



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav letadlové techniky

Zavádění náhradního zatížení do konstrukce

Application of load to the structure

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2024

Jan Málek

Studijní program: B2342 Teoretický základ strojního inženýrství

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Vedoucí práce: Ing. Karel Barák

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Málek** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **509179**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Zavádění náhradního zatížení do konstrukce

Název bakalářské práce anglicky:

Application of load to the structure

Pokyny pro vypracování:

Zavádění zatížení konstrukce křídla při statických pevnostních zkouškách s respektováním i rozložení zatížení po hloubce křídla.

- Rešerše současného stavu
- Návrh metodiky zavádění náhradního zatížení do konstrukce
- Konstrukční návrh
- Experimentální ověření navrženého řešení

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Karel Barák ústav letadlové techniky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **26.04.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Karel Barák
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

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

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Karlu Barákovi za rady a pomoc při experimentálních zkouškách. Dále bych chtěl poděkovat Bc. Ondřeji Plajdičkovi za výrobu zkušebního přípravku a také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu při studiu.

Anotační list

Autor:	Jan Málek	
Název BP:	Zavádění náhradního zatížení do konstrukce	
Název anglicky:	Application of load to the structure	
Rok vyhotovení:	2024	
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství	
Obor studia:	2301R000 Studijní program je bezoborový	
Ústav:	Ústav letadlové techniky	
Vedoucí BP:	Ing. Karel Barák	
Bibliografické údaje:	počet stran	58
	počet obrázků	55
	počet grafů	9
	počet tabulek	11
	počet příloh	6
Klíčová slova:	zatěžování křídla, tkaninový závěs, lepení, experiment	
Keywords:	wing loading, fabric hinge, bonding, experiment	

Abstrakt:

V této bakalářské práci je popsán návrh tkaninového závěsu vhodného k zavádění zatížení do konstrukce křídla během pevnostní zkoušky. Nejdříve je provedena rešerše používaných metod zatěžování křídel, následuje rešerše materiálů a lepidel vhodných pro tkaninový závěs. Další částí je návrh tří variant závěsu, jejich pevnostní analýza a experimentální ověření únosnosti. Také je navržen a pevnostně zkontrolován přípravek pro provedení experimentu.

Abstract:

This bachelor thesis is about design of a fabric hinge for applying load to the structure during static wing test. Firstly, is done research of used methods of loading wings, then of materials and adhesives suitable for the fabric hinge. Then are designed three versions of the hinge, done their strength analysis and experimentally verified their final strength. There is also designed and analysed apparatus for the experiment.

Obsah

1	Úvod	9
2	Metody statických zkoušek křídla	10
2.1	Metoda pytlů.....	10
2.2	Hydraulické válce	10
2.3	Vahadlový systém – Whiffletree	11
2.3.1	Kleštiny.....	12
2.3.2	Lepení kovových destiček	13
2.3.3	Lepení tkaninových závěsů	13
3	Zatížení působící na křídlo	15
4	Lepení.....	16
4.1	Teorie adheze.....	16
4.1.1	Teorie mechanické adheze.....	16
4.1.2	Elektrostatická teorie	16
4.1.3	Difuzní teorie	16
4.1.4	Teorie adsorpce.....	17
4.1.5	Chemické vazby	17
4.1.6	Fyzikální vazby	18
4.2	Rozdělení druhů lepidel podle způsobu tuhnutí	18
4.2.1	Lepidla tuhnoucí vlivem vsáknutí a odtěkání rozpouštědel.....	18
4.2.2	Reaktivní lepidla	18
4.2.3	Lepidla termoplastická.....	18
4.2.4	Lepidla stále lepivá	18
4.3	Lepidla vhodná pro lepení tkaninového závěsu	18
4.3.1	Epoxidová lepidla	19
4.3.2	Disperzní lepidla	19
4.3.3	Kyanakrylátová lepidla – vteřinová lepidla	19
4.3.4	Lepidla na bázi chloroprenového kaučuku	19
4.4	Úprava povrchu před lepením	19
5	Materiály závěsu.....	20
5.1	Okó.....	20
5.1.1	Polyester (PES).....	20
5.1.2	Nylon	20
5.1.3	Polyolefiny	20
5.2	Základna	21

5.2.1	Bavlna	21
5.2.2	Len	21
5.3	Vazby tkanin	21
5.3.1	Plátňová vazba	21
5.3.2	Keprová vazba.....	22
5.3.3	Atlasová vazba	22
5.4	Textilní popruh.....	23
6	Návrh závěsu.....	24
6.1	Volba materiálu	24
6.2	Varianta I	25
6.3	Varianta II	26
6.4	Varianta III	27
6.5	Pevnostní kontrola.....	28
6.5.1	Pevnost švů.....	28
6.5.2	Pevnost Varianty I.....	29
6.5.3	Pevnost varianty II	31
6.5.4	Pevnost varianty III	34
6.5.5	Trubka	36
7	Návrh zkušebního přípravku	42
7.1	Výběr materiálů	42
7.2	Zatížení přípravku	43
7.2.1	Těžiště modelového nosníku	44
7.2.2	Průběh posouvající síly a ohybového momentu	45
7.3	Pevnostní kontrola.....	46
7.3.1	Ohyb přípravku.....	46
7.3.2	Svar plech – šestihran	48
8	Experimentální ověření únosnosti závěsu	50
8.1	Lepení závěsů.....	50
8.2	Urychlení schnutí lepidla	50
8.3	Varianta I	52
8.4	Varianta II	54
8.5	Varianta III	56
8.6	Zkouška lepidla na kompozitních vzorcích	59
8.7	Zhodnocení experimentu.....	60
9	Návrh úprav	61

9.1	Volba pevnějších materiálů	61
9.2	Zvětšení závěsu	61
9.3	Použití více závěsů v jedné lokalitě.....	61
9.3.1	Pevnostní kontrola nosníku	62
10	Závěr	66
11	Seznam použité literatury	67

1 Úvod

Během návrhu letounu je nutné správné vyhodnocení celkového zatížení působící na konstrukci. Narušení její integrity by mohlo mít závažný vliv na bezpečnost posádky nebo pozemního obyvatelstva. Je nutné ověřit, zda letoun dokáže snést zatížení, na které byl navržen a zda tato zatížení neovlivní další provoz letounu.

Na ústavu letadlové techniky fakulty strojní ČVUT se provádí pevnostní zkoušky ultralehkých letadel nebo jiných menších letounů. Jednou z částí konstrukce UL letounů, u které se provádí pevnostní kontrola, jsou křídla. Křídla jsou hlavním zdrojem vztlaku, díky kterému se letadlo pohybuje ve vzduchu a jejich poškození by vedlo k fatálním nehodám. Během jejich zkoušení se musí ověřit únosnost pro všechny kritické případy zatížení. Zavádění náhradního zatížení je potřebné provádět co nejpodobněji se zatížením, které by vzniklo během provozu. K tomu musí být pevnostní zkoušky vhodně navrženy.

Cílem této práce je navrhnout přípravek, kterým by se zavádělo zatížení do konstrukce křídla během pevnostní zkoušky tak, aby bylo respektováno rozložení zatížení po hloubce křídla a bylo co nejpodobněji nasimulováno zatížení působící během letu.

2 Metody statických zkoušek křídla

2.1 Metoda pytlů

Pytlivá metoda je jednou z nejjednodušších metod zatěžování křídla. Křídlo se zavěsí tak, aby horní podtlaková strana křídla směřovala dolů a na přetlakovou část se postupně naskládají pytle se sypkým materiálem, např. pískem, s přesně danou hmotností. Jednotlivé pytle se umísťují tak, aby co nejpřesněji napodobovaly průběh zatížení na křídle. [1] [2]

Nevýhodou této metody je, že během postupného deformování křídla může dojít k pohybu jednotlivých pytlů, čímž dojde k nepřesnému rozložení zatížení. Také se může stát, že pytle začnou z křídla padat. Jelikož je křídlo uchyceno obráceně, tak se také musí počítat s tím, že k tíže závaží působí i vlastní tíha křídla. Pokud by došlo k poruše křídla během testu, může být velké množství závaží nebezpečné pro osoby pohybující se v okolí.

Touto metodou lze jako jednou z mála dosáhnout souvislého rozložení zatížení po celém křídle. Také není potřebné speciální zařízení pro provedení zkoušky, jen je třeba křídlo uchytit. Pytlivá metoda je vhodná pro orientační ověření výpočtových deformací.



Obrázek 1 Pytlivá metoda [3]

2.2 Hydraulické válce

Dalším způsobem zatěžování křídla je použití hydraulických válců připevněných ke křídle. Při této metodě se na spodní část křídla přilepí úchyt, ke kterému se připevní hydraulický válec. Těchto úchytů se přilepí několik. S větším množstvím úchytů lze dosáhnout přesnějšího rozložení zatížení, které se bude podobat zatížení dosahovanému za letu. Následně se válce začnou zvedat a deformovat křídlo.

Důležité je, aby úchyt bezpečně přenášel zatížení z válce do křídla. Proto se musí zvolit vhodné materiály, které jsou schopné snést dané zatížení. Tím, že se křídlo během testu deformuje, je potřebné, aby byl materiál elastický a deformoval se s křídlem. Vhodným materiálem je pryžová deska, která je dostatečně pružná a pevná. Na desku je z jedné strany přilepený kovový plech, který slouží k přenosu zatížení mezi hydraulickým válcem a pryžovou deskou. Vhodný materiál pro plech je hliník,

díky své nízké hmotnosti zjednodušuje následnou manipulaci. K jednomu válci lze pomocí kovových ramen připevnit více desek. [4]

Válec by měl být připevněn kloubově, aby se deska mohla při průhybech křídla naklápět a nebyla zbytečně zatěžována navíc. Pro připevnění desky ke křídlu je potřebné zvolit vhodné lepidlo. Musí tvořit pevnou vazbu se spojovanými materiály a také musí být schopno přenést všechno zatížení. Lepené plochy je nezbytné očistit a odmastit, aby vznikla co nejpevnější vazba mezi lepidlem a povrchem. [4]

Touto metodou zatěžování lze dosáhnout přesného rozložení zatížení po celém křídle. Je vhodná pro křídla složitějších tvarů, například delta křídla. Nevýhodou je náročnost provedení a potřeba mnoha hydraulických válců, aby bylo možné dosáhnout přených výsledků.

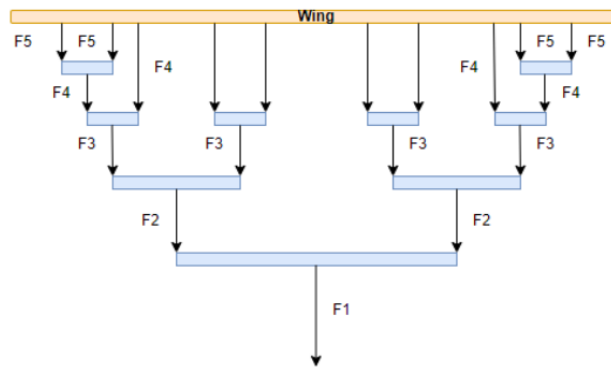


Obrázek 2 Hydraulické válce zatěžující křídlo [5]

2.3 Vahadlový systém – Whiffletree

U této metody se využívá jednoduchých principů mechanických pák pro rozložení sil. Jedná se o jednu z nepoužívanějších metod zatěžování křídla.

