



FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE

Ústav letadlové techniky

Analýza napjatosti konstrukčních prvků startovacího zařízení systému AT25

Bakalářská práce

2023

Marie Lacigová

Studijní program: B2342 Teoretický základ strojního inženýrství

Studijní obor: 2301R000 (bez oboru)

Vedoucí práce: Ing. Ivan Jeřábek Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lacigová** Jméno: **Marie** Osobní číslo: **502346**
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:

Analýza napjatosti konstrukčních prvků startovacího zařízení systému AT 25

Název bakalářské práce anglicky:

Structural Parts Stress Analysis of The AT 25 system Starting Device

Pokyny pro vypracování:

Analýza zatížení startovacího zařízení
Definice kritických konstrukčních uzlů startovacího zařízení
Pevnostní kontrola dílů konstrukce startovacího zařízení

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynu vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Ivan Jeřábek, Ph.D. ústav letadlové techniky FS

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

.

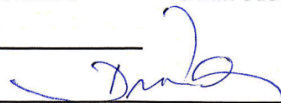
Datum zadání bakalářské práce: **28.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: _____



Ing. Ivan Jeřábek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Milan Dvořák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna 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.

25.4.2023

Datum převzetí zadání

Lacigová

Podpis studentky

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady 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

Ráda bych poděkovala vedoucímu práce, Ing. Ivanovi Jeřábkovi Ph.D., za vedení této práce, za odborné připomínky během vypracování a za vřelý přístup. Dále děkuji zadavateli tématu za poskytnutí veškerých potřebných parametrů pro vypracování. V neposlední řadě děkuji rodině za podporu nejen během psaní práce.

ANOTAČNÍ LIST

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou napjatosti konstrukčních prvků startovacího zařízení AT 25. Jsou definovány návrhové parametry zařízení, provedeny silové rozbory a analýzy kritických částí. Pro konkrétní návrh konstrukčního řešení kritického spojovacího mechanismu je provedena pevnostní kontrola.

Autor:	Marie Lacigová
Název BP:	Analýza napjatosti konstrukčních prvků startovacího zařízení systému AT 25
Rok vyhotovení:	2023
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Obor studia:	2301R000 (bez oboru)
Ústav:	Ústav letadlové techniky
Bibliografické údaje:	Ing. Ivan Jeřábek Ph.D.
	Počet stran 60
	počet obrázků 36
	počet tabulek 14
	počet grafů 0
	počet příloh 2
Klíčová slova:	Startovací zařízení; spojovací prvek nosníků; stahovací spona; analýza napjatosti

ANOTATION LIST

This bachelor's thesis deals with the analysis of the tension of the structural elements of the starting device AT 25. The design parameters of the device are defined, force analyzes and analyzes of critical parts are performed. A strength check is carried out for a concrete design solution of a critical connecting mechanism.

Author:	Marie Lacigová
Title of bachelor thesis:	Analýza napjatosti konstrukčních prvků startovacího zařízení systému AT 25
Academic year:	2023
Study program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Field of study:	2301R000 (bez oboru)
Department:	Ústav letadlové techniky
Bibliographic data:	Ing. Ivan Jeřábek Ph.D.
	no. of pages 60
	no. of pictures 36
	no. of tables 14
	no. of graphs 0
	no. of attachments 2
Key words:	Starting device; connecting element of beams; hook clamps; tension analysis

OBSAH

1	Úvod	15
2	Popis systému	16
2.1	Letoun	16
2.2	Startovací zařízení.....	16
2.3	Stožár s anténou	17
3	Definice návrhových parametrů	18
3.1	Letoun	18
3.1.1	Hmotnost.....	18
3.1.2	Minimální rychlost.....	18
3.2	Startovací zařízení.....	19
3.2.1	Délka startovací dráhy.....	19
3.2.2	Konstrukce startovacího zařízení	19
3.2.3	Požadavek na montáž.....	20
3.2.4	Výroba	20
3.2.5	Navíjení lana	20
3.2.6	Brzdny systém	21
4	Rozbor zatížení startovacího zařízení	22
4.1	Osová síla	24
4.2	Ohybový moment	28
4.3	Posuvná síla.....	33
5	Definice kritických konstrukčních uzlů startovacího zařízení	35
5.1	Definice požadavků na konstrukční uzly.....	35
5.1.1	Zástavbové požadavky.....	35
5.1.2	Pevnostní požadavky	36
5.1.3	Finanční kritéria.....	36
5.1.4	Dostupnost požadovaného spoje na trhu	36
5.1.1	Technologické požadavky.....	37
5.2	Aktuální konstrukční řešení spoje.....	38
5.3	Návrh konstrukčního řešení spoje	38
5.3.1	Postranní bločky	40
5.3.2	Hák.....	40
5.3.3	Zavírací páka.....	41
5.3.4	Třmen	41
5.3.5	Boční díl pro uchycení třmenu	41
5.3.6	Bloček s čepy uvnitř nosníku	42
5.4	Rozbor konstrukčního řešení	43
6	Pevnostní kontrola dílů konstrukce startovacího zařízení	47
6.1	Bloček uvnitř nosníku.....	48
6.2	Hák.....	50
6.3	Třmen.....	52
6.4	Zavírací páka.....	53



6.5	Čepy	53
6.5.1	Čep 1.....	54
6.5.2	Čep 2.....	55
6.5.3	Čepy 3 a 4	56
7	Závěr	58
8	Použitá literatura	59

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 AT25.....	16
Obrázek 2 Startovací rampa pro AT25.....	17
Obrázek 3 Stožár se zařízením pro sledování polohy letounu.....	17
Obrázek 4 Schéma sil působících na vozík a letoun.....	23
Obrázek 5 Schéma startovacího zařízení s vyznačenými oblastmi výpočtů.....	24
Obrázek 6 Zjednodušený model startovacího zařízení.....	28
Obrázek 7 Otvory v nosníku startovacího zařízení.....	28
Obrázek 8 Řez nosníkem v místě, kde se nachází nejméně materiálu.....	29
Obrázek 9 Poloha vozíku vůči startovacímu zařízení.....	30
Obrázek 10 Uvolnění náhradního modelu startovacího zařízení.....	31
Obrázek 11 Řezy pro výpočet momentu.....	33
Obrázek 12 Průběh ohybového momentu a posuvné síly v obecné poloze vozíku li.....	34
Obrázek 13 Rozdělení na části startovacího zařízení.....	35
Obrázek 14 Čelní pohled na nosník a vozík s kritickými rozměry.....	36
Obrázek 15 Spona GN 852 [5].....	37
Obrázek 16 Stahovací třmenová spona K0044 [6].....	37
Obrázek 17 Spona s J-hákem [7].....	37
Obrázek 18 CAD model spoje pomocí pantu.....	38
Obrázek 19 Mechanismus spony: 1 – páka je v obecné poloze, spona je otevřená; 2 – přechod přes mrtvý bod, tři čepy jsou v jedné rovině; 3 – spona je zavřená.....	39
Obrázek 20 Rozměry děr pro šrouby v nosníku - horní strana.....	40
Obrázek 21 Rozměry děr pro šrouby v nosníku - dolní strana.....	40
Obrázek 22 Postranní bloček.....	40
Obrázek 23 Hák.....	41
Obrázek 24 Zavírací páčka.....	41
Obrázek 25 Třmen.....	41
Obrázek 26 Boční díl.....	42
Obrázek 27 Rozmístění děr pro přidělení dolní spony.....	42
Obrázek 28 Rozmístění děr pro přidělení horní spony.....	42
Obrázek 29 Umístění spony vůči pohybu vozíku při rozjezdu.....	43
Obrázek 30 Řez spojem nosníku.....	44
Obrázek 31 Rozměry bločku uvnitř nosníku.....	48
Obrázek 32 Rozměrové charakteristiky háku.....	50
Obrázek 33 Rozměrové charakteristiky háku.....	51
Obrázek 34 Rozměry třmenu.....	52
Obrázek 35 Rozměry zavírací páčky.....	53
Obrázek 36 Rozměry a poloha čepů.....	54

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Vstupní hodnoty pro výpočet minimální vzletové rychlosti.....	19
Tabulka 2 Vlastnosti oceli AISI 316 [3].....	20
Tabulka 3 Rozměry startovacího zařízení.....	24
Tabulka 4 Výsledné hodnoty osových sil.....	27
Tabulka 5 Dosazované hodnoty.....	31
Tabulka 6 Výsledné hodnoty momentů pro jednotlivé případy.....	33
Tabulka 7 Výsledné hodnoty posuvné síly pro jednotlivé případy.....	34
Tabulka 8 Kalkulace nákladů na jeden spojovací prvek [9].....	46
Tabulka 9 Hodnoty silových účinků použitých při pevnostní kontrole.....	47
Tabulka 10 Mechanické vlastnosti materiálu 11 500 [10].....	48
Tabulka 11 Rozměry bločku pro pevnostní výpočty.....	49
Tabulka 12 Rozměry třmenu pro pevnostní výpočty.....	52



Tabulka 13 Rozměry zavírací páčky pro pevnostní výpočty	53
Tabulka 14 Rozměry čepů pro pevnostní výpočty	54

SEZNAM POUŽITÝCH PROGRAMŮ

- MS Office
- SolidWorks
- Fusion 360
- Matlab

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

zkratka	význam
PLA	Polyalactit acid
PA	Polyamid
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
MSA	Mezinárodní standartní atmosféra
PETG	Polyethylene terephthalate glycol

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

symbol	název	jednotky
F_L	Vztlaková síla	N
ρ	Hustota vzduchu v 0 m MSA	kg/m ³
c_L	Součinitel vztlaku letounu	-
S	Plocha křídla	m ²
m	Vzletová hmotnost letounu	kg
g	Gravitační zrychlení	m/s ²
v	Pádová rychlost	m/s
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	MPa
R_m	Mez pevnosti	MPa
E	Mez pružnosti	GPa
O_v	Odpor vozíku	N
X	Odpor letounu	N

Y	Vztlaková síla letounu	N
m_L	Hmotnost letounu	kg
m_v	Hmotnost vozíku	kg
F_1, F_2, F_3	Osová síla v oblasti 1, 2, 3	N
l_1, l_2, l_3	Délka oblasti 1, 2, 3	m
α	Úhel stoupání	°
h, H, p	Výška	m
v_{min}	Minimální vzletová rychlost	m/s
Z	ztráty	-
E_k	Kinetická energie	J
E_p	Potenciální energie	J
E_{kv1}	Energie vozíku na konci oblasti 1	J
E_{pv2}	Energie z pružiny	J
k	Tuhost pružiny	N/m
k_4	Tuhost 4 pružin	N/m
W_2	Práce v oblasti 2	J
J	Osový kvadratický moment	mm ⁴
q_0	Spojité zatížení	N/m
G_{1Y}	Tíha vozíku s letounem	N
G_{2Y}	Tíha vozíku	N
F_i	Osová síla	N
l_i	Obecná poloha vozíku	m

G_Y	Zatížení	N
R	Reakce R v podpoře A	N
S	Reakce S v podpoře A	N
T	Reakce T v podpoře B	N
M_o	Ohybový moment	N/m
M_o	Ohybový moment od vnějšího příčného zatížení	N/m
P_f	Posuvná síla od momentu	N
F_s	Tahová síla	N
h	Vzdálenost vláken	mm
T	Posuvná síla	N
N	Zatížení v ose nosníku	N
α	Substituce	-
dč	Průměr čepu - bloček	mm
lč	Délka čepu - bloček	mm
sč	Plocha čepu - bloček	mm ²
τ	Smykové napětí	MPa
τ^D	Maximální dovolené smykové napětí	MPa
p	Tlak na dotykových plochách	MPa
p^D	Maximální dovolený tlak na dotykových plochách	MPa
dč2	Průměr čepu 2	mm
bt	Rozměr třmenu	mm

gt	Rozměr třmenu	mm
St	Namáhaná plocha třmenu	mm ²
σ	Napětí v tahu	MPa
σ_D	Maximální dovolené napětí v tahu	MPa
dč1	Průměr čepu 1	mm
dč2	Průměr čepu 2	mm
bp	Rozměr páčky	mm
gp	Rozměr páčky	mm
lč1	Délka čepu 1	mm
Sp	Namáhaná plocha páčky	mm ²
dč4	Průměr čepu 4	mm
h	Šířka háku	mm

1 Úvod

Trendem v letectví v posledních letech je stavba bezpilotních letounů, tzv. UAV. Své místo si našly jak mezi amatérskými nadšenci pro letectví, tak v zemědělství, v průmyslu či v armádě. Stejně jako u civilních letounů, i u bezpilotního letounu je kritickým okamžikem start. Ten může být proveden různými způsoby, například pomocí podvozku s koly či ližinami, nebo díky startovací rampě, která na relativně krátké vzdálenosti dodá letounu potřebnou energii pro vzlet.

Startovací rampy bývají pro své rozměry tvořeny z více kusů, které před použitím musejí být smontovány k sobě a zajištěny spojovacím prvkem. Mezi nároky, které jsou na spoj kladeny, patří vysoká tuhost spoje, nízké ekonomické náklady a uživatelská přívětivost.

Bakalářská práce se bude zabývat kontrolou spojovacího elementu, který by mohl být použit na startovacím zařízení od společnosti Airtech. Nejprve bude provedena definice návrhových parametrů startovacího zařízení, dále rozbor zatížení, kdy budou získány potřebné silové účinky, které budou vstupovat do pevnostních výpočtů. Po definici návrhových parametrů a samotného návrhu spoje bude přistoupeno k pevnostní kontrole spojovacího elementu.

