a strength and there is defined a load of flap, from which is made strength and control calculations. At the end is calculate mass analysis of the flap.

Obsah

Seznam obrázků	9
Seznam grafů	10
Seznam tabulek	10
Seznam příloh	10
Seznam použitých programů	10
Seznam použitých symbolů	11
1 Úvod	15
2 Možnosti a principy vztlakové mechanizace	16
2.1 Pasivní mechanizace	17
2.1.1 Klapka na náběžné hraně	17
2.1.2 Klapka na odtokové hraně	18
2.2 Aktivní mechanizace	19
2.2.1 Vnitřní princip	19
2.2.2 Vnější princip	21
3 Konstrukce	22
3.1 Podélný systém	22
3.2 Příčný systém	23
3.3 Potahy	23
3.4 Zvolená konstrukční řešení vztlakové klapky letounu UL-39 Albi	24
3.4.1 Nosník	24
3.4.2 Žebra	25
3.4.3 Potah	27
4 Pevnostní požadavky	28
4.1 Mechanické vlastnosti uhlíkového kompozitu	28
4.2 Součinitele bezpečnosti	28
4.2.1 Součinitel bezpečnosti pro uhlíkový kompozit	29
4.3 Letová obálka	29
5 Stanovení zatížení	30
5.1 Zjednodušení geometrie klapky	30
5.2 Zatížení podle předpisu UL 2	30
5.2.1 Výpočet spojitého zatížení	31
5.3 Reakce od závěsů klapky	32
5.4 Posouvající síla a ohybový moment	34
5.4.1 Určení polohy druhého závěsu	36

5.5	Kroučící moment vzhledem k náběžné hraně klapky	37
6	Dimenzování pásnic nosníku na ohyb	39
6.1	Zjednodušení geometrie průřezu pásnic	39
6.2	Pevnostní výpočet	41
6.3	Kontrola a určení bezpečnosti po délce nosníku.	42
7	Smykové zatížení klapky	45
7.1	Výpočet smykového namáhání	45
7.2	Stabilita smykově namáhaných částí	48
7.2.1	Výpočet stability potahu	48
7.2.2	Výpočet stability stojiny nosníku	49
8	Hmotový rozbor	50
8.1	Hustoty použitých materiálů	50
8.2	Polohy těžišť komponent klapky	50
8.3	Výpočet hmotností	50
9	Závěr	52
10	Použité zdroje	53

Seznam obrázků

Obr. 1 Mechanizace křídla letounu [2]	16
Obr. 2 Typy systémů mechanizace křídla [3]	17
Obr. 3 Varianty klapek na náběžné hraně [4]	18
Obr. 4 Varianty klapek na odtokové hraně [3]	19
Obr. 5 Princip vyfukování mezní vrstvy na klapce [5]	20
Obr. 6 Princip tryskové klapky [5]	20
Obr. 7 Odsávání a dobíjení mezní vrstvy [6]	20
Obr. 8 Ofukování ze shora [5]	21
Obr. 9 Ofukování ze spodu [5]	21
Obr. 10 Vývoj mechanizace na letadlech Boeing [4]	21
Obr. 11 Slot na náběžné hraně [3]	21
Obr. 12 Výsuvná klapka na odtokové hraně [3]	21
Obr. 13 Typy nosníků [3]	22
Obr. 14 Podélníky pro lehká letadla [3]	22
Obr. 15 Druhy příčných systémů [3]	23
Obr. 16 Konstrukční uspořádání nosné konstrukce [3]	23
Obr. 17 Konstrukce klapky	24
Obr. 18 Nosník	24
Obr. 19 Uspořádání tkanin v řezu nosníkem	24
Obr. 20 Orientace vláken tkanin v nosníku	25
Obr. 21 Uspořádání žebra u kořene	25
Obr. 22 Uspořádání žebra 2	26
Obr. 23 Uspořádání žebra na konci	26
Obr. 24 Orientace vláken tkaniny v žebro na konci	26
Obr. 25 Zadní zámek potahu	27
Obr. 26 Přední zámek potahu	27
Obr. 27 Uspořádání vláken tkaniny potahu	27
Obr. 28 Obálka obrátů [7]	29
Obr. 29 Obálka poryvů [7]	29
Obr. 30 Geometrie klapky	30
Obr. 31 Zatížení podle UL 2 [7]	30
Obr. 32 Plošné zatížení klapky	31
Obr. 33 Uvolnění klapky	32
Obr. 34 Poloha těžiště zatěžujícího obrazce	33
Obr. 35 Řez v části I	34
Obr. 36 Řez v části II	34
Obr. 37 Určení směrnice přímky $q(\bar{x})$	35
Obr. 38 Určení směrnice přímky $b(\bar{x})$	38
Obr. 39 Uvažované silové uspořádání pro dimenzování pásnic	39
Obr. 40 Průřez pásnic	39
Obr. 41 Průřez pásnic se sklonem	40
Obr. 42 Výška nosníku po délce	40
Obr. 43 Skokové snížení nosníku	40
Obr. 44 Průřez rozdílných pásnic	42
Obr. 45 Geometrie klapky a silové poměry	45
Obr. 46 Namáhání klapky	45
Obr. 47 Stabilita tenké desky [10]	48
Obr. 48 Odečet rozměrů potahu	48

Obr. 49 Absolutní souřadnicový systém letounu	50
---	----

Seznam grafů

Graf 1 Spojité zatížení po délce klapky	32
Graf 2 Posouvající síla po délce klapky	37
Graf 3 Ohybový moment po délce klapky	37
Graf 4 Kroutící moment vzhledem k náběžné hraně klapky	38
Graf 5 Bezpečnost horní pásnice	44
Graf 6 Bezpečnost spodní pásnice	44

Seznam tabulek

Tab. 1 Napětí po délce klapky	43
Tab. 2 Výsledky provozního smykového namáhání klapky	47
Tab. 3 Početní smyková napětí	47
Tab. 4 Bezpečnosti vůči pevnosti ve smyku	47
Tab. 5 Kritická smyková napětí zadní části potahu	49
Tab. 6 Kritická smyková napětí stojiny nosníku	49
Tab. 7 Polohy těžišť komponent klapky v absolutním souřadnicovém systému letounu	50
Tab. 8 Hmotnosti komponent klapky	51

Seznam příloh

Příloha 1 CAD model vztlakové klapky	
Příloha 2 Soubor výpočtů	

Seznam použitých programů

Adobe Illustrator CS6	
Adobe Photoshop CS6	
Microsoft Office Word 2007	
Microsoft Office Excel 2007	
Dassault Systems SolidWorks 2012	

Seznam použitých symbolů

a	[m]	poloha druhého závěsu
a_D	[m]	délka desky namáhané na krut
b	[m]	hloubka klapky po délce
b_0	[m]	hloubka klapky u kořene
b_D	[m]	hloubka desky namáhané na smyk
b_P	[m]	hloubka pásnice nosníku
b_{PH}	[m]	hloubka horní pásnice nosníku
b_{PS}	[m]	hloubka spodní pásnice nosníku
b_k	[m]	hloubka klapky na konci
C_y	[-]	součinitel vztaku
COG		těžiště zatěžujícího obrazce z anglického center of gravity
COG ₁		těžiště plochy S_1
COG ₂		těžiště plochy S_2
COG _{PH}		těžiště horní pásnice
COG _{PS}		těžiště spodní pásnice
E	[Pa]	Youngův modul pružnosti v tahu
E.O.		elastická osa
h	[m]	výška nosníku po délce
h_0	[m]	výška nosníku na počátku přímé části
h_1	[m]	výška nosníku po hloubce pásnice na počátku
h_2	[m]	výška nosníku po hloubce pásnice na konci
h_k	[m]	výška nosníku na konci přímé části
h_S	[m]	střední výška nosníku po délce
h_{SK}	[m]	střední výška přepážky profilu (stojiny nosníku)
J_{z_N}	[m ⁴]	kvadratický moment průřezu k ose z_N
K_S	[-]	součinitel velikosti pro výpočet τ_K
k	[-]	součinitel bezpečnosti
k_{1P}	[-]	bezpečnost přední dutiny vůči pevnosti ve smyku
k_{2P}	[-]	bezpečnost zadní dutiny vůči pevnosti ve smyku
k_H	[-]	součinitel bezpečnosti horní pásnice
k_S	[-]	součinitel bezpečnosti spodní pásnice
k_{SP}	[-]	bezpečnost stojiny nosníku vůči pevnosti ve smyku
L	[m]	délka klapky
L_n	[m]	délka po délce přímé části nosníku
M_A	[Nm]	moment vztažený k bodu A
M_C	[Nm]	moment vztažený k bodu C
M_D	[Nm]	moment vztažený k bodu D
M_{kI}	[Nm]	kroutící moment vztažený k náběžné hraně klapky v oblasti I
M_{kII}	[Nm]	kroutící moment vztažený k náběžné hraně klapky v oblasti II
$M_{kE.O.}$	[Nm]	kroutící moment vztažený k elastické ose
M_{OI}	[Nm]	ohybový moment v oblasti I
M_{OII}	[Nm]	ohybový moment v oblasti II
M_{Omax}	[Nm]	maximální ohybový moment
m	[kg]	hmotnost letounu
m_{1V}	[kg]	hmotnost jedné vrstvy prepregu

m_{ck}	[kg]	celková hmotnost vztlakové klapky
m_K	[kg]	hmotnost komponentu
m_L	[kg]	hmotnost lepidla
m_N	[kg]	hmotnost nosníku
m_{Pot}	[kg]	hmotnost potahu
m_{Z0}	[kg]	hmotnost závěsu u kořene
m_{Z2}	[kg]	hmotnost závěsu 2
$m_{ž0}$	[kg]	hmotnost žebra u kořene
$m_{ž2}$	[kg]	hmotnost žebra 2
$m_{žK}$	[kg]	hmotnost žebra na konci
N, O, P		konstanty obecného zápisu rovnice přímky
n	[-]	provozní násobky obrátů
\vec{n}		normálový vektor na vektor \vec{v}
o.o.		ohybová osa nosníku
Q	[N]	osamocená síla vyvolaná působením spojitého zatížení
Q_{I1}	[N]	osamocená síla vyvolaná působením zatěžujícího obrazce S_1 v oblasti I
Q_{II1}	[N]	osamocená síla vyvolaná působením zatěžujícího obrazce S_1 v oblasti II
Q_{2I}	[N]	osamocená síla vyvolaná působením zatěžujícího obrazce S_2 v oblasti I
Q_{2II}	[N]	osamocená síla vyvolaná působením zatěžujícího obrazce S_2 v oblasti II
q	[N/m]	spojité zatížení po délce klapky
q_0	[N/m]	spojité zatížení u kořene klapky
q_1	[N/m]	smýkový tok v přední dutině
q_2	[N/m]	smýkový tok v zadní dutině
q_k	[N/m]	spojité zatížení na konci klapky
q_s	[N/m]	smýkový tok ve stojině nosníku (přepážce profilu)
q_{SC}	[N/m]	celkový smýkový tok ve stojině nosníku (přepážce profilu)
R_A	[N]	reakce v místě závěsu u kořene klapky
R_B	[N]	reakce v místě druhého závěsu
r_P	[m]	poloha krajního vlákna
r_{PH}	[m]	poloha krajního vlákna horní pásnice
r_{PS}	[m]	poloha krajního vlákna spodní pásnice
S	[m ²]	plocha křídla
S_1	[m ²]	plocha první části zatěžujícího obrazce
S_2	[m ²]	plocha druhé části zatěžujícího obrazce
S_{1+2}	[m ²]	součet ploch S_1 a S_2
S_{IV}	[m ²]	plocha jedné vrstvy prepregu
S_{PH}	[m ²]	plocha průřezu horní pásnice
S_{PS}	[m ²]	plocha průřezu spodní pásnice
s_1	[m]	délka střednice přední dutiny
s_2	[m]	délka střednice zadní dutiny
T	[N]	posouvající síla
T', T''	[N]	síly o stejné velikosti jako T zavedeny pro výpočet ohybu
T^*, T^{**}	[N]	síly o stejné velikosti jako T zavedeny pro výpočet krutu
T_I	[N]	posouvající síla v oblasti I

T_{II}	[N]	posouvající síla v oblasti II
t	[m]	tloušťka potahu a stojiny nosníku
t_P	[m]	tloušťka pásnice nosníku
t_{PH}	[m]	tloušťka horní pásnice nosníku
t_{PS}	[m]	tloušťka spodní pásnice nosníku
t_{1V}	[m]	tloušťka jedné vrstvy prepregu
U_1	[m ²]	plocha přední dutiny
U_2	[m ²]	plocha zadní dutiny
V_K	[m ³]	objem komponentu
\vec{v}		vektor popisující přímku
v_A	[m/s]	návrhová rychlost obratu
v_D	[m/s]	maximální návrhová rychlost strmého letu
v_{EAS}	[m/s]	ekvivalentní rychlost letu
W	[Pa]	velikost měrného zatížení na ploše
W^-	[Pa]	průměrné provozní zatížení plochy
W_O	[m ³]	průřezový modul v ohybu
x	[m]	souřadnice ve směru délky klapky
\bar{x}	[m]	souřadnice ve směru délky klapky jdoucí proti souřadnici x
x_1	[m]	poloha těžiště plochy S_1
x_2	[m]	poloha těžiště plochy S_2
x_A	[m]	souřadnice absolutního souřadnicového systému ve směru délky letounu
x_Q	[m]	působíště síly Q , poloha těžiště zatěžujícího obrazce
y	[m]	souřadnice ve směru tloušťky klapky
y'	[m]	souřadnice ve směru výšky nosníku zavedená pro výpočet polohy <i>o.o.</i>
y'_H	[m]	poloha těžiště průřezu horní pásnice ve směru osy y'
$y'_{o.o.}$	[m]	poloha elastické osy ve směru osy y'
y'_S	[m]	poloha těžiště průřezu spodní pásnice ve směru osy y'
y_A	[m]	souřadnice absolutního souřadnicového systému ve směru šířky letounu
y_K	[m]	souřadnice ve směru tloušťky profilu zavedená pro výpočet krutu
z	[m]	souřadnice ve směru hloubky klapky
\bar{z}'	[m]	souřadnice ve směru hloubky pásnic zavedená pro výpočet polohy <i>o.o.</i>
$\bar{z}'_{o.o.}$	[m]	poloha elastické osy ve směru osy \bar{z}'
\bar{z}_K	[m]	souřadnice ve směru hloubky profilu zavedená pro výpočet krutu, jdoucí proti souřadnici z
z_A	[m]	souřadnice absolutního souřadnicového systému ve směru výšky letounu
z_N	[m]	souřadnice ve směru hloubky nosníku
$z_{E.O.}$	[m]	poloha elastické osy ve směru osy \bar{z}_K
z_{NH}	[m]	vzdálenost náběžné hrany od stojiny nosníku
α	[°]	úhel náběhu
ϑ_1	[1/m]	zkrut přední dutiny
ϑ_2	[1/m]	zkrut zadní dutiny
κ	[-]	součinitel skladby materiálu pro výpočet τ_K
ρ_S	[kg/m ²]	plošná hustota

ρ_{Sjs}	[kg/m ²]	plošná hustota jedné vrstvy jednosměrného prepregu
ρ_{Svs}	[kg/m ²]	plošná hustota jedné vrstvy vícesměrného prepregu
ρ_V	[kg/m ³]	objemová hustota
ρ_{Vl}	[kg/m ³]	objemová hustota lepidla
σ_D	[Pa]	dovolené ohybové napětí
σ_{Dd}	[Pa]	dovolené napětí v tlaku
σ_{Dt}	[Pa]	dovolené napětí v tahu
σ_{OH}	[Pa]	napětí v horní pásnici nosníku
σ_{OS}	[Pa]	napětí ve spodní pásnici nosníku
σ_{Pt}	[Pa]	mez pevnosti v tahu
σ_{Pd}	[Pa]	mez pevnosti v tlaku
τ	[Pa]	smykové napětí
τ_1	[Pa]	smykové napětí v přední dutině
τ_{1p}	[Pa]	početní smykové napětí v přední dutině
τ_2	[Pa]	smykové napětí v zadní dutině
τ_{2K}	[Pa]	kritické smykové napětí v zadní části potahu
τ_{2p}	[Pa]	početní smykové napětí v zadní dutině
τ_K	[Pa]	kritické smykové napětí, při kterém dojde ke ztrátě stability
τ_p	[Pa]	početní smykové napětí
τ_{PS}	[Pa]	mez pevnosti ve smyku
τ_S	[Pa]	smykové napětí ve stojině nosníku
τ_{SK}	[Pa]	kritické smykové napětí ve stojině nosníku
τ_{Sp}	[Pa]	početní smykové napětí ve stojině nosníku

1 Úvod

Náplní této bakalářské práce je vytvořit návrh vztlakové klapky letounu UL-39 Albi. V první části se nachází zpracovaná teorie mechanizace křídel letounu, popisující různé principy a provedení vztlakových klapek. Vztlaková klapka je, co se týče konstrukčního hlediska, zmenšené křídlo. Proto je v části zabývající se architekturou klapky využito, mimo jiné, i zdrojů popisujících uspořádání prvků v křídlech letounů.

V tomto konkrétním případě je řešena Fowlerova šěrbinová klapka, jejíž komponenty jsou vyrobeny z uhlíkového kompozitu. V místech uchycení závěsů je mezi krajní vrstvy zalaminované jádro z březové překližky. V případě nedostatečné stability smykově namáhaných částí lze použít sendvičovou strukturu s pěnovým jádrem.