Ke křídlu se připevní úchyty, které se připojí pomocí lan nebo táhel k jednomu okraji nosníku, ke druhému okraji je připojený další úchyt na křídle. Mezi úchyty je v určité vzdálenosti připojen další nosník, který může být připojen k další vrstvě nosníku nebo na zdroj zatěžující síly. Pomocí vzdálenosti připojení jednotlivých přichycení v nosníku je možné rozložit zatěžující sílu na potřebné velikosti působící v jednotlivých úchytech v křídle. Čím více nosníků je použito, tím přesnějšího rozložení lze dosáhnout. Nosníky ve vyšších vrstvách mohou být zatíženy například pomocí hydraulického válce, nebo kladkového systému se závažím. [6] [2]

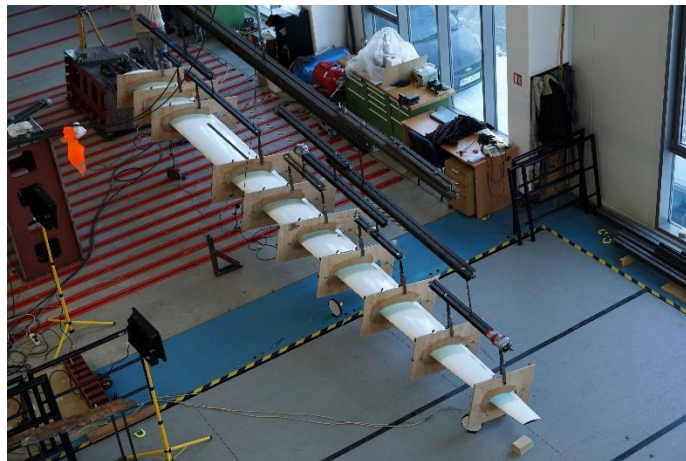


Obrázek 3 Rozložení sil ve whiffletree [2]

Pro zavedení zatížení do konstrukce se musí vhodně zvolit přichycení systému ke křídlu. Je požadováno, aby uchycení nebylo během testu porušeno a aby co nejlépe napodobovalo zatížení působící během letu. K tomu je využíváno několik metod.

2.3.1 Kleštiny

Kleština se většinou skládá ze dvou částí, které se připevní z horní a spodní strany křídla a obklopí celý profil. Je důležité, aby jednotlivé kleštiny byly vhodně rozmístěny po celém křídle, aby ho při zatěžování nepoškodily. Měly by se umísťovat do tužších částí konstrukce například k žebro, aby křídlo nepromáčkl. Materiál kleštin se odvíjí od materiálu a velikosti zatěžovaného křídla. Pro kovové křídlo, které má mnoho žeber a dalších výztuh, bývá kleština vyrobená ze dřeva nebo kovu a je přichycena přímo na křídlo. U kompozitních křidel je nutné být opatrnější, protože nemívají tolik výztuh jako kovové a mohlo by jednodušeji dojít k jejich poškození. Mezi kompozitní křídlo a kleštinu může být umístěna vrstva pěny nebo gumové podložky. [2]

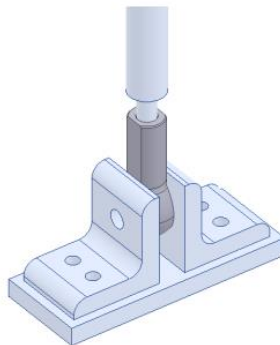


Obrázek 4 Použití kleštin [7]

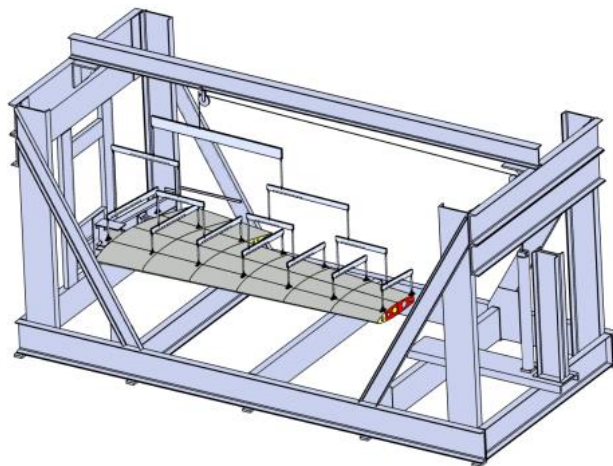
Kleštiny musí být vyrobeny přesně, aby přiléhaly co nejlépe na povrch křídla, jinak by mohlo docházet k nechtěnému lokálnímu zatížení, které by mohlo vést k poškození křídla. Tím, že kleština tahá za celý profil křídla, nemusí být dosaženo požadovaného rozložení zatížení.

2.3.2 Lepení kovových destiček

Dalším možným způsobem zavedení zatížení do konstrukce je přilepení destiček na povrch křídla. Plochá kovová destička, vyztužená profily, se rotačně připevní na konec táhla, aby nedocházelo k jeho nechtěnému kroucení nebo ohýbání. Destička se také přilepí ke křídlu. Velikost destičky musí být vhodně zvolena. Pokud by byla příliš malá, tak by mohlo dojít k jejímu odlepení, nebo by mohlo nastat lokální přetížení konstrukce. Kdyby byla moc velká, nemusela by správně přiléhat k povrchu křídla. Tím, že při zatěžování netaháme za celý profil, jak tomu bylo u kleštin, ale taháme za lokální místa, je možné přizpůsobit rozložení zatížení i po hloubce profilu křídla, čímž je možné dosáhnout přesnějších výsledků. [6]



Obrázek 5 Tvar lepené destičky s táhlem [6]



Obrázek 6 Rozložení destiček po křídle [6]

2.3.3 Lepení tkaninových závěsů

Vhodnou metodou zavádění zatížení do konstrukce je přilepení závěsů vyrobených z pevných technických tkanin na povrch křídla. Závěsem se protáhne dřevěná nebo kovová výztuha, která se připevní k zatěžujícím nosníkům. Závěsy je vhodné vyrábět ze dvou druhů tkanin, jedné pevné, ze které se vytvoří oko pro zatěžující výztuhu. Druhá by měla být vhodná pro přilepení ke křídlu. Obě části se sešijí a přilepí k potahu. [8]

Tvar a velikost závěsu musí být správně navrženy, protože ovlivňují rozložení sil v lepené základové části a tím únosnost lepeného spoje. Podobně jako tomu je u přilepených kovových destiček, je zaváděno zatížení v lokálních místech, tím je možné přizpůsobit rozložení zatížení i po hloubce profilu. Další výhodou tkaninových závěsů je také univerzálnost. Závěs je možné přilepit na jakýkoli tvar křídla, na rozdíl od kleštin, které musí kopírovat tvar profilu. Také mohou být použity k zatěžování jiných částí konstrukce.

U této metody bývá omezující pro velikost možného zatížení lepený spoj, který nevydrží a dojde k odlepení závěsu od křídla. Proto je nutné, aby byl správně očištěný a upravený povrch pro vytvoření co nejkvalitnějšího lepeného spojení. Také dochází k roztržení lepené tkaniny. [8]

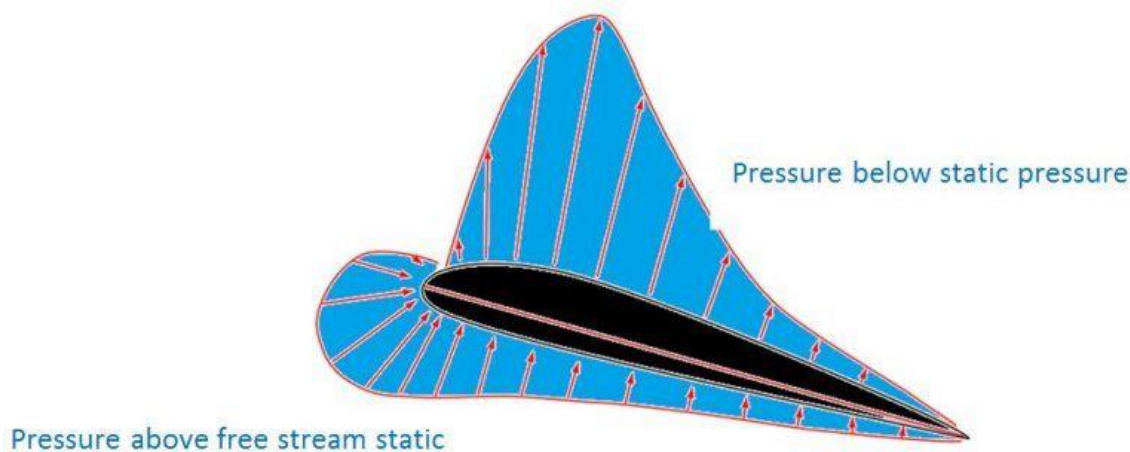


Obrázek 7 Přilepené tkaninové závěsy na křídlo [8]

Dále je v této práci proveden návrh podobného tkaninového závěsu pro zavádění zatížení do konstrukce. S vedoucím bakalářské práce bylo konzultováno, že závěs by měl být schopen přenést zatížení 4 000 N s bezpečností o velikosti 2. Výsledná síla působící na závěs by tedy měla být 8 000 N. V této práci není navržen vahadlový systém pro zavedení zatížení do závěsů, jelikož na Ústavu letadlové techniky ČVUT FS je takový systém již používán.

3 Zatížení působící na křídlo

Při obtékání křídla vzduchem dochází k urychlování proudu vzduchu na horní straně křídla a ke zpomalení na spodní straně. Urychlením dojde ke snížení tlaku a zpomalením ke zvýšení tlaku. Tím se vytvoří tlakové rozložení po hloubce profilu, které je specifické pro každý profil.



Obrázek 8 Rozložení tlaku na profilu [9]

Působení tlaku je možné nahradit výslednou aerodynamickou silou. S větším tlakovým rozdílem mezi horní a spodní stranou se zvětšuje velikost aerodynamické síly působící na křídlo. Podle polohy působí aerodynamické síly také figuruje klopivý moment. Pokud by se síla umístila do bodu tlakového centra, tak by nepůsobil žádný přídatný moment. Nevýhoda tohoto bodu je, že jeho poloha se mění s úhlem náběhu. Proto se výsledná aerodynamická síla umísťuje do aerodynamického středu, který se nachází přibližně v $\frac{1}{4}$ hloubky profilu. Výhodou tohoto umístění je, že klopivý moment je k tomuto bodu konstantní, nebo jeho změna je velmi malá při změně úhlu náběhu a také se nemění jeho poloha. [10]

Aerodynamická síla se dá rozložit na vztlakovou a odporovou sílu. Vztlak působí kolmo na nabíhající vzduch, zatímco odpor působí ve směru proudění.

Z jednotlivých tlakových rozložení v profilech křídla lze vytvořit rozložení po celém křídle. Na křídlo také působí síly vyvolané hmotností konstrukce křídla. Výsledné aerodynamické a hmotnostní síly namáhají konstrukci posouvající silou, ohybovým momentem a kroutícím momentem.

Předpisy stanovují, že konstrukce letounu musí být schopná přenést provozní zatížení, to je maximální zatížení působící během letu, bez vzniku trvalých deformací a způsobené deformace nesmí ovlivnit bezpečnost. Také musí po dobu 3 vteřin snést bez porušení konstrukce početní zatížení. To je provozní zatížení vynásobené součinitelem bezpečnosti. Základní hodnota součinitele bezpečnosti je 1,5. Ta může být násobena doplňkovými součiniteli bezpečnosti, jejichž velikost se odvíjí od důležitosti dané části konstrukce, spolehlivosti výpočtů, vibrací, rázech v konstrukci apod. [11]

Při statických zkouškách křídel je vhodné zavést náhradní zatížení do konstrukce tak, aby co nejpřesněji napodobovalo rozložení zatížení během letu.

4 Lepení

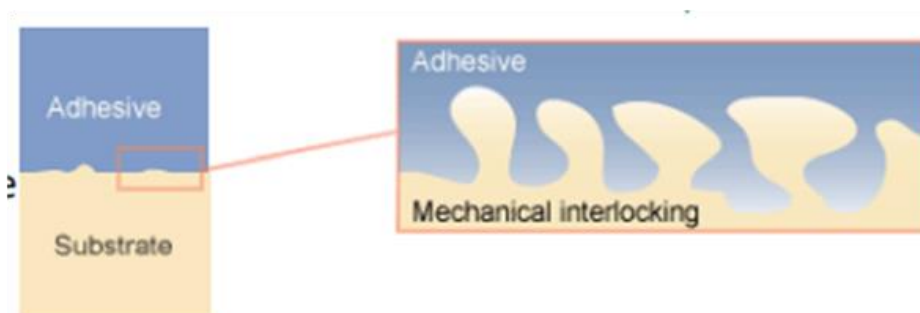
Pro spojení závěsu a křídla je výhodné použít lepený spoj. Lepením je možné spojovat různorodé materiály, které by bylo obtížné spojit jiným způsobem. Také není potřeba narušit konstrukci spojovaných částí. K dosažení kvalitního lepeného spoje je nutné vybrat vhodné lepidlo, které bude dobře přilnavé ke spojovaným materiálům. Přilnavost lepidla k povrchu se označuje adheze, soudržnost molekul lepidla se označuje koheze.