Výsledkem práce by mělo být zhodnocení navrhovaného spojovacího elementu z pevnostního hlediska.

2 Popis systému

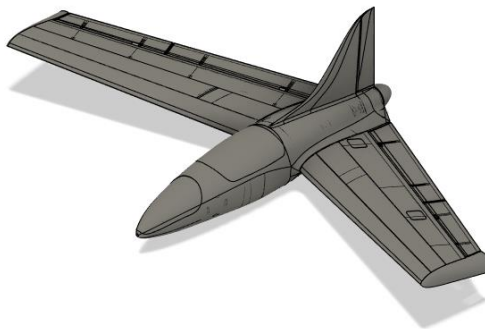
Na projektu AT 25 se pracuje od roku 2020. Produktem je bezpilotní letoun s veškerým příslušenstvím potřebným pro provoz. Vzhledem k aktuální situaci dochází k přestavění letounu na pozorovací stroj, využitelný pro vojenské účely.

Celý systém se skládá z:

- Letounu
- Startovacího zařízení
- Stožáru s anténou

2.1 Letoun

Letounem je bezpilotní letadlo o hmotnosti 24,3 kg, s rozpětím křídel 3 metry. Křídla mají tvar záporného šípku. Jedná se o pozorovací stroj, kdy k pozorování objektů je využita kamera umístěná ve trupu. Vzletová rychlost je 55 km/h, které musí letoun dosáhnout na dráze startovacího zařízení. Provozní rychlost se pohybuje kolem 105 km/h, dolet je 124 km a ve vzduchu vydrží kolem jedné hodiny. K přistání se využívá padák, díky kterému je zajištěno hladké dosednutí na zem a letadlo tak může být využíváno opakovaně.



Obrázek 1 AT25

2.2 Startovací zařízení

Startovací zařízení vzniklo za účelem automatizace a zjednodušení vzletu letadla. Cílem je předat letounu dostatečnou energii pro rychlý a bezpečný vzlet, přičemž proces startu by měl být jednoduchý na ovládání.

Startovací zařízení je tvořeno ze tří dutých nosníků obdélníkového tvaru, kdy se na jednom konci nachází ukotvení do země a na konci druhém jsou dvě opěrné

nohy, které určují úhel naklonění startovací rampy. Zařízení je dlouhé 5 metrů, během kterých musí letoun získat potřebnou rychlost pro vzlet.

Na nosníku je umístěn vozík, který na sobě nese letadlo. Z vozíku je přes kladku na konci nosníku vedeno lano, které je namotáváno pomocí elektromotoru zavěšeného pod prvním profilem startovacího zařízení. Elektromotor je ovládán regulátorem, který je spolu s baterkou napevno umístěn v boxu na začátku startovacího zařízení.

Po roztočení elektromotoru se vozík rozjíždí, na konci dráhy naráží do pružin umístěných na konci startovací rampy, čímž dochází k prudkému zastavení vozíku, a letoun díky působení setrvačných sil opouští startovací zařízení. Vozík je pružinami vrácen do původní polohy.



Obrázek 2 Startovací rampa pro AT25

2.3 Stožár s anténou

Další, neméně důležitou částí systému, je stožár nesoucí zařízení pro monitorování polohy letounu. Je vysoký 4 metry, ukotven pomocí tří lan. Na vrchu je umístěna otočná hlavice s anténou.



Obrázek 3 Stožár se zařízením pro sledování polohy letounu

3 Definice návrhových parametrů

Pro konstrukční řešení spoje startovacího zařízení bude potřeba znát návrhové parametry letounu a startovacího zařízení.

3.1 Letoun

3.1.1 Hmotnost

Letadlo bylo navrhováno tak, aby dle (EU) 2019/947 spadalo do „otevřené“ kategorie bezpilotních letounů do podkategorie A3. Letouny v této podkategorii musí mít maximální vzletovou hmotnost, včetně užitečného zatížení, nižší než 25 kg. Do maximální vzletové hmotnosti počítáme jak palivo, tak užitečné zatížení. [1]

Dron AT25 má maximální vzletovou hmotnost 24,3 kg, tím pádem splňuje hmotnostní požadavek daného nařízení.

3.1.2 Minimální rychlost

Minimální - pádová - rychlost je taková rychlost, kdy je letoun ještě schopen bezpečného letu. Pro vzlet musí být vztlaková síla větší, než je tíha letounu, a tím pádem dojde k odpoutání letadla od země. Porovnáním vztlakové síly a tíhy letounu dostáváme rovnici (1), ze které je možné zjistit minimální rychlost potřebnou pro vzlet.

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c_L \cdot S = m \cdot g, \quad (1)$$

kde

- v rychlost letu
- ρ hustota vzduchu v 0 m MSA (Mezinárodní standardní atmosféra)
- c_L součinitel vztlaku letounu
- S Plocha křídla
- m vzletová hmotnost letounu
- g gravitační zrychlení

Hodnoty vstupních veličin jsou v tabulce Tabulka 1:

Veličina	Hodnota
Hustota vzduchu v 0 m MSA	1,225 kg/m ³
Součinitel vztlaku letounu	0,88
Plocha křídla	1,92 m ²
Vzletová hmotnost	24,3 kg
Gravitační zrychlení	9,81 m/s ²

Tabulka 1 Vstupní hodnoty pro výpočet minimální vzletové rychlosti

Součinitel vztlaku c_L byl zadán zadavatelem, stejně tak plocha křídla letounu S .

Po upravení a dosazení vztahu (1) získáme pádovou rychlost:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g}{S \cdot \rho \cdot c_L}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 24,3 \cdot 9,81}{1,92 \cdot 1,225 \cdot 0,88}} = 15,18 \frac{m}{s} = 54,6 \frac{km}{h}. \quad (2)$$

Pro uvažované návrhové parametry byla minimální vzletová rychlost po zaokrouhlení stanovena na 55 km/h.

3.2 Startovací zařízení

3.2.1 Délka startovací dráhy

Délka vzletu je ovlivněná řadou parametrů, především výchylkou klapek, hmotností letounu, povětrnostními podmínkami, sklonem dráhy, teplotou vzduchu a nadmořskou výškou. [2]

Délka dráhy, na které musí letoun AT25 získat minimální rychlost, je 4,07 m. Sklon dráhy je 16°. Parametry dráhy jsou definovány zadavatelem.

3.2.2 Konstrukce startovacího zařízení

Konstrukce startovacího zařízení byla navrhována s ohledem na snadnou přepravu zařízení. Startovací zařízení se skládá z kufru pro uložení baterií a regulátoru, z uložení nohou a pružin v koncové části, z vozíku a ze tří nosníků ze studena válcované nerezové oceli AISI 316 (vlastnosti viz tabulka níže).

Značení	Rp _{0,2} [MPa]	Rm [MPa]	E [GPa]	Hustota [g/cm ³]
AISI 316 ČSN 17 346 X5CrNiMO17-12-2	240	530	200	8

Tabulka 2 Vlastnosti oceli AISI 316 [3]

Hmotnost vozíku, který je ze stejného materiálu jako nosník startovací rampy, je 2890 g.

3.2.3 Požadavek na montáž

Základním požadavkem je snadná sestavitelnost a rozebíratelnost. Zařízení by měla být schopna bez problémů sestavit jedna osoba, stejně tak i při rozebírání, a to v co nejkratším čase. Klíčový je spojovací prvek jednotlivých nosníků, jehož konstrukce a volba zásadně ovlivňuje dobu potřebnou pro montáž a demontáž zařízení. K sestavení by nemělo být potřeba velké množství nářadí a dílů volně se nacházejících mimo zařízení, čímž se sníží riziko případného zapomenutí dílu potřebného pro provoz celé sestavy. Minimální bezpečnost spoje je $k=2$.

3.2.4 Výroba

Nosníky startovací rampy jsou z nerezového plechu o tloušťce 2 mm. Jednotlivé pláty jsou tvářeny a následně svařeny na požadovaný tvar obdélníkového průřezu. Odlehčovací otvory a díry pro šrouby jsou vyrobeny pomocí technologie laserového řezání.

3.2.5 Navíjení lana

Vozík, nesoucí letoun, je tažen po startovací rampě lanem, které je namotáváno na naviják připevněný k elektromotoru. Lano putuje přes kladku na konci rampy ke zmíněnému navijáku.

Průměr dřívku navijáku je 16 mm. Po namotání lanka o průměru 5 mm je průměr zvětšen na 70 mm.

Kladka, přes kterou se na konci startovací rampy točí lano, má tvar kola a je vyrobená technologií 3D tisku z materiálu PLA, namotávané lanko je z PA.

Naviják je roztáčen pomocí elektromotoru Reg 40 s konstantním tahem a s výkonem 12 kW. Elektromotor je vypnut poté, co vozík projede kolem indukčního čidla umístěného na ocelovém profilu startovacího zařízení.

3.2.6 Brzdný systém

Po odstartování a vznesení letounu je vozík brzděn pomocí magnetů využívajících vlastností Halbachova pole a pomocí tlačných pružin.

Halbachovo magnetické pole je tvořeno speciálně uspořádanými permanentními magnety, které díky specifické orientaci pólů zvětšují velikost magnetického pole na jedné straně řady magnetů, a snižují ho na straně druhé. V případě startovacího zařízení využíváme tohoto principu k brzdění vozíku, kdy magnety jsou nesený vozíkem. Halbachovo pole se začíná tvořit v okamžiku, kdy vozík najede na hliníkové desky připevněné na nosníku startovacího zařízení. Od této chvíle je vozík brzděn. Velikost magnetického pole a jeho vlivu na brzdění závisí na mnoha parametrech, avšak pro zjednodušení budeme v této práci uvažovat konstantní zpomalování vozíku. [4]

Vozík je dobrzděn pomocí pružin připevněných ke koncové části startovacího zařízení. Celkově jsou použity čtyři, paralelně uspořádané pružiny o shodné délce $l = 305 \text{ mm}$ a tuhosti $k = 6,07 \text{ N/mm}$.

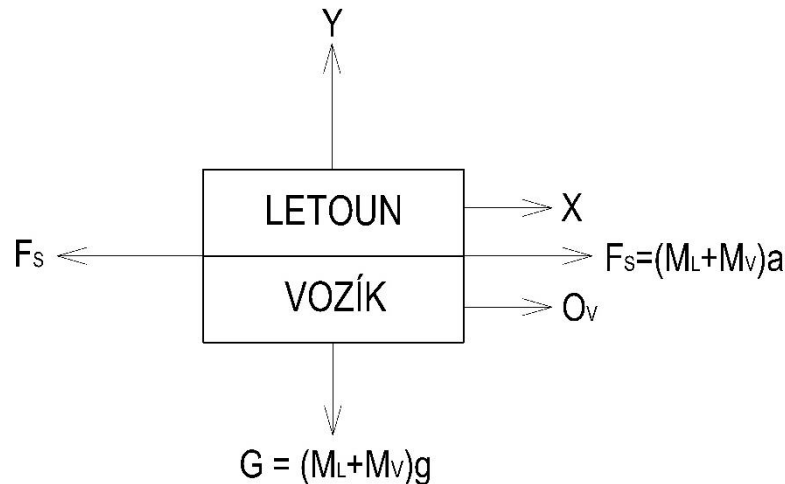
4 Rozbor zatížení startovacího zařízení

Pro další práci je třeba stanovit síly, které na soustavu letoun – vozík – startovací zařízení působí. Nejprve bude rozebrán vozík a letoun, následovat budou výpočty sil na startovacím zařízení, které budou vstupovat do dalších výpočtů.

Během pohybu vozíku a letounu po startovacím zařízení jsou tyto dva prvky spojeny k sobě, proto budou popisovány jako jeden celek. Schéma znázorňující zatížení silami je na Obrázek 4. Komplexní silový rozbor a stanovení pohybových rovnic vozíku a letounu přesahuje rozsah předkládané práce.

Pro výpočet zatížení startovacího zařízení byla zvolena energetická metoda, která nahradí uvažovanou soustavu vozík - letoun hmotným bodem o celkové hmotnosti rovnající se součtu hmotností vozíku a letounu. Dále se vychází z předpokladu, že veškerá energie pohonu bude použita pro urychlení „hmotného bodu“ a překonání pasivních odporů soustavy. Ztráta energie na překonání pasivních odporů byla odhadnuta na 15% celkové energie pohonu. Předpokládá se tedy, že 85% energie pohonu bude transformováno do potenciální a kinetické letounu a vozíku. Déle se předpokládá, že maximální celkové energie (potenciální a kinetické) bude dosaženo těsně před aktivací brzdného mechanismu startovacího zařízení. Na základě výše uvedených předpokladů bude start letounu rozdělen do fází:

- Urychlování soustavy letoun vozík na dráze 367 cm, na kterých musí letoun dosáhnout požadované startovací rychlosti. Po celou dobu se předpokládá konstantní síla pro akceleraci soustavy letoun - vozík. Na konci bude dosaženo maximální energie systému vozík – letoun.
- Brzdění samotného vozíku na dorazech, tzn. na dráze 59 cm. Zde se předpokládá utlumení pohybu vozíku o hmotnosti 2,89 kg z rychlosti 55 km/hod.



Obrázek 4 Schéma sil působících na vozík a letoun

Hmotnost letounu a vozíku je dána ze zadání, přičemž pro výpočet tíhy budeme uvažovat tíhové zrychlení $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Tíha je na Obrázek 4 označena G.

Odpor vozíku, O_v , zahrnuje jak aerodynamický odpor urychlovaného vozíku, tak i odpor koleček, které umožňují pohyb po dráze startovacího zařízení. Hodnota odporu vozíku bude zahrnuta do celkové ztráty systému.