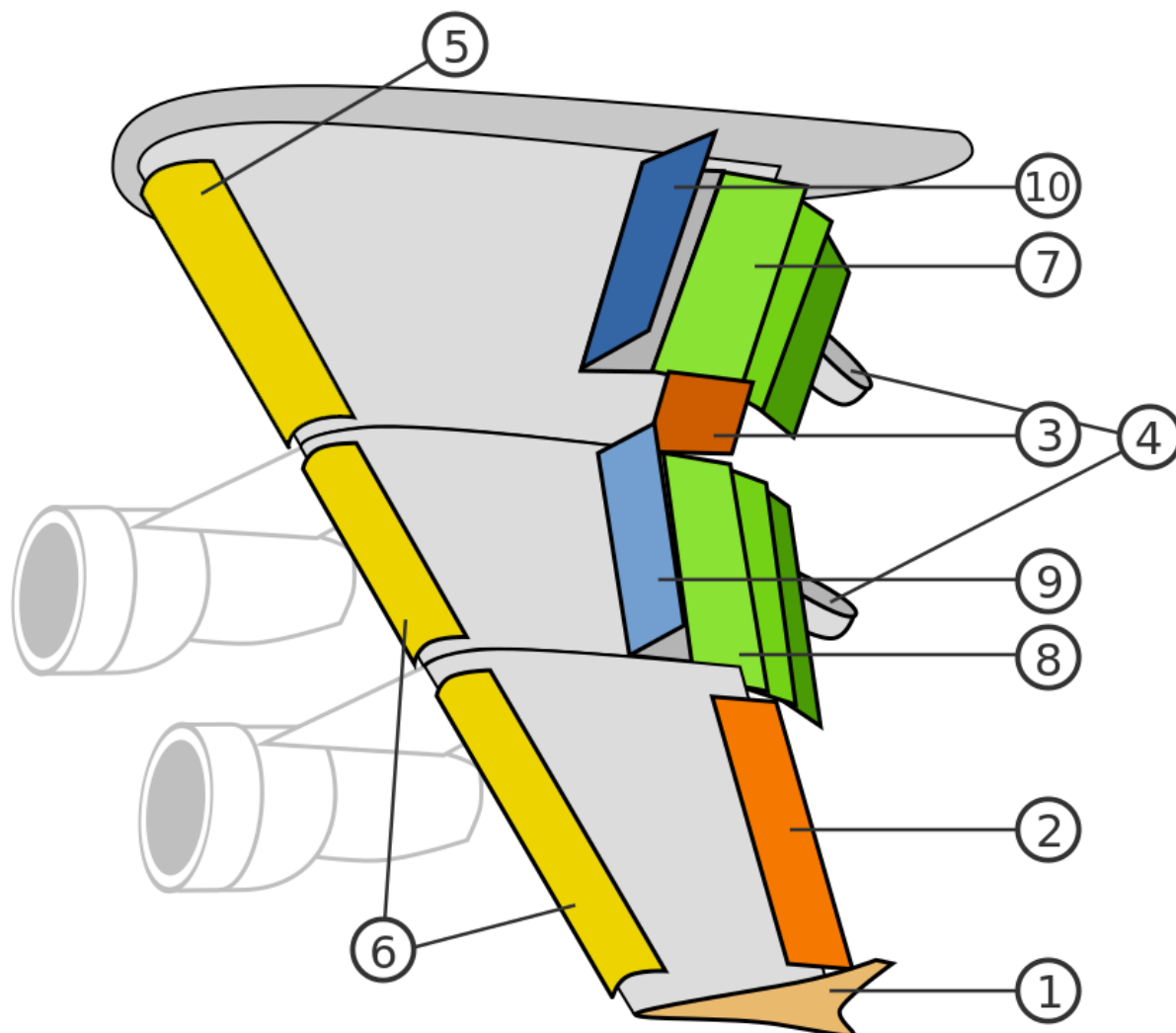
Při samotném řešení je kladen důraz na přesné dodržení vnějších tvarů a rozměrů, kvůli zástavbovým a aerodynamickým požadavkům. Z tohoto důvodu je vnější obrys převzat z modelu aktuální klapky momentálně instalované na letounu. Dále byly převzaty oba závěsy spojující klapku s vodícím a ovládacím mechanismem.

Zatížení je stanoveno podle přepisu UL2 Letecké amatérské asociace ČR. Protože poloha jednoho závěsu je určena v kořeni klapky, je podstatnou částí výpočtů stanovení optimální polohy druhého závěsu, z důvodu minimalizování maxima ohybového momentu.

Nosník je umístěn v místě největší výšky profilu klapky, aby byl co nejúnosnější. Dále je provedeno dimenzování pásnic nosníku a kontrola na stabilitu prvků namáhaných na smyk. Protože u každého letounu je velice důležitou veličinou hmotnost, je také propočítán hmotový rozbor celé klapky.

2 Možnosti a principy vztlakové mechanizace

Mechanismy vztlakových klapek jsou pohyblivé součásti křídel letounů, které slouží ke změně parametrů křídla, konkrétně ke zvýšení vztlaku. Díky těmto změnám je letadlo schopné bezpečně zvládnout fázi vzletu a přistání. [1]



Obr. 1 Mechanizace křídla letounu [2]










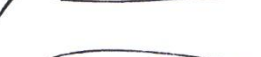



1 winglet ; 2,3 křídélka ; 4 gondoly vztlakových klapek ; 5,6 sloty
7,8 vztlakové klapky ; 9,10 aerodynamická brzda

Možnost dosahovat vyšších rychlostí byla dlouho omezoována výkonem motorů, proto se musela křídla konstruovat s malým plošným zatížením a s vysokým součinitelem vztlaku. Takováto křídla sama o sobě zajišťovala bezproblémový vzlet a přistání. Ovšem ve třicátých letech dvacátého století pokročil vývoj motorů. To umožnilo značné navýšení letové rychlosti a následné optimalizaci profilů křídel pro cestovní let. Plošné zatížení se zvýšilo a součinitel vztlaku se snížil, což mělo za následek zvýšení pádové, přistávací a vzletové rychlosti letounu. Také potřebná přistávací a vzletová dráha se prodloužila a přibližovací manévry se stal obtížnějším. Proto se začaly, na úkor hmotnosti a jednoduchosti, vyvíjet systémy mechanizace křídel. První jednoduché systémy byly postupem času nahrazovány účinnějšími a složitějšími

prvky. V dnešní době se již všechna rychlá letadla bez mechanizace neobejdou, protože při přistávacích rychlostech nad 200 - 250 km/h se časy na rozhodnutí a provedení případné korekce letu krátí pod limity dosažitelné i dobře vycvičenými posádkami. [3]

Principy mechanizací

1. zvětšení křivosti profilů (Obr. 2: ID 2, 3, 10 a 13)
2. zvětšení plochy křídla
3. ovlivnění mezní vrstvy
4. kombinace těchto principů (Obr. 2: ID 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11 a 12)

ID	NÁKRES	NÁZEV	Δc_y	α°
1		Základní profil $c_{y, max}=1,2$		
2		Odštěpná klapka	0,78+0,90	14
3		Sklopná kl.	0,54+0,66	12
4		Štěrbinová sklopná kl.	0,60+0,72	12
5		Sklopná klapka s vyfukováním	1,80+2,40	NA
6		Fowlerova štěrbinová klapka	1,38+1,5	13
7		Dvouštěrbinová kl.	1,68+1,80	13
8		Tříštěrbinová kl.	2,40+3,60	NA
9		Slot na NH	0,42+0,48	26
10		Krügerova kl.	0,40+0,60	NA
11		Dvouštěrbinová kl. se slotem na NH	2,16+2,64	NA
12		Tříštěrbinová kl. se slotem na NH	>3,5	NA
13		Sklopná NH a klapka na OH	0,60+0,72	>22°

Obr. 2 Typy systémů mechanizace křídla [3]

2.1 Pasivní mechanizace

Mezní vrstva je řízená přirozeným odsáváním a přefukováním proudů vzduchu.

2.1.1 Klapka na náběžné hraně

Působí hlavně tím, že ovlivňuje mezní vrstvu po velké hloubce křídla. U tenkých profilů zabraňuje odtržení proudu na náběžné hraně a oddaluje odtržení po celé délce profilu do

vyšších úhlů náběhu. Změna křivosti ovlivňuje proudění jen do malé hloubky a vztlak celého křídla navyšuje jen nepatrně. [3]

Výsuvný slot

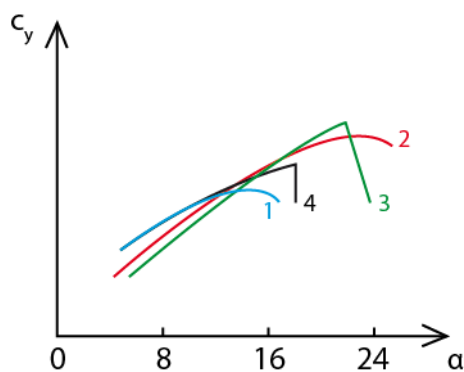
Je velmi účinný a zabraňuje odtržení proudu na křídle až do velkých úhlů náběhu. Slot má plynulý průběh křivky $c_y = f(\alpha)$ i po překročení kritického úhlu náběhu. V kombinaci s klapkou na odtokové hraně výrazně zvyšují součinitel vztlaku a kritický úhel náběhu. Na druhou stranu je konstrukčně složitý a také těžší než ostatní varianty. [4]

Krügerova klapka

Tento princip je značně jednodušší a lehčí než výsuvný slot, ovšem i přes svou účinnost po dosažení kritického úhlu náběhu vyvolává rychlé odtržení proudu vzduchu na křídle a rychlý pokles vztlaku. Proto se používá na křídlech s vysokým úhlem náběhu. [4]

Sklopná klapka na náběžné hraně

Sklopná klapka na náběžné hraně je konstrukčně složitější než Krügerova klapka a není tak účinná. [4]



Obr. 3 Varianty klapek na náběžné hraně [4]

1 ... křídlo bez mechanizace ; 2 ... křídlo s výsuvným slotem ; 3 ... křídlo s Krügerovou klapkou ; 4 ... křídlo se sklopnou klapkou

2.1.2 Klapka na odtokové hraně

Především pracuje na principu zvětšení křivosti profilu křídla, takže dochází k urychlení proudění v oblasti odtokové hrany a to má za následek zvýšení vztlaku na značné části profilu. Tyto klapky ovšem mohou způsobit dřívější odtrhávání na odtokové hraně u křídle s tenkým profilem, což vede ke snížení kritického úhlu náběhu. [3]

Odštěpná klapka

Jedná se o nejjednodušší a nejlehčí řešení, ale její odpor rychle roste již od malých výchylek, a proto není vhodná pro zlepšení parametrů stoupání. V dnešní době se jedná o zastaralé řešení. [3]

Sklopná klapka na odtokové hraně

U této klapky dochází při výchylkách 10 - 15° náhle k odtržení proudu podél osy závěsu, přičemž vztlak opadne a odpor roste při zvětšování výchylky obdobně jako u odštěpné klapky. [3]

Jednošterbinová klapka

U tohoto principu je proud vzduchu před klapkou nasáván skrze šterbinu na horní stranu náběžné hrany klapky, kde stabilizuje proudění vzduchu. Toto proudění vytváří na klapce

samotné novou mezní vrstvou, která dovoluje sklopení klapky až na úhel téměř 40° . Avšak mezní vrstva na křídle před šterbinou je ovlivněna nepatrně. [3]

Fowlerova klapka

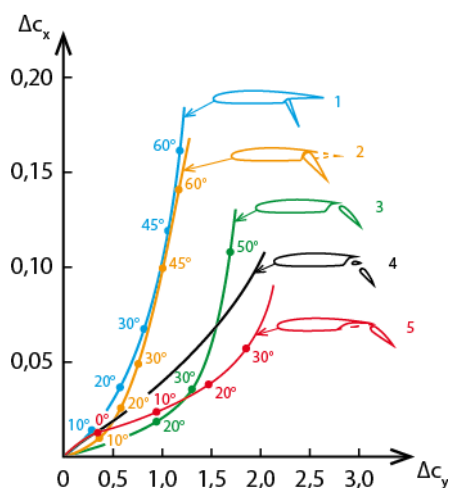
Jedná se o jednošterbinovou klapku, která se nejprve vysune po těživě směrem dozadu a až v koncové části vysouvání se sklopí. Vztlak tak roste nejprve díky zvětšení plochy křídla a poté ještě změnou zakřivení profilu. Odpor se dlouho zvětšuje pomalu a proto je tato klapka vhodná i pro starty. Horní potah je uzpůsoben tak, že zakrývá cca 90 - 95% klapky v zatažené poloze. [3]

Dvoušterbinová klapka

Její předností je ještě příznivější rozložení tlaků, které oddaluje odtržení proudu na klapce. To dovoluje dosahovat většího vztlaku při větších výchylkách klapky. Pokud jsou klapka i předklapka vytahovány nezávisle na sobě, lze dosáhnout výchylek až 70° . Protože závěsné mechanismy takového řešení jsou velmi složité, používá se často ve prospěch konstrukční a provozní jednoduchosti předklapka pevně spojená s klapkou, zavěšenou na čtyřkloubovém mechanismu. Při této konfiguraci nelze klapky nastavovat geometricky přesně jak pro vzlet a zároveň pro přistání. Proto se volí geometricky přesné nastavení pro polohu přistávací. [3]

Tříšterbinová klapka

Tento systém se používá na některých transportních letounech s vysokým plošným zatížením ($> 500 \text{ kg/m}^2$). V kombinaci s mechanizací náběžné hrany lze dosáhnout součinitele vztlaku až $c_y = 5,5$ aniž by přírůstky odporu a klopivého momentu přesáhly kritické meze. [3]



Obr. 4 Varianty klapek na odtokové hraně [3]

1 ... odštepňá klapka ; 2 ... sklopná klapka ; 3 ... jednošterbinová klapka
4 ... dvoušterbinová klapka ; 5 ... Fowlerova klapka

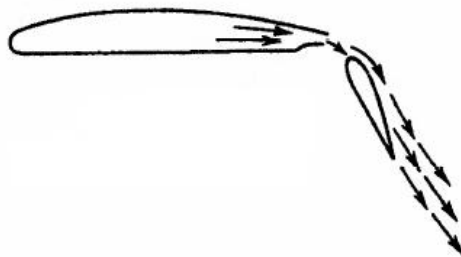
2.2 Aktivní mechanizace

U aktivní mechanizace je mezní vrstva ovlivňována pomocí vnějšího zdroje energie.

2.2.1 Vnitřní princip

Vyfukování mezní vrstvy

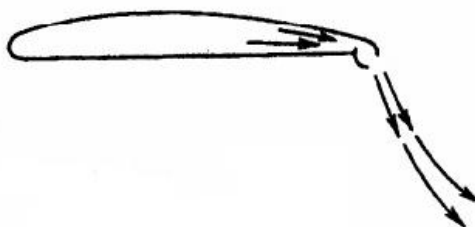
U tohoto uspořádání dochází k vyfukování mezní vrstvy na horním povrchu klapky, k čemuž je využíván proud vzduchu odebíraný z kompresoru proudového motoru, nebo proud vyfukových plynů. Vyfukování mezní vrstvy vede k nárůstu vztlaku a efektivnosti klapky. [4]



Obr. 5 Princip vyfukování mezní vrstvy na klapce [5]

Trysková klapka

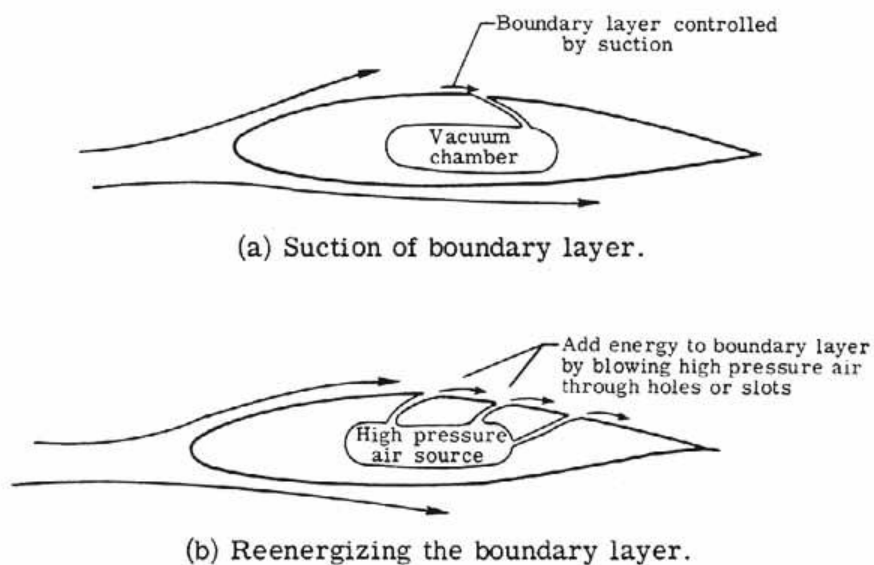
Klapka je zde v podstatě tvořena proudem vzduchu, nebo plynu, který proudí velkou rychlostí skrze štěrbinu na určitém rozpětí a pod daným úhlem. Tato konstrukce zvyšuje vztlak více než kterékoli jiné řešení. Ovšem je na jeho realizaci potřeba značné množství vzduchu, či plynu, navíc účinnost klapky rychle klesá při zmenšování štíhlosti křídla a také v blízkosti země. [4]



Obr. 6 Princip trykové klapky [5]

Řízení mezní vrstvy

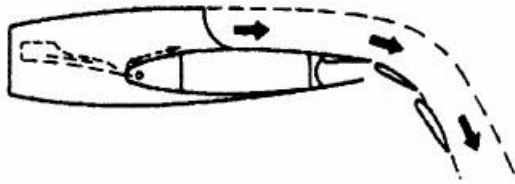
Spočívá v tom, že jsou nízkoenergetické části mezní vrstvy nahrazeny proudem o vysoké energii. To oddaluje odtržení mezní vrstvy do větší hloubky profilu, dovoluje větší úhel náběhu a zvyšuje vztlak. Při odsávání mezní vrstvy je nízkoenergetická mezní vrstva vysávána otvory do podtlakové komory uvnitř křídla, zatímco dobíjení mezní vrstvy probíhá tak, že z přetlakové komory je do mezní vrstvy vyfukován proud o vysoké energii. [6]



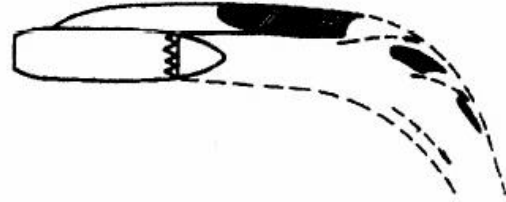
Obr. 7 Odsávání a dobíjení mezní vrstvy [6]

2.2.2 Vnější princip

Zde dochází k ofukování klapek a částí křídla motorovým proudem.