4.1 Teorie adheze

Vytvoření vazeb mezi lepidlem a materiálem není jednoduchý proces, je známo několik teorií, které popisují, jak vznikají adhezní síly mezi povrchy. Většinou se nejedná o jeden mechanismus přilnavosti, ale dochází k jejich kombinaci. Podle typu vazby se také liší pevnost spoje. [12] [13]

4.1.1 Teorie mechanické adheze

Tato teorie říká, že lepidlo nateče do pórů a nerovností materiálu, kde po ztuhnutí vytvoří mechanické překážky bránící oddělení spojovaných částí. Teorie nevysvětluje lepení hladkých povrchů a také jí rozporuje několik příkladů, kdy jsou u stejného materiálu pevnější spoje na hladším povrchu než na pórovitém. [12] [13]



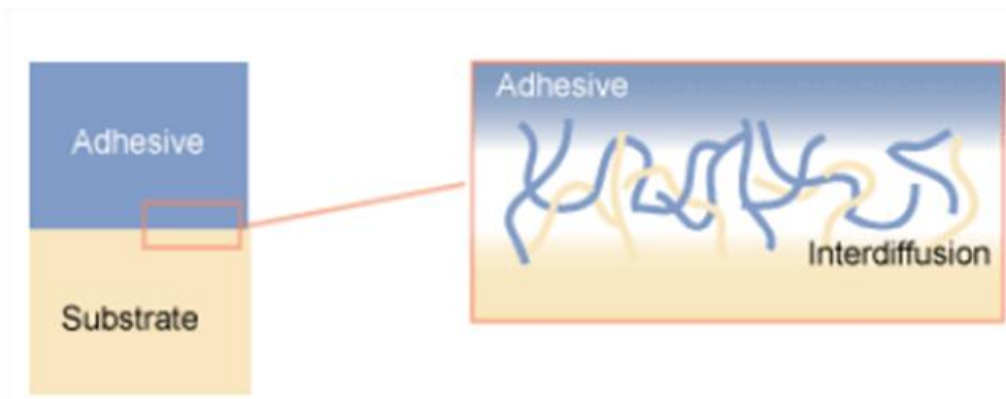
Obrázek 9 Mechanická adheze [14]

4.1.2 Elektrostatická teorie

Při lepení polymerů na polymery nebo na kovy dochází k přesunu elektronů mezi materiály, čímž se vytvoří rozdíl elektrického potenciálu, který vyvolává elektrostatické síly. Tyto síly brání oddělení spojených částí a jejich velikost je závislá na rychlosti odtrhávání lepených materiálů. [12] [13]

4.1.3 Difuzní teorie

Podle této teorie dochází k difuzi mezi lepidlem a spojovaným materiálem, díky čemuž dojde k promísení molekul ve styčných vrstvách. Teorie je použitelná pro spojování polymerů s dlouhými řetězci molekul, které jsou navzájem mísitelné a mají možnost pohybu. [12] [13]



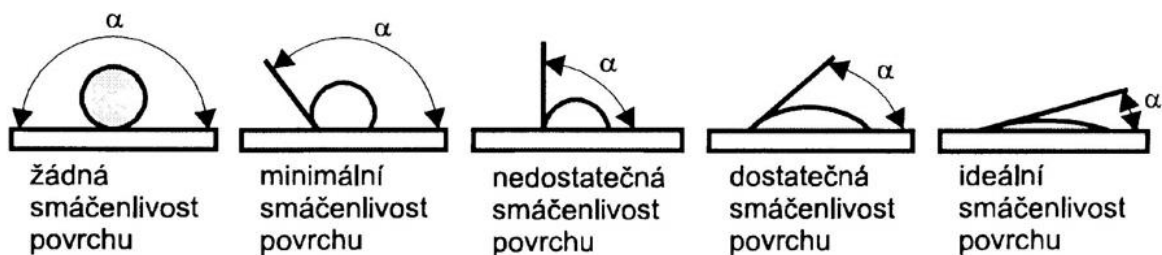
Obrázek 10 Difuzní teorie [14]

4.1.4 Teorie adsorpce

Pro vytvoření pevného lepeného spoje je nutné, aby byl lepený povrch lepidlem smáčivý. Ke smáčení dochází ve styku dvou rozdílných fází, například pevného materiálu a kapaliny. V důsledku toho, že přitažlivé síly mezi molekulami na povrchu nejsou vzájemně kompenzovány tak jako uvnitř hmoty, vzniká v místech styku dvou různých fází volná energie. [12]

U kapalin se na povrchu vytvoří vlivem volné povrchové energie blanka, která sbaluje kapalinu do objemu s co nejmenším povrchem – koule. Pokud je volná energie pevného povrchu větší než kapaliny, dojde k porušení stability blanky kapaliny a ta se po povrchu rozprostře. Tím dochází ke smáčení. Síly způsobující smáčení se vztahují na jednotku délky a nazývají se povrchové napětí. [12]

Smáčivost je dána velikostí povrchového napětí lepidla a lepeného materiálu. Pokud má kapalné lepidlo menší povrchové napětí než lepený materiál, dochází k roztečení lepidla po povrchu a vytvoření kontinuální lepené vrstvy. [12]



Obrázek 11 Smáčivost povrchu [15]

4.1.5 Chemické vazby

Chemické vazby, také nazývané primární, spojují atomy prvků v molekulách. Rozdělují se na iontové, kovalentní a kovové. Při lepení určitých materiálů, které jsou reaktivní s lepidlem, je možná tvorba těchto vazeb, například při lepení kovů polyuretanovými nebo epoxidovými lepidly, kde se předpokládá reakce hydratovaných oxidů kovu s volnými hydroxyly lepidla. [12] [13]

4.1.6 Fyzikální vazby

Jedná se o sekundární vazby, které nejsou tak silné jako primární a jsou fyzikálního charakteru. Nazývají se Van der Waalovy síly a dělí se na Keesomovy elektrostatické síly, Debyeovy indukční síly a Londonovy disperzní síly. Keesomovy a Londonovy síly jsou důležité pro lepení. [12]

Keesomovy síly vznikají vzájemným působením permanentních dipólů – molekul s asymetrickým rozložením elektrických nábojů. Dipóly se podle polarizace rozdělují na nepolární, negativně polární, pozitivně polární, pozitivně a negativně polární. Přitažlivé síly mezi látkami nepolárními a látkami silně polárními nemusí vůbec vzniknout. [12]

Londonovy disperzní síly vznikají, když se na sousedních atomech pohybují valenční elektrony opačným směrem a tím dochází k vzájemné polarizaci molekul. Tyto síly působí na malou vzdálenost a jsou závislé na teplotě. [12]

K vytvoření pevného spojení je nutné, aby byly lepené materiály lepidlem smáčivé. Ke smáčení dojde, pokud má kapalina menší povrchové napětí, než mají spojované materiály. Následně musí lepidlo při tuhnutí vytvořit silnou vazbu.

4.2 Rozdělení druhů lepidel podle způsobu tuhnutí

4.2.1 Lepidla tuhnoucí vlivem vsáknutí a odtěkání rozpouštědel

Obsahem těchto lepidel jsou přírodní nebo syntetické filmotvorné látky rozpuštěné nebo rozptýlené ve vodě nebo v organických rozpouštědlech. K tuhnutí dochází odpařováním rozpouštědla. [12]

4.2.2 Reaktivní lepidla

Po aplikaci reaktivních lepidel dochází k chemickým reakcím, které způsobují tuhnutí. Rozdělují se na jednosložková a vícesložková. U jednosložkových je chemická reakce vyvolána vnějšími vlivy – teplotou, vzdušnou vlhkostí. U vícesložkových lepidel začne chemická reakce po smísení složek. [12]

4.2.3 Lepidla termoplastická

K lepení se používají termoplasty, které se roztaví a nanasou na jeden ze spojovaných materiálů a následně se přiloží druhý a dojde ke ztuhnutí. Maximální pevnosti je dosaženo hned po ztuhnutí. [12]

4.2.4 Lepidla stále lepivá

Jedná se o lepidla, která nemění svou konzistenci a zůstávají stále lepivá. Ke spojení dochází přitlačení lepící vrstvy k lepenému materiálu. [12]

4.3 Lepidla vhodná pro lepení tkaninového závěsu

Pro lepení textilií na kov jsou vhodná epoxidová lepidla, disperzní lepidla, kyanakrylátová lepidla, roztoky kaučuků a roztoky plastů. [16]

K nalepení závěsu na kompozitní křídlo by mohlo být vhodné použít epoxidová nebo kaučuková lepidla. [16] [13]

4.3.1 Epoxidová lepidla

Jedná se o dvousložková reaktivní lepidla. Aby došlo k vytvrzení, musí být epoxidová pryskyřice namíchána ve správném poměru s tvrdidlem. Mohou vytvrzovat za okolní teploty nebo při zvýšené teplotě. Do epoxidových lepidel lze přidávat plniva. Plnivo zvyšuje hustotu a také rozvádí vnitřní pnutí lepidla při zatížení. [12]

4.3.2 Disperzní lepidla

Disperzní lepidla obsahují jemné disperze polymerů ve vodě. Během vytvrzování dochází k odpařování obsažené vody a k tvorbě souvislého filmu z propojených polymerních částí. [16]

4.3.3 Kyanakrylátová lepidla – vteřinová lepidla

Jde o jednosložková lepidla, k jejichž tuhnutí dochází působením vzdušné vlhkosti. K vytvoření spoje dojde během několika vteřin nebo minut. Vteřinová lepidla mají dobrou přilnavost a také bývají houževnaté. [12]

4.3.4 Lepidla na bázi chloroprenového kaučuku

Řadí se mezi lepidla tuhnoucí odtěkáním organických rozpouštědel. Aplikuje se nanesením souvislé vrstvy na obě lepené plochy, nechá se 10 – 15 minut odpařit část rozpouštědla a následně se obě kontaktní plochy přilepí k sobě a zatíží tlakem. K úplnému zatuhnutí spoje dojde až po delší době, protože se ve spoji stále drží zbytky rozpouštědel. Výsledný spoj je pružný a pevný. [16]

4.4 Úprava povrchu před lepením

Na povrchu lepených materiálů se mohou nacházet různé cizorodé látky, nátěrové hmoty, korozní produkt, nebo mastnota, tuky a oleje. Při lepení by nedošlo ke kontaktu lepidla s povrchem a tím by byla snížena pevnost spoje. Úpravou povrchu se odstraní povrchové nečistoty a slabé vrstvy nátěrových hmot nebo oxidů, upraví se mikrostruktura povrchu nebo se zvýší molekulární interakce lepidla s povrchem. Povrch lze očistit mechanicky od hrubých nečistot nebo chemicky od mastnot a korozního produktu. Většinou se povrch nejdříve očišťuje a odmašťuje, následuje mechanické zdrsnění a případně může následovat nanesení chemických přípravků zvyšujících adhezi. K odmašťování se používají rozpouštědla nebo vodné roztoky. [13]

K lepení jsou vhodnější povrchy lehce zdrsňené, než hladké nebo leštěné. Zdrsněním se dosáhne větší kontaktní plochy s lepidlem a tím se zvýší pevnost spoje. Po zdrsnění by měl být povrch znovu očištěn a odmaštěn. [13]

Při lepení je také důležitá nasákavost. Absorpcí lepidla do materiálu se docílí zvětšení lepené plochy. U málo viskózních lepidel může nastat suchý spoj. To znamená, že se do materiálu nasáкло tolik lepidla, že se přerušil film lepidla mezi povrchy a tím došlo k vytvoření spoje s nižší pevností. [16]

5 Materiály závěsu

Závěs pro zatěžování křídla se skládá ze dvou částí. První je oko pro uchycení zatěžované výztuhy. Oko je zatěžováno převážně tahem, tomu se musí zvolit vhodná tkanina. Druhá část je základna přilepená k povrchu křídla. Ta musí přenést všechno zatížení ze závěsu a zároveň musí být z materiálu vhodného k přilepení ke kovovému nebo kompozitnímu povrchu. Oko a základna se k sobě přišijí, k tomu je nutné zvolit příslušnou nit.