Odpor letounu, X , působí, stejně jako odpor vozíku, proti směru pohybu. Aerodynamický odpor je závislý na rozměrech letounu, hustotě vzduchu, rychlosti a aerodynamických charakteristikách letounu. Ve zvolené metodě výpočtu zohledníme odpor přes ztrátovou energii, která byla odhadnuta na 15 % z celkové energie.

Vztlaková síla Y je závislá na ploše křídla, hustotě vzduchu, součiniteli vztlaku a rychlosti letounu. Vztlak roste s druhou mocninou rychlosti a v místě opuštění letounu by se měl rovnat tíze stroje. V rámci dimenzování musíme zajistit, že startovací zařízení bude schopno přenést zatížení i v případě, kdy letoun nebude mít dostatečnou rychlost pro to, aby došlo k vyrovnání tíhy a vztlaku. Proto nebudeme ve výpočtech vztlakovou sílu uvažovat a postavíme se na stranu bezpečnosti.

Setrvačné síly působí proti zrychlení. V našem případě uvažujeme zrychlení a konstantní, tedy i setrvačná síla má konstantní velikost. Do výpočtu bude zahrnuta jak hmotnost letounu M_L , tak hmotnost vozíku M_V .

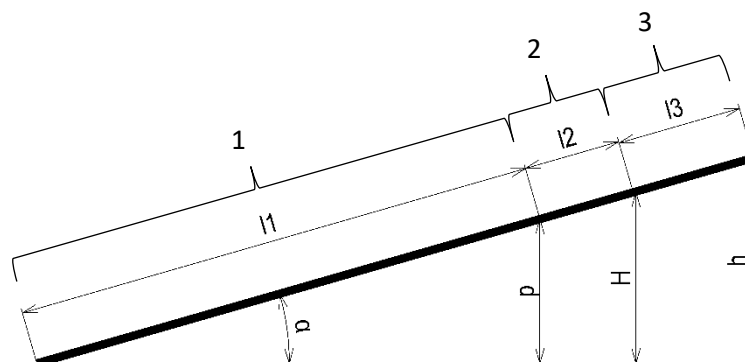
Motory letounu jsou spuštěny až po opuštění startovacího zařízení, motor dronu tedy nemá vliv na tah při startu. Tah je zprostředkován pomocí lanka, které se navíjí na naviják roztáčený elektromotorem.

V našem zjednodušeném modelu neuvažujeme vliv boční síly, která by mohla na letoun a startovací zařízení působit. Díky tomuto můžeme výpočty provádět v rovině a nikoliv v prostoru. Boční síly by mohly vznikat působením větru, případně jiných meteorologických jevů.

4.1 Osová síla

Pro pevnostní výpočty je nezbytné určit osovou sílu vznikající od lanka. Vypočítáme ji pomocí energetických rovnic.

Výpočet se rozpadne na tři případy dle toho, na kterém segmentu startovacího zařízení se letoun a vozík nacházejí. Na Obrázek 5 je schematicky znázorněn nosník startovacího zařízení s vyznačenými třemi oblastmi, ve kterých budeme počítat osovou sílu F . V Tabulka 3 jsou číselné hodnoty známých rozměrů vtažující se k obrázku a dále je uveden popis jednotlivých oblastí.



Obrázek 5 Schéma startovacího zařízení s vyznačenými oblastmi výpočtů

Označení rozměru v obrázku	Popis	Hodnota
l_1	Délka oblasti 1	3,665 m
l_2	Délka oblasti 2	0,497 m
l_3	Délka oblasti 3	0,095 m
α	Úhel stoupání	16°

Tabulka 3 Rozměry startovacího zařízení

Hodnoty p , H a h byly stanoveny z geometrie startovacího zařízení v rámci výpočtů.

Popis jednotlivých fází startu na startovacím zařízení:

- 1) Letoun nedosáhl potřebné rychlosti pro vzlet a pohybuje se se stejným zrychlením jako vozík. Na dráze l_1 první oblasti musí letoun zrychlit z nulové počáteční rychlosti na minimální vzletovou rychlost v_{MIN} a přitom překonat stoupání nakloněné roviny startovací rampy. Na konci oblasti dojde k naražení do mechanismu pružin a letoun opustí startovací zařízení.
- 2) Vozík se pohybuje po nosníku sám, bez přítomnosti letounu. Působením Halbachova magnetického pole dochází k brzdění vozíku. Letoun setrvačností opouští startovací vozík. Počáteční rychlost se rovná minimální vzletové rychlosti letounu. Koncová rychlost není známa, avšak lze ji zpětně získat ze stlačení pružin, ke kterému dochází v oblasti 3. Délka této oblasti je známá, začíná při najetí vozíku na hliníkové desky, ve kterých se indukují magnetické pole, a končí tam, kde dochází k prvnímu kontaktu vozíku s pružinou.
- 3) Vozík je brzděn pružinovým systémem tvořeným ze čtyř pružin daných parametry. Počáteční rychlost je rovna minimální vzletové rychlosti v_{MIN} a koncová rychlost je nulová. Dráha l_2 je známá. Vozík stoupá z důvodu naklonění startovací rampy.

V každé oblasti provedeme výpočet osových sil. Vzhledem k využití experimentálních metod při navrhování brzdícího systému zařízení, kdy volba brzdících prvků byla provedena na základě zkušeností konstruktérů, síly v oblasti tři budou vypočítány dříve než v oblasti dva.

Oblast jedna

Celková energie se musí rovnat vykonané práci. Víme, že v počátečním stavu před startem je rychlost vozíku i letounu nulová, vykonaná práce je také nula. Na konci oblasti je rychlost $v_{min} = 55 \text{ km/h} = 15,28 \text{ m/s}$. Délka této oblasti je $l_1 = 3,665 \text{ m}$, stoupání je $\alpha = 16^\circ$. Vozík s letounem vystoupají o výšku p , kterou vypočítáme z geometrie startovacího zařízení.

$$p = l_1 \cdot \sin(\alpha) = 3,665 \cdot \sin(16^\circ) = 1,01 \text{ m} \quad (3)$$

Hmotnost pohybujícího se tělesa je součet hmotnosti vozíku a letounu.

$$m = m_{\text{vozík}} + m_{\text{letoun}} = 2,890 + 24,3 = 27,19 \text{ kg} \quad (4)$$

Do výpočtu bude zahrnuta ztrátová energie vznikající v důsledku působícího odporu vzduchu a pasivních odporů koleček vozíku, která byla odhadnuta na 15 % koeficientem $Z = 1,15$, který představuje ztráty.

Celková rovnice pohybu bude následující:

$$(E_k + E_p) \cdot Z = F_1 \cdot l_1 \quad (5)$$

$$\left(\frac{1}{2}mv_{\min}^2 + mgh\right) \cdot Z = F_1 \cdot l_1 \quad (6)$$

Odtud vyjádříme sílu F_1

$$F_1 = \frac{\frac{1}{2}mv_{\min}^2 + mgp}{l_1} \cdot Z = \frac{\frac{1}{2} \cdot 27,19 \cdot 15,28^2 + 27,19 \cdot 9,81 \cdot 1,01}{3,665} \cdot 1,15 \quad (7)$$

$$= 1080,5 \text{ N}$$

Oblast tři

Koncová rychlost v_2 na oblasti tři je nulová = dochází k zastavení vozíku. Z videozáznamu bylo stanoveno stlačení pružin $x = 95 \text{ mm}$. Z katalogu výrobce pružiny byla definována tuhost pružiny $k = 6,07 \text{ N/mm}$. Dle zákona o zachování energie musí být energie na začátku stejná jako na konci. Tímto způsobem získáme rychlost vozíku v okamžiku prvního kontaktu s pružinami.

Mechanismus obsahuje celkem čtyři pružiny o stejné tuhosti k_4 . Celková tuhost je

$$k_4 = 4 \cdot k = 4 \cdot 6,07 = 24,28 \frac{\text{N}}{\text{mm}} = 24280 \text{ N/m} \quad (8)$$

Pro další výpočty bude uvažována maximální síla F_3 , kterou vypočítáme pomocí maximálního stlačení a celkové tuhosti pružin.

$$F_3 = k_4 \cdot x = 24,28 \cdot 95 = 2306,6 \text{ N} \quad (9)$$

Pro výpočty v oblasti dva bude nutné stanovit energii odebranou pružinami. Vychází se z předpokladu, že zbylá část energie vozíku se musí ubrzdit v oblasti dvě.

$$E_{pv2} = \frac{1}{2} k_4 x^2 = \frac{1}{2} \cdot 24280 \cdot 0,095^2 = 109,6 \text{ J} \quad (10)$$

Oblast dva

Dochází k brzdění pomocí působení magnetického pole. Počáteční rychlost vozíku je rovna minimální vzletové rychlosti v_{MIN} , a koncová rychlost v_1 . Délka dráhy je l_2 . Rozdíl energie na počátku a na konci sledované oblasti porovnáme s vykonanou prací. Uvažujeme pouze s hmotností vozíku, neboť letoun již opustil startovací zařízení.

Energie těsně před najetím do oblasti je dána minimální vzletovou rychlostí letounu a hmotností vozíku.

$$E_{kv1} = \frac{1}{2} m_v v_{min}^2 = \frac{1}{2} \cdot 2,89 \cdot 15,28^2 = 337,4 \text{ J} \quad (11)$$

Z rozdílu energie na začátku a na konci sledované oblasti, tj z energie E_{kv1} a E_{pv2} , získáme vykonanou práci. Z té již dopočítáme hledanou sílu.

$$W_2 = E_{kv1} - E_{pv2} = 334,7 - 109,6 = 225,1 \text{ J} \quad (12)$$

$$F_2 = \frac{W_2}{l_2} = \frac{225,1}{0,497} = 452,9 \text{ N} \quad (13)$$

Výsledné hodnoty pro přehlednost zapíšeme do tabulky:

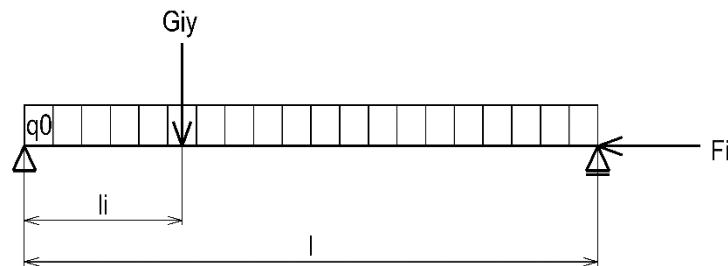
Oblast	Síla v krajních bodech	Délka oblasti	Výška
1	F1=1080,5 N	l1=3,665 m	p=1,01 m
2	F2=452,9 N	l2=0,497 m	H=1,147 m
3	F3=2306,6 N	l3=0,095 m	h=1,173 m

Tabulka 4 Výsledné hodnoty osových sil

4.2 Ohybový moment

Velikost ohybového momentu bude zásadní vstupní veličinou pro pevnostní kontrolu spoje jednotlivých částí nosníků startovacího zařízení.

Startovací zařízení bude nahrazeno zjednodušeným matematickým modelem, ve kterém budou zachované veškeré uvažované předpoklady. Schéma modelu v obecné poloze vozíku je na Obrázek 6.

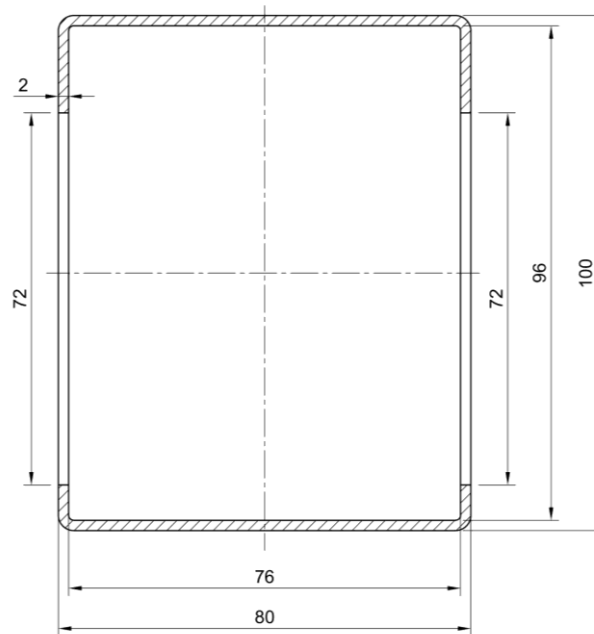


Obrázek 6 Zjednodušený model startovacího zařízení

Nosník je opatřen odlehčovacími otvory, viz Obrázek 7. Otvory budou ve výpočtech zohledněny v průřezových charakteristikách. Osový kvadratický moment J bude pomocí programu SolidWorks stanoven pro nejkritičtější případ, kdy je odlehčující otvor největších rozměrů, viz Obrázek 8. Uvedený předpoklad poskytne přesnější výsledek modelu, bez nutnosti detailního řešení deformací a zatížení skutečné konstrukce startovacího zařízení.



Obrázek 7 Otvory v nosníku startovacího zařízení



Obrázek 8 Řez nosníkem v místě, kde se nachází nejméně materiálu
Osový kvadratický moment:

$$J = 91076,1 \text{ mm}^4 \quad (14)$$

V modelu je zanedbán vliv hmotnosti přídatných těles, jako jsou brzdící prvky, motor s navijákem pro navíjení lana, ale i hmotnost spojovacích elementů. Hmotnost samotných nosníků startovacího zařízení zanedbána nebude.