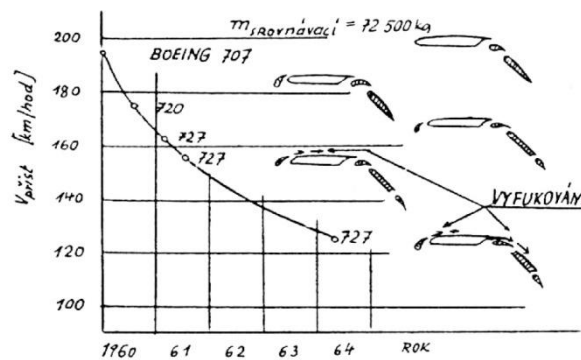
Obr. 8 Ofukování ze shora [5]



Obr. 9 Ofukování ze spodu [5]

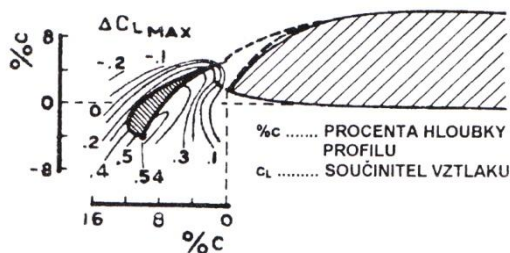
Dá se říci, že většina klapek na odtokové hraně zasahuje cca do 30% hloubky profilu křídla a má dvě provozní polohy. Pro start a stoupaní se výchylka pohybuje okolo 20° , pro přiblížení a samotné přistání cca 40° . [3]

Pro zvýšení účinnosti mechanizace křídla, za účelem navýšení vztlaku, se využívá kombinací různých principů. Na Obr. 10 je vyobrazený vývoj mechanizace na velkém dopravním letadle, díky kterému se docílilo snížení přistávací rychlosti. [4]

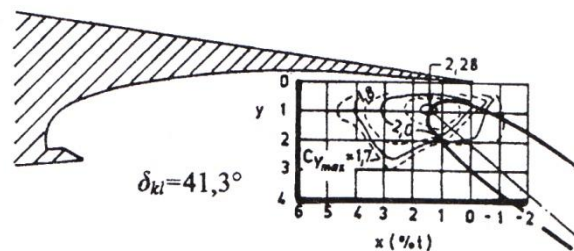


Obr. 10 Vývoj mechanizace na letadlech Boeing [4]

Pro správnou funkci systémů pro zvyšování vztlaku je naprosto nezbytné správné umístění jejich prvků, ve všech polohách. Dosažitelné přírůstky vztlaku jsou velice citlivé na vzájemnou polohu klapky a křídla, jakožto na geometrii štěrbin. Velmi nebezpečné mohou být rozdílné výrobní odchylky v geometrii na mechanizmech závěsů a klapkách samotných pro pravé a levé křídlo. To může způsobit nevyváženost a neočekávané klonění letadla po vysunutí vztlakových klapek. Na Obr. 11 a Obr. 12 je vyobrazena ukázka prezentace výsledků měření klapek v aerodynamickém tunelu. Na obrázku se slotem na náběžné hraně je vidět, že jeho nesprávné umístění může způsobit i zápornou změnu vztlaku. [3]



Obr. 11 Slot na náběžné hraně [3]



Obr. 12 Výsuvná klapka na odtokové hraně [3]

3 Konstrukce

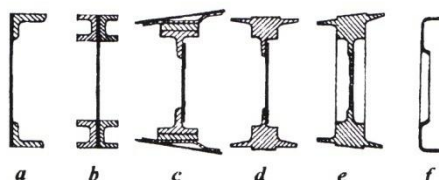
Z pohledu konstrukce nosných prvků je vztlaková klapka v podstatě zmenšeným křídlem a tudíž je tvořena podélným systémem, příčným systémem a potahem.

3.1 Podélný systém

Patří sem nosníky, pomocné nosníky (podélné stěny) a podélníky (stringery).

Nosníky

Nosníky přenášejí převážnou část ohybu křídla. Mají značné pásnice na horní a spodní hraně nosníku, přičemž horní je tlaková a spodní tahová. U nosníků s pásnicemi skládaných ze standardních lisovaných profilů je ten problém že příčný tvar pásnice neodpovídá obrysu profilu. Proto se musí mezi pásnici a potah vložit vložka, buď plechová s přírubami, nebo je potřeba na přírubu pásnice přinýtovat pásek z lehkého obrobitelného materiálu a dopilovat ho do požadovaného tvaru. U tvarových pásnic a monolitních nosníků tyto problémy odpadají, protože jsou rovnou vyrobeny do požadovaného tvaru profilu. [3]



Obr. 13 Typy nosníků [3]

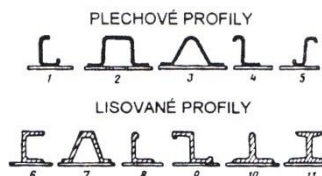
a, b ... nosníky s pásnicemi z normalizovaných profilů ; c ... nosník s pásnicemi z normalizovaných profilů opatřen přírubou a tvarovou vložkou ; d ... nosník s tvarovými pásnicemi ; e ... monolitní nosník ; f ... pomocný nosník

Pomocné nosníky

Označují se jako podélné stěny. Fungují jako opora pro žebra, obrysové výztuhy a potahy, také přenášejí smykové toky v komoře. Ohyb nepřenáší vůbec, popřípadě pouze jeho malou část. [3]

Podélníky

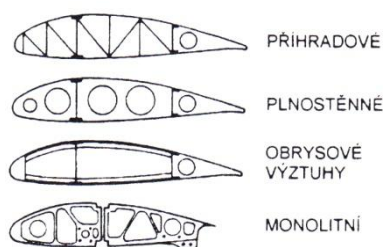
Také se nazývají stringery. Především přenášejí vzdušné síly z potahu do žeber a spolu se spolunosnou částí potahu přenášejí část ohybového zatížení. Zabraňují vzniku hlubokých dlouhých vln od smykových toků, tím že rozdělují velká pole mezi nosníky a tím přispívají k aerodynamické čistotě profilu. Pro lehká letadla se používají plechové profily, nebo lisované profily. [3]



Obr. 14 Podélníky pro lehká letadla [3]

3.2 Příčný systém

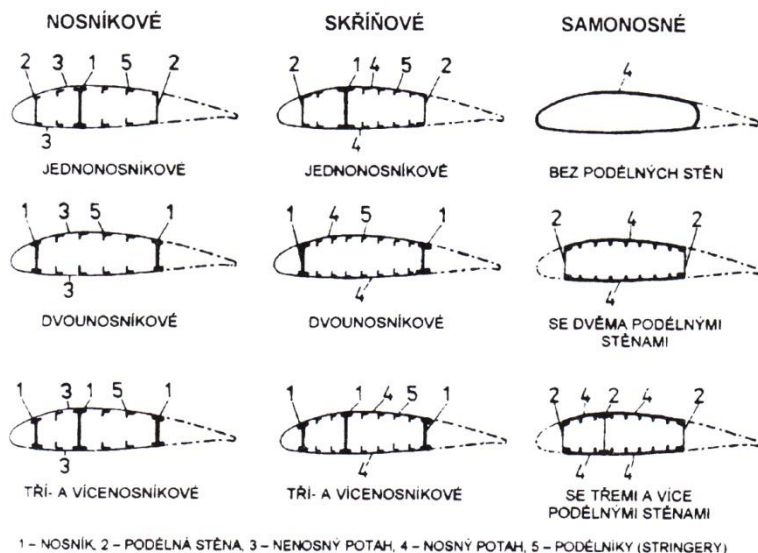
Je tvořen žebry a obrysovými výztuhami, které slouží k přenosu zatížení z podélníků a přilehlých polí potahu na nosníky. Jejich výraznou funkcí je udržení daného obrysu klapky, kdy podpírají potah. Příhradová konstrukce se používá u velmi lehkých letadel a v kombinaci s obrysovými výztuhami je hmotnostně příznivá. Plnostěnná žebra jsou nejpoužívanější a většinou se lisují z plechu. Monolitní žebra dokážou přenést velké smykové zatížení a často se frézují z tlustých plechů. [3]



Obr. 15 Druhy příčných systémů [3]

3.3 Potahy

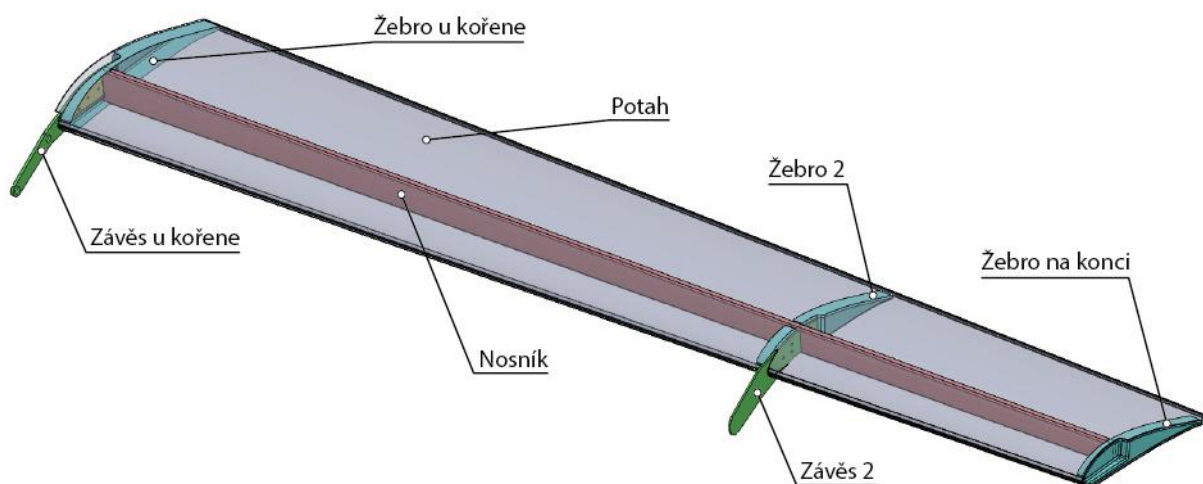
Potahy lze rozdělit na smykově nosné a nenosné, ale i nenosné potahy přenáší vzdušná zatížení membránovým účinkem a to z polí mezi podélníky a žebry do nosných částí konstrukce. Dále můžeme rozlišovat nosné potahy na vyztužené příčným a podélným systémem a na samonosné, které udrží svůj tvar bez podpory i při působení vnějších i vnitřních zatížení. [3]



Obr. 16 Konstrukční uspořádání nosné konstrukce [3]

3.4 Zvolená konstrukční řešení vztlakové klapky letounu UL-39 Albi

Jako materiál je použit uhlíkový kompozit s pojivem z epoxidové pryskyřice, ve formě prepregu. Výraz prepreg je zkratkou anglického výrazu preimpregnated fibres, což v češtině znamená předimpregovaná vlákna, kdy je tkanina již nasycena pojivem, které je zčásti vytvrzené. Tato tkanina se postupně klade do formy vrstvu po vrstvě až do požadované tloušťky a posléze je vytvrzena za pomoci tepla a tlaku v autoklávu. Všechny komponenty klapky jsou k sobě slepeny, proto jsou vůči sobě odsazeny o 0,6 mm, čímž vzniká dostatečný prostor pro lepidlo.



Obr. 17 Konstrukce klapky

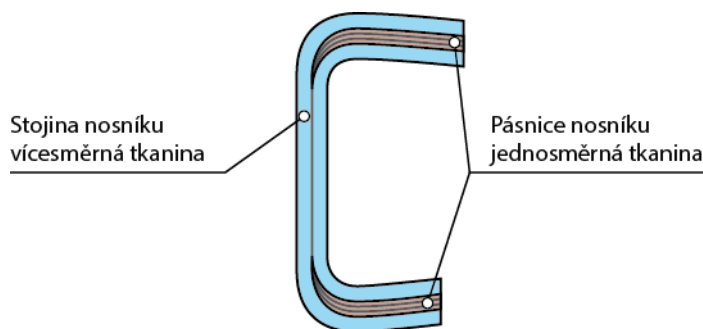
3.4.1 Nosník

Nosník je umístěn v místě největší tloušťky profilu klapky, aby byla schopnost pásnic přenášet ohybový moment co největší. Je zvolen průřez C, který má velmi dobrou únosnost. Ovšem pro zajištění bezproblémového vyjmutí dílu je potřeba použít vícedílnou formu, protože pásnice se směrem po hloubce od stojiny sbíhají, jak je vidět v Obr. 19. Navíc z Obr. 18 je zřejmé, že jednodílnou formu nelze vyjmout ani ve směru po délce nosníku.



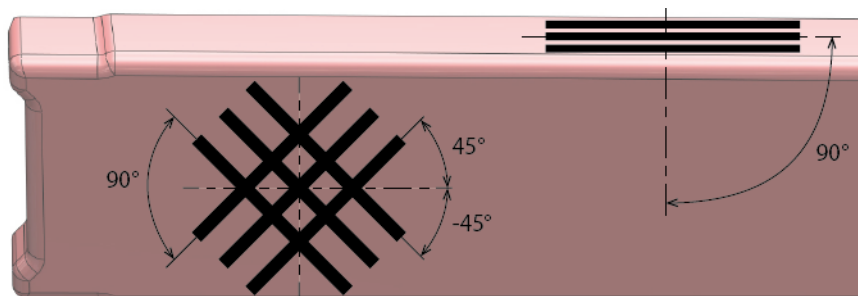
Obr. 18 Nosník

Pro pásnice je použita jednosměrná tkanina o tloušťce jedné vrstvy 0,13 mm, zatímco stojina je z 0,2 mm tlusté tkaniny s orientací vláken 0° a 90°. Uspořádání tkanin v nosníku zobrazuje Obr. 19.



Obr. 19 Uspořádání tkanin v řezu nosníkem

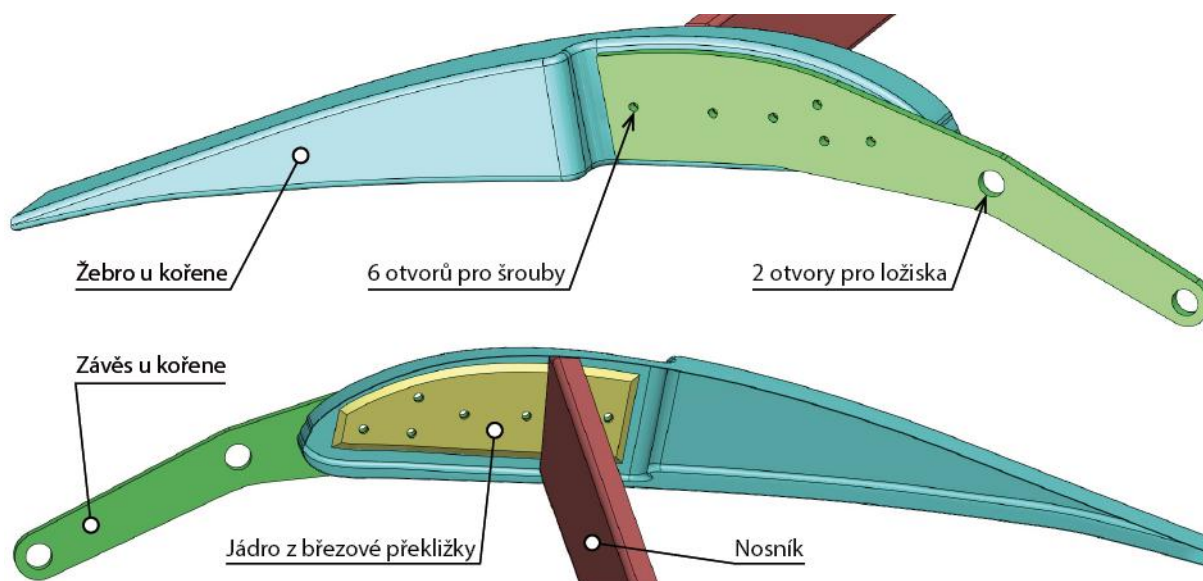
Stojina nosníku je v podstatě namáhána čistým smykem, kde hlavní tahová a tlaková napětí jsou skloněna pod úhlem $\pm 45^\circ$, proto je tkanina orientována tak aby byla vlákna ve směru hlavních napětí. Pásnice je zase namáhána pouze ohybem, proto jsou vlákna jednosměrné tkaniny orientována ve směru délky nosníku.



Obr. 20 Orientace vláken tkanin v nosníku

3.4.2 Žebra

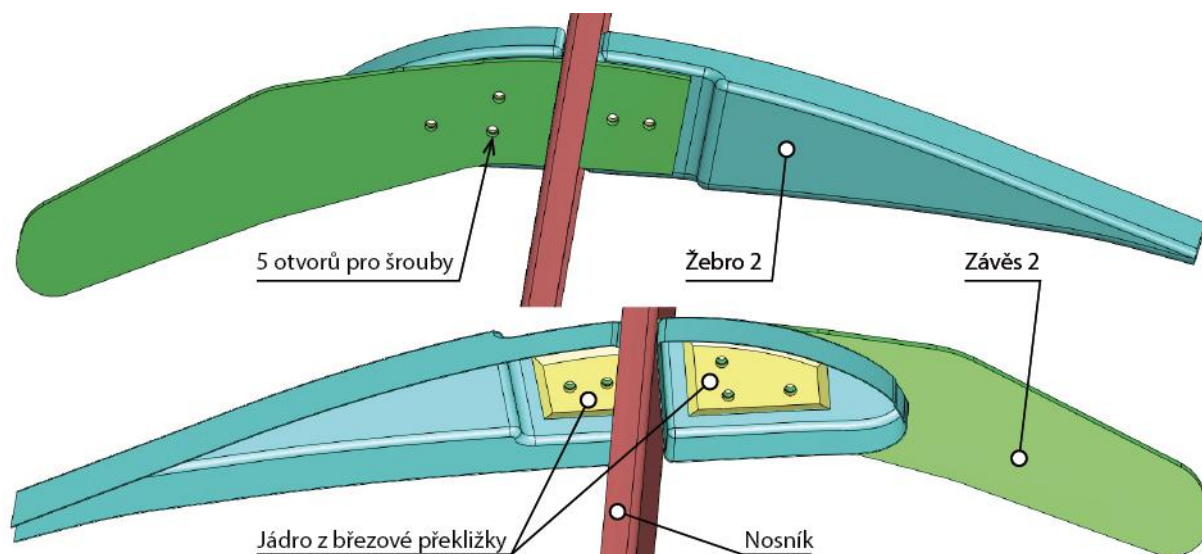
V klapce jsou celkem tři žebra a jsou plnostěnná ze stejné vícesměrné tkaniny jako je použita pro stojinu nosníku. Jeden závěs je upevněn k žebro v kořeni klapky a druhý k druhému žebro. Závěsy jsou k žebroům přilepeny a přišroubovány, přičemž v místech jejich upevnění je mezi krajní vrstvy žebro zalaminované jádro z březové překližky.