5.1 Oko

Pro oko musí být zvolena tkanina s vysokou pevností v tahu, ta závisí na materiálu jednotlivých vláken, jejich vazbě a také na hustotě provázání. Mezi nejběžnější technické tkaniny, které by byly vhodné pro tvorbu závěsu jsou nylon, polyolefiny a polyestery. [17]

5.1.1 Polyester (PES)

Jedná se o skupinu polymerů s esterovou funkční skupinou. Do této skupiny patří polyethyltereftalát (PET), ze kterého se vyrábí většina vláken. Jde o semikrystalický syntetický materiál vyráběný z ropy pomocí polykondenzace kyseliny tereftalové a etylenglykolu. Vlastnosti polyesterových vláken lze zlepšit a přizpůsobit přidáním aditiv. [18] [19]

Polyesterové materiály bývají často používány díky své nízké ceně a poměrně dobrým vlastnostem. Vláknina jsou pevná, neabsorbují vlhkost, mají dobrou rozměrovou stabilitu. Teplota skelného přechodu je přibližně 70 °C, díky čemuž mohou být vlákna použita i za zvýšené teploty. Z polyesteru se například vyrábí plachty, lana, ochranné oděvy. [17] [19]

Orientační pevnost PET vláken je 510 až 690 Nmm⁻². Modul pružnosti se pohybuje v rozmezí 6 až 11 kNmm⁻². [17]

5.1.2 Nylon

Nylon byl jedním z prvních syntetických vláken. Jde o semikrystalický polymer ze skupiny polyamidů. Řadí se mezi termoplasty. Pomocí rychlosti ochlazování při výrobě semikrystalických materiálů lze řídit podíl krystalické fáze v objemu vláken, čímž je umožněno upravovat vlastnosti materiálu. Nylonová vlákna mají oproti polyesteru nižší pevnost. Mezi hlavní zástupce nylonových vláken patří nylon 6 a nylon 66. [17] [20]

Oproti jiným termoplastům vykazuje poměrně vysokou polaritu, i přesto není bez předchozí úpravy povrch vhodný k lepení. [12]

Pevnost vláken nylonu 66 je v rozmezí 350 až 550 Nmm⁻², jeho modul pružnosti je 3 až 6,5 kNmm⁻². Nylon 6 má pevnost 450 až 700 Nmm⁻² a modul pružnosti 2,5 až 3,4 kNmm⁻². [17]

5.1.3 Polyolefiny

Jedná se o skupinu plastů obsahující polypropylen (PP) a polyethylen (PE). Polypropylen je termoplast s dobrou chemickou a mechanickou odolností. Je velmi levný. Teplota tavení se pohybuje okolo 160 °C. Používá se pro tvorbu lan a sítí. Plave na vodní hladině, protože má menší hustotu než voda. [17] [21]

Polyethylen je také termoplast, který se vyrábí polymerizací ethenu. Je ho možné vyrábět jako ultra vysokomolekulární polyethylen (UHMW-PE), který se vyznačuje velmi vysokou pevností, odolností proti otěru a nízkou hustotou. Teplota tání je přibližně 146 °C, což omezuje jeho použití. Používá se pro výrobu lan, plachet a také ochranných oděvů například neprůstřelných vest. [17] [22]

Polyolefiny nejsou vhodné pro vytváření lepených spojů kvůli jejich nepolárnímu charakteru. [16]

Pevnost polypropylenových vláken dosahuje 410 Nmm⁻² a modul pružnosti 6,4 kNmm⁻². Ultra vysokomolekulární polyethylen má pevnost až 4000 Nmm⁻² a modul pružnosti 95 kNmm⁻². [17]

5.2 Základna

K vytvoření pevného lepeného spoje je potřeba, aby byly lepené materiály lepidlem smáčivé, a to je splněno, pokud materiál má vyšší povrchové napětí než lepidlo. Textilie pro horní část závěsu mají nízké povrchové napětí nebo netvoří vazby s lepidlem, čímž nejsou vhodné k lepení na křídlo. Musí být vybrány tkaniny, které je možné pevně přilepit a také jsou schopné snést dané zatížení.

5.2.1 Bavlna

Bavlna je přírodní materiál skládající se z dlouhých řetězců celulózy. Délka jednotlivých řetězců ovlivňuje pevnost a kvalitu vláken tkaniny. Jedná se o pevný a otěru vzdorný materiál. Vlákna dobře absorbují vodu a jejich mechanické vlastnosti se mění s obsahem vlhkosti. [19]

Pevnost bavlněných vláken se pohybuje v rozmezí 287 až 597 Nmm⁻² a jejich modul pružnosti je 5,5 až 12 kNmm⁻². [23]

5.2.2 Len

Jedná se o přírodní materiál rostoucí ze stonků lnu setého. Jednotlivá vlákna jsou z celulózy, které obsahují přibližně 70 %. Vlákna jsou poměrně lehká, jejich hustota je 1,5 g/cm³. Pevnost v tahu může dosahovat až 1500 Nmm⁻² a modul pružnosti dosahuje 60 kNmm⁻². Pevnostně převyšuje bavlněná vlákna. Také má schopnost dobře absorbovat vlhkost. [24] [25]

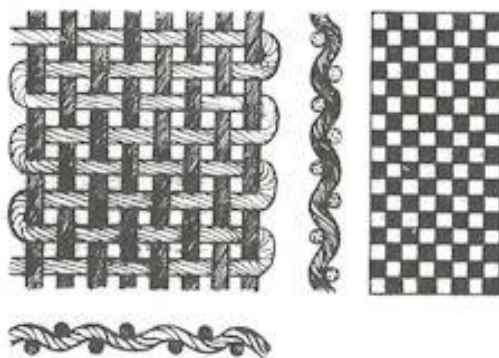
5.3 Vazby tkanin

Tkané látky se skládají z jednotlivých přízí, které jsou mezi sebou provázané. Příze se proplétají ve dvou hlavních směrech. Prvním je osnova, která vede po délce tkaniny. Druhým je útek, který je propletený mezi osnovními nitěmi a je na ně kolmý. Na hustotě provázání závisí výsledné vlastnosti tkaniny. [26]

Používají se tři základní vazby:

5.3.1 Plátnová vazba

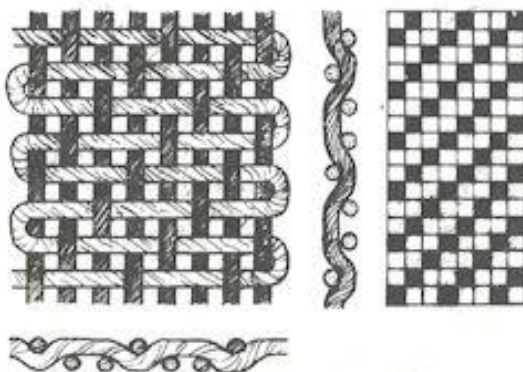
U plátnové vazby se útkové příze střídavě proplétají z horní a spodní strany přes osnovní vlákna. Jedná se o nejjednodušší a také nejpoužívanější vazbu. Výsledná tkanina je díky vysoké hustotě provázání tuhá. [27]



Obrázek 12 Plátnová vazba [28]

5.3.2 Keprová vazba

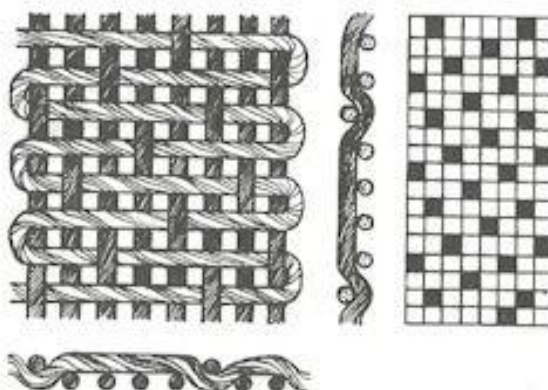
V keprové vazbě jsou útkové příze vedeny vždy alespoň ob dvě osnovní příze, čímž se na povrchu tkaniny vytvoří diagonální linie specifické pro keprovou vazbu. Oproti plátnové vazbě je méně proplétaná, tudíž má menší tahovou odolnost. [27]



Obrázek 13 Keprová vazba [28]

5.3.3 Atlasová vazba

Atlasová vazba je tvořena jen občasným propletením osnovy a útku, čímž se vytvoří nepravidelný vzor na povrchu tkaniny a také je výsledná tkanina velmi hladká a lesklá. Jednotlivé propletení nejsou vedle sebe. [27]



Obrázek 14 Atlasová vazba [28]

5.4 Textilní popruh

Pro oko závěsu by bylo možné použít textilní popruh. Jedná se o tenkou plošnou textilii, která je navržena na přenášení tahových zatížení. Vyrábějí se v plátnové vazbě, keprové vazbě nebo jejich odvozených vazbách. Celková pevnost popruhu se odvíjí od použitého materiálu, šířce popruhu, hustotě provázání jednotlivých přízí. Popruhy mají velmi velké využití. Používají se pro přepravu materiálů, v nábytkářství, obuvnictví, k výrobě speciální výstroje atd. [29]



Obrázek 15 Textilní popruh [30]

6 Návrh závěsu

Závěs má být navržen tak, aby dokázal přenést požadované zatížení se zadanou úrovní bezpečnosti a také aby byla jeho výroba jednoduchá a levná. Jsou navrženy tři varianty. Všechny jsou vyrobeny ze stejných materiálů. Varianty se liší obtížností výroby a velikostí sil působící mezi okem a základnou v jednotlivých švech.

6.1 Volba materiálu

Pro materiál základny je zvolena lněná tkanina v plátnové vazbě s plošnou hmotností 650 g/m^2 s pevností $2\,000 \text{ N}$ v osnově a $1\,200 \text{ N}$ v útku. Tyto hodnoty určují pevnost tkaniny se šířkou 50 mm . Tkanina je v řezné formě. To znamená, že její povrch není upraven a není na ní nanesená vodoodpudivá vrstva, která by zhoršovala adhezní vlastnosti při lepení. Len byl zvolen díky své vhodnosti k lepení a poměrně vysoké pevnosti. Bavlněné tkaniny s podobnou plošnou hmotností mají přibližně poloviční pevnost.

Pro oko je zvolen polypropylenový popruh široký 50 mm s pevností $10\,000 \text{ N}$. Šíře popruhu určuje velikost lepené plochy a velikost švů. Pokud by pevnost závěsu převyšovala navržené zatížení, bylo by možné použít popruhy užší. Popruh byl zvolen, protože je mnohem dostupnější než plošné tkaniny s vysokou pevností.

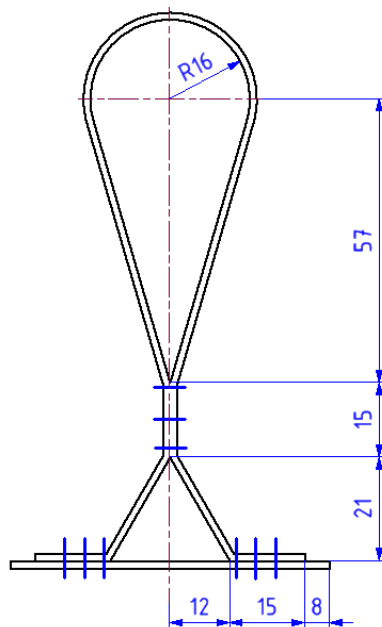
Popruh se ve více namáhaných švech přišije k základně pomocí polyesterových nití TYTAN 15 s pevností v tahu 110 N . U méně namáhaných švů je použita nit TYTAN 30 s pevností v tahu 57 N . Pro výrobu závěsů ve větším množství je vhodné, aby byly švy šity strojně. Navržené varianty byly nechány vyrobít u ševců, u kterých nebylo možné použít nitě TYTAN 15, protože jsou moc silné a byly použity nitě Synton 30 respektive TYTAN 30. Tato informace byla sdělena až po vyrobení první varianty, u které se počítá s pevností nití TYTAN 15 a použitím nití s nižší pevností by nebylo dosaženo teoretické úrovně bezpečnosti. Použití nití s nižší pevností se také projevilo v experimentálním ověření únosnosti závěsů.

K lepení základny k povrchu křídla bylo nejdříve zvoleno kontaktní lepidlo Pattex Chemoprén Extrém, které dosahuje pevnosti ve smyku $0,94 \text{ Nmm}^{-2}$. Toto lepidlo pevnostně nevyhovovalo a je nahrazeno polychloroprenovým kontaktním lepidlem s označením 1357 Scotch-Weld od společnosti 3M s pevností ve smyku až $3,7 \text{ Nmm}^{-2}$. Epoxidová nebo kyanakrylátová lepidla mohou dosahovat pevnosti ve smyku přes 30 Nmm^{-2} , ale nebyly zvoleny, protože jsou po ztuhnutí poměrně křehké a také drahé v porovnání s kontaktními lepidly.