Hmotnost nosníku startovacího zařízení je vyjádřena spojitým zatížením q_0 , které bylo vypočítáno pomocí známých rozměrů a materiálových vlastností nosníku. Rozměry nosníku jsou převzaty z Obrázek 8. Hmotnost nosníku je nižší o odlehčovací otvory ve startovacím zařízení.

$$q_0 = \frac{g \cdot (m_{sz} - m_{děr})}{l} = \frac{9,81 \cdot (25,9 - 7,4)}{4,5} = 39,6 \frac{N}{m} \quad (15)$$

- g gravitační zrychlení
- m_{sz} hmotnost startovacího zařízení bez otvorů
- $m_{děr}$ hmotnost materiálu, který by byl v otvorech nosníků
- l délka startovacího zařízení

Kromě spojitého zatížení je startovací zařízení zatíženo tíhovou silou vozíku a letounu. Vzhledem k náklonu startovacího zařízení o úhel $\alpha = 16^\circ$ bude tato síla

rozložena do dvou složek – do směru x a do svislého směru y . Složka ve směru x byla již uvažována při výpočtu osově síly, nebude přímo vstupovat do výpočtu ohybového momentu. Síla ve směru y , značená jako G_{1Y} , bude muset být uvažována. Velikost této síly nabývá dvou hodnot dle toho, zda došlo ke vzletu letounu či nikoliv. Tíha vozíku s letounem je ve výpočtech označována jako G_{1Y} , tíha samotného vozíku G_{2Y} .

$$\begin{aligned} G_{1Y} &= (m_{\text{vozíku}} + m_{\text{letounu}}) \cdot g \cdot \cos\alpha = (2,890 + 24,3) \cdot 9,81 \cdot \cos(16^\circ) \\ &= 256,4 \text{ N} \end{aligned} \quad (16)$$

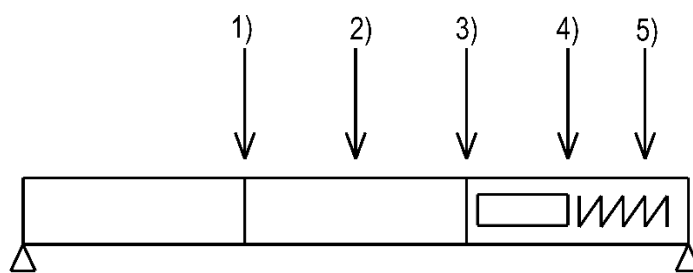
$$G_{2Y} = m_{\text{vozíku}} \cdot g \cdot \cos\alpha = 2,890 \cdot 9,81 \cdot \cos(16^\circ) = 27,25 \text{ N} \quad (17)$$

Osová síla F_i byla vypočítána v předešlých výpočtech v kapitole 4.1.

Na startovací rampě se nacházejí dva spoje. V místech těchto dvou spojů bude zjišťována velikost momentů.

Na jeden konec nosníku byla umístěna kloubová podpěra, na konec druhý podpěra posuvná. Tím byla dosažena statická určitost nosníku.

Výpočet bude proveden pro více případů, dle toho, v jaké části startovacího zařízení se zrovna nachází letoun a vozík. Uvažovanými případy jsou:



Obrázek 9 Poloha vozíku vůči startovacímu zařízení

- 1) Vozík s letounem se nachází na spoji 1, působí zde osová síla F_1 .
- 2) Vozík s letounem se nachází uprostřed startovacího zařízení. Osová síla je od síly F_1 . Ohybový moment v tomto místě dosahuje svého maxima.
- 3) Vozík s letounem se nachází na spoji 2, stále zde působí osová síla F_1 .
- 4) Vozík bez letounu je brzděn pomocí magnetů. Působí zde osová síla F_2 .
- 5) Vozík byl zabrzděn nárazem do pružin. Osová síla má velikost síly F_3 .

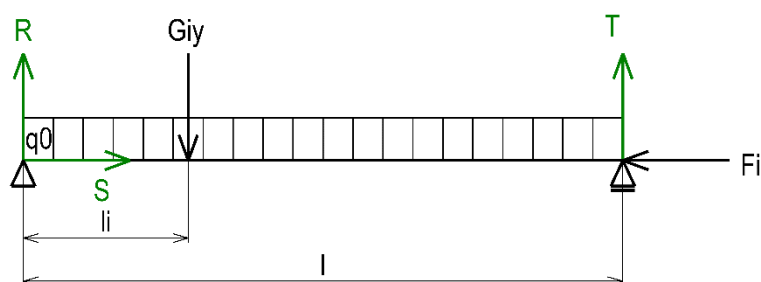
Stěžejními jsou případy 1) až 3). V případech 4) a 5) se neočekávají v místech spojů velké hodnoty ohybového momentu. Postup výpočtu ve všech pěti oblastech je stejný, dochází ke změně vstupních parametrů, ale stavba rovnic se nemění. Bude zde uveden postup výpočtu pro obecnou polohu vozíku v místě l_i , o zatížení G_Y a osově síle F . Dosazení bude provedeno pro případ 2), číselné hodnoty pro zbylé případy se vypočítají v Matlabu. Vstupní hodnoty pro výpočet jsou uvedeny v tabulce 5:

Název veličiny	Obecné označení ve výpočtu	Označení konkrétní hodnoty	Hodnota
Osová síla	F_i	F	2161 N
Poloha vozíku	l_i	$l/2$	2,3 m
zatížení	G_Y	G_{1Y}	256,4 N

Tabulka 5 Dosazované hodnoty

Uvolnění modelu startovacího zařízení

V podporách se zavedou reakce R , S a T . Dále na nosník působí osová síla F a síla G_{1Y} , která má své působíště ve vzdálenosti l_i od levé podpory. Celková délka zařízení je l . Nosič je staticky určitý, proto velikost reakcí bude vyjádřena přímo ze statických rovnic.



Obrázek 10 Uvolnění náhradního modelu startovacího zařízení

Osová síla F_i v případě, pro který jsou dosazovány hodnoty, se z geometrie rovná dvojnásobku vypočtené osově síly, která byla zjištěna v kapitole 4.1. Vypočtená síla F_1 je síla v laně, které táhne vozík. V ose nosníku je síla dvojnásobná.

$$S = F \quad (18)$$



$$R + T - G_{1Y} - q_0 \cdot l = 0 \quad (19)$$

$$T \cdot l - G_{1Y} \cdot l_i - q_0 \cdot \frac{l^2}{2} = 0 \quad (20)$$

$$S = 2 \cdot F_1 = 2161 \text{ N} \quad (21)$$

$$T = \frac{q_0 \cdot \frac{l^2}{2} + G_{1Y} \cdot l_i}{l} = \frac{39,6 \cdot \frac{4,6^2}{2} + 256,4 \cdot \frac{4,6}{2}}{4,6} = 219,2 \text{ N} \quad (22)$$

$$R = q_0 \cdot l + G_{1Y} - T = 39,6 \cdot 4,6 + 256,4 - 219,2 = 219,2 \text{ N} \quad (23)$$

- R reakce v podpoře A
S reakce v podpoře A, působící v ose nosníku
T reakce v podpoře B
F₁ osová síla v první oblasti
G_{1Y} svislá složka tíhy vozíku a letounu
q₀ spojité zatížení nosníku

Nosník bude kontrolován na kombinaci ohybu a tlaku, případně tahu. Základní diferenciální rovnice bude řešena v momentech.

Výsledný ohybový moment, vyjádřený rovnicí (24), je ovlivněn ohybovým momentem od osově síly F a momentem od vnějšího příčného zatížení.

$$Mo(x)^{II} + \alpha^2 Mo(x) = \mathfrak{M}_o(x)^{II} \quad (24)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{N}{E \cdot J}} \quad (25)$$

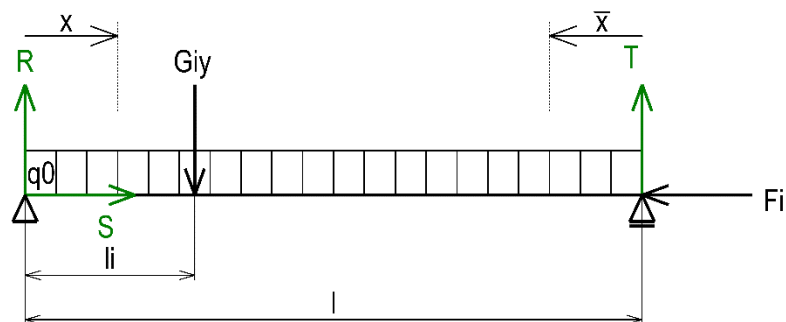
- Mo výsledný ohybový moment
 \mathfrak{M}_o moment od vnějšího příčného zatížení
N zatížení v ose nosníku
E Youngův modul pružnosti

J kvadratický moment průřezu. Uvažován minimální moment stanovený v kapitole 4.2

Moment od příčných sil se vyjádří zprava a zleva, následně dvakrát zderivuje a získá se:

$$M_0(x)'' = -q_0 \quad (26)$$

$$M_0(\bar{x})'' = -q_0 \quad (27)$$



Obrázek 11 Řezy pro výpočet momentu

Úpravou rovnice (24) a dosazením okrajových podmínek bude získána rovnice ohybových momentů zleva a zprava. Rovnice byla zpracována pomocí programu Matlab. Průběh ohybového momentu v obecné poloze je na Obrázek 12. Po dosazení hodnot pro konkrétní polohu vozíku jsou získány ohybové momenty působící v místech spojů. Výsledné hodnoty momentů pro jednotlivé případy jsou v Tabulka 6.

Případ	1	2	3	4	5
Moment na spoji 1	457,8 Nm	332,4 Nm	305,4 Nm	93,1 Nm	76,1 Nm
Moment na spoji 2	298,1 Nm	305,7 Nm	428,6 Nm	92,4 Nm	75,3 Nm

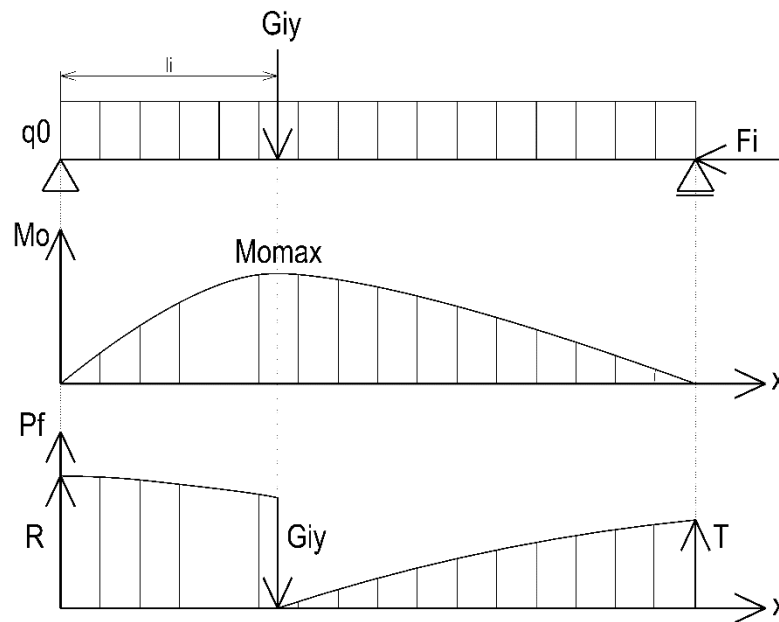
Tabulka 6 Výsledné hodnoty momentů pro jednotlivé případy

4.3 Posuvná síla

Ve spojích působí kromě osové síly a ohybového momentu také posuvná síla P_f . Pro její výpočet bude použita Schwedlerova věta. Derivací ohybového momentu se získá síla P_f .

$$P_f(x) = M_0(x)' \quad (28)$$

Po dosazení příslušných hodnot vyčíslíme velikost posuvné síly v kritických místech, kde se nacházejí spoje. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 7.



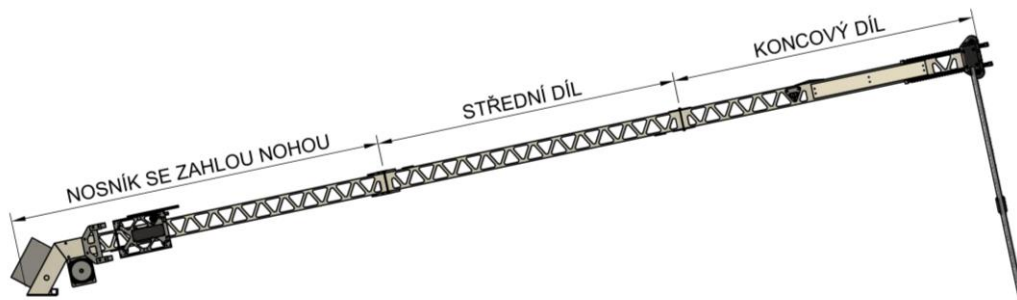
Obrázek 12 Průběh ohybového momentu a posuvné síly v obecné poloze vozíku l_i

Případ	1	2	3	4	5
Posuvná síla na spoji 1	230,6 N	158,7 N	143,2 N	29,6 N	23,1 N
Posuvná síla na spoji 2	166,2 N	171,2 N	251,5 N	58 N	53,4 N

Tabulka 7 Výsledné hodnoty posuvné síly pro jednotlivé případy

5 Definice kritických konstrukčních uzlů startovacího zařízení

Startovací zařízení je z důvodu vysoké hmotnosti a velkých rozměrů složeno ze tří samostatných částí - z nosníku se zahnutým koncem, který slouží k upevnění zařízení k zemi, ze středního dílu a z koncového dílu, který nese sestavu určenou pro brzdění a uložení podpěrných nohou. Rozdělení na jednotlivé části je znázorněné na obrázku 11.