Obr. 21 Uspořádání žebra u kořene

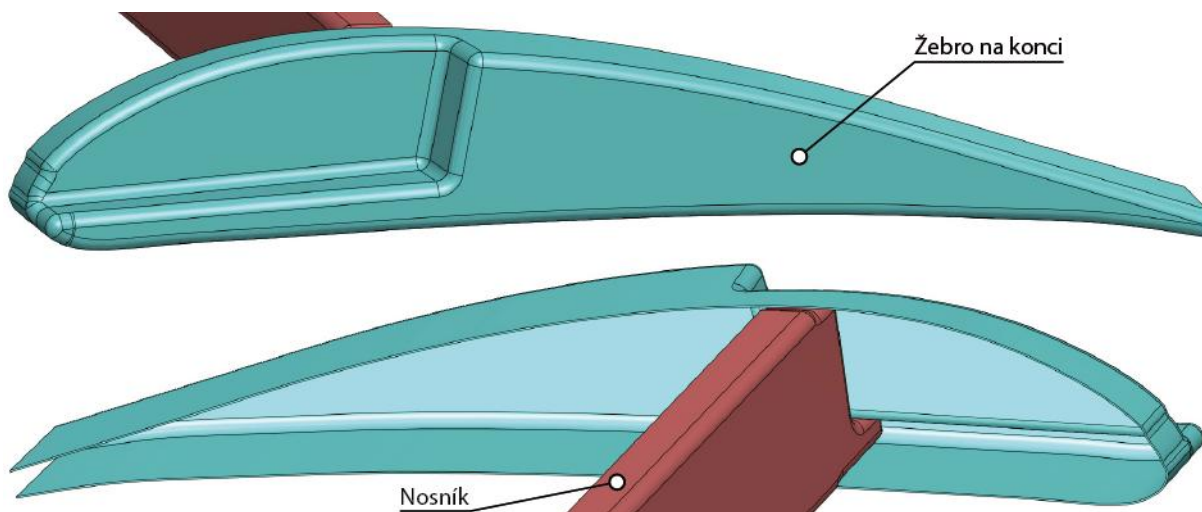
Osazení žebra u kořene, za pomoci kterého je přilepen potah, se ve směru délky klapky zužuje. Toto osazení je však relativně krátké a zúžení je velmi malé, proto lze díl z formy vyjmout i za mírného použití hrubé síly, aniž by došlo k delaminaci vrstev. Naopak žebro 2 i žebro na konci jsou v klapce situovány obráceně, což znamená že se osazení rozšiřuje a vyjímání z formy je bezproblémové.

Žebro 2, vyobrazené v Obr. 22, je, z důvodu procházejícího nosníku, rozděleno na dvě části, zatímco ve stojně nosníku je otvor pro průchod závěsu 2. Závěsy jsou převzaty z aktuální klapky, pouze otvory pro šrouby jsou rozmístěny jinak s ohledem na pozici nosníku.



Obr. 22 Uspořádání žebra 2

V závěsu 2 jsou také potřeba dva otvory pro ložiska, ale to je záležitost kinematiky pohybového mechanismu klapky a to již není v náplni této bakalářské práce. Navíc změnou polohy závěsu 2 je potřeba mechanismus upravit. U krajních žebrování, které jsou zobrazené v Obr. 21 a Obr. 23 byly zachovány vnější tvary, z důvodu zástavbových požadavků.



Obr. 23 Uspořádání žebra na konci

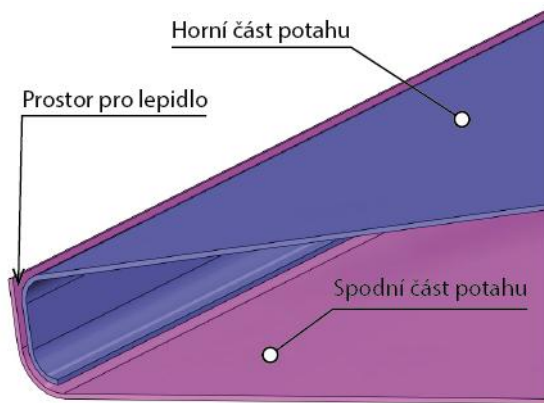
Co se týče orientace vláken tkaniny v žebrech vychází se ze stejného předpokladu jako u stojiny nosníku. Orientace vláken je vyobrazena v Obr. 24.



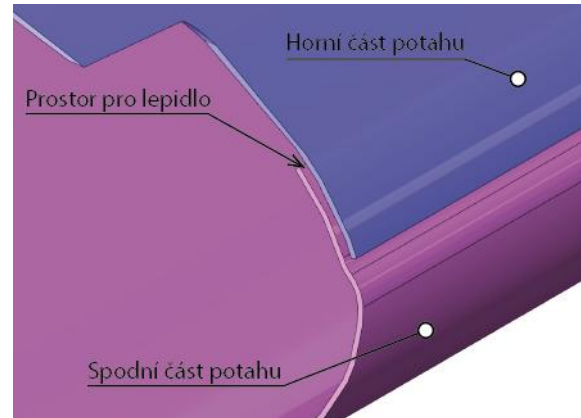
Obr. 24 Orientace vláken tkaniny v žebrování na konci

3.4.3 Potah

Potah je vyroben ze stejné tkaniny jako jsou žebra a z technologických důvodů je rozdělen na dvě části, které jsou k sobě přilepeny pomocí zámků, zobrazených v Obr. 25 a Obr. 26. Je smykově nosný a v případě nedostatečné stability při přenosu smykového zatížení ho lze doplnit pěnovým jádrem.

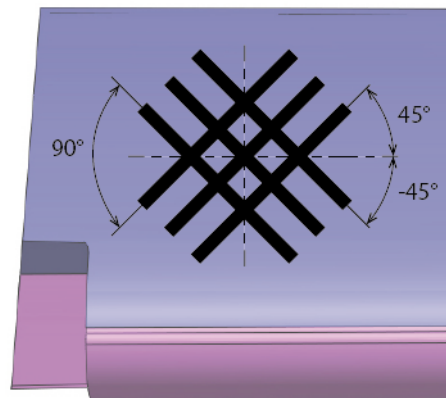


Obr. 25 Zadní zámek potahu



Obr. 26 Přední zámek potahu

Stejně jako u stojiny nosníku a žebra i pro potah platí, že směry hlavních napětí jsou skloněny o $\pm 45^\circ$ a vlákna tkaniny jsou orientována do těchto směrů.



Obr. 27 Uspořádání vláken tkaniny potahu

4 Pevnostní požadavky

Pevnostní požadavky se stanovují pomocí provozního a početního zatížení. Provozní zatížení je nejvyšší očekávané zatížení, které může při provozu letounu nastat a početní zatížení je provozní zatížení násobené součiniteli bezpečnosti. Zatížení musí být rozložena tak aby odpovídala skutečnosti, nebo se k ní blížila z bezpečné strany. Konstrukce musí přenášet provozní zatížení aniž by došlo k její trvalé deformaci. Při všech zatížení, až do početního zatížení, nesmí dojít k omezení bezpečného provozu vzniklými elastickými deformacemi a to především u soustavy řízení. Navíc konstrukce musí být schopna přenášet početní zatížení bez vzniku poruchy po dobu tří vteřin. [7]

Z pohledu stability je v podkapitole 7.2 počítáno s tím, že smykově namáhané části jsou stabilní až do početního zatížení. V praxi mnohdy malá ztráta stability nevyvolá selhání konstrukce, například potahy se mnohdy zvlíní aniž by to ohrozilo únosnost prvku. Tato menší deformace sice narušuje aerodynamickou čistotu profilu, ale zesílením komponentu se zvýší hmotnost a to má větší negativní dopad.

4.1 Mechanické vlastnosti uhlíkového kompozitu

Kompozitní materiál z uhlíkové tkaniny pojený epoxidovou pryskyřicí použitý pro výrobu vztlakové klapky letounu UL-39 Albi je materiál v takzvaném křehkém stavu. To znamená že se chová jinak při namáhání na tlak než na tah, proto je potřeba rozlišovat pevnosti pro dané namáhání.

Jednosměrná tkanina

- pevnost v tahu $\sigma_{Pt} = 1700 \text{ MPa}$
- pevnost v tlaku $\sigma_{Pd} = 900 \text{ MPa}$

Vícesměrná tkanina

- pevnost ve smyku $\tau_{PS} = 120 \text{ MPa}$
- Youngův modul pružnosti v tahu $E = 74160 \text{ MPa}$

4.2 Součinitele bezpečnosti

Níže uvedené součinitele bezpečnosti jsou převzaty z [7].

- a) Pokud není uvedena jiná hodnota, musí být použit součinitel bezpečnosti 1,5.
- b) Součinitel bezpečnosti je potřeba upravit pokud:
 - Existuje nejistota o pevnosti součástí.
 - Je očekávána ztráta pevnosti v čase do výměny.
 - Nejsou k dispozici přesné pevnostní hodnoty vzhledem k neznámým výrobním a zkušebním metodám.
- c) Součinitel bezpečnosti je stanoven pro:

• odlitky	2,0
• šroubové spoje	2,0
• závěsy kormidel (kromě valivých ložisek)	6,7
• kování	1,2
• uchycení upevňovacích pasů	1,5
• řídicí lana	2,0
• nosná lana	2,0

- ložiska v táhlovém řízení na styčné ploše měkčí části 3,3
- ložiska v lanovém řízení na styčné ploše měkčí části 2,0
- sedačkové závěsy 2,0 [7]

4.2.1 Součinitel bezpečnosti pro uhlíkový kompozit

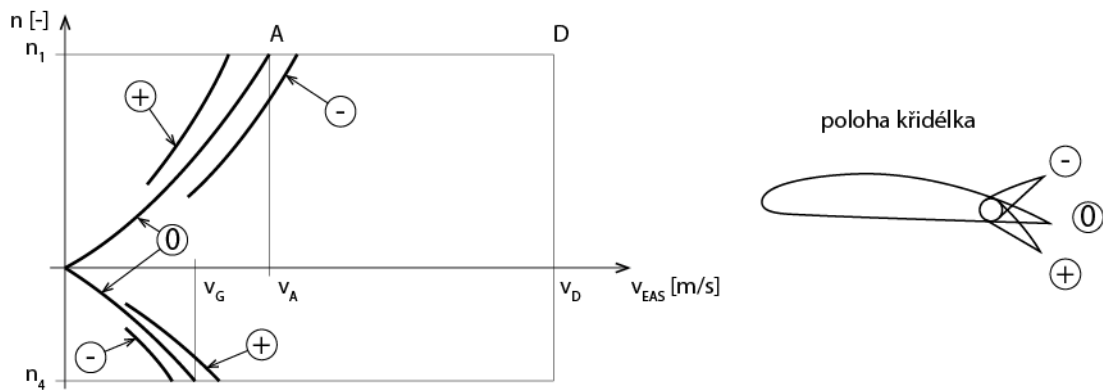
Pro uhlíkový prepreg není uvažován vliv teploty, ale reaguje na vlhkost. Proto se základní součinitel bezpečnosti 1,5 rozšiřuje o vliv vlhkosti 1,25.

$$k = 1,5 \cdot 1,25 = 1,875$$

4.3 Letová obálka

Při návrhu letounu musí být prokázáno splnění požadavků pevnosti konstrukce pro všechny kombinace rychlosti letu a násobků zatížení, které se nacházejí na hraniční křivce a uvnitř obálky. Obě obálky jsou vyobrazeny pro konfiguraci se vztlakovými klapkami v cestovní poloze. [7]

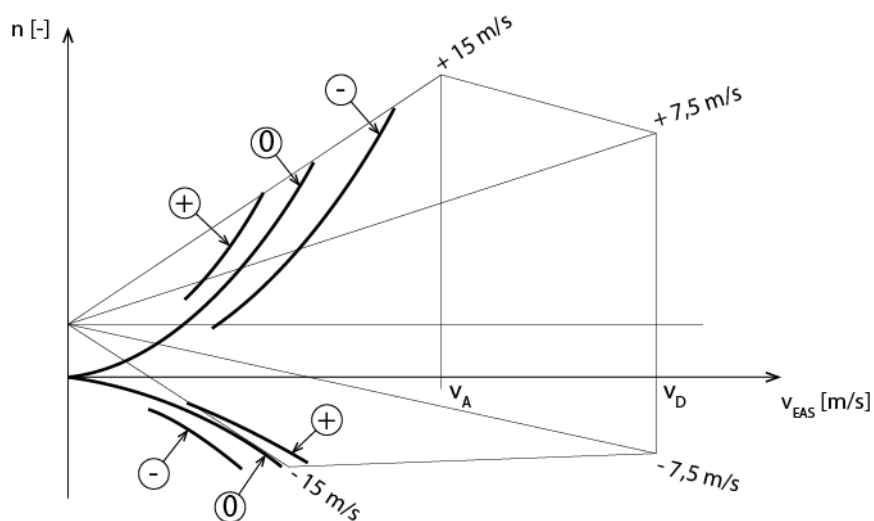
Obálka obrátů



Obr. 28 Obálka obrátů [7]

Obálka poryvů

Pro návrhovou rychlost v_A musí být letoun schopen snést kladný (nahoru) i záporný (dolu) poryv o rychlosti 15 m/s. Při rychlosti v_D musí letoun odolat poryvu, kladnému i zápornému, o rychlosti 7,5 m/s, přičemž poryv působí ve směru kolmém na dráhu letu. [7]

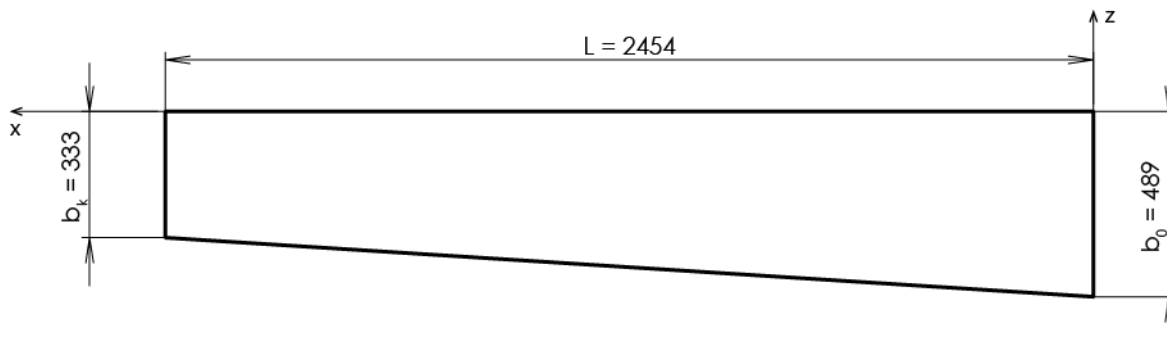


Obr. 29 Obálka poryvů [7]

5 Stanovení zatížení

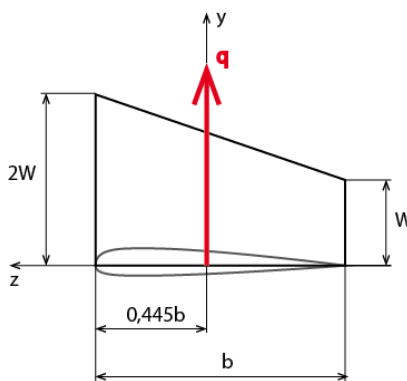
5.1 Zjednodušení geometrie klapky

Pro výpočet zatížení se uvažují kraje klapky kolmé na náběžnou hranu a zanedbává se úhel šípu. Protože úhel mezi náběžnou hranou a délkou spojitého zatížení je zanedbatelný, uvažuje se délka spojitého zatížení stejná jako délka náběžné hrany.



Obr. 30 Geometrie klapky

5.2 Zatížení podle předpisu UL 2



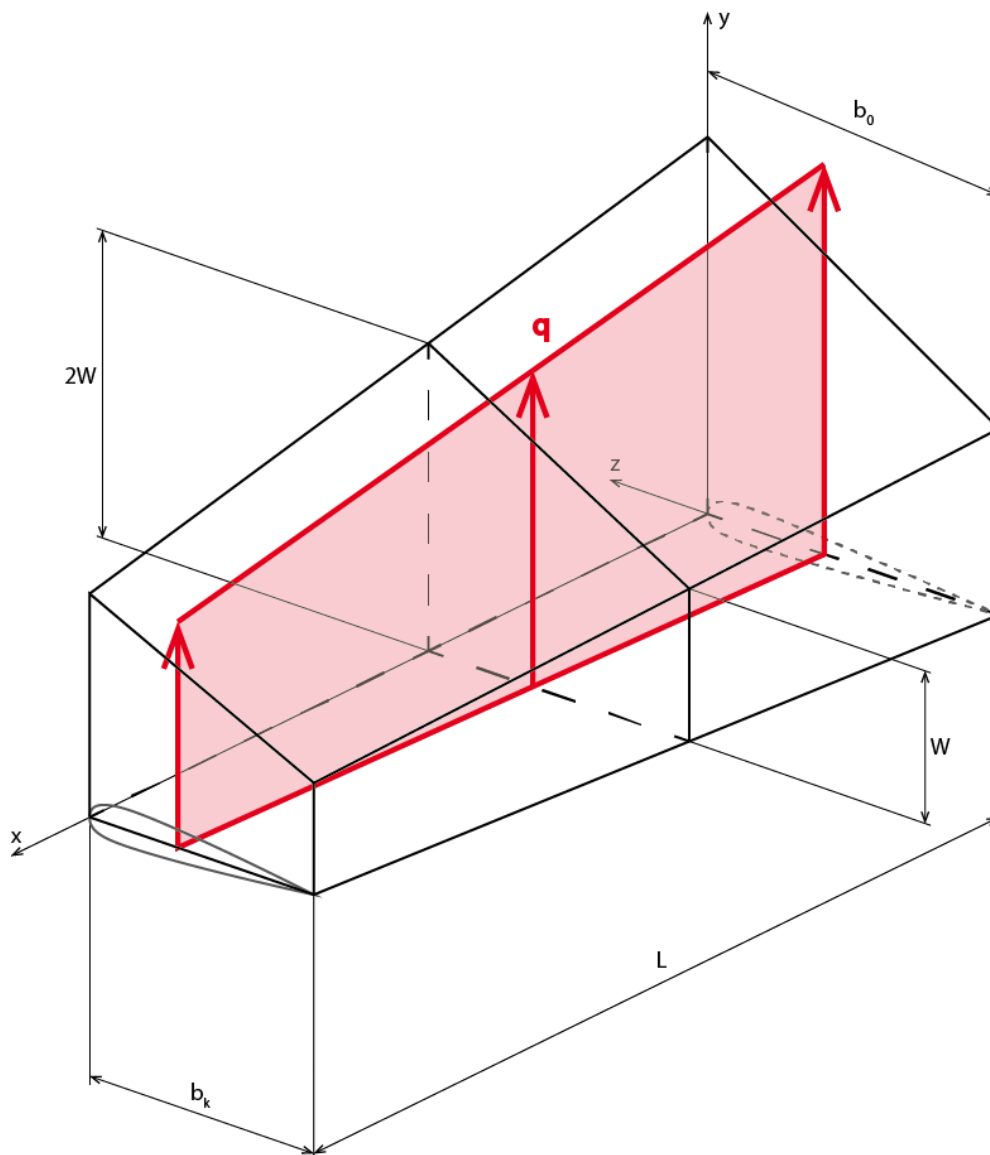
Obr. 31 Zatížení podle UL 2 [7]

$$W^= = 23,94 \cdot \frac{m}{S} \cdot \frac{C_y}{1,6} [Pa] \quad (5.1) \quad [7]$$