Pro zatížení závěsu je zvolena ocelová trubka. Trubka je vhodnější oproti obdélníkovým nebo čtvercovým profilům v tom, že při napnutí závěsu dojde pokaždé ke stejnému hladkému vyrovnání popruhů. V polovině délky trubky je otvor, do kterého se umístí třmen pro uchycení ocelového lana. Trubka má délku 130 mm , vnější průměr 32 mm a tloušťkou stěny 5 mm . Otvor pro třmen má průměr 20 mm . Materiál je ocel S235 s mezí kluzu 235 Nmm^{-2} . Použitý třmen má nosnost $4,14 \text{ tun}$.

6.2 Varianta I

Pro první variantu byl zvolen jednoduchý tvar oka, který je jednoduše výrobitelný. Nevýhodou je poměrně malá oblast lepené plochy kolem švů mezi základnou a okem. Tím by mohlo dojít k přetížení lepeného spoje a odlepení od povrchu.



Obrázek 16 Návrh tvaru závěsu varianty I

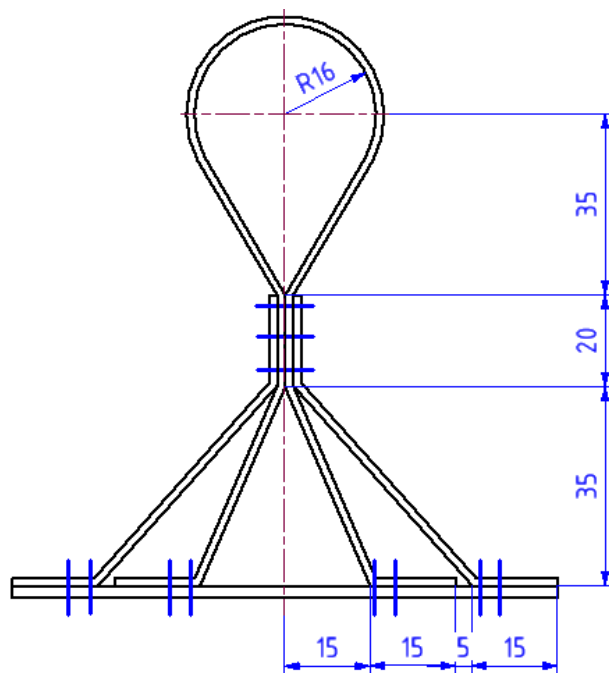
Oko je tvořeno ze dvou textilních popruhů, délka jednoho popruhu je 280 mm. Ty jsou přišité k základně na dvou místech pomocí šesti řádků švů, tří na každé straně. Tři řádky byly zvoleny z hlediska bezpečnosti, i když je dále pevnost počítána jen ze dvou řádků. Během experimentu bylo dosaženo závěru, že třetí řádek nepřenašel zatížení a v dalších variantách byly použity jen řádky dva. Základna má velikost 70x130 mm. Oko je dále sešité ve středové části pomocí tří řádků švů. Tím dojde k lepšímu rozložení zatížení mezi jednotlivými řádky švů ve spodní části oka. Mezi řádky švů v základně je mezera 4 mm, ve středové části je mezera 6 mm. Horní částí se provleče trubka pro zavedení zatížení. Z tohoto důvodu je mezi popruhy mezera 20 mm pro třmen.



Obrázek 17 Výsledný návrh první varianty závěsu

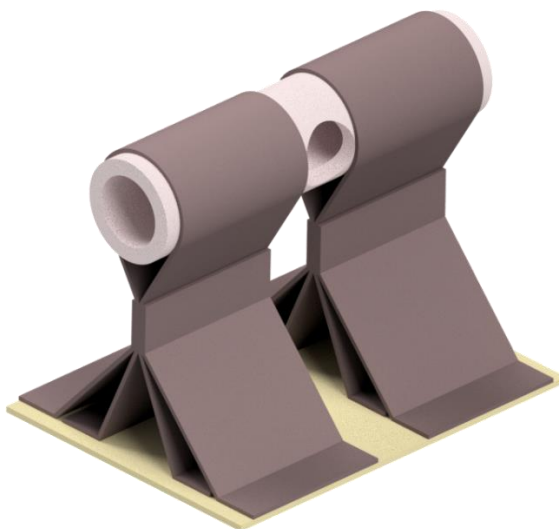
6.3 Varianta II

Tato varianta vychází z první varianty. Základ je stejný jednoduchý tvar, ke kterému jsou ze stran přišity další dva textilní popruhy. Tím dojde k lepšímu rozložení zatížení do základny a zvýšení únosnosti lepeného spoje.



Obrázek 18 Návrh tvaru závěsu varianty II

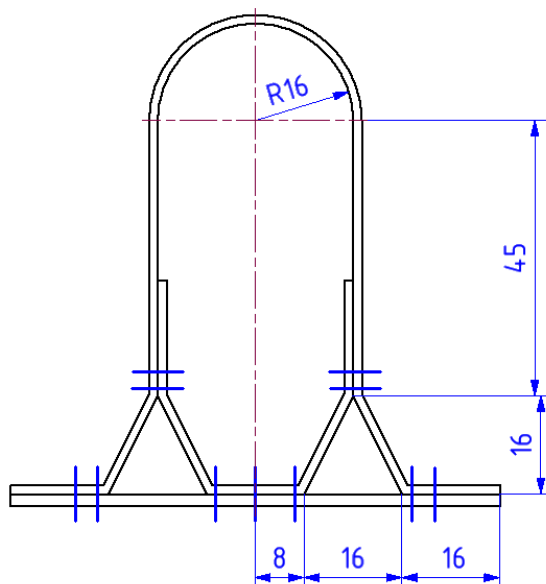
Středová část je ze dvou popruhů s délkou 275 mm, k nim jsou přišité pomocí tří řádků švů čtyři kratší popruhy s délkou 90 mm. Základna má velikost 100x130 mm. Jednotlivé popruhy měly být k základně přišity dvěma řádky švů, ale při výrobě došlo k nedorozumění a řádky švů byly prošity do sebe. Proto dále počítána pevnost těchto švů jako jeden řádek s vyšší hustotou stehů. Mezi oky je opět mezera 20 mm pro třmen zavádějící zatížení.



Obrázek 19 Model varianty II

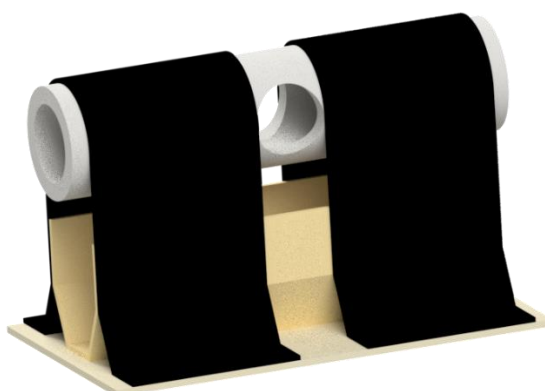
6.4 Varianta III

Tato varianta je inspirovaná tkaninovým závěsem používaným v [8]. Skládá se opět ze dvou textilních popruhů. Ty jsou přišity k okrajům základny. Ve středové části základny je přišitý kus lněné tkaniny, který se také přišije k vnitřním stranám popruhu. Tkanina je umístěna tak, aby sílu přenášely pevnější osnovní příze. Tím je vytvořen v honí části tvar U, do kterého se umístí trubka zavádějící zatížení. Ve spodní části jsou symetricky čtyři místa přišití oka k základně.



Obrázek 20 Návrh varianty III

Délka popruhu je 210 mm. Velikost středové lněné části je 90x120 mm. Velikost základny je 80x130 mm. K přišití středové části k popruhu jsou použity dva řádky švů, stejně jako k přišití popruhu k základně. Středová část je přišita k základně pomocí tří řádků švů. Pro zjednodušení výroby je středová část z lněné tkaniny. Její šířka byla zvolena tak, že při šití je možné pokračovat jedním řádkem švu z jednoho popruhu do druhého. V této části působí síly, které je lněná tkanina schopná přenést.



Obrázek 21 Model varianty III

6.5 Pevnostní kontrola

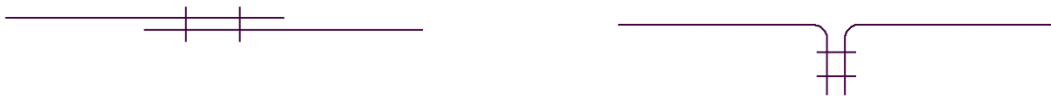
V této části je provedena pevnostní kontrola oka závěsu, jeho švů a trubky zavádějící zatížení při požadované síle 4 000 N. Únosnost lepeného spoje a základny není početně kontrolována, protože je poměrně obtížné určit, jak velká část základny bude zatížení přenášet a jak silný spoj vytvoří lepidlo s použitými materiály. Výsledná únosnost závěsu je ověřována experimentálně. Také není kontrolován třmen pro zavedení zatížení, protože se jedná o kupovanou součást se stanovenou únosností.

6.5.1 Pevnost švů

Při namáhání švu tkanin je únosnost ovlivňována několika parametry, například pevností nitě a spojovaných materiálů, typu švu, hustotě švu a typu stehu. Během zatížení dochází k rozložení sil do jednotlivých vazných bodů švu. Pevnost vazného bodu určuje pevnost nitě v kličce, která je nižší než dvojnásobná pevnost nitě v tahu. Snížení je vyjádřeno koeficientem pevnosti nitě v kličce φ a jeho velikost závisí na materiálu nitě, pro PES nitě $\varphi \approx 0,7$. [31]

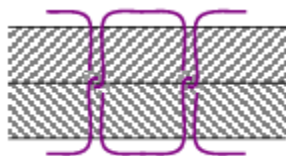
Při šití dochází k poškození nitě, čímž dojde ke snížení výsledné pevnosti švu. To je vyjádřeno koeficientem poškození nitě ψ , pro PES nitě $\psi \approx 0,8$. [31]

Používají se dva základní druhy švů: hřbetový a přeplátovaný. U hřbetového švu přenáší zatížení mezi spojovanými tkaninami jen nit. U přeplátovaných švů dojde sešitím k sevření spojovaných tkanin a tím při zatěžování vzniká mezi tkaninami tření, které přispívá k únosnosti spoje. [31]

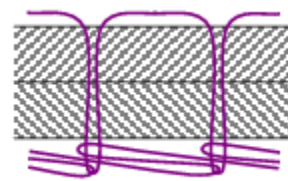


Obrázek 22 Přeplátovaný šev (levý) a hřbetový šev (pravý)

Druhy stehů také určují pevnost spoje, nejčastěji jsou využívány stehy 301 a 401. Steh 301 je základní dvounitý vázaný steh, je pevný a málo roztažný. Steh 401 je dvounitý řetízkový steh, je pevný a roztažný. [31]



Obrázek 23 Steh 301 [31]



Obrázek 24 Steh 401 [31]

Při použití víceřádkového švu dochází k rozložení zatížení do více stehů, čímž se dá zvýšit celková únosnost spoje. U přeplátovaných spojů je efekt zvýšení pevnosti použitím více řádků výraznější než u hřbetových švů. [31]

Dalším parametrem, který je třeba vzít v úvahu při návrhu švu, je hustota stehů. Ta udává počet stehů na jednotku délky. S vyšší hustotou stehů roste počet vazných bodů

přenášející zatížení, ale také dochází k většímu opotřebení materiálu a snížení pevnosti. [31]

Výpočet příčné pevnosti švu převzatý z [31]

$$F_{\xi} = 2 \cdot 10^{-1} \cdot (h \cdot b + 10) \cdot F_n \cdot \varphi \cdot \psi \cdot \alpha. \quad (6.1)$$

kde F_{ξ} - pevnost švu [N]

F_n – pevnost nitě v tahu [N]

h – hustota stehu [cm^{-1}]

b – šířka vzorku [mm]

φ – koeficient pevnosti nitě v klíčce [-]

ψ – koeficient poškození nitě [-]

α – koeficient švu [-]

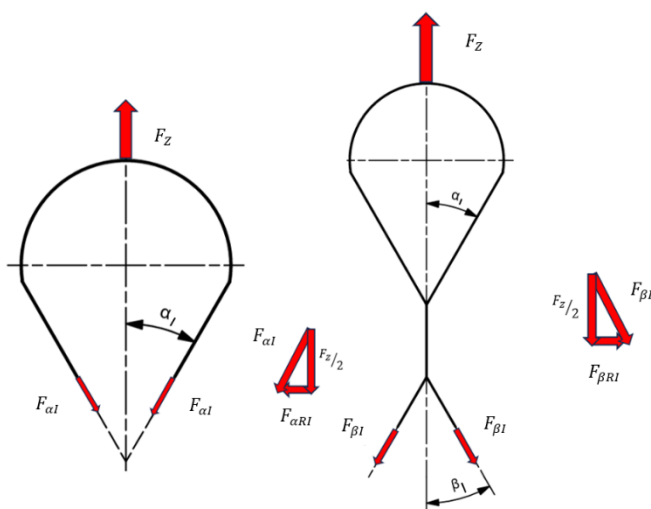
Koeficient švu α udává, jak se daný šev podílí na přenosu zatížení. Závisí na druhu švu, druhu stehu, počtu řádků švu. Pro jednořádkový hřbetový šev se stehem 301 je $\alpha = 1$, pro jednořádkový přeplátovaný je $\alpha = 1,03$. Dvouřádkový přeplátovaný šev má $\alpha = 1,99$ a dvouřádkový hřbetový má $\alpha = 1,21$. [31]

6.5.2 Pevnost Varianty I

Závěs je zatěžován trubkou, která rozkládá sílu symetricky do obou popruhů, takže na jeden popruh působí síla

$$F_Z = F/2 = 2\,000\text{ N}. \quad (6.2)$$

Dále se síla rozloží v popruhu. V následující části jsou vypočítány síly ve vybraných místech popruhů. Tím, že je popruh symetrický podél svislé osy, stačí počítat síly jen v jedné polovině.