Obrázek 13 Rozdělení na části startovacího zařízení

Před použitím je nutné zařízení složit a nosníky spojit pomocí spojovacího elementu. Spoje nosníků zařízení jsou kritickým konstrukčním uzlem, dochází zde k přerušení silových toků v nosníku a silové účinky musí být přeneseny pomocí spojovacího prvku. Zároveň spoj musí zajistit dostatečnou přesnost spojovaných dílů a tuhost konstrukce.

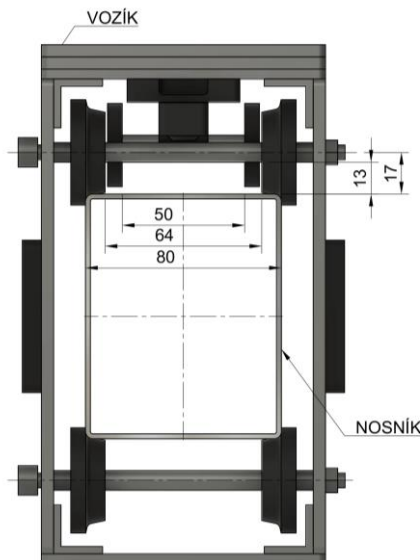
5.1 Definice požadavků na konstrukční uzly

5.1.1 Zástavbové požadavky

Rozměry spojovacího elementu jsou omezené ostatními prvky startovacího zařízení, zejména:

- šířkou nosníku startovací rampy – šířka nosníku je 80 mm
- rozchodem koleček vozíku – vnitřní stěny koleček jsou od sebe vzdáleny 64 mm
- rozchodem pomocných koleček od systému odpojování lana od vozíku – vnitřní stěny jsou vzdáleny 50 mm
- osou koleček vozíku – osa spojující kolečka se nachází 17 mm od povrchu nosníku. Průměr osy je 8 mm. Prostor mezi nosníkem a osou je tedy 13 mm.

V blízkém okolí spoje se na nosníku nenachází žádné konstrukční prvky, proto v podélném směru nosníku není rozměr spoje nijak zásadně omezen. Schéma znázorňující rozměrové omezení spojovacího prvku je na obrázku 14.



Obrázek 14 Čelní pohled na nosník a vozík s kritickými rozměry

Ve vrchní části nosníku je prostor spoje omezen konstrukcí startovacího vozíku. V případě potřeby je možné použít v horní a dolní části spoje s rozdílnými rozměry.

Nosník musí být po celé délce průchozí pro svazek kabelů. Minimální průměr svazku je 20 mm.

5.1.2 Pevnostní požadavky

Spoj musí být schopen přenést silové účinky vypočtené v kapitole 4 s bezpečností $k=2$ určenou zadavatelem. V součiniteli bezpečnosti je zohledněno i rázové zatížení, kterým se tato práce podrobně nezabývá. Pevnostní kontrola konstrukčních prvků bude provedena v další kapitole práce.

5.1.3 Finanční kritéria

Maximální cena za spoje nosníků by neměla překročit 1,5% z celkové ceny startovacího zařízení. Celková cena za startovací zařízení je 450 000 Kč, maximální cena obou spojů nacházejících se na zařízení je tedy 6750 Kč.

5.1.4 Dostupnost požadovaného spoje na trhu

V ideálním případě by měl být spojovací prvek volně dostupný na trhu. V opačném případě by musel být vyroben na zakázku.

Volně se prodávají nastavitelné stahovací spony. Příklady konstrukcí průmyslově prodávaných spon jsou na obrázcích 15, 16 a 17. Jejich cena se pohybuje v závislosti na konstrukci od 80 Kč po 400 Kč v ocelovém provedení, produkty z nerezové oceli jsou až dvakrát dražší, spony o mohutnější konstrukci se cenově pohybují výš. Spony o odpovídajících pevnostních požadavcích mají na výšku rozměr od 22 mm, dle 5.1.1 je maximální povolený rozměr 13 mm, jsou tedy nevyhovující. Rozměrově vyhovující spony mají maximální únosnost 2000 N, z pevnostního hlediska jsou také nevyhovující. [5] [6] [7]

Požadavek na spoj je natolik specifický, že se na trhu přímo nenachází produkt vhodný pro spojení dvou nosníků startovacího zařízení a je potřeba ho navrhnout a vyrobit.



Obrázek 15 Spona GN 852 [5]



Obrázek 16 Stahovací třmenová spona K0044 [6]



Obrázek 17 Spona s J-hákem [7]

5.1.1 Technologické požadavky

Spoj musí být výrobitelný technologiemi, kterými disponuje zadavatel bakalářské práce. Technologické vybavení firmy zahrnuje obráběcí stroje určené především pro obrábění hliníku a základní dílenské nářadí pro ruční opracování materiálu. Na základě zkušeností a kontaktů zadavatele jsou ve firmě využívány technologie frézování a elektrojiskrového řezání (drátování), případně laser.

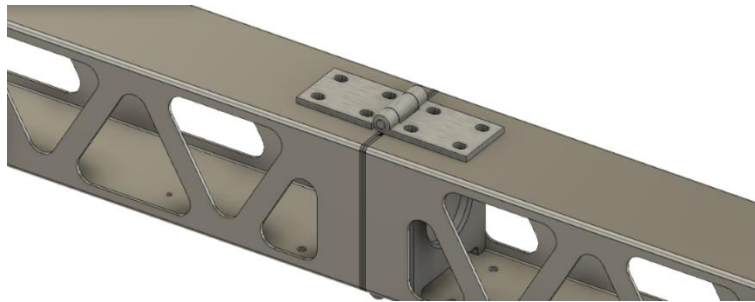
Pro výrobu dílů speciálního tvaru je možné použít plastový 3D tisk.

Pro výrobu spojů je vhodné použít volně dostupné oceli, na méně namáhané součásti hliníku. Vzhledem ke kusové výrobě spojovacích dílů startovacího zařízení by bylo vysoce neefektivní pořizování speciálních technologií. V případě potřeby jiných technologií je nutné součásti nechat zhotovit na zakázku.

Pro zjednodušení montáže a výroby by měly být dvojice spojovacích prvků mezi segmenty nosníku stejné.

5.2 Aktuální konstrukční řešení spoje

První zkoušky startovacího zařízení probíhaly se spojením nosníků fungujícím na principu pantu či závěsu, kdy spoj byl tvořen ze dvou nerezových desek s navařenou nerezovou trubkou, kterou se při skládání startovací rampy protáhl lícovaný šroub a došlo tak k zajištění pohybu nosníků. Závěs byl ze spodní a horní strany nosníku, uvnitř nosníku byl plastový bloček s čepy, které zajišťovaly pohyb čelních ploch vůči sobě.



Obrázek 18 CAD model spoje pomocí pantu

Výhoda tohoto spoje byla především v jeho malých rozměrech a jednoduchosti konstrukce. Z ekonomického i technologického hlediska se jednalo o nenáročný prvek.

Nevýhodou, která rozhodla o nahrazení spoje jiným konstrukčním konceptem, byla náročná smontovatelnost. Lícované šrouby šly obtížně zasunout do navařených trubek, často muselo být ke smontování použito kladivo a časem došlo k poničení nerezových dílů spoje. K montáži jednoho spoje bylo potřeba minimálně dvou lidí. Problém nastával i při demontáži, kdy lícovaný šroub nešel snadno vyjmout.

Řešení se neosvědčilo a je zapotřebí provést nový návrh konstrukčního řešení spoje.

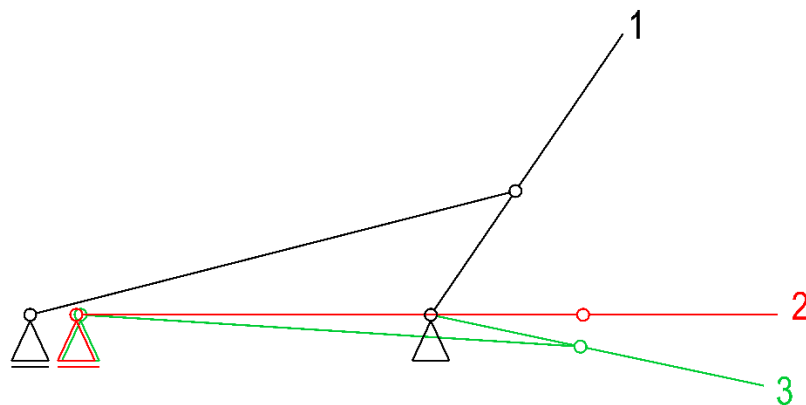
5.3 Návrh konstrukčního řešení spoje

Pro nový návrh spojovacího prvku byl zvolen koncept spony, a to především pro její snadné použití při montáži.

Návrh spojovacího elementu bude inspirován stahovacími sponami s překlápěcím mechanismem.

Překlápěcí mechanismus spony je vhodné využít v aplikacích, kde je potřeba opakovaně spojovat a rozpojovat dva nebo více dílů k sobě. Při správné aplikaci a konstrukci spony by po uzavření nemělo dojít k samovolnému otevření.

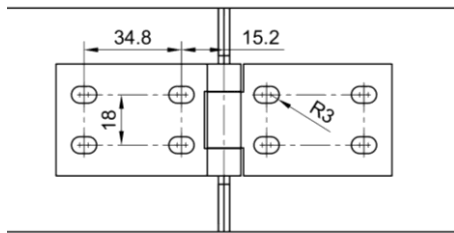
Spony se skládají ze systému páček a čepů. Spona po uzavření zůstává ve své poloze díky překonání mrtvého bodu při otáčení zavírací páčky do horizontální polohy. Při povolení spony je nutné vynaložit sílu pro překonání mrtvého bodu. Povolovací síla se v našem případě nastaví pomocí utahovacího šroubu, kterým se napne hák spony. Schématický náčrt mechanismu je na obrázku 18. Pro zajištění zavírací páčky v horizontální poloze je možné ji opatřit otvorem s nebo bez závitů, kterým se po sevření spony protáhne čep nebo šroub, a páčka se tak nebude moci uvolnit. [8]



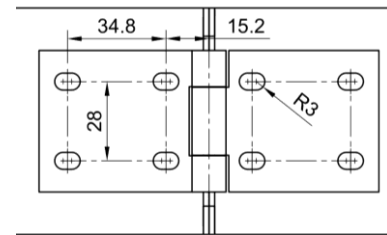
Obrázek 19 Mechanismus spony: 1 – páka je v obecné poloze, spona je otevřená; 2 – přechod přes mrtvý bod, tři čepy jsou v jedné rovině; 3 – spona je zavřená

Při návrhu spony bude kladen důraz na co největší rozměry dílů. Tím by mělo být dosaženo co největší pevnosti spoje při respektování možného prostoru pro spoj viz. kapitola požadavky na spoj. Maximální dovolené rozměry byly popsány na obrázku 14. Šířka spoje musí respektovat požadavek, aby v případě montážních nepřesností a vlivem provozních vibrací nedošlo ke kolizi dílů spony a projíždějícího vozíku.

Pro připevnění spon k nosníku je možné využít buď otvory používané při předchozím řešení spoje pomocí pantu, nebo je možnost vyrobit nové otvory pro šrouby. V původním řešení jsou použity díry pro šroub M6 s umístěním dle obrázků 20 a 21.



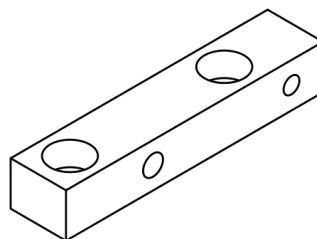
Obrázek 20 Rozměry děr pro šrouby v nosníku - horní strana



Obrázek 21 Rozměry děr pro šrouby v nosníku - dolní strana

5.3.1 Postranní bločky

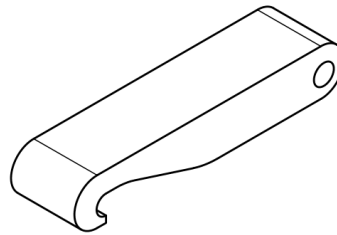
Spona musí být pomocí dvou čepů připevněna k startovacímu zařízení. K tomu poslouží dva boční díly. Boční díly budou připevněny k nosníku zařízení pomocí nově vyvrtaných děr a šroubů M5. Vzhledem ke snaze vytvořit sponu co největší nebylo možné využít již předvrtaných děr. Velikost hlavy šroubu je 8 mm, rozměr postranního bločku bude 12 mm. Tím je získán prostor, do kterého se navrhnu další díly spony. Délka bločků je volena v závislosti na uložení čepů, kterými je připevněna spona k nosníku. Bloček dále obsahuje průchozí díru se závitem M4.



Obrázek 22 Postranní bloček

5.3.2 Háček

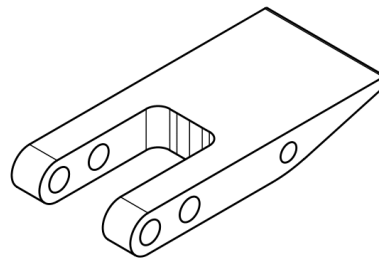
Nejvíce namáhaný bude samotný háček, jeho rozměry jsou voleny co největší. Zaháknut bude o čep s průměrem 4 mm. Pro minimalizování namáhání háku ohybovým momentem je snahou mít tuto osu co nejbližší k ose čepu, kterým je háček připevněn k další části spony a kolem kterého se háček otáčí. Posunutí os čepů do roviny rovnoběžné s povrchem nosníku je na úkor tloušťky stěny háku v kritickém místě, pro umístění os čepů je třeba zvolit kompromisní řešení a následně provést pevnostní kontrolu.