Pro konvenční vztlakové klapky může být použito $C_y = 1,6$. [7]

V případě letounu UL-39 Albi se do rovnice (5.1) dosazují tyto hodnoty:

- Maximální vzletová hmotnost $m = 472,5 \text{ kg}$
- Plocha křídla $S = 8,8 \text{ m}^2$
- Součinitel vztlaku $C_y = 1,6$



Obr. 32 Plošné zatížení klapky

5.2.1 Výpočet spojitého zatížení

Pro průměrné provozní zatížení plochy platí.

$$W^= = \frac{W + 2 \cdot W}{2} = \frac{3}{2} \cdot W \quad (5.2)$$

Spojité zatížení se získá ze zatěžujícího obrazce.

$$q = W \cdot b + \frac{1}{2} \cdot W \cdot b = \frac{3}{2} \cdot W \cdot b \quad (5.3)$$

Z rovnic (5.1), (5.2) a (5.3) se vyjádří výsledný vztah pro výpočet spojitého zatížení po délce klapky.

$$q = W^= \cdot b = 23,94 \cdot \frac{m}{S} \cdot b \quad (5.4)$$

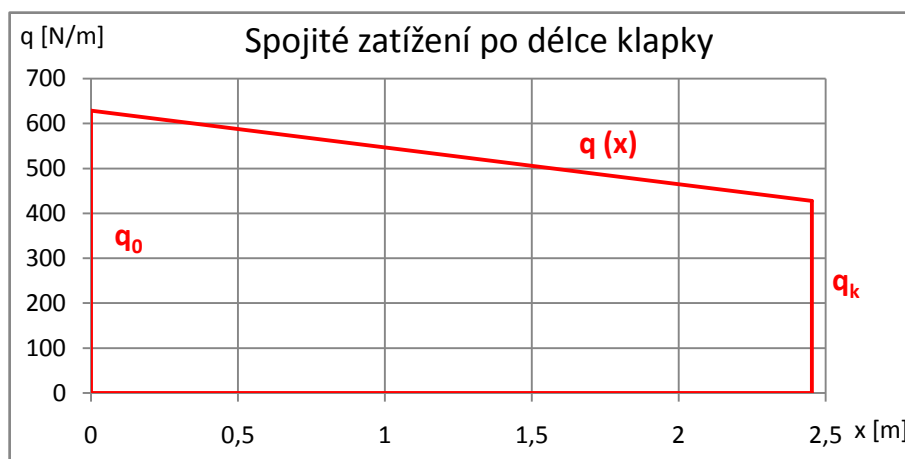
Spojité zatížení u kořene klapky

$$q_0 = 23,94 \cdot \frac{m}{S} \cdot b_0 = 23,94 \cdot \frac{472,5}{8,8} \cdot 0,489 \doteq 628,568 \text{ N/m} \quad (5.5)$$

Spojité zatížení na konci klapky

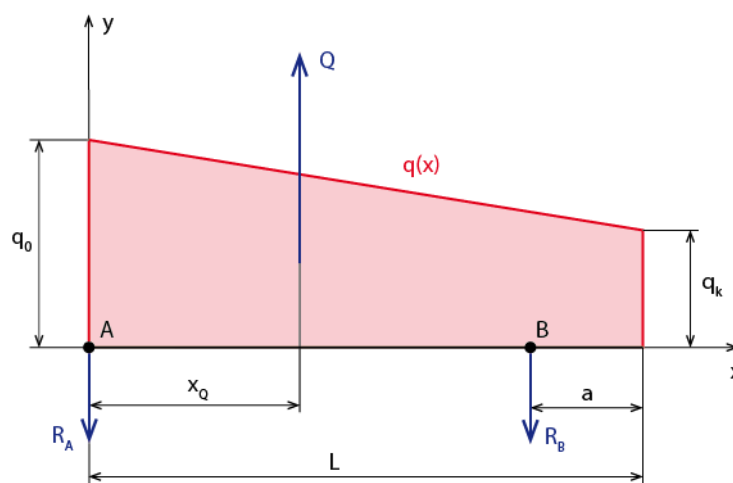
$$q_k = 23,94 \cdot \frac{m}{S} \cdot b_k = 23,94 \cdot \frac{472,5}{8,8} \cdot 0,333 \doteq 428,043 \text{ N/m} \quad (5.6)$$

Průběh spojitěho zatížení po délce klapky je uvažován lineární.



Graf 1 Spojité zatížení po délce klapky

5.3 Reakce od závěsů klapky



Obr. 33 Uvolnění klapky

Silová rovnováha ve směru osy y

$$y: -R_A - R_B + Q = 0 \quad (5.7)$$

Momentová rovnováha vzhledem k bodu A

$$M_A: Q \cdot x_Q - R_B \cdot (L - a) = 0 \quad (5.8)$$

Z rovnic (5.7) a (5.8) vyplývají vztahy pro výpočet reakcí v závěsech.

$$R_B = Q \cdot \frac{x_Q}{L - a} \quad (5.9)$$

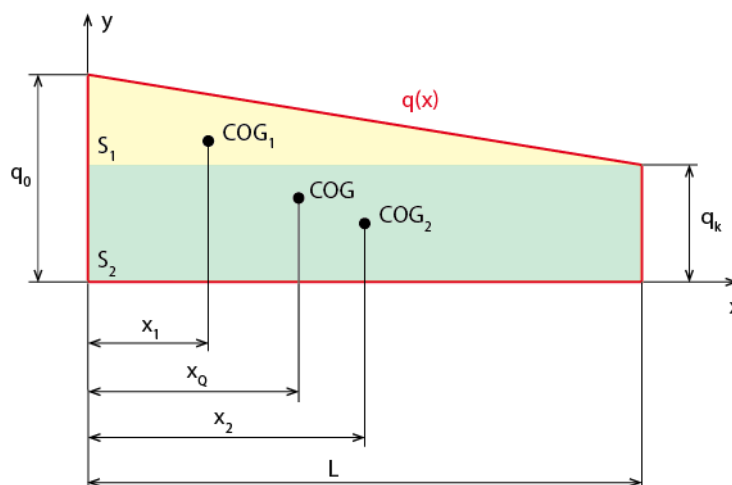
$$R_A = Q - Q \cdot \frac{x_Q}{L - a} = Q \cdot \left(1 - \frac{x_Q}{L - a}\right) \quad (5.10)$$

Pro další výpočty je potřeba určit osamocenou sílu Q , nahrazující působení spojitého zatížení, a její působíště.

$$Q = q_k \cdot L + \frac{1}{2} \cdot (q_0 - q_k) \cdot L = \frac{1}{2} \cdot L \cdot (q_0 + q_k) \quad (5.11)$$

$$Q = \frac{1}{2} \cdot 2,454 \cdot (628,568 + 428,043) \doteq 1296,462 \text{ N}$$

Působíště síly Q se nachází v těžišti zatěžujícího obrazce. Vychází se ze znalosti statických momentů dílčích ploch na které byl, podle Obr. 34, zatěžující obrazec rozdělen.



Obr. 34 Poloha těžiště zatěžujícího obrazce

$$S_{1+2} \cdot x_Q = S_1 \cdot x_1 + S_2 \cdot x_2 \quad (5.12)$$

Po vyjádření hledané souřadnice a dosazení známých veličin dílčích ploch se získá vztah (5.13) pro výpočet působíště síly Q .

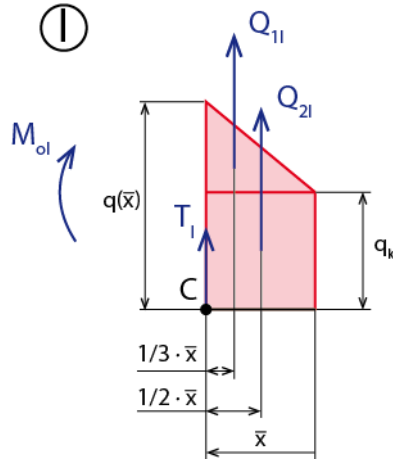
$$x_Q = \frac{S_1 \cdot x_1 + S_2 \cdot x_2}{S_{1+2}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot (q_0 - q_k) \cdot L \cdot \frac{1}{3} \cdot L + q_k \cdot L \cdot \frac{1}{2} \cdot L}{\frac{1}{2} \cdot (q_0 - q_k) \cdot L + q_k \cdot L} \quad (5.13)$$

$$x_Q = \frac{1}{3} \cdot L \cdot \frac{q_0 + 2 \cdot q_k}{q_0 + q_k}$$

$$x_Q = \frac{1}{3} \cdot 2,454 \cdot \frac{628,568 + 2 \cdot 428,043}{628,568 + 428,043} \doteq 1,149 \text{ m}$$

5.4 Posouvající síla a ohybový moment

Při určení posouvající síly a ohybového momentu je použita metoda řezu "zleva". Z důvodu uspořádání sil, vyobrazeném na Obr. 33, je potřeba zatížení řešit ve dvou na sobě navazujících částech.



Obr. 35 Řez v části I

Část I je vymezena souřadnicemi.

$$\bar{x} \in \langle 0; a \rangle \quad (5.14)$$

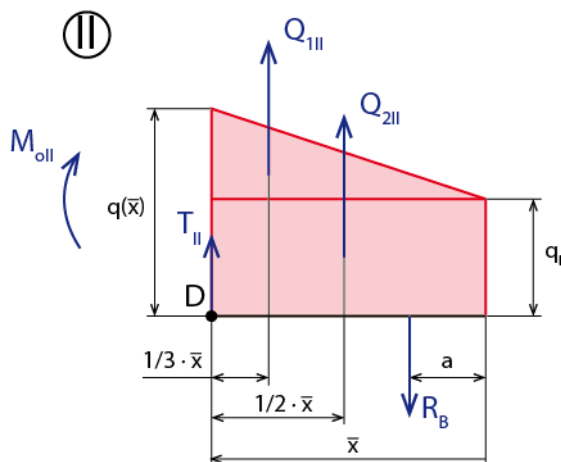
Silová rovnováha ve směru souřadnice y

$$y: T_I + Q_{1I} + Q_{2I} = 0 \quad (5.15)$$

Momentová rovnováha vzhledem k bodu C

$$M_C: M_{0I} - Q_{1I} \cdot \frac{1}{3} \cdot \bar{x} - Q_{2I} \cdot \frac{1}{2} \cdot \bar{x} = 0 \quad (5.16)$$

Pro část II je postup analogický s tím rozdílem, že zde navíc působí reakce od druhém závěsu R_B , která byla určena výše.



Obr. 36 Řez v části II

$$\bar{x} \in \langle a; L \rangle \quad (5.17)$$

$$y: T_{II} + Q_{1II} + Q_{2II} - R_B = 0 \quad (5.18)$$

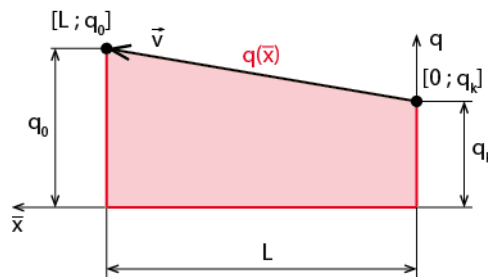
$$M_D: M_{0II} - Q_{1II} \cdot \frac{1}{3} \cdot \bar{x} - Q_{2II} \cdot \frac{1}{2} \cdot \bar{x} + R_B \cdot (\bar{x} - a) = 0 \quad (5.19)$$

Na Obr. 35 a Obr. 36 je vyobrazeno jak je zatěžující obrazec rozdělen na dvě části, které jsou nahrazeny osamocenými silami s danými působišti. Formálně jsou tyto síly pro část I a II stejné, protože jsou proměnné po délce zatížení.

$$Q_{1II} = Q_{1I} = \frac{1}{2} \cdot (q(\bar{x}) - q_k) \cdot \bar{x} \quad (5.20)$$

$$Q_{2II} = Q_{2I} = q_k \cdot \bar{x} \quad (5.21)$$

Pro určení průběhů posouvající síly a ohybového momentu, je potřeba zjistit směrnici přímky $q(\bar{x})$.



Obr. 37 Určení směrnice přímky $q(\bar{x})$

Vychází se ze skutečnosti, že normálový vektor určuje konstanty N a O v obecném zápisu přímky.

$$N \cdot \bar{x} + O \cdot q + P = 0 \quad (5.22)$$

$$\vec{n} = (q_k - q_0; L) \quad (5.23)$$

Porovnáním vztahů (5.22) a (5.23) vyloučíme P .

$$(q_k - q_0) \cdot \bar{x} + L \cdot q + P = 0 \quad (5.24)$$

Dosazením například bodu $[0; q_k]$ do (5.24) se určí poslední konstanta P .

$$P = -L \cdot q_k \quad (5.25)$$

Výsledný zápis přímky se získá dosazením (5.25) do (5.24) a vyjádří se proměnná $q(\bar{x})$.

$$q(\bar{x}) = q_k + \frac{q_0 - q_k}{L} \cdot \bar{x} \quad (5.26)$$

Dosazením vztahu (5.26) do rovnic (5.15), (5.16), (5.18) a (5.19) vyjdou potřebné vztahy pro průběh posouvající síly a ohybového momentu.

$$T_I(\bar{x}) = -\frac{q_0 - q_k}{2 \cdot L} \cdot \bar{x}^2 - q_k \cdot \bar{x} \quad (5.27)$$

$$T_{II}(\bar{x}) = -\frac{q_0 - q_k}{2 \cdot L} \cdot \bar{x}^2 - q_k \cdot \bar{x} + R_B \quad (5.28)$$

$$M_{OI}(\bar{x}) = \frac{q_0 - q_k}{6 \cdot L} \cdot \bar{x}^3 + \frac{1}{2} \cdot q_k \cdot \bar{x}^2 \quad (5.29)$$

$$M_{OII}(\bar{x}) = \frac{q_0 - q_k}{6 \cdot L} \cdot \bar{x}^3 + \frac{1}{2} \cdot q_k \cdot \bar{x}^2 - R_B \cdot (\bar{x} - a) \quad (5.30)$$

5.4.1 Určení polohy druhého závěsu

Vhodným umístěním druhého závěsu, jehož polohu určuje rozměr a , lze minimalizovat maxima ohybového momentu a tím snížit nároky na dimenzování pásnic nosníku na ohyb. Proto je nejprve potřeba najít polohy extrémů předpisů ohybového momentu popsanych v rovnicích (5.29) a (5.30).

$$\frac{\partial M_{OI}(\bar{x})}{\partial \bar{x}} = 0$$

$$\frac{q_0 - q_k}{2 \cdot L} \cdot \bar{x}^2 + q_k \cdot \bar{x} = 0 \quad (5.31)$$

$$\frac{\partial M_{OII}(\bar{x})}{\partial \bar{x}} = 0$$

$$\frac{q_0 - q_k}{2 \cdot L} \cdot \bar{x}^2 + q_k \cdot \bar{x} - R_B = 0 \quad (5.32)$$

Samotné polohy extrémů se vyjádří z rovnic (5.31) a (5.32).

$$\bar{x}_{1I} = 0 \quad ; \quad \bar{x}_{2I} = \frac{-2 \cdot q_k \cdot L}{q_0 - q_k} \quad (5.33)$$

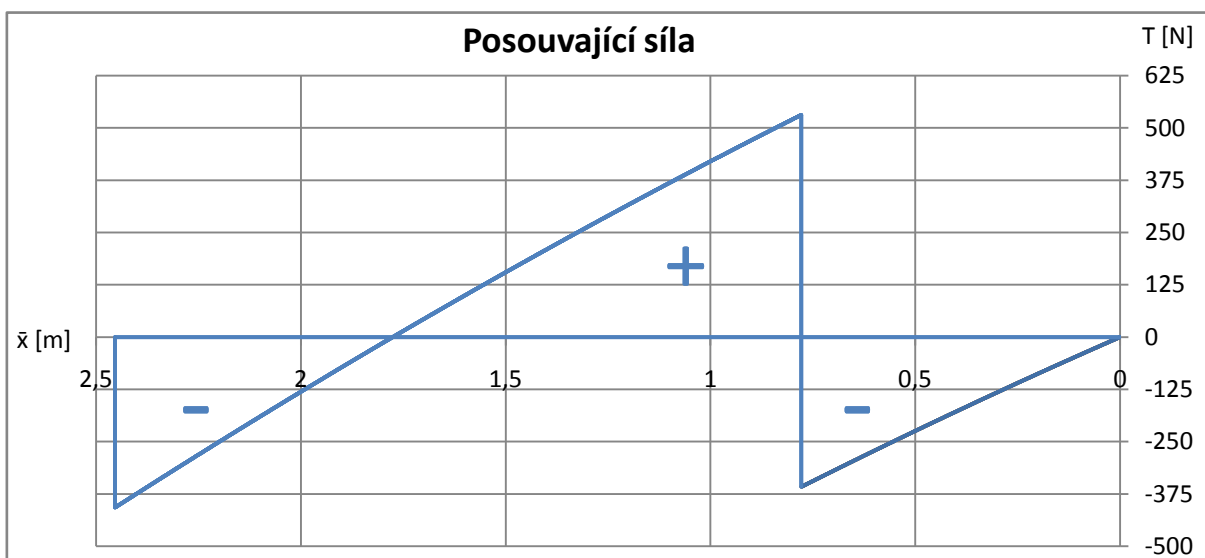
$$\bar{x}_{12II} = \frac{-q_k \pm \sqrt{q_k^2 + 2 \cdot \frac{q_0 - q_k}{L} \cdot R_B}}{\frac{q_0 - q_k}{L}} \quad (5.34)$$

Ze souřadnic v (5.33) je zřejmé že jeden extrém ohybového momentu, v první části, je na kraji klapky a je roven nule a druhý vychází záporný, tudíž mimo řešenou oblast zadanou v (5.14). Pro další postup je podstatný moment v místě rozměru a , kde nabývá ohybový moment maxima pro část I. V části II se nachází také jedno maximum a to pro souřadnici kdy se odmocnina ve vztahu (5.34) přičítá, protože pokud se odmocnina odečte vyjde souřadnice záporná a tudíž mimo oblast popsanou v (5.17).