Obrázek 25 Rozložení sil v závěsu varianty I

Velikosti úhlů α_I a β_I se vypočítají z rozměrů závěsu obr. 16

$$\alpha_I = \arctan\left(\frac{16}{57}\right) = 16^\circ \quad (6.3)$$

$$\beta_I = \arctan\left(\frac{12}{21}\right) = 30^\circ \quad (6.4)$$

$$F_{\alpha I} = \frac{F_Z}{2} / \cos(\alpha_I) = \frac{2\,000}{2} / \cos(16) = 1\,040,3\,N \quad (6.5)$$

$$F_{\alpha RI} = \frac{F_Z}{2} \cdot \tan(\alpha_I) = \frac{2\,000}{2} \cdot \tan(16) = 286,7\,N \quad (6.6)$$

$$F_{\beta I} = \frac{F_Z}{2} / \cos(\beta_I) = \frac{2\,000}{2} / \cos(30) = 1\,154,7\,N \quad (6.7)$$

$$F_{\beta RI} = \frac{F_Z}{2} \cdot \tan(\beta_I) = \frac{2\,000}{2} \cdot \tan(30) = 577,4\,N \quad (6.8)$$

Bezpečnost popruhu se vypočítá porovnáním pevnosti popruhu a maximální síly, která v popruhu vznikne

$$k_{pI} = \frac{10\,000}{F_{\beta I}} = \frac{10\,000}{1\,154,7} = 8,66. \quad (6.9)$$

Z tohoto vyplývá, že popruh o šířce 50 mm s pevností 10 000 N pevnostně vyhovuje i s rezervou snížení pevnosti šitím. Švy ve střední části závěsu musí snést zatížení $F_{\alpha RI}$ a $F_{\beta RI}$. Švy spojující popruh se základnou musí snést sílu $F_{\beta I}$. Jelikož je $F_{\beta I}$ větší než $F_{\alpha RI}$ a $F_{\beta RI}$ a použité švy jsou stejné, stačí provést pevnostní kontrolu pouze pro šev spojující popruh se základnou.

K přišití závěsu k základně je vhodné použít nit TYTAN 15 s pevností v tahu $F_n = 110\,N$, délka švu je stejná jako šířka popruhu $b = 50\,mm$. Délka stehu je 3 mm, z toho vyplývá, že hustota stehu $h = 3,3$. Koeficient švu je poměrně obtížné určit. V tomto případě se výsledný šev spíše podobá hřbetovému švu a také z hlediska bezpečnosti je předběžně určen jako při použití dvouřádkového hřbetového švu $\alpha = 1,21$. Koeficient pevnosti nitě v kličce $\varphi = 0,7$. Koeficient poškození nitě $\psi = 0,8$. Dosazením do rovnice (6.1) se určí pevnost daného švu

$$F_{\dot{s}I} = 2 \cdot 10^{-1} \cdot (3,3 \cdot 50 + 10) \cdot 110 \cdot 0,7 \cdot 0,8 \cdot 1,21 = 2\,608,8\,N. \quad (6.10)$$

Jelikož jsou hodnoty koeficientů jen přibližné, výsledná hodnota pevnosti je orientační.

Bezpečnost švu:

$$k_{\dot{s}I} = \frac{F_{\dot{s}I}}{F_{\beta I}} = \frac{2\,608,8}{1\,154,7} = 2,26 \quad (6.11)$$

Jak je napsáno v kapitole 6.1, tyto závěsy byly ušity nití Synton 30, která má přibližně poloviční pevnost než niť TYTAN 15. Z toho plyne, že koeficient bezpečnosti je také přibližně poloviční a tím pádem není dosaženo požadované úrovně bezpečnosti 2. Pro ověření únosnosti závěsu s použitím nití TYTAN 15, byl ušit jeden vzorek ručně.

6.5.3 Pevnost varianty II

Stejně jako u první varianty působí na jedno oko popruhu síla

$$F_Z = F/2 = 2\,000\text{ N}. \quad (6.12)$$

Z geometrie závěsu obr. 18 se určí velikost úhlů, o které jsou jednotlivé části popruhu skloněny od středové osy. Ze symetrie stačí řešit jen zatížení poloviny závěsu.

$$\alpha_{II} = \arctan\left(\frac{16}{35}\right) = 24,6^\circ \quad (6.13)$$

$$\beta_{II} = \arctan\left(\frac{15}{35}\right) = 23,2^\circ \quad (6.14)$$

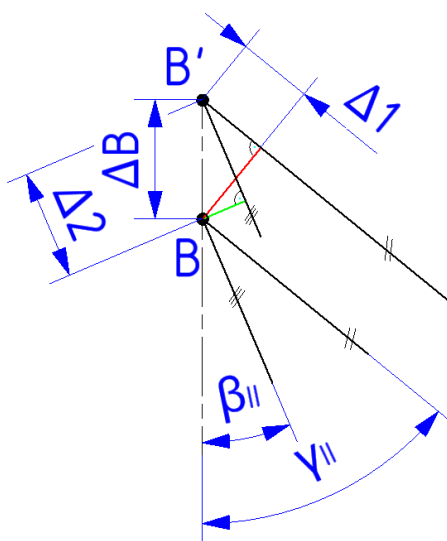
$$\gamma_{II} = \arctan\left(\frac{35}{35}\right) = 45^\circ \quad (6.15)$$

Síly v horní části oka:

$$F_{\alpha_{II}} = \frac{F_Z}{2} / \cos(\alpha_{II}) = \frac{2\,000}{2} / \cos(24,6) = 1\,100\text{ N} \quad (6.16)$$

$$F_{\alpha_{RII}} = \frac{F_Z}{2} \cdot \tan(\alpha_{II}) = \frac{2\,000}{2} \cdot \tan(24,6) = 457,8\text{ N} \quad (6.17)$$

Pro určení sil ve spodní části oka je nutné stanovit deformační podmínku, jelikož se jedná o staticky neurčitý případ. Deformační podmínka říká, že v místě spojení bočních popruhů a středové části mají popruhy stejný posuv ve svislém směru



Obrázek 26 Deformační podmínka

$$\Delta B = \frac{\Delta 1}{\cos \gamma_{II}} = \frac{\Delta 2}{\cos \beta_{II}}. \quad (6.18)$$

Délka vnějšího popruhu je $l_{\gamma_{II}} = 49,5 \text{ mm}$, vnitřní má délku $l_{\beta_{II}} = 38,1 \text{ mm}$.
 Dosazením za posuvy jednotlivých popruhů

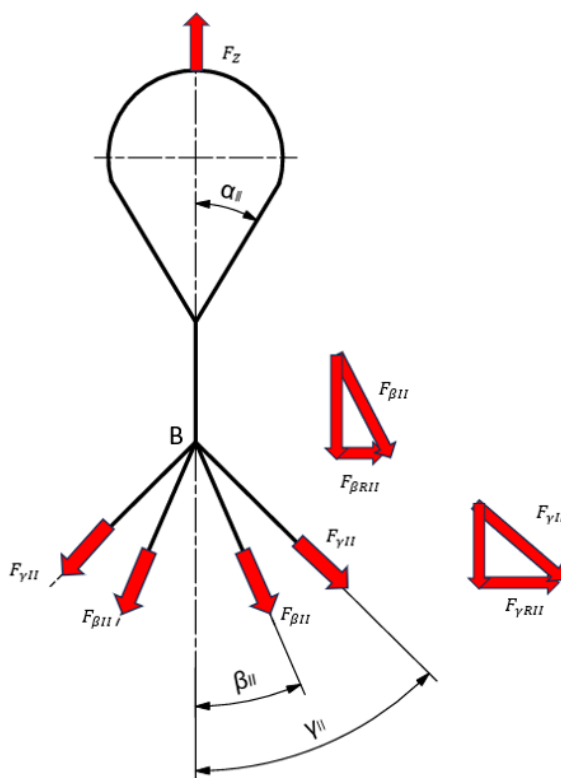
$$\frac{F_{\gamma_{II}} \cdot l_{\gamma_{II}}}{\cos \gamma_{II} \cdot E \cdot S} = \frac{F_{\beta_{II}} \cdot l_{\beta_{II}}}{\cos \beta_{II} \cdot E \cdot S}. \quad (6.19)$$

Tím že se jedná o stejné materiály je výsledný tvar deformační podmínky

$$\frac{F_{\gamma_{II}} \cdot l_{\gamma_{II}}}{\cos \gamma_{II}} = \frac{F_{\beta_{II}} \cdot l_{\beta_{II}}}{\cos \beta_{II}}. \quad (6.20)$$

Doplněním silového rozkladu v místě B jsou získány dvě rovnice o dvou neznámých

$$\frac{F_z}{2} = F_{\beta_{II}} \cdot \cos \beta_{II} + F_{\gamma_{II}} \cdot \cos \gamma_{II}. \quad (6.21)$$



Obrázek 27 Rozložení sil v závěsu varianty II

Úpravou rovnic (6.20) a (6.21) se vyjádří síla

$$F_{\beta II} = \frac{F_Z}{2} \cdot \left[\cos \beta_{II} + \frac{\cos^2 \gamma_{II} \cdot l_{\beta II}}{\cos \beta_{II} \cdot l_{\gamma II}} \right]^{-1} = \frac{2\,000}{2} \cdot \left[\cos 23,2 + \frac{\cos^2 45 \cdot 38,1}{\cos 23,2 \cdot 49,5} \right]^{-1}$$

$$F_{\beta II} = 747,5 \text{ N.} \quad (6.22)$$

Úpravou rovnice (6.21) a dosazením se vypočítá síla

$$F_{\gamma II} = \frac{\left(\frac{F_Z}{2} - F_{\beta II} \cdot \cos \beta_{II} \right)}{\cos \gamma_{II}} = \frac{\left(\frac{2\,000}{2} - 747,5 \cdot \cos 23,2 \right)}{\cos 45}$$

$$F_{\gamma II} = 442,6 \text{ N.} \quad (6.23)$$

Bezpečnost popruhu se v tomto případě určí v horní části závěsu, kde působí největší síla $F_{\alpha II}$

$$k_{pII} = \frac{10\,000}{F_{\alpha II}} = \frac{10\,000}{1\,100} = 8,83. \quad (6.24)$$

Pevnost švů v základně je počítána pro sílu F_{β} protože $F_{\beta} > F_{\gamma}$. K sešití je použita nit TYTAN 30 s pevností v tahu 57 N. Švy jsou v tomto případě jednořádkové s hustotou stehu $h = 5$. Koeficienty pevnosti nitě v kličce a snížení pevnosti jsou stejné jako u švů varianty I. Koeficient švu α je roven 1. Dosazením do rovnice (6.1) se vypočítá síla, kterou je šev schopný přenést

$$F_{s\beta II} = 2 \cdot 10^{-1} \cdot (5 \cdot 50 + 10) \cdot 57 \cdot 0,7 \cdot 0,8 \cdot 1 = 1\,660 \text{ N.} \quad (6.25)$$