Obrázek 23 Hák

5.3.3 Zavírací páka

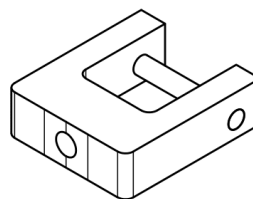
Návrh dílu je proveden v závislosti na poloze a rozměrech bločku a háku. Dílem jsou protaženy tři čepy o průměru 5 mm. Dva z čepů slouží k upevnění spony k nosníku, třetí čep spojuje díl s hákem. Páka je dále opatřena otvorem s průchozí dírou o průměru 4 mm pro zajištění proti otevření pomocí stavěcího šroubu. Konec dílu má zkosený tvar pro snadné otevírání a zavírání spony.



Obrázek 24 Zavírací páčka

5.3.4 Třmen

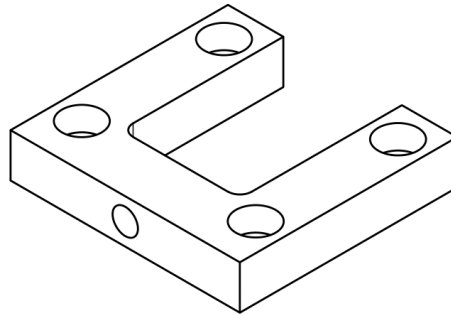
Třmen nese čep pro zaháknutí háku. Má závit M6, kdy pomocí šroubu se nastaví předpětí spony.



Obrázek 25 Třmen

5.3.5 Boční díl pro uchycení třmenu

Boční díl zamezí třmenu pohybu do stran a zároveň slouží jako opěrná plocha pro hlavu nastavovacího šroubu M6.

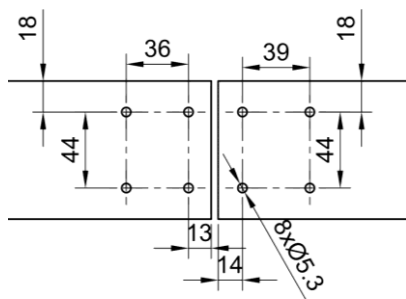


Obrázek 26 Boční díl

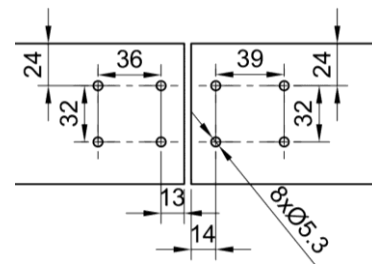
Všechny navržené díly respektují technologické možnosti zadavatele a není nutné zajišťovat jejich výrobu externě.

Pro příznivé materiálové vlastnosti a dobrou dostupnost byl zvolen materiál háku, třmenu a zavíracího kusu z nerezové oceli 17 240. Boční díly budou z hliníkové slitiny EN AW 6060.

Spona z horní a dolní strany startovacího zařízení nebude shodná, v dolní části je více prostoru, spoj je také více namáhaný. Bude provedena modifikace rozměrů pro spodní a horní sponu. Pro připevnění bločků k nosníku je třeba vyvrtat nové díry, stávající jsou nevhodně rozmístěné. Rozmístění nových děr je na obrázku 27 a 28.



Obrázek 27 Rozmístění děr pro přidělení dolní spony



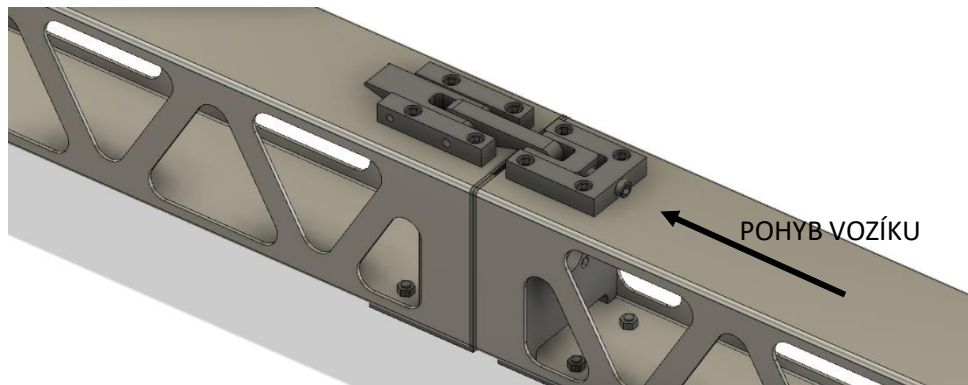
Obrázek 28 Rozmístění děr pro přidělení horní spony

Sestavný výkres je v příloze 1 a 2.

5.3.6 Bloček s čepy uvnitř nosníku

Uvnitř nosníku se nachází bloček s čepy. Bloček se osvědčil již při použití typu spoje pomocí pantu, není třeba ho měnit.

Spona bude vůči startovacímu zařízení orientována tak, aby v případě náhodného otevření spony během rozjezdu vozíku nedošlo k zastavení vozíku v důsledku kolize se zavírací částí spony.



Obrázek 29 Umístění spony vůči pohybu vozíku při rozjezdu

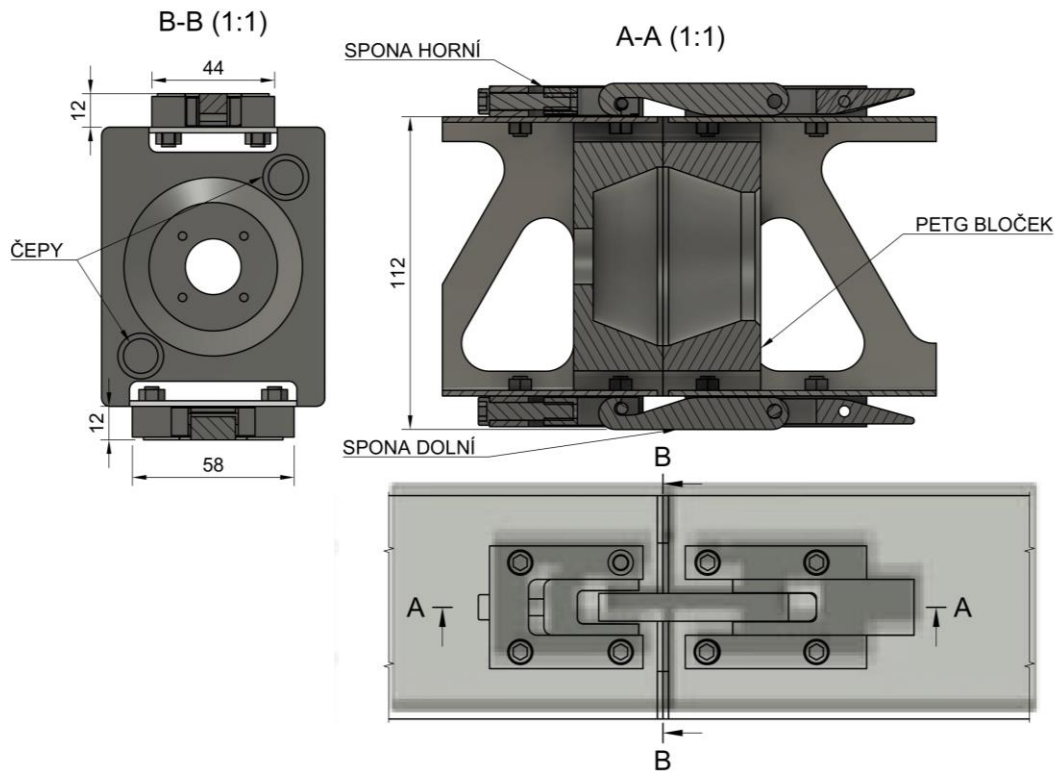
5.4 Rozbor konstrukčního řešení

Navrhovaný spojovací mechanismus se skládá ze tří částí, ze spony v horní oblasti nosníku, ze spony v dolní části a z bločku s čepu umístěného uvnitř nosníku. Sestavný výkres spon je v přílohách 1 a 2, rozložení dílů ku nosníku je na obrázku 30.

Samotná konstrukce spony se skládá z:

- Háku, který je pomocí čepu připevněn k zavíracímu kusu. Hák je kolem čepu otočný.
- Zavírací páka, kterou prochází z každé strany dva čepy – jeden je k přichycení háku, druhý k zajištění.
- Třmenu ve tvaru U s dírou se závitem a dírami pro čep, za který se zahákne hák.
- Bločků, které jsou pomocí šroubů M5x16 pevně přichyceny k nosníku a kterými prochází čepy od dílu určenému k zavírání spony
- Dílu, který slouží k opření hlavy nastavovacího šroubu.
- Nastavovací šroub M6x30, který je zašroubován do třmenu.

Střední díl s čepem, který se nachází uprostřed nosníku, je složen z plastového bločku s průchozí dírou pro elektroniku a v rozích se nacházejí otvory pro pouzdro pro čepy. V bločku jsou diagonálně umístěny dva čepy.



Obrázek 30 Řez spojem nosníku

Bližší geometrie jednotlivých dílů bude popsána v rámci pevnostní kontroly dílů.

Spona je na nosníku natrvalo připevněna pomocí šroubů, které procházejí krajními bločky. Při rozmontování startovacího zařízení zůstává třmen a díl nesoucí nastavovací šroub na jednom kusu nosníku, hák, zavírací díl a bločky jsou na kuse druhém. Vnitřní bloček je natrvalo umístěn uvnitř nosníku.

Při zavírání spony je překročen mrtvý bod a spona by se tak neměla otevřít působením vibrací. Pro zajištění před případným nechtěným otevřením spony je v zaklapávací části otvor pro případné zajištění pomocí čepu nebo stavěcího šroubu.

Zhodnocení konstrukčního řešení z hlediska výše stanovených kritérií bude provedeno v této kapitole.

Rozměr

Spona byla konstruována tak, aby rozměrově odpovídala požadavkům. Spona v horní části má šířku 44 mm a výšku 12 mm, dolní spona pak je o rozměrech 58x12 mm. Rozměry spojovacího prvku jsou vyhovující.

Pevnost

Zhodnocení pevnosti dílů bude věnována další kapitola práce.

Technologie

Vzhledem ke komplikovanému tvaru byla pro výrobu ocelových dílů zvolena technologie elektrojiskrového řezání. Hliníkové díly budou frézovány a plastový bloček uvnitř nosníku vyráběn pomocí 3D tisku z PETG.

Výroba ocelových dílů z nerezové oceli 17 240 byla zadána specializované firmě zaměřující se na obrábění. Hliníkové díly byly obráběny v dílnách zadavatele na frézce, plastové díly byly vyráběny na 3D tiskárně vlastněné zadavatelem.

Finanční kritéria

Spoj se skládá z vyráběných a kupovaných dílů. V případě ocelových dílů je cena za materiál obsažena v ceně za vyrobený kus, materiál je poskytován obráběcí firmou. Hliníkové díly jsou vyráběny v dílně zadavatele, materiál je poskytován zadavatelem. Cena použitého hliníku EN AW 6060 je 170 Kč/kg. Cena za materiál PETG je 599 Kč/kg, na výrobu bločku je potřeba 85 g materiálu.

Kalkulace výsledné ceny spojovacího systému je v tabulce 8. U vyráběných dílů není proveden podrobný rozbor ceny v závislosti na použitém materiálu, mzdy obráběče a provozních nákladů stroje. Tyto aspekty jsou zahrnuty v ceně za jeden kus. Pro snadnější kalkulaci jsme k ceně za jednu sponu přičetli i cenu za polovinu 3D tištěného bločku uvnitř nosníku.

Díl	Materiál	Cena za kus	Počet kusů na 1 spoj	Cena na jeden spoj
Hák	17 240	300 Kč	1	300 Kč
Zavírání	17 240	300 Kč	1	300 Kč
Třmen	17 240	300 Kč	1	300 Kč
Boční díl	EN AW 6060	70 Kč	2	140 Kč
Držák šroubu	EN AW 6060	120 Kč	1	120 Kč



Bloček	PETG	55 Kč	1	55 Kč
Kolík válcový kalený DIN 6325 4x20	-	2,5 Kč	1	2,5 Kč
Kolík válcový kalený DIN 6325 5x20	-	2,6 Kč	1	2,6 Kč
Kolík válcový kalený DIN 6325 5x16	-	1,6 Kč	2	3,2 Kč
Kolík válcový kalený DIN 6325 8x24	-	4,8 Kč	1	4,8 Kč
Pouzdro kluzné přírubové SKF PSMF 081212	-	61,1 Kč	1	61,1 Kč
Šroub s válcovou hlavou a vnitřním 6HR DIN 912 M6x30	-	3,3 Kč	1	3,3 Kč
Šroub s válcovou hlavou a vnitřním 6HR DIN 912 M5x16	-	1,6 Kč	8	12,8 Kč
Matice DIN 934 M5	-	1,1 Kč	8	8,8 Kč
Šroub stavěcí plochý DIN 913 M4x10	-	0,8 Kč	1	0,8 Kč
Celkem			30 dílů	1314,9 Kč

Tabulka 8 Kalkulace nákladů na jeden spojovací prvek [9]

Cena za všechny čtyři spony je 5296,6 Kč, udělený rozpočet nebyl překročen.

6 Pevnostní kontrola dílů konstrukce startovacího zařízení

V pevnostních výpočtech není uvažováno rázové zatížení konstrukce. Rázové zatížení bude zohledněno v součiniteli bezpečnosti $k=2$. Spoj musí přenést silové účinky působící na startovací zařízení, zejména osovou sílu, ohybový moment a posuvnou sílu, které byly vypočítány v předešlých kapitolách práce.