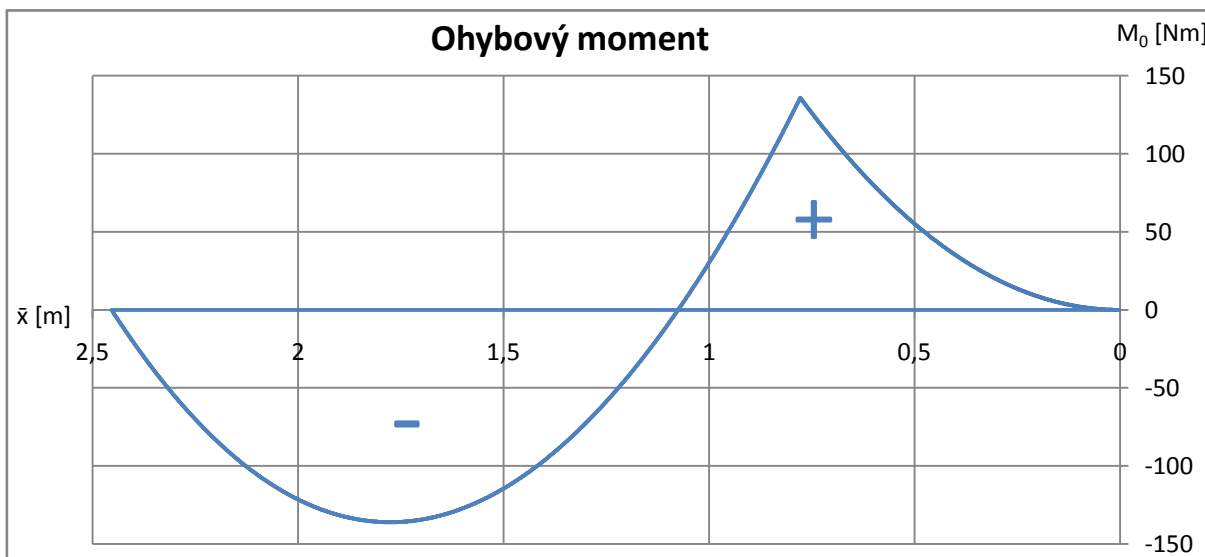
Z průběhu ohybového momentu je zřejmé, že pokud se bude zmenšovat hodnota maxima v jedné části, tak v druhé se bude zvyšovat. Proto pro minimalizaci ohybového momentu je požadováno, aby obě dvě maxima měla stejnou velikost. Z tohoto požadavku byl zjištěn rozměr a , který byl nalezen za pomoci souboru naprogramovaném v Příloze 2 Soubor výpočtů v kartě Stanovení zatížení.

$$a = 0,778 \text{ m} \quad (5.35)$$

Po určení hodnoty délky a lze graficky vyjádřit zatížení klapky.



Graf 2 Posouvající síla po délce klapky

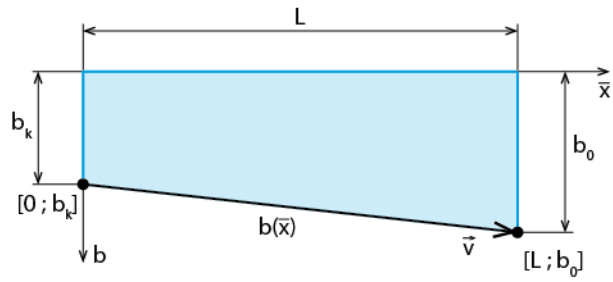


Graf 3 Ohybový moment po délce klapky

5.5 Kroučící moment vzhledem k náběžné hraně klapky

Protože je klapka také namáhána na krut, je vhodné pro další výpočty určit kroučící moment, vyvolávající její zkrut. Ve skutečnosti jsou místa připevnění závěsů ovlivněna tuhostí samotných závěsů a vysouvacího mechanismu, které jsou pro následující výpočty zanedbány.

Nejprve je potřeba určit směrnici odtokové hrany. Postup je analogický s odvozením směrnice popsanou v (5.26).



Obr. 38 Určení směrnice přímky $b(\bar{x})$

$$b(\bar{x}) = b_k + \frac{b_0 - b_k}{L} \cdot \bar{x} \quad (5.36)$$

Samotný kroutící moment je závislý na posouvající síle, proto bude předpis pro kroutící moment rozdělen do dvou částí, stejně jako posouvající síla.

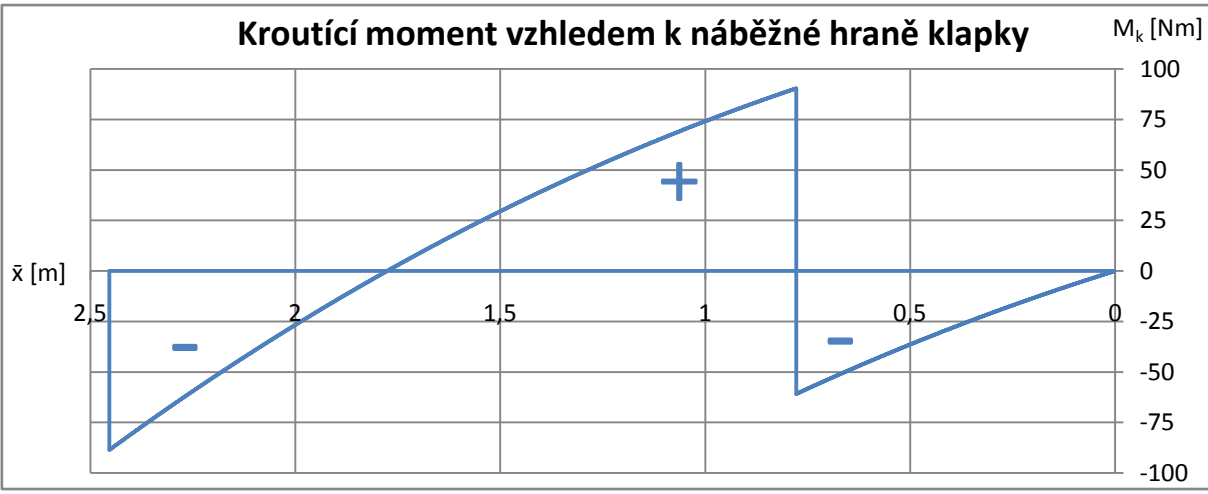
$$M_{kI}(\bar{x}) = T_I(\bar{x}) \cdot 0,445 \cdot b(\bar{x}) \quad (5.37)$$

$$M_{kII}(\bar{x}) = T_{II}(\bar{x}) \cdot 0,445 \cdot b(\bar{x}) \quad (5.38)$$

Dosazením (5.36) do (5.37), (5.38) a následnou úpravou výrazů vyjdou vztahy pro průběh kroutícího momentu vzhledem náběžné hraně klapky.

$$M_{kI}(\bar{x}) = 0,445 \cdot \left(-\frac{(q_0 - q_k) \cdot (b_0 - b_k)}{2 \cdot L^2} \cdot \bar{x}^3 - \left(\frac{q_0 - q_k}{2 \cdot L} \cdot b_k + \frac{b_0 - b_k}{L} \cdot q_k \right) \cdot \bar{x}^2 - q_k \cdot b_k \cdot \bar{x} \right) \quad (5.39)$$

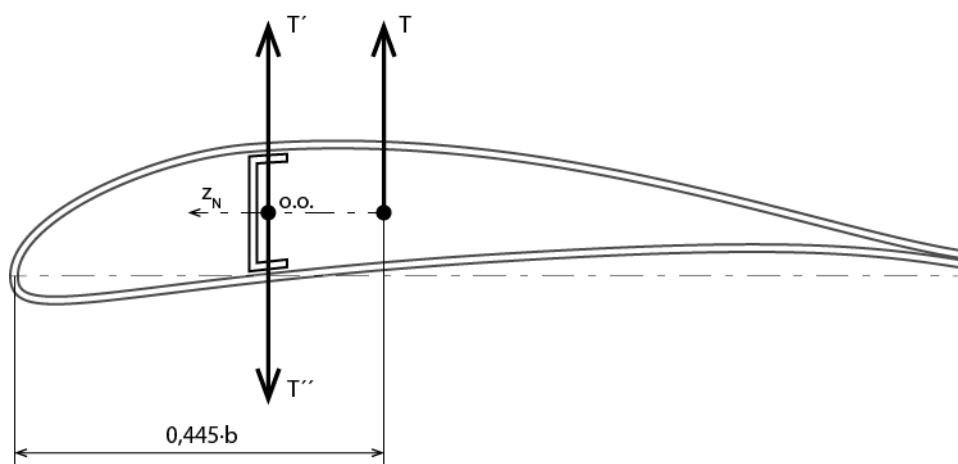
$$M_{kII}(\bar{x}) = 0,445 \cdot \left(-\frac{(q_0 - q_k) \cdot (b_0 - b_k)}{2 \cdot L^2} \cdot \bar{x}^3 - \left(\frac{q_0 - q_k}{2 \cdot L} \cdot b_k + \frac{b_0 - b_k}{L} \cdot q_k \right) \cdot \bar{x}^2 + \left(\frac{b_0 - b_k}{L} \cdot R_B - q_k \cdot b_k \right) \cdot \bar{x} + R_B \cdot b_k \right) \quad (5.40)$$



Graf 4 Kroutící moment vzhledem k náběžné hraně klapky

6 Dimenzování pásnic nosníku na ohyb

Pro výrobu pásnic je použita uhlíková tkanina o tloušťce jedné vrstvy 0,13 mm, která je pojena epoxidovou pryskyřicí.

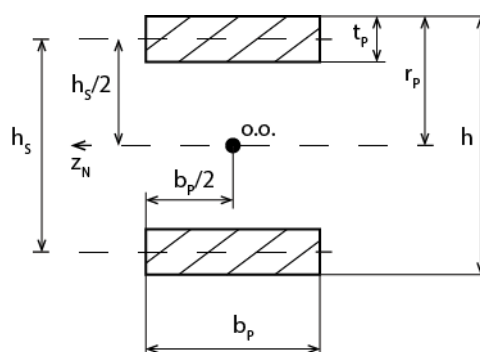


Obr. 39 Uvažované silové uspořádání pro dimenzování pásnic

Tak jak je vyobrazeno v Obr. 39, jsou v místě ohybové osy nosníku zavedeny síly T' a T'' , které jsou stejně velké jako posouvající síla T . Síla T' zatěžuje nosník čistým ohybem, zatímco dvojice sil T a T'' vytváří kroutící moment, který je obsažen v kroutícím momentu odvozeném v podkapitole 5.5. Znovu nemá smysl rozlišovat délku klapky v místě ohybové osy a v místě působení síly T , proto lze v podkapitole 6.2 zaměnit T' za T a počítat s ohybovým momentem odvozeným v podkapitole 5.4. Tento princip výpočtu, kdy se řeší zvlášť ohyb a zkrut klapky, je převzat z [8].

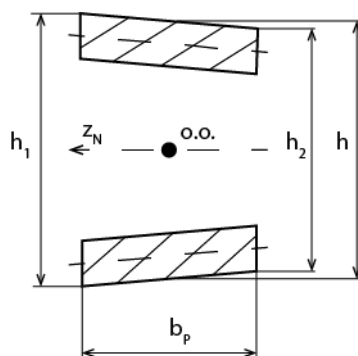
6.1 Zjednodušení geometrie průřezu pásnic

Pásnice jsou sice vytvarované tak aby kopírovaly tvar potahu, ale toto zakřivení je tak malé, že ho lze zanedbat, stejně tak zaoblený přechod mezi pásnicemi a stojinou. Navíc, jak zakřivení pásnic, tak zaoblený přechod, ve skutečnosti zvyšují únosnost nosníku, takže toto zjednodušení je na straně bezpečnosti. Při dimenzování je tedy uvažován obdélníkový průřez, s polohou ohybové osy tak jak je znázorněno na Obr. 40.



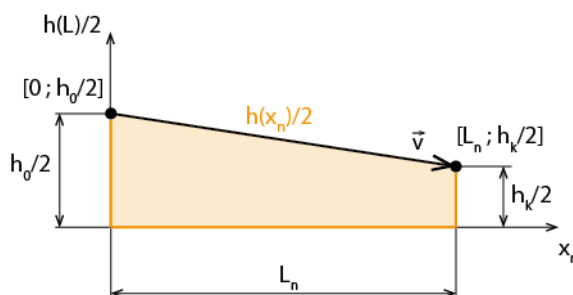
Obr. 40 Průřez pásnic

Výška nosníku h je uvažována jako střední hodnota po hloubce z hodnot h_1 a h_2 , tak jak je vyobrazeno na Obr. 41.



Obr. 41 Průřez pásnic se sklonem

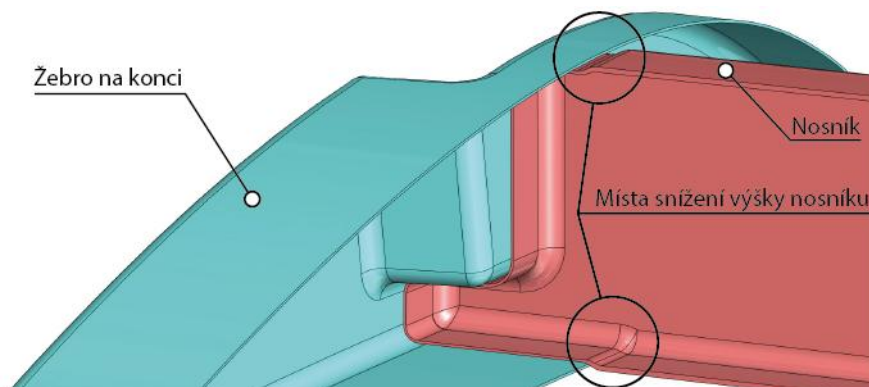
Protože nosník se směrem ke konci klapky snižuje je potřeba určit směrnici přímky která určuje výšku nosníku po délce. Odvození vztahu (6.1) je analogické s určením vztahů (5.26) a (5.36).



Obr. 42 Výška nosníku po délce

$$h(x_n) = \frac{h_k - h_0}{L_n} \cdot x_n + h_0 \quad (6.1)$$

Jak je patrné z Obr. 42 je pro nosník zavedena jeho vlastní souřadnice x_n , která plní spíše symbolickou funkci, protože jak již bylo řečeno v podkapitole 5.1 úhel šípu je malý a v tomto případě lze úhel mezi souřadnicí x a x_n zanedbat. Ovšem podstatná je délka nosníku L_n , která je uvažována pouze v po délce rovinné části pásnic mezi krajními žebry. Nosník se totiž do krajních žebor skokově snižuje, jak je vyobrazeno v Obr. 43. Vzdálenost mezi krajem klapky a tímto zúžením se poté započítává do dalšího postupu a byla odečtena z *Přílohy 1 CAD model vztlakové klapky*.



Obr. 43 Skokové snížení nosníku

6.2 Pevnostní výpočet

Obecně je dovolené ohybové napětí dáno vztahem.

$$\sigma_D = \frac{M_{Omax}}{W_O} \quad (6.2)$$

Průřezový modul v ohybu W_O se obecně získá ze vztahu (6.3).

$$W_O = \frac{J_{z_N}}{r_P} \quad (6.3)$$

Kde rozměr r_P je poloha krajního vlákna a kvadratický moment průřezu J_{z_N} , vztažený k ose z_N , se určí ze znalosti kvadratického momentu obdélníku a Steinerovy věty.

$$J_{z_N} = 2 \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot b_P \cdot t_P^3 + b_P \cdot t_P \cdot \left(\frac{h_S}{2} \right)^2 \right) \quad (6.4)$$

Závorka je ve vztahu (6.4) dvakrát protože namáhání přenášejí dva průřezy, které jsou uvažovány stejné. Hodnota dovoleného napětí se získá snížením hodnot pevností, uvedených v podkapitole 4.1, hodnotou bezpečnosti z odstavce 4.2.1. Uhlíkový kompozit je materiál v takzvaném křehkém stavu, proto je důležité rozlišovat jestli je namáhán na tah či tlak.

$$\sigma_{Dt} = \frac{\sigma_{Pt}}{k} = \frac{1700}{1,875} \doteq 906,667 \text{ MPa} \quad (6.5)$$

$$\sigma_{Dd} = \frac{\sigma_{Pd}}{k} = \frac{900}{1,875} = 480 \text{ MPa} \quad (6.6)$$

Pokud působí ohybový moment ve směru zvoleném v podkapitole 5.4 je spodní pásnice namáhána na tah a horní na tlak. Vyjde-li ohybový moment záporný je v daném místě namáhání pásnic opačné.

Dimenzování je provedeno pro maximální hodnoty ohybového momentu, tudíž pro maxima hledaná v odstavci 5.4.1. Nyní jsou jedinými neznámými parametry hloubka pásnice b_P a její tloušťka t_P . Jeden parametr se tedy zvolí a druhý dopočítá. Protože tloušťku pásnice lze měnit pouze změnou počtu vrstev, je volenou veličinou právě ona.