Bezpečnost švu:

$$k_{sIIz} = \frac{F_{s\beta II}}{F_{\beta II}} = \frac{1\,660}{747,5} = 2,14 \quad (6.26)$$

Ve středové části oka, kde se připojují krátké popruhy k oku, působí na šev síla z krátkých popruhů $F_{\gamma II}$ a k ní se přičte síla $F_{\beta RII}$

$$F_{vII} = \sqrt{(F_{\beta II} \cdot \sin(\beta_{II}))^2 + F_{\gamma II}^2} = \sqrt{(747,5 \cdot \sin(23,2))^2 + 442,6^2} = 531,6 \text{ N.} \quad (6.27)$$

Tento šev musí být ušit velmi přesně, aby byly při zatěžování všechny popruhy napnuté a přenášely zatížení. Proto je ušit ručně pomocí předního stehu a nitě TYTAN 15. Přibližná pevnost švu je počítána jako při šití stehem 301 v (6.1) pro dvouřádkový hřbetový šev

$$F_{sVII} = 2 \cdot 10^{-1} \cdot (3,3 \cdot 50 + 10) \cdot 110 \cdot 0,7 \cdot 0,8 \cdot 1,21 = 2\,609 \text{ N.} \quad (6.28)$$

Bezpečnost švu:

$$k_{\text{šIIp}} = \frac{F_{\text{šVII}}}{F_{\text{vII}}} = \frac{2\,609}{531,6} = 4,91 \quad (6.29)$$

6.5.4 Pevnost varianty III

U této varianty je dosaženo nejmenších sil zaváděných do základny, tím je únosnost lepeného spoje nejvyšší v porovnání s ostatními variantami. Od trubky je veden popruh svisle, takže v něm působí přímo polovina síly z trubky. Následně dochází k rozložení síly mezi středovou lňnou tkaninu a pokračující popruh.

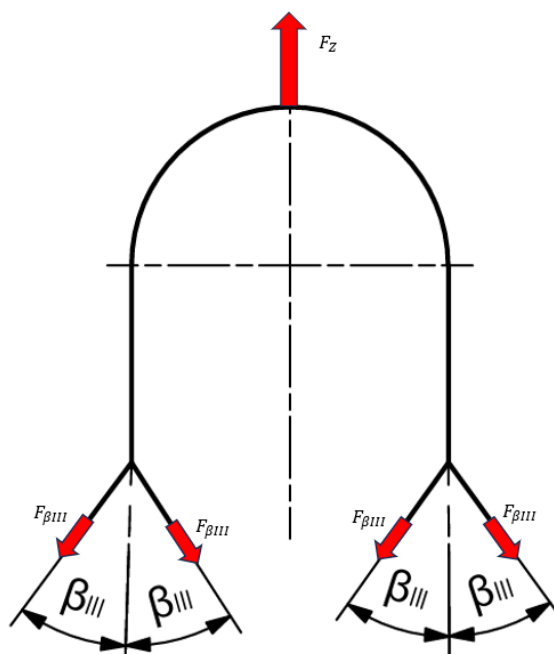
$$\beta_{\text{III}} = \arctan\left(\frac{8}{16}\right) = 26,6^\circ \quad (6.30)$$

Ze symetrie je síla ve středové lňné části stejná jako ve skloněné části popruhu. Ta se vyjádří rovnicí rovnováhy

$$\frac{F_Z}{2} = 2 \cdot F_{\beta_{\text{III}}} \cdot \cos \beta_{\text{III}} \quad (6.31)$$

Úpravou je získáno

$$F_{\beta_{\text{III}}} = \frac{F_Z}{4 \cdot \cos \beta_{\text{III}}} = \frac{2\,000}{4 \cdot \cos 26,6} = 559,2 \text{ N} \quad (6.32)$$



Obrázek 28 Rozložení sil v závěsu varianty III

Bezpečnost popruhu:

$$k_{pIII} = \frac{10\,000}{F_Z/2} = \frac{10\,000}{1\,000} = 10 \quad (6.33)$$

Bezpečnost lněné středové části je počítána pro šířku 50 mm, přestože je lněná část širší

$$k_{LIII} = \frac{2\,000}{F_{\beta III}} = \frac{2\,000}{559,2} = 3,58. \quad (6.34)$$

Všechny švy jsou šité nití TYTAN 30. K přišíť popruhů k základně jsou použity dva řádky švů. K přišíť lněné středové části k základně jsou použity tři řádky souměrně tak, aby středový řádek procházel středem základny. Tím, že se jedná o hřbetové švy, druhý řádek přenáší mnohem menší zatížení než první a je možné považovat tyto tři švy k základně jako dva dvouřádkové. Švy mezi popruhem a středovou lněnou tkaninou jsou také dva hřbetové.

Pevnost švu je

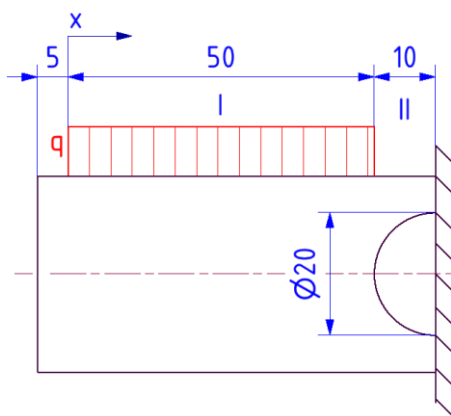
$$F_{\beta III} = 2 \cdot 10^{-1} \cdot (3,3 \cdot 50 + 10) \cdot 57 \cdot 0,7 \cdot 0,8 \cdot 1,21 = 1\,352 \text{ N.}$$

Bezpečnost švu:

$$k_{\beta IIIz} = \frac{F_{\beta III}}{F_{\beta III}} = \frac{1\,352}{559,2} = 2,42 \quad (6.35)$$

6.5.5 Trubka

Na trubku působí zatěžující síla a reakce od popruhů. Reakční síly se vyobrazí jako spojité zatížení. Největší namáhání je v oblasti otvoru pro třmen, kde působí maximální ohybový moment, posouvající síla a otačení od třmenu a také je zde zmenšený nosný průřez. Dále je vypočítán průběh ohybového momentu, normálové napětí způsobené ohybovým momentem a otačením, tečné napětí od posouvající síly a výsledné redukované napětí.



Obrázek 29 Zatížení působící na polovinu trubky

Tím, že je trubka zatížena symetricky, tak je postačující řešit zatížení poloviny trubky. Ta se rozdělí do dvou oblastí. První, kde působí spojité zatížení od popruhu. Druhá oblast je od konce první až k ose symetrie.

Velikost spojitěho zatížení:

$$q = \frac{F}{2} / 50 = \frac{4\,000}{2} / 50 = 40 \text{ N/mm} \quad (6.36)$$

Průběh posouvající síly:

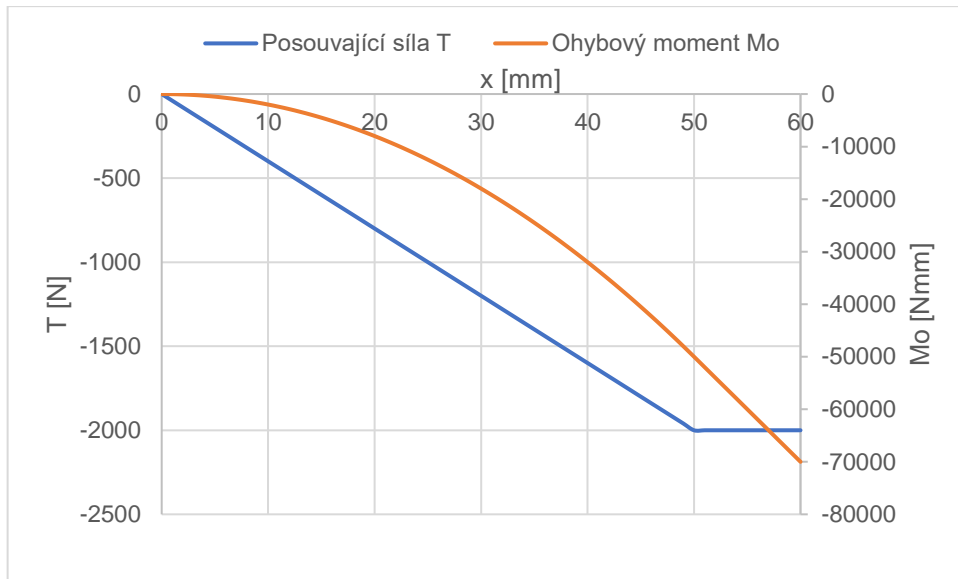
$$T_I = -q \cdot x \quad (6.37)$$

$$T_{II} = -q \cdot 50 = -\frac{F}{2} \quad (6.38)$$

Průběh ohybového momentu:

$$M_{oI} = -q \cdot \frac{x^2}{2} \quad (6.39)$$

$$M_{oII} = -q \cdot 50 \cdot \left(x - \frac{50}{2}\right) \quad (6.40)$$



Graf 1 Průběh posouvající síly a ohybového momentu v polovině trubky

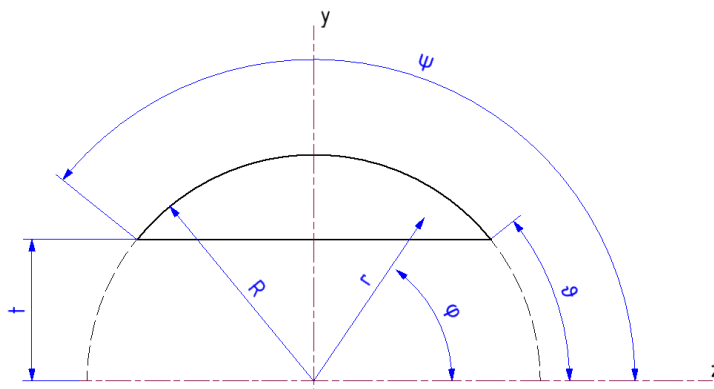
Z průběhu vnitřních sil lze vidět, že maximální posouvající síla $T = -2\,000\text{ N}$ a ohybový moment $M_{\text{omax}} = -70\,000\text{ Nmm}$ působí v rovině osy otvoru pro třmen, také je zde zmenšen nosný průřez. V tomto místě bude provedena pevnostní kontrola. K výpočtu normálového napětí od ohybového momentu je potřebné znát kvadratický moment průřezu k ose kolem které je průřez ohýbán

$$J_z = \int y^2 dS. \quad (6.41)$$

Pro zjednodušení výpočtu je integrál (6.41) převeden do polárních souřadnic. Také je využito aditivnosti kvadratického momentu a plocha průřezu je rozdělena do čtyř oblastí. Dvě velké kruhové úseče, od kterých jsou odečteny dvě menší kruhové úseče.