Posuvnou sílu přenášejí čepy v plastovém PETG bločku uvnitř nosníku, osová síla je přenášena opřením čelních dílů nosníku. Ohybový moment je přenášen díly spony.

Pro výpočty bude přepočítán ohybový moment na tahovou sílu F_s , která působí na díly spony. Referenční vzdálenost pro výpočet ohybového momentu je definována jako vzdálenost nejvzdálenějších vláken dílů spony a nosníku $h=112$ mm, jak je na obrázku 30.

$$F_s = \frac{M_o}{h} = \frac{457,8}{112 \cdot 10^{-3}} = 4087,9 \text{ N} \quad (29)$$

Výpočet následně bude proveden pouze pro extrémní hodnoty silových účinků vypočtených v kapitolách 4.2 a 4.3. V tabulce 9 jsou shrnuty maximální hodnoty silových účinků působících na spoj, se kterými se bude počítat při pevnostní kontrole.

Silový účinek	Značení ve výpočtech	Maximální hodnota
Posuvná síla	T	251,5 N
Síla z ohybového momentu	F_s	4087,9 N

Tabulka 9 Hodnoty silových účinků použitých při pevnostní kontrole

V pevnostních výpočtech budou zavedeny zjednodušené matematické modely, které nahradí řešení kontaktní úlohy nelineárního systému. V modelu bude zavedeno předpětí spony 1,5-krát větší, než je síla F_s . Sílou $1,5 \cdot F_s$ nahradíme předpětí, které v mechanismu vzniká při uzavírání spony.

Většina vyráběných dílů je z korozivzdorné oceli 17 240, s mezí pevnosti $R_m=500$ MPa [14]. S bezpečností $k=2$ je dovolené napětí:

$$\sigma_D = \frac{R_m}{k} = \frac{500}{2} = 250 \text{ MPa}$$

Čepy jsou z oceli 11 500, pro kterou jsou dány následující dovolené hodnoty napětí:

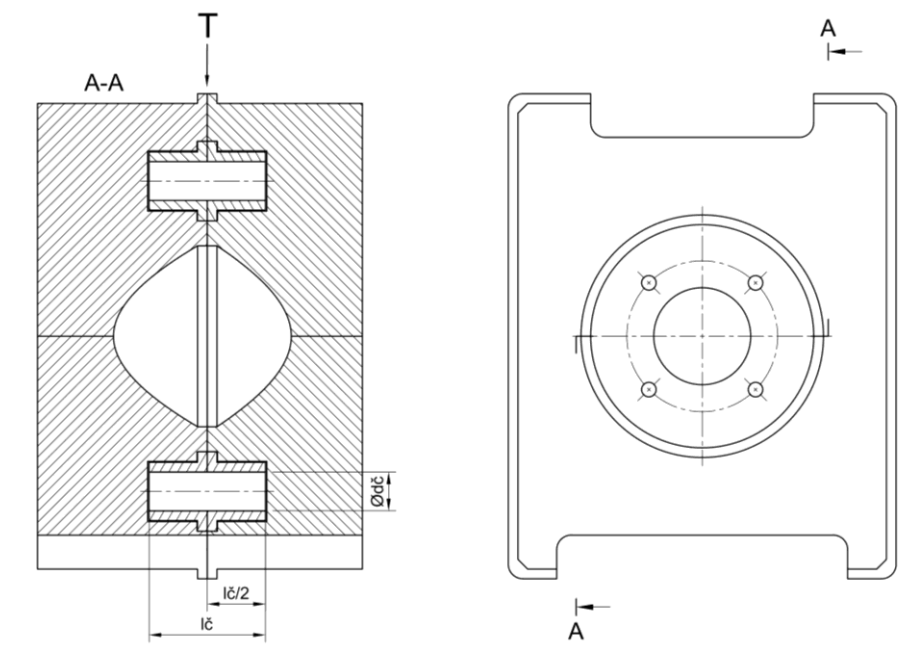
Dovolené napětí ve střihu	$\tau_D = 125 \text{ MPa}$
Dovolené napětí v ohybu	$\sigma_D = 175 \text{ MPa}$
Dovolený kontaktní tlak	$p_D = 40 \text{ MPa}$

Tabulka 10 Mechanické vlastnosti materiálu 11 500 [10]

6.1 Bloček uvnitř nosníku

Bločky jsou pomocí 3D tisku vyrobeny z materiálu PETG a jsou vlepny uvnitř spojovaných nosníků startovacího zařízení. Jejich primární funkcí je uložení čepů a pouzder pro čepy, které přenáší posouvající sílu a zamezují čelnímu pohybu nosníků vůči sobě. Bločky mají v prostředku díru pro průchod elektrických rozvodů.

Kritickým dílem v bločku jsou dva čepy $\text{Ø}8 \times 24$, které přenášejí posouvající sílu. Čepy budou kontrolovány na střih a otláčení.



Obrázek 31 Rozměry bločku uvnitř nosníku

Průměr čepu d_c	8 mm
-------------------	------

Délka čepu $l_{\check{c}}$	24 mm
----------------------------	-------

Tabulka 11 Rozměry bločku pro pevnostní výpočty

Střih

Plochu čepu vypočítáme následovně:

$$S_{\check{c}} = \pi \frac{d_{\check{c}}^2}{4} = \pi \frac{8^2}{4} = 50,3 \text{ mm}^2 \quad (30)$$

V konstrukci se nacházejí dva čepy, ve výpočtu budeme sílu dělit dvěma. Ve výpočtech počítáme s největší silou, která na spoj působí. Čep je z oceli 11 500, $\tau_D = 125 \text{ MPa}$

$$\tau = \frac{T}{S_{\check{c}}} \cdot \frac{1}{2} = \frac{251,5}{50,3} \cdot \frac{1}{2} = 2,5 \text{ MPa} \quad (31)$$

$$\tau \leq \tau_D \quad (32)$$

$$2,5 \text{ MPa} \leq 125 \text{ MPa} \quad (33)$$

- $S_{\check{c}}$ plocha čepu
- $d_{\check{c}}$ průměr čepu
- T posuvná síla
- τ smykové napětí
- τ_D dovolené smykové napětí

Otlačení

Vypočítaný tlak bude porovnán s maximálním dovoleným tlakem ve stykové ploše pro materiál 11 500 $p_D = 40 \text{ MPa}$.

$$p = \frac{T}{\frac{l_{\check{c}}}{2} \cdot d_{\check{c}}} \cdot \frac{1}{2} = \frac{251,5}{\frac{24}{2} \cdot 8} \cdot \frac{1}{2} = 1,3 \text{ MPa} \leq p_D \quad (34)$$

$$p \leq p_D \quad (35)$$

$$1,3 \text{ MPa} \leq 40 \text{ MPa} \quad (36)$$

p_d dovolený tlak ve stykové ploše

Díl vyhovuje pevnostním požadavkům. Navržené čepy jsou předimenzované.

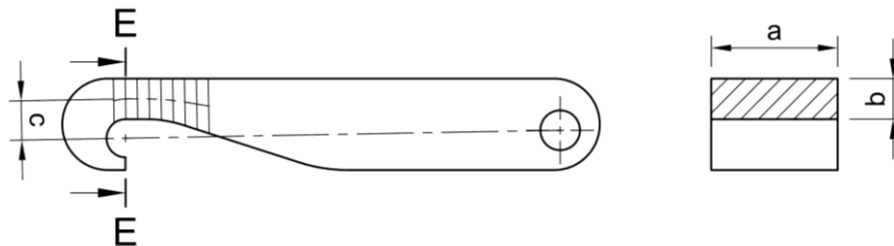
6.2 Hák

Hák je vyroben z nerezové oceli 17 240. Hák bude namáhaný na ohyb a tah.

Ohyb

Pro výpočet bude uvažován zjednodušený matematický model, kdy osová síla F_s bude přesunuta do nejvzdálenějšího těžiště průřezu od nositelky. Model bude následně doplněn o moment vzniklý posuvem síly. Nositelka síly leží na spojnici os čepů.

Nejvzdálenější těžiště průřezu bylo zjištěno na základě geometrických charakteristik ve vzdálenosti c od nositelky síly F_s . Ve výpočtech je uvažováno s hodnotou předpětí, které bylo stanoveno na 1,5-ti násobek síly F_s . Moment a osová napětí je následně:



Obrázek 32 Rozměrové charakteristiky háku

$$M_s = (1,5 \cdot F_s) \cdot c = (1,5 \cdot 4087,9) \cdot 4,937 = 30272,9 \text{ Nmm} \quad (37)$$

$$\sigma_o = \frac{M_s}{W_o} = \frac{30272,9}{\frac{1}{6} \cdot 16 \cdot 5,143^2} = 429,2 \text{ MPa} \quad (38)$$

M_s Moment namáhající krček háku

c Vzdálenost osy háku od nejvzdálenějšího těžiště průřezu

σ_o Ohybové napětí

W_o Průřezový modul v ohybu

Tah

Následuje výpočet napětí v tahu:

$$S_h = a \cdot b = 16 \cdot 5,1 = 81,6 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_t = \frac{1,5 \cdot F_s}{S_h} = \frac{1,5 \cdot 4087,9}{81,6} = 75,1 \text{ MPa} \quad (39)$$

S_h Obsah plochy řezu háku v místě působení posunuté síly F_s

F_s Síla od ohybového momentu nosníku

σ_t Napětí v tahu

Součtem výsledných napětí bude získáno napětí pro porovnání s dovolenou hodnotou napětí $\sigma_D = 250 \text{ MPa}$, viz úvod kapitoly 6.

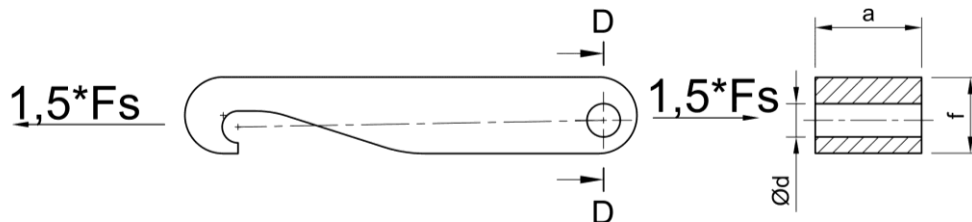
$$\sigma_o + \sigma_t = 429,2 + 75,1 = 504,3 \text{ MPa} \quad (40)$$

$$\sigma_o + \sigma_t > \sigma_D \quad (41)$$

Dle výpočtů namáhání v ohybu a tahu je díl nevyhovující.

Tah v okolí čepu

Hák je dále kontrolován v oblasti čepu o průměru 5 mm. Kontrola v místě dle obrázku 33 bude prováděna na tah a porovnávána s $\sigma_D = 250 \text{ MPa}$



Obrázek 33 Rozměrové charakteristiky háku

$$S = a \cdot f - d \cdot a = 16 \cdot 11,5 - 16 \cdot 5 = 104 \text{ mm}^2 \quad (42)$$

$$\sigma_t = \frac{1,5 \cdot F_s}{S} = \frac{1,5 \cdot 4087,9}{104} = 59 \text{ MPa} \quad (43)$$

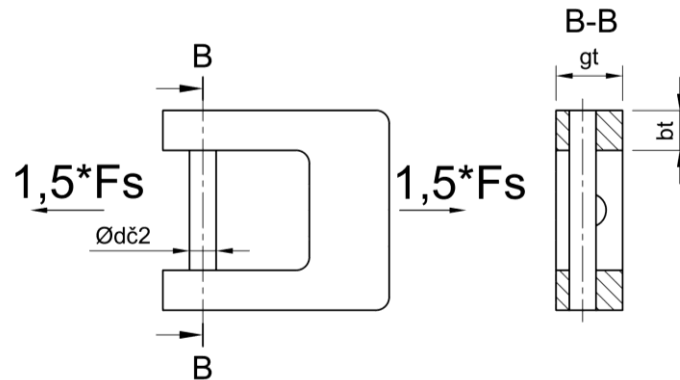
$$\sigma_t \leq \sigma_D \quad (44)$$

Dle kontroly je prostor v okolí čepu schopen přenést tah způsobený namáháním dílu.

Na základě pevnostní kontroly byl hák zhodnocen jako nevyhovující.

6.3 Třmen

Nákres třmenu se základními rozměry je na obrázku 34. Kontrola čepu bude provedena v samostatné kapitole, zde je zaměřeno na kontrolu díry pro čep. Kontrola je provedena na tah v místě nejmenšího průřezu dílem. Třmen je z nerezové oceli 17 240. Dovolené napětí je $\sigma_D = 250 \text{ MPa}$.