Po kombinaci vztahů (6.2), (6.3), (6.4) a dosazením $r_P = h/2$ se vyjádří hledaný rozměr b_P . Potřebné výpočty jsou provedeny v Příloze 2 Soubor výpočtů na kartě Dimenzování pásnic.

$$b_P = \frac{M_{Omax} \cdot h}{\sigma_D \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot t_P^3 + t_P \cdot h_S^2 \right)} \quad (6.7)$$

Počet vrstev tkaniny je pro obě pásnice stejný a jsou to tři.

$$t_P = 0,39 \text{ mm} \quad (6.8)$$

Pro horní pásnici vyšlo.

$$b_{PH} = 14,05 \text{ mm} \quad (6.9)$$

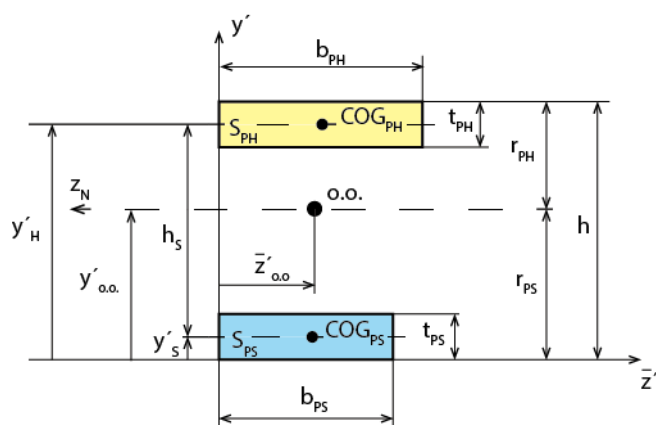
Hloubka spodní pásnice je.

$$b_{PS} = 11,98 \text{ mm} \quad (6.10)$$

Jak již bylo řečeno, v každém řezu nosníku je vždy jedna pásnice namáhaná na tah a druhá na tlak. Při výpočtu hloubky pásnice podle vzorce (6.7) je vypočítána hodnota pro dvojici pásnic daného namáhání. To znamená, že ve vztahu (6.9) je vypočítána hodnota, která platí pro dvě pásnice namáhané na tlak, ale ve skutečnosti je druhá pásnice namáhaná na tah a tudíž by měla být únosnější. Proto je ve vztahu (6.10) vypočítána hodnota pro spodní pásnici, s uvažováním stejného principu.

6.3 Kontrola a určení bezpečnosti po délce nosníku.

V podkapitole 6.2 byly vypočítány rozdílné hloubky pásnic, ale v předpokladech zavedených v podkapitole 6.1 byly pásnice uvažovány stejné a tudíž i poloha ohybové osy byla uprostřed výšky nosníku. Proto je potřeba vypočítat skutečnou polohu ohybové osy a provést kontrolu pro obě pásnice zvlášť.



Obr. 44 Průřez rozdílných pásnic

Pro další kontrolní výpočty je potřeba zjistit polohu ohybové osy ve směru osy y' , která se získá ze znalosti statických momentů pásnic vůči ose z' .

$$y'_{o.o.} = \frac{S_{PH} \cdot y'_H + S_{PS} \cdot y'_S}{S_{PH} + S_{PS}} = \frac{t_{PH} \cdot b_{PH} \cdot \left(h_S + \frac{t_{PS}}{2} \right) + \frac{1}{2} \cdot b_{PS} \cdot t_{PS}^2}{t_{PH} \cdot b_{PH} + t_{PS} \cdot b_{PS}} \quad (6.11)$$

Nyní lze z Obr. 44 odvodit vzdálenosti krajních vláken pásnic od ohybové osy.

$$r_{PS} = y'_{o.o.} \quad (6.12)$$

$$r_{PH} = h - r_{PS} \quad (6.13)$$

Kvadratický moment průřezu k ose z_N procházející ohybovou osou se získá ze znalosti průřezů pásnic a Steinerovy věty.

$$J_{z_N} = b_{PH} \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot t_{PH}^3 + t_{PH} \cdot \left(r_{PH} - \frac{t_{PH}}{2} \right)^2 \right) + \quad (6.14)$$

$$+ b_{PS} \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot t_{PS}^3 + t_{PS} \cdot \left(r_{PS} - \frac{t_{PS}}{2} \right)^2 \right)$$

Analogií se vztahy (6.2) a (6.3) se určí vztahy pro výpočet napětí v horní a spodní pásnici.

$$\sigma_{OH} = \frac{r_{PH} \cdot M_O}{J_{z_N}} \quad (6.15)$$

$$\sigma_{OS} = \frac{r_{PS} \cdot M_O}{J_{z_N}} \quad (6.16)$$

Následující vztah (6.17) ukazuje výpočet bezpečnosti horní pásnice v místě, kde je namáhána na tah. Pro místo kde je pásnice namáhána na tlak se v rovnici (6.17) zamění σ_{Dt} za σ_{Dd} .

$$k_H = \frac{\sigma_{Dt}}{\sigma_{OH}} \quad (6.17)$$

Záměnou indexu H za S se vyjádří vztah pro výpočet bezpečnosti spodní pásnice, přičemž smysl dosazování σ_{Dt} a σ_{Dd} se nemění. Všechny výše uvedené výpočty jsou provedeny v *Příloze 2 Soubor výpočtů na kartě Dimenzování pásnic*. V tomto souboru byla upravena hloubka pásnic.

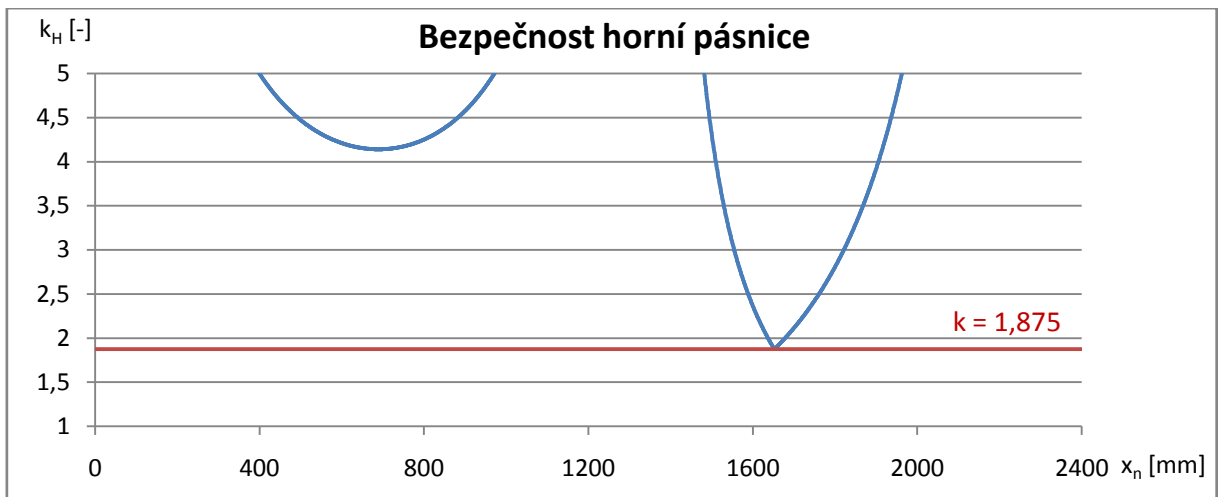
$$b_{PH} = 13,97 \text{ mm} \quad (6.18)$$

$$b_{PS} = 11,77 \text{ mm} \quad (6.19)$$

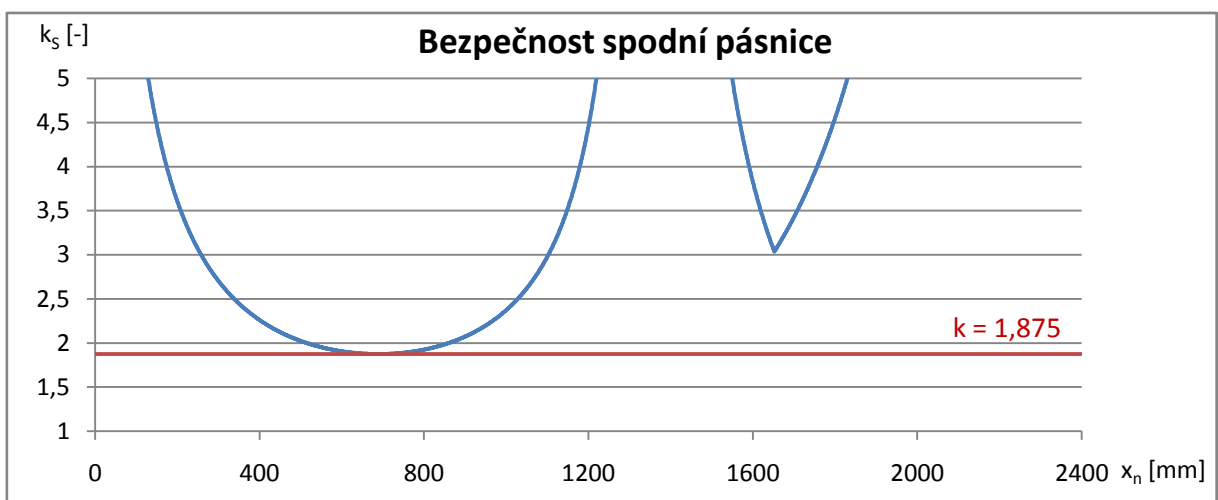
Minimum bezpečnosti spodní pásnice není přímo v místě působení maxima ohybového momentu ze kterého byla, v podkapitole (6.2), spočítána hloubka b_{PS} . To je způsobeno tím, že průběh funkce ohybového momentu, ve zkoumaném místě je velmi pozvolný a výška nosníku klesá rychleji než hodnoty ohybového momentu.

Poloha po délce klapky x [mm]	Napětí horní pásnice σ_{OH} [MPa]	Napětí spodní pásnice σ_{OS} [MPa]
678	-409,551	-478,802
713	-410,610	-480,004
1676	480,109	559,865

Tab. 1 Napětí po délce klapky



Graf 5 Bezpečnost horní pásnice

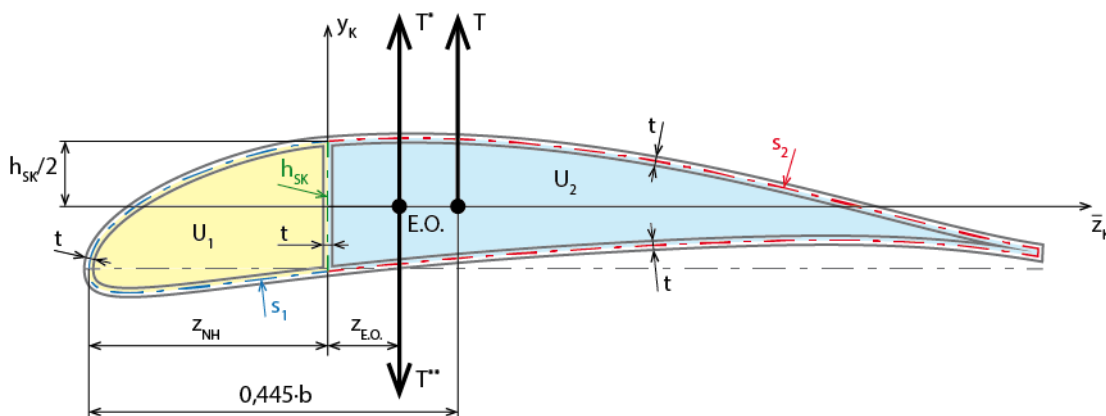


Graf 6 Bezpečnost spodní pásnice

7 Smykové zatížení klapky

7.1 Výpočet smykového namáhání

Součásti namáhané na smyk, potah, žebra a stojina nosníku, jsou vyrobeny z tkaniny o tloušťce jedné vrstvy 0,2 mm. V principu se jedná o krut nekruhového uzavřeného průřezu konkrétně nesymetrického skříňového profilu s jednou přepážkou v podobě stojiny nosníku.



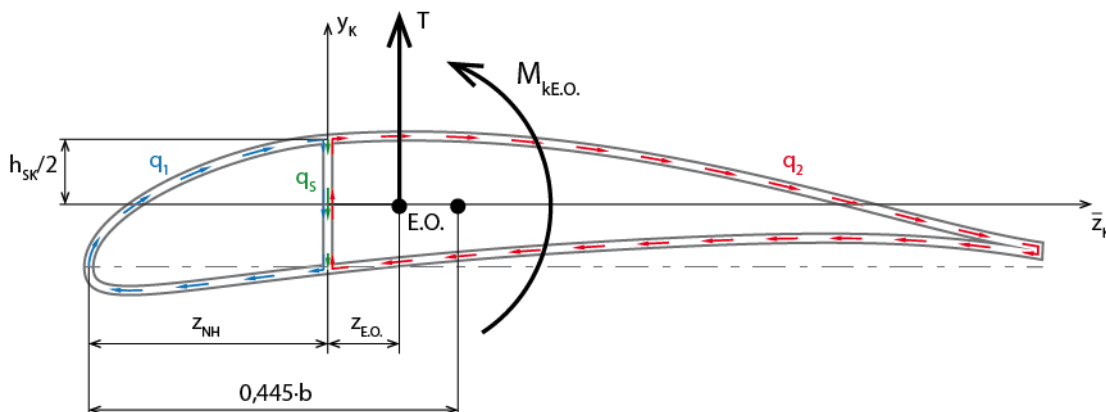
Obr. 45 Geometrie klapky a silové poměry

Protože výpočet krutu profilu je proveden za předpokladu působení posouvající síly v elastické ose, je potřeba zavést síly T^* a T^{**} , které jsou stejně velké jako posouvající síla T . Síla T^* je tedy uvažována v dalších postupech jako posouvající síla a silová dvojice T a T^{**} vytváří kroutící moment vzhledem k elastické ose $M_{kE.O.}$, popsaný vztahem (7.1). Tato úvaha je analogická se způsobem použitým v kapitole 6 a je také převzata z [8].

$$M_{kE.O.} = T \cdot (0,445 \cdot b - z_{NH} - z_{E.O.}) = M_k - T \cdot (z_{NH} + z_{E.O.}) \quad (7.1)$$

Kde M_k je kroutící moment vztažený k náběžné hraně klapky určený v podkapitole 5.5. Elastická osa je takové místo, kdy je úhel natočení a tedy i zkrut nulový. Její poloha je zřejmá z Obr. 45, kde se rozměr $z_{E.O.}$ vypočítá podle vztahu (7.2), který je převzat z [9]. Poloha ve směru osy y_K je určena z přibližné symetrie profilu podél osy \bar{z}_K . Uvažování rozměru $h_{SK}/2$ sice není zcela přesný předpoklad, ale vzniklá chyba není příliš velká.

$$z_{E.O.} = \frac{-2 \cdot s_1(s_1 \cdot U_2 + U_1 \cdot h_{SK} + U_2 \cdot h_{SK})}{(s_1 + h_{SK}) \cdot (s_1 \cdot s_2 + s_1 \cdot h_{SK} + s_2 \cdot h_{SK})} + \frac{2 \cdot U_1}{s_1 + h_{SK}} \quad (7.2) \quad [9]$$



Obr. 46 Namáhání klapky

Platí momentová rovnováha.

$$M_{ke.o.} + 2 \cdot U_1 \cdot q_1 + 2 \cdot U_2 \cdot q_2 = 0 \quad (7.3)$$

Jedná se o dvakrát staticky neurčitou úlohu, proto je potřeba doplnit dvě deformační podmínky, které vychází z předpokladu, že zkrut obou dutin musí být stejný.

$$\vartheta_1 = \frac{1}{2 \cdot U_1} \cdot \oint_{(1)} \frac{q}{G \cdot t} \cdot ds = \vartheta_2 = \frac{1}{2 \cdot U_2} \cdot \oint_{(2)} \frac{q}{G \cdot t} \cdot ds \quad (7.4)$$

Všechny části klapky jsou ze stejného materiálu o stejné tloušťce, proto jsou modul pružnosti v krutu G a tloušťka stěny t všude stejné. Rovnici (7.4) lze zjednodušit a po vyřešení integrálů se získá tvar (7.5) pro řešený příklad.

$$\frac{1}{U_1} \cdot (q_1 \cdot s_1 + (q_1 + q_S - q_2) \cdot h_{SK}) = \frac{1}{U_2} \cdot (q_2 \cdot s_2 + (-q_1 - q_S + q_2) \cdot h_{SK}) \quad (7.5)$$

Kombinací vztahů (7.3) a (7.5) vyjdou vztahy smykových toků pro přední a zadní dutinu.

$$q_1 = \frac{-(U_1 \cdot s_2 + U_1 \cdot h_{SK} + U_2 \cdot h_{SK}) \cdot \frac{M_{ke.o.}}{2 \cdot U_2} - (U_1 + U_2) \cdot h_{SK} \cdot q_S}{U_2 \cdot s_1 + U_2 \cdot h_{SK} + 2 \cdot U_1 \cdot h_{SK} + \frac{U_1}{U_2} \cdot (U_1 \cdot s_2 + U_1 \cdot h_{SK})} \quad (7.6)$$

$$q_2 = \frac{-M_{ke.o.} - 2 \cdot U_1 \cdot q_1}{2 \cdot U_2} \quad (7.7)$$

Stojina nosníku, tedy přepážka profilu, přenáší posouvající sílu T , proto v ní vzniká smykový tok q_S .

$$q_S = \frac{T}{h_{SK}} \quad (7.8)$$

Ovšem celkový smykový tok v přepážce je dán součtem orientovaných toků, které jí protékají.

$$q_{SC} = q_1 + q_S - q_2 \quad (7.9)$$

Pro smykový tok v uzavřeném profilu platí analogie s hydrodynamikou, kde si smykový tok q lze představit jako průtok média potrubím a smykové napětí τ jako rychlost proudění. Z čehož vyplývá, že smykový tok je v uzavřeném profilu konstantní. Všeobecný vztah pro výpočet smykového napětí ze smykového toku je popsán v rovnici (7.10).

$$\tau = \frac{q}{t} \quad (7.10)$$

Klapka je na smykové zatížení řešena ve čtyřech řezech. Potřebné rozměry jsou získány z *Přílohy 1 CAD model vztlakové klapky* a jsou uvedeny v *Příloze 2 Soubor výpočtů* na kartě *Zatížení na krut*, kde jsou provedeny všechny potřebné výpočty. Výsledné hodnoty provozního smykového zatížení jsou uvedeny v Tab. 2.

	Poloha po délce klapky x [mm]	Smykové napětí v přední dutině τ_1 [MPa]	Smykové napětí v zadní dutině τ_2 [MPa]	Smykové napětí ve stojině nosníku τ_S [MPa]
Řez I - kořen klapky	26	2,390	-1,164	-10,454
Řez II	850	-0,668	0,324	2,911
Řez III - závěs 2, vnitřní pole	1676	-4,146	1,998	18,017
Řez III - závěs 2, vnější pole	1676	2,795	-1,342	-12,130
Řez IV - konec klapky	2407	0,180	-0,086	-0,778

Tab. 2 Výsledky provozního smykového namáhání klapky

V řezu III je potřeba počítat zvlášť pro vnější a vnitřní pole, protože se nachází přesně na jejich uvažovaném rozmezí. Navíc je v tomto místě skok v průběhu kroutícího momentu, jak je zřejmé z Graf 4 a je tedy důležité započíst do výpočtů tu hodnotu, která náleží danému poli. Pro další výpočty je potřeba určit početní smyková napětí navýšením provozních smykových napětí z Tab. 2 o bezpečnost.

	Početní smykové napětí v přední dutině τ_{1p} [MPa]	Početní smykové napětí v zadní dutině τ_{2p} [MPa]	Početní smykové napětí ve stojině nosníku τ_{Sp} [MPa]
Řez I - kořen klapky	4,481	-2,183	-19,601
Řez II	-1,252	0,607	5,459
Řez III - závěs 2, vnitřní pole	-7,774	3,747	33,781
Řez III - závěs 2, vnější pole	5,241	-2,517	-22,743
Řez IV - konec klapky	0,337	-0,161	-1,458

Tab. 3 Početní smyková napětí

Bezpečnost vůči pevnosti ve smyku se získá porovnáním početních smykových napětí s pevností ve smyku, jak je obecně zapsáno ve vztahu (7.11).

$$k_p = \frac{\tau_{PS}}{\tau_p} \quad (7.11)$$

Kde τ_{PS} je pevnost ve smyku vícesměrné tkaniny, která je uvedena v podkapitole 4.1.

	Bezpečnost přední dutiny k_{1p}	Bezpečnost zadní dutiny k_{2p}	Bezpečnost stojiny nosníku k_{Sp}
Řez I - kořen klapky	26,782	54,983	6,122
Řez II	95,857	197,814	21,982
Řez III - závěs 2, vnitřní pole	15,437	32,026	3,552
Řez III - závěs 2, vnější pole	22,895	47,683	5,276
Řez IV - konec klapky	356,129	743,792	82,313

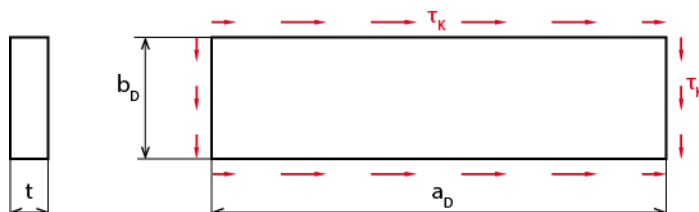
Tab. 4 Bezpečnosti vůči pevnosti ve smyku

7.2 Stabilita smykově namáhaných částí

Požadavek pro stabilitu smykově namáhaných částí je takový, aby si všechny smykově namáhané části zachovaly stabilitu až do početního zatížení. To znamená, že se početní smyková napětí z Tab. 3 budou porovnávat s kritickými hodnotami napětí.

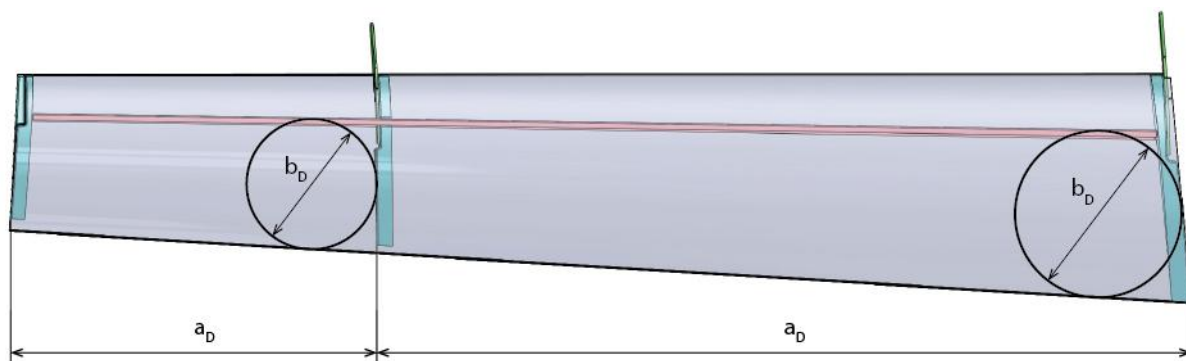
7.2.1 Výpočet stability potahu

Nejkritičtějším místem, z pohledu stability při kroucení, je potah zadní dutiny klapky, z důvodu velké plochy a malého zakřivení. Protože zakřivení v této části je velmi malé, lze ho zanedbat a potah v této části uvažovat jako rovinnou desku.



Obr. 47 Stabilita tenké desky [10]

Řešené plochy zadní části potahu ve skutečnosti nejsou zcela obdélníkové, proto rozměr a_D je brán jako největší vzdálenost mezi žebry dané části a hloubka desky b_D je získána jako průměr největší vepsané kružnice řešené části potahu. Používání vepsaných kružnic, vyobrazených v Obr. 48, vylučuje okraje, které jsou ovlivněny vetknutím.



Obr. 48 Odečet rozměrů potahu

Zvlášť je řešena horní a spodní část zadní části potahu, protože hloubky desek jsou, vlivem různého zakřivení a nesymetrie profilu, rozdílné. Tyto desky jsou uvažovány jako podélně i příčně vetknuté, protože jsou ze všech stran přilepeny k ostatním komponentům. Princip výpočtu kritických smykových napětí i odečtu rozměrů desky je převzat z [10].

$$\tau_K = \kappa \cdot K_s \cdot E \cdot \left(\frac{t}{b_D}\right)^2 \quad (7.12) \quad [10]$$

Kde $\kappa = 3$ pro symetrickou skladbu uhlíkového kompozitu a je odečteno z obrázku 4.41 nacházejícím se v [10]. Youngův modul E je zadán v podkapitole 4.1. Součinitel K_s se získá z grafu 4.42, který je také v [10] a vyobrazuje závislost $f(K_s) = b_D/a_D$. Odečtené hodnoty a výpočty jsou uvedeny v Příloze 2 Soubor výpočtů v kartě Zatížení na krut.

	Kritické smykové napětí zadní části potahu τ_{2K} [MPa]	
	Vnitřní pole	Vnější pole
Horní část potahu	2,307	3,948
Spodní část potahu	2,452	4,174

Tab. 5 Kritická smyková napětí zadní části potahu

Z porovnání Tab. 3 s Tab. 5 je zřejmé, že jediným místem, kdy je početní smykové napětí vyšší než kritické, je v místě závěsu 2 pro vnitřní pole. To platí pouze pro samotný potah, ale ten je v tomto místě podepřen žebrem. Obecně na krajích uvažovaných desek se stabilitou problémy nejsou, navíc výše uvedený postup se zabývá problematiku ohledně stability v hloubi desek. Takže lze prohlásit, že zadní část potahu je stabilní a jak je řečeno výše, zadní část potahu je z pohledu stability nejkritičtější, proto pokud vyšla stabilní, tak přední část potahu bude stabilní také.

7.2.2 Výpočet stability stojiny nosníku

Stojina nosníku je rovinná deska a postup výpočtu kritického smykového napětí je analogický s výpočtem provedeným v 7.2.1. Protože stojina nosníku nemá obdélníkový tvar, hodnoty a_D a b_D se znovu získají analogicky s předchozím postupem.

	Kritické smykové napětí stojiny nosníku τ_{Sk} [MPa]
Vnitřní pole	59,626
Vnější pole	96,716

Tab. 6 Kritická smyková napětí stojiny nosníku

Při porovnání Tab. 3 a Tab. 6 je zřejmé, že se stabilitou stojiny nosníku žádné problémy nejsou. Jak pro potah tak i pro stojinu vyšlo, že při provozu klapky neztratí stabilitu i bez použití pěnového jádra, což je výhodné z hmotnostního hlediska.

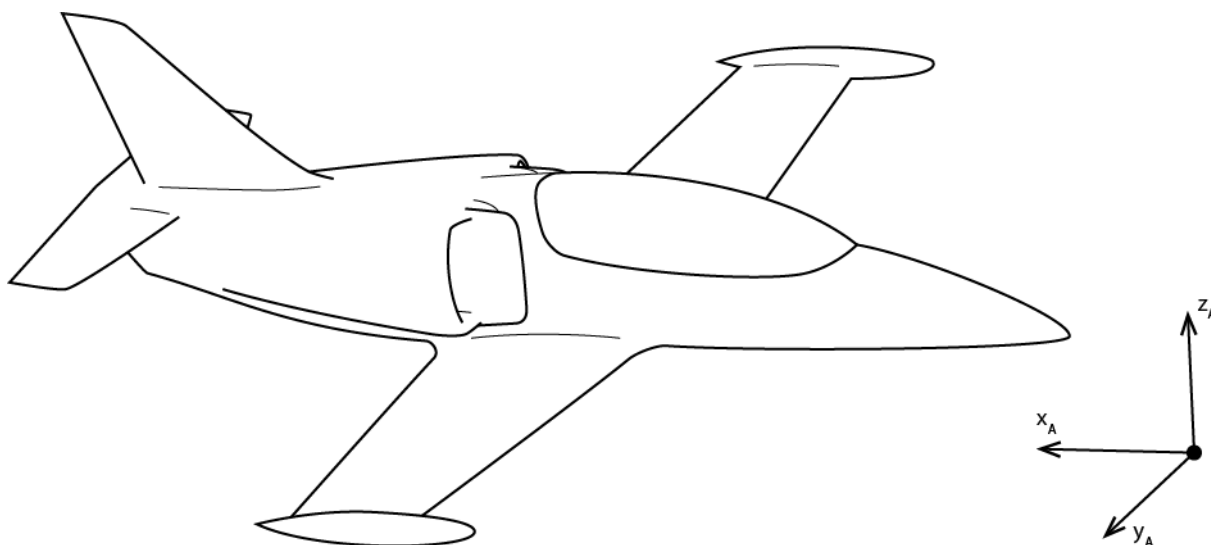
8 Hmotový rozbor

Pro letoun je hmotnost velmi důležitou veličinou, proto je zde proveden hmotový rozbor.

8.1 Hustoty použitých materiálů

- Vícesměrný uhlíkový prepreg (potah, žebra, stojina nosníku) $\rho_{Svs} = 320 \text{ g/m}^2$
- Jednosměrný uhlíkový prepreg (pásnice nosníku) $\rho_{Sjs} = 163 \text{ g/m}^2$
- Lepidlo HENKEL HYSOL EA 9394 $\rho_{Vl} = 1360 \text{ kg/m}^3$

8.2 Polohy těžišť komponent klapky



Obr. 49 Absolutní souřadnicový systém letounu

Polohy těžišť jednotlivých částí klapky v absolutním souřadnicovém systému letounu jsou získány z Přílohy 1 CAD model vztlakové klapky a jsou uvedeny v Tab. 7.

	Nosník	Žebro u kořene	Žebro 2	Žebro na konci	Závěs u kořene	Závěs 2	Potah
x_A [mm]	4936,424	5137,776	4940,201	4858,434	4979,591	4797,517	5043,242
y_A [mm]	-1243,216	-79,941	-1738,242	-2496,407	-75,072	-1737,868	-1226,491
z_A [mm]	1056,654	961,409	1090,820	1148,154	936,109	1059,474	1051,454

Tab. 7 Polohy těžišť komponent klapky v absolutním souřadnicovém systému letounu

8.3 Výpočet hmotností

Z Přílohy 1 CAD model vztlakové klapky je známa geometrie všech komponent klapky a spolu se znalostí hustot použitých materiálů lze odvodit jejich hmotnosti. Při zadané objemové hustotě materiálu lze hmotnost dopočítat podle vztahu (8.1).

$$m_K = \rho_V \cdot V_K \quad (8.1)$$

Kde m_K je označení pro hmotnost komponentu. Pokud je známa plošná hustota, hmotnost jedné vrstvy prepregu se vypočítá podle rovnice (8.2).

$$m_{1V} = \rho_S \cdot S_{1V} \quad (8.2)$$

Vynásobením vztahu (8.2) počtem vrstev znovu vyjde hmotnost komponentu. Plošnou hustotu lze, pro případ tkaniny o tloušťce t_{1V} , přepočítat na objemovou podle výrazu (8.3).

$$\rho_V = \frac{\rho_S}{t_{1V}} \quad (8.3)$$

Nosník m_N [g]	Žebro u kořene m_{z0} [g]	Žebro 2 m_{z2} [g]	Žebro na konci m_{zK} [g]	Závěs u kořene m_{z0} [g]	Závěs 2 m_{z2} [g]	Potah m_{Pot} [g]	Lepidlo m_L [g]
153,594	46,284	28,249	16,802	125,375	81,077	1266,525	143,457

Tab. 8 Hmotnosti komponent klapky

Celková hmotnost klapky je součet všech dílčích hmotností. Všechny uvedené výpočty jsou provedeny v *Příloze 2 Soubor výpočtů* na kartě *Hmotový rozbor*.

$$m_{ck} = m_N + m_{z0} + m_{z2} + m_{zK} + m_{z0} + m_{z2} + m_{Pot} + m_L \doteq 1861,364 \text{ g} \quad (8.4)$$

9 Závěr

V této bakalářské práci je řešena vztlaková klapka letounu UL-39 Albi, který spadá do kategorie ultralightů a nízká hmotnost je pro něj stěžejní. Toto letadlo využívá Fowlerovu klapku, která sice potřebuje relativně složitý a těžký vysouvací mechanismus, ale co se účinnosti týče je výrazně lepší než u jednodušších a lehčích variant. Z pohledu uspořádání komponent klapka sestává ze tří plnostěnných žeber, dvou závěsů, potahu a nosníku. Nosník je zvolen s průřezem C, ten je výhodný z pevnostního hlediska, ale kvůli geometrii průřezu je potřeba použít vícedílnou formu, aby bylo zajištěno bezpečné vyjmutí z formy. Ke stavbě celého letounu je použit uhlíkový kompozit ve formě prepregu. Jedná se o materiál s velikou pevností a malou hustotou, z čehož vyplývá, že konstrukce z něj vyrobené jsou velmi lehké a pevné.

Prvním krokem výpočtové části je určení zatížení podle předpisu UL2 - I Letecké amatérské asociace ČR, z kterého se vychází při dalších výpočtech. Oba závěsy vnáší do konstrukce reakční síly a jsou přilepeny a přišroubovány k místním žebřům. Poloha prvního závěsu je v místě kořene klapky, zatímco poloha druhého je určena tak, aby maximum ohybového momentu bylo co nejmenší. V principu je klapka namáhaná na ohyb a na krut. K přenosu ohybu slouží pásnice nosníku, zatímco krut přenáší potah, stojina nosníku a žebra, která podepírají potah a stanovují tvar profilu. Nosník je umístěn v místě největší tloušťky profilu z důvod maximalizování únosnosti v ohybu. Ze znalosti zatížení a umístění nosníku jsou nadimenzovány průřezy pásnic. Ve výpočtech působícího kroučícího momentu jsou zanedbány tuhosti závěsů a vysouvacího mechanismu klapky. Z pohledu krutového zatížení je důležitá stabilita zadní části potahu, protože se jedná o velkou plochu s malým zakřivením. Stabilita této části vyšla dostatečná i bez použití sendvičové struktury s pěnovým jádrem, což je přívětivé především z hlediska hmotnosti. Poslední částí této práce, kdy již jsou známy všechny parametry klapky, je hmotový rozbor.

V dalších fázích návrhu bude potřeba upravit vysouvací mechanismus v okolí druhého závěsu, protože jeho poloha je, oproti klapce aktuálně se nacházející na letounu, jiná. Závěsy zatím byly převzaty, ale je možné, že by za jistých modifikací mohlo dojít k jejich odlehčení. Žebra jsou plnostěnná a tak by při jejich analýze mohl vzniknout prostor pro otvory, které by znovu snížily hmotnost.

10 Použité zdroje

- [1] VELIČKA, Jakub. Základní druhy vztlakových klapek. Pilotní.cz [online]. 22.2.2014 [cit. 2.3.2017]. Dostupné z: <https://www.pilotni.cz/zakladni-druhy-vztlakovych-klapek/>
- [2] NORDMANN, Arne. Control surfaces at the wing of a plane.svg. Wikipedia Commons [online]. 15.5.2007 [cit. 2.3.2017]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Control_surfaces_at_the_wing_of_a_plane.svg
- [3] MIKULA, Jan. Konstrukce a projektování letadel II: vydání první. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, listopad 2005. ISBN 80-01-03338-4
- [4] PÁVEK, Josef, Zdeněk KOPŘIVA. Konstrukce a projektování letadel I: Praha: Ediční středisko ČVUT, 1982
- [5] SLAVÍK, Svatomír. Mechanizace křídla - prostředky pro zvýšení vztlaku, křídélka, spojery.pdf. Ústav letadlové techniky ČVUT FS [online]. 22.3.2006 [cit. 5.3.2017]. Dostupné z: <http://aerospace.fsik.cvut.cz/letadla1/Mechanizace%20k%C5%99%C3%ADdla%20-%20prost%C5%99edky%20pro%20zv%C3%BD%C5%A1en%C3%AD%20vztlaku,%20k%C5%99id%C3%A9lka,%20spojery.pdf>
- [6] SP-367 Introduction to the Aerodynamics of Flight. NASA History program office [online]. [cit. 5.3.2017]. Dostupné z: <https://history.nasa.gov/SP-367/chapt4.htm#f67>
- [7] Letecká amatérská asociace ČR. UL2 - I. Část: Požadavky letové způsobilosti SLZ, Ultralehké letouny řízené aerodynamicky [online]. Praha: 17.10.2002, 30.3.2005 [cit. 21.3.2017]. Dostupné z: <http://www.laacr.cz/SiteCollectionDocuments/predpisy/UL2-I.pdf>
- [8] ŠPUNDA, Jaromír. Stavební mechanika a pevnost letounu: Část IV. Brno: Vojenská akademie Antonína Zápotockého, 1971
- [9] BARÁK, Karel. Teoretické podklady pro stanovení smykových toků vícedutinové konstrukce. Praha: Ústav letadlové techniky ČVUT v Praze, 2012
- [10] FUNKE, Herbert. Systematische Entwicklung von Ultra-Leichtbaukonstruktionen in Faserverbund-Wabensandwichbauweise am Beispiel eines Kleinflugzeuges. Rheda-Wiedenbrück, 2001. Disertační práce (Dr.-Ing.). Universität-GH Paderborn, Laboratorium für Konstruktionslehre, 27. 8. 2001. ISBN 3-00-008670-6. Dostupné z: http://www.r-g.de/w/images/9/99/Dissertation_von_Herbert_Funke.pdf