Obrázek 34 Rozměry třmenu

Průměr čepu $d_{\check{c}2}$	4 mm
Rozměr b_t	6 mm
Rozměr g_t	10 mm

Tabulka 12 Rozměry třmenu pro pevnostní výpočty

Tah

$$S_t = b_t \cdot g_t - b_t \cdot d_{\check{c}2} = 6 \cdot 10 - 6 \cdot 4 = 36 \text{ mm}^2 \quad (45)$$

$$\sigma_t = \frac{1,5 \cdot F_s}{2 \cdot S_t} = \frac{1,5 \cdot 4087,9}{2 \cdot 36} = 85,2 \text{ MPa} \quad (46)$$

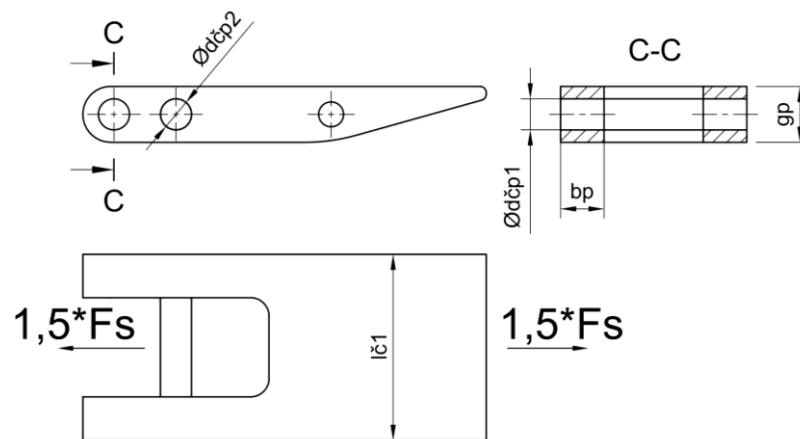
$$\sigma_t \leq \sigma_D$$

- F_s síla od ohybu nosníku
- S_t plocha materiálu v místě čepu
- b_t šířka namáhané části třmenu
- g_t výška třmenu
- $d_{\check{c}2}$ průměr čepu
- σ_t napětí v tahu

Třmen má odpovídající pevnost v oblasti kritického namáhání.

6.4 Zavírací páka

V páce se nachází tři čepy shodných průměrů, přičemž dva slouží k upevnění páky k nosníku startovacího zařízení, jeden k připojení háku. Díl nebyl vyhodnocen jako kritický.



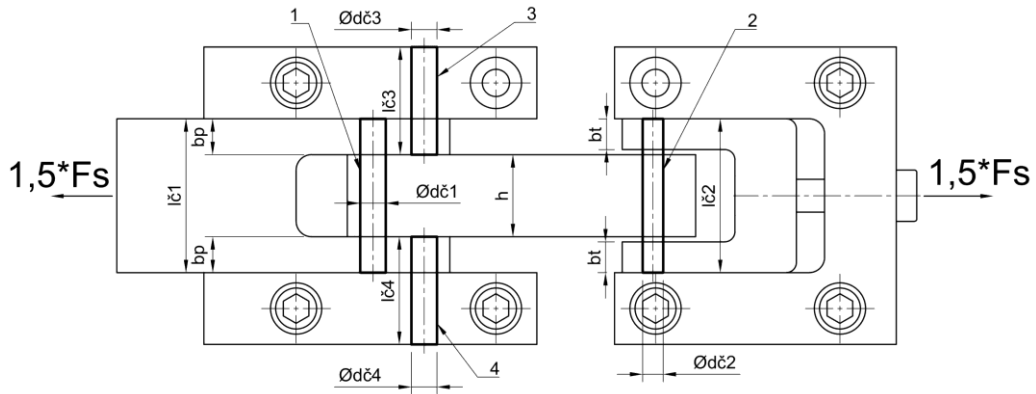
Obrázek 35 Rozměry zavírací páčky

Průměr čepu $d_{č1} = d_{č3}$	5 mm
Rozměr b_p	7 mm
Rozměr g_p	9 mm
Délka čepu $l_{č1}$	30 mm

Tabulka 13 Rozměry zavírací páčky pro pevnostní výpočty

6.5 Čepy

V sestavě se nachází celkem čtyři čepy, jak je zakresleno na obrázku 36. Čepy budou kontrolovány na stříh, otláčení.



Obrázek 36 Rozměry a poloha čepů

Průměr čepu $d_{\check{c}1} = d_{\check{c}3} = d_{\check{c}4}$	5 mm
Průměr čepu $d_{\check{c}2}$	4 mm
Délka čepu $l_{\check{c}1} = l_{\check{c}2}$	30 mm
Délka čepu $l_{\check{c}3} = l_{\check{c}4}$	20 mm
Rozměr b_p	7 mm
Rozměr b_t	6 mm
Šířka háku h	16 mm

Tabulka 14 Rozměry čepů pro pevnostní výpočty

6.5.1 Čep 1

Materiál čepu 1 je kalená ocel 11 500. Způsob namáhání čepu je vidět na obrázku 36. Čep bude počítán na smyk a otláčení.

Smyk

Dovolená hodnota ve smyku pro materiál 11 500 je $\tau_D = 125 \text{ MPa}$ [10]

$$S_{\check{c}} = \pi \frac{d_{\check{c}}^2}{4} = \pi \frac{5^2}{4} = 19,6 \text{ mm}^2 \quad (47)$$

$$\tau_s = \frac{1,5 \cdot F_s}{S_{\check{c}}} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1,5 \cdot 4087,9}{19,6} \cdot \frac{1}{2} = 156,4 \text{ MPa} \quad (48)$$

τ_D Dovolené napětí ve smyku

τ_s Napětí ve smyku

F_s Síla od ohybu nosníku

$S_{\check{c}}$ Plocha čepu

Hodnota dovoleného smykového napětí byla překročena, čep číslo 1 nevyhovuje pevnostním požadavkům.

Otlačení

Pro ocelové čepy z oceli 11 500 je $p_D = 100 \text{ MPa}$

$$p_1 = \frac{1,5 \cdot F_s}{2 \cdot d_{\check{c}1} \cdot b_p} = \frac{1,5 \cdot 4087,9}{2 \cdot 5 \cdot 7} = 87,6 \text{ MPa} \leq p_D \quad (49)$$

$$p_2 = \frac{1,5 \cdot F_s}{2 \cdot d_{\check{c}1} \cdot (l_{\check{c}1} - 2b)} = \frac{1,5 \cdot 4087,9}{2 \cdot 5 \cdot (30 - 2 \cdot 7)} = 38,3 \text{ MPa} \leq p_D \quad (50)$$

p_1 Tlak v kontaktní ploše v oblasti b_p

p_2 Tlak v kontaktní ploše v oblasti $l_{\check{c}1} - 2b$

F_s Síla od ohybu nosníku

Dle výpočtu na otlačení jsou čepy vyhovující.

6.5.2 Čep 2

Postup výpočtu čepu 2 je obdobný jako v případě čepu 1. Materiál čepu 2 je kalená ocel 11 500. Čep bude počítán na smyk a otlačení.

Smyk

Dovolená hodnota ve smyku pro materiál 11 500 je $\tau_D = 125 \text{ MPa}$.

$$S_{\check{c}2} = \pi \frac{d_{\check{c}2}^2}{4} = \pi \frac{4^2}{4} = 12,6 \text{ mm}^2 \quad (51)$$

$$\tau_s = \frac{1,5 \cdot F_s}{S_{\check{c}2}} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1,5 \cdot 4087,9}{12,6} \cdot \frac{1}{2} = 243,3 \text{ MPa} \quad (52)$$

τ_D Dovolené napětí ve smyku

τ_s Napětí ve smyku

F_s Síla od ohybu nosníku

$S_{\check{c}2}$ Plocha čepu

Hodnota dovoleného smykového napětí byla překročena, čep 2 nevyhovuje pevnostním požadavkům.

Otlačení

Pro ocelové čepy z oceli 11 500 je $p_D = 100 \text{ MPa}$

$$p_1 = \frac{1,5 \cdot F_s}{2 \cdot d_{\check{c}2} \cdot b_t} = \frac{1,5 \cdot 4087,9}{2 \cdot 4 \cdot 6} = 127,7 \text{ MPa} > p_D \quad (53)$$

$$p_2 = \frac{1,5 \cdot F_s}{2 \cdot d_{\check{c}2} \cdot h} = \frac{1,5 \cdot 4087,9}{2 \cdot 4 \cdot 16} = 47,9 \text{ MPa} \leq p_D \quad (54)$$

p_1 Tlak v kontaktní ploše v oblasti b_t

p_2 Tlak v kontaktní ploše v oblasti h

F_s Síla od ohybu nosníku

Dle výpočtu je čep nevyhovující.

6.5.3 Čepy 3 a 4

Čepy 3 a 4 jsou shodné, budou počítány na stříh a otlačení.

Smyk

Výpočet na smyk je podobný jako v předchozím případě. Dovolená hodnota ve smyku pro materiál 11 500 je $\tau_D = 125 \text{ MPa}$. [10]

$$S_{\check{c}3,4} = \pi \frac{d_{\check{c}}^2}{4} = \pi \frac{5^2}{4} = 19,6 \text{ mm}^2 \quad (55)$$

$$\tau = \frac{1,5 \cdot F_s}{S_{\check{c}3,4}} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1,5 \cdot 4087,9}{2 \cdot 19,6} = 156,4 \quad (56)$$

$$\tau > \tau_D \quad (57)$$

τ_D Dovolené napětí ve smyku

τ_s Napětí ve smyku

F_s Síla od ohybu nosníku

$S_{\check{c}3,4}$ Plocha čepu

Výsledek kontroly nebyl úspěšný, stanované maximální napětí bylo překročeno.

Otlačení

Pro ocelové čepy z oceli 11 500 je $p_D = 100 \text{ MPa}$. [10]

$$p_1 = \frac{1,5 \cdot F_s}{2 \cdot d_{\check{c}3,4} \cdot b} = \frac{1,5 \cdot 4087,9}{2 \cdot 5 \cdot 7} = 87,6 \text{ MPa} \leq p_D \quad (58)$$

$$p_2 = \frac{1,5 \cdot F_s}{2 \cdot d_{\check{c}3,4} \cdot (l_{\check{c}3,4} - b)} = \frac{1,5 \cdot 4087,9}{2 \cdot 5 \cdot (20 - 7)} = 47,2 \text{ MPa} \leq p_D \quad (59)$$

p_1 Tlak v kontaktní ploše v oblasti b

p_2 Tlak v kontaktní ploše v oblasti $l_{\check{c}3,4} - b$

F_s Síla od ohybu nosníku

Výsledek kontroly na otlačení byl úspěšný.

7 Závěr

Práce se zabývala pevnostní kontrolou spojovacích prvků startovacího zařízení.

Byly definovány návrhové parametry startovacího zařízení systému AT 25 a stanoveny silové účinky působící na zařízení, které definovaly statické zatížení spojovacích prvků. Po definici nároků a požadavků na spoj nosníků byla provedena analýza navrhovaného spoje.

Ve výpočtech byly použity zjednodušené matematické modely. např. u pevnostních výpočtů dílů spony byl zaveden zjednodušený model, který nahradil řešení kontaktní úlohy nelineárního singulárního systému. Zjednodušené modely umožnily provést pevnostní kontrolu spoje, při přiměřené náročnosti a požadované přesnosti výpočtu.

Konstrukční řešení spojovacího mechanismu odpovídá požadavkům z technologického, finančního a rozměrového hlediska. Z pevnostního pohledu je však mechanismus nevyhovující. Jako nevyhovující se ukázala většina dílů spojovacího mechanismu.

Primárně je doporučeno provést konstrukční úpravy dílů. V případě čepů by měly být použity čepy o větším průměru. U vyráběných dílů, vzhledem k omezenému zástavbovému prostoru, je obtížné provést úpravu rozměrů. Je doporučeno změnit navrhovaný materiál 17 240 za materiál s vyšší pevností nebo uvážit jeho náhradu za nekorozivzdornou ocel s povrchovou úpravou.

8 Použitá literatura

- [1] Prováděcí nařízení komise (EU) 2019/947. In: . 2019, 11.6.2019, L 152/45.
- [2] TICHAVSKÝ, Vladimír a Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Strojní FAKULTA. Základy letu. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004.
- [3] Italinox [online]. Praha, listopad 2022 [cit. 2022-11-22]. Dostupné z: <https://italinox.cz/plechy/>
- [4] JAE-SEOK CHOI a JEONGHOON YOO. Design of a Halbach Magnet Array Based on Optimization Techniques. IEEE Transactions on Magnetics [online]. 2008, **44**(10), 2361-2366 [cit. 2023-02-14]. ISSN 0018-9464. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.2008.2001482
- [5] Eles+Ganter. Eles+Ganter [online]. [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://www.elesa-ganter.com/en/www/our-wide-range-of-standard-parts-and-machine-elements/toggle-power-and-hook-clamps--1#>
- [6] Marek industrial a.s [online]. [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://www.marek.eu/panty-a-zamky/tazne-uzavery-spony-a-prezky/?recordStart=0>
- [7] Northwestern tools: Northwestern American Made Products for Work-Holding and FastenerApplications [online]. [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://www.northwesternertools.com/-c-349.html?osCsid=cc3ca496aa7d4c9ce64522a9472ecbf1>.
- [8] Goebel: A Guide to Over Center Toggle Latches [online]. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.goebelfasteners.com/a-guide-to-over-center-toggle-latches/>
- [9] Prumex. Prumex [online]. Hrušovany nad Jev., 2023 [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: <https://www.prumex.cz/>



- [10] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření. Šesté vydání. Úvaly: Albra, 2017. ISBN 978-80-7361-111-8.
- [11] JAŇOUR, Zbyněk, Josef PODZIMEK a Vincenc HACURA. Základy aerodynamiky a mechaniky letu. Sv. 37. Praha: Naše vojsko, 1953. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/mqg4jm2c>
- [12] LNĚNIČKA, Jaroslav. Létání: Flying. Hradec Králové: Aeromodel, 1995. ISBN 80-238-0535-5.
- [13] J MICHALEC, Jiří a České vysoké učení technické v Praze. Strojní FAKULTA. Pružnost a pevnost II. Praha: ČVUT, 1994. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/vBmcMzcb>
- [14] ČSN 41 7240: Ocel 17 240 Cr-Ni. Neznámé. 12/1972n. I