Převod do polárních souřadnic:

$$\begin{aligned} y &= r \cdot \sin \varphi & r &\in \left\langle \frac{t}{\sin \varphi}; R \right\rangle \\ z &= r \cdot \cos \varphi & \varphi &\in \langle \vartheta; \psi \rangle \\ J &= r \end{aligned}$$



Obrázek 30 Polární souřadnice

$$\begin{aligned}
 J_z &= \iint y^2 dy dz = \int_{\vartheta}^{\psi} \int_{\frac{t}{\sin \varphi}}^R r^2 \cdot \sin^2 \varphi \cdot r dr d\varphi = \int_{\vartheta}^{\psi} \left[\frac{r^4}{4} \right]_{\frac{t}{\sin \varphi}}^R \cdot \sin^2 \varphi d\varphi = \\
 &= \int_{\vartheta}^{\psi} \frac{R^4}{4} \cdot \sin^2 \varphi d\varphi - \int_{\vartheta}^{\psi} \frac{t^4}{4} \cdot \frac{1}{\sin^2 \varphi} d\varphi = \\
 &= \left[\frac{R^4}{4} \cdot \left(\frac{\varphi}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \varphi)}{4} \right) \right]_{\vartheta}^{\psi} + \left[\frac{t^4}{4} \cdot \cotg \varphi \right]_{\vartheta}^{\psi} \quad (6.42)
 \end{aligned}$$

Jednotlivé oblasti mají hranice integrálu (6.42) v tabulce 1

	t [mm]	R [mm]	ϑ [°]	ψ [°]
Oblast 1	10	16	38,7	141,3
Oblast 2	10	16	218,7	321,3
Oblast 3	10	11	65,4	114,6
Oblast 4	10	11	245,4	294,6

Tabulka 1 Hranice oblastí v polárních souřadnicích

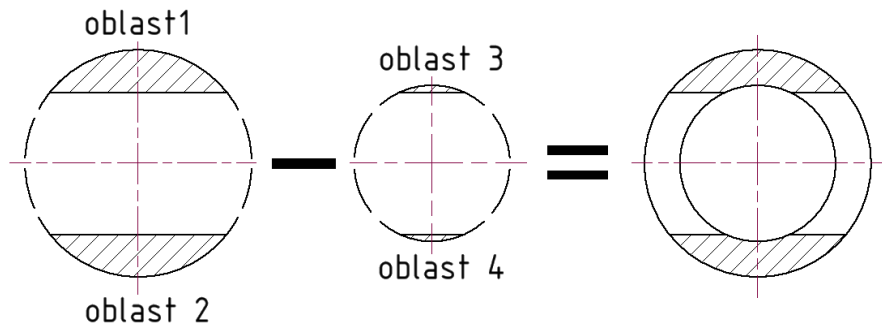
Kvadratický moment oblasti 1:

$$\begin{aligned}
 J_{z1} &= \frac{16^4}{4} \cdot \left(\frac{(141,3 - 38,7) \cdot \frac{\pi}{180}}{2} - \frac{\sin(2 \cdot 141,3) - \sin(2 \cdot 38,7)}{4} \right) + \frac{10^4}{4} \cdot (\cotg 141,3 - \cotg 38,7) \\
 J_{z1} &= 16\,423 \text{ mm}^4 \quad (6.43)
 \end{aligned}$$

Osově kvadratické momenty jednotlivých oblastí:

	$J_{zi} [mm^4]$
Oblast 1	$J_{z1} = 16\,423$
Oblast 2	$J_{z2} = 16\,423$
Oblast 3	$J_{z3} = 668$
Oblast 4	$J_{z4} = 668$

Tabulka 2 Osově kvadratické momenty jednotlivých oblastí



Obrázek 31 Výsledný osový kvadratický moment

Výsledný osový kvadratický moment se určí:

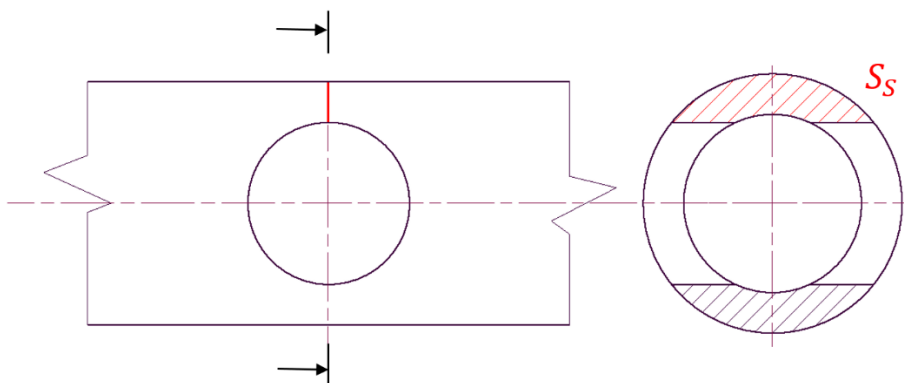
$$J_z = J_{z1} + J_{z2} - J_{z3} - J_{z4}$$

$$J_z = 16\,423 + 16\,423 - 668 - 668 = 31\,510 \text{ mm}^4 \quad (6.44)$$

V horní části trubky vznikne maximální normálové napětí od ohybu

$$\sigma_{omax} = \frac{M_{omax}}{J_o} \cdot \left(-\frac{D}{2}\right) = \frac{-70\,000}{31\,510} \cdot \left(-\frac{32}{2}\right) = 35,54 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}. \quad (6.45)$$

Od posouvající síly vznikne smykové napětí, které působí na ploše horní poloviny průřezu trubky $S_s = 98,22 \text{ mm}^2$



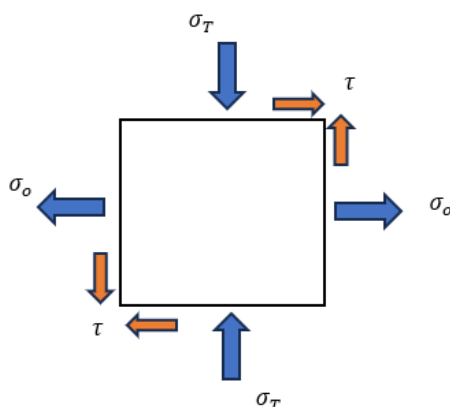
Obrázek 32 Smyková plocha

$$\tau = \frac{-F/2}{S_s} = \frac{-4\,000/2}{S_s} = -20,36 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}. \quad (6.46)$$

Uchycení třmenu v otvoru způsobuje tlakové namáhání v oblasti styku třmenu s trubicí, průměr otvoru pro třmen je označen písmenem h , D je vnější průměr trubky a d je vnitřní průměr trubky.

$$\sigma_T = \frac{F}{h \cdot (D - d)} = \frac{4\,000}{20 \cdot (32 - 22)} = 20 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}. \quad (6.47)$$

Tyto zatížení způsobují v rovině osy symetrie trubky rovinnou napjatost. Tu je potřebné převést na jednoosou napjatost, kterou lze porovnat s pevností materiálu. Nejdříve se pomocí Mohrovy kružnice převede působící napětí na hlavní napětí v hlavní rovině. To je rovina, ve které nepůsobí smykové napětí. Následně se pomocí hypotézy Maximálního smykového napětí vypočítá redukované napětí. Tato hypotéza je vybrána, protože více přihlíží k tomu, že působící smykové napětí je podobně velké jako normálové.



Obrázek 33 Element trubky

Střed Mohrovy kružnice:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_o - \sigma_T}{2} = \frac{35,54 - 20}{2} = 7,77 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (6.48)$$

Poloměr Mohrovy kružnice:

$$\sigma_r = \sqrt{\left(\frac{\sigma_o + \sigma_T}{2}\right)^2 + \tau^2} = \sqrt{\left(\frac{35,54 + 20}{2}\right)^2 + (-20,36)^2} = 34,43 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (6.49)$$

Hlavní napětí:

$$\sigma_{1,3} = \sigma_s \pm \sigma_r$$

$$\sigma_1 = \sigma_s + \sigma_r = 7,77 + 34,43 = 42,2 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (6.50)$$

$$\sigma_3 = \sigma_s - \sigma_r = 7,77 - 34,43 = -26,66 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (6.51)$$

Redukované napětí:

$$\sigma_{red} = \sigma_1 - \sigma_3 = 42,2 - (-26,66) = 68,86 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (6.52)$$

Bezpečnost se stanoví porovnáním meze kluzu použitého materiálu a vypočítaného redukovaného napětí

$$k_T = \frac{\sigma_k}{\sigma_{red}} = \frac{235}{68,86} = 3,41. \quad (6.53)$$

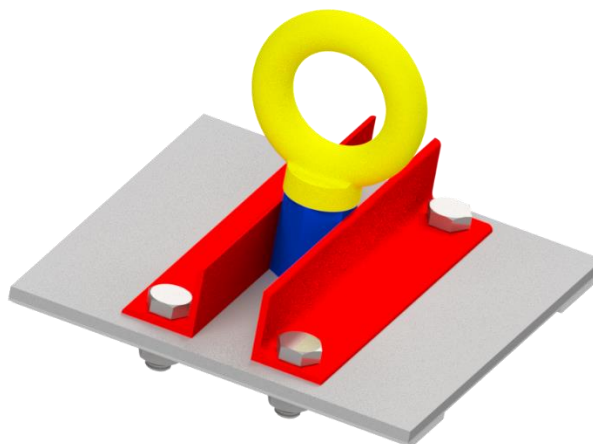
Tato velikost bezpečnosti zajišťuje, že k poškození ocelové trubky by došlo při působení více než trojnásobku zatěžovací síly F.

7 Návrh zkušebního přípravku

K ověření únosnosti tkaninového závěsu je potřebné navrhnout přípravek, na který se závěs přilepí a následně upne do trhačky, kde bude zatěžován. Přípravek je vytvořený z ocelového plechu, ke kterému je pomocí svarových spojů připevněn šestihran. Skrze šestihran je vytvořený závitový otvor, do kterého je přišroubováno tažné oko. Pomocí oka je přípravek uchycen do trhačky. Ke zvýšení celkové tuhosti přípravku jsou k ocelovému plechu přivařeny dva L profily.

Pro usnadnění a urychlení pevnostních zkoušek nejsou tkaninové závěsy lepeny přímo na ocelový plech, ale lepí se na hliníkový plech, který se ke zkušebnímu přípravku přišroubuje. Tím je možné rychle vyměnit zkoušené závěsy a také je ověřována pevnost tkaninového závěsu přilepeného na hliník, ze kterého jsou vyrobeny potahy letadel.

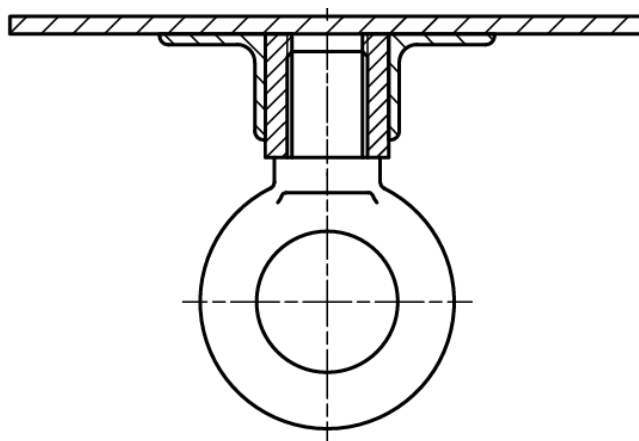
Hliníkový plech je uchycen pomocí čtyř šroubů. Díry pro šrouby jsou v přípravku průchozí a vedou skrze L profily. Pro lepší rozvedení tlaku ze šroubů na plech jsou použity ocelové příložky.



Obrázek 34 Model zkušebního přípravku

7.1 Výběr materiálů

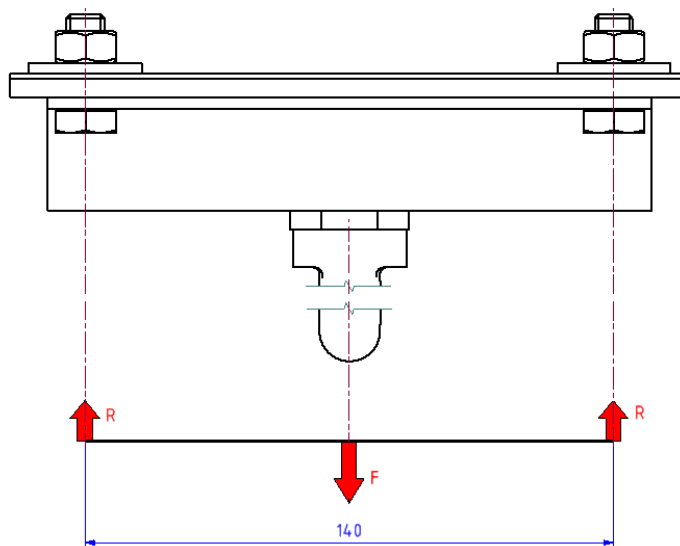
Ocelový plech má rozměry 180x170 mm a tloušťku 5 mm. Plocha plechu je zvolena tak, aby bylo dost prostoru pro všechny varianty závěsu a také pro ocelové příložky. Materiál je ocel S235. K plechu se připevní dva L profily pomocí svarových spojů. L profily mají rozměr 30x30x3 mm a délku 160 mm. Jsou také z oceli S235. Ocelový šestihran má rozměr mezi stěnami 25 mm a je dlouhý 35 mm. Jako příložky jsou použity dvě ocelové ploché tyče široké 30 mm, dlouhé 170 mm a tlusté 3 mm. K připevnění hliníkového plechu jsou použity čtyři šrouby M10 se šestihrannou hlavou a maticemi. Hliníkový plech má rozměry stejné jako ocelový plech a tloušťku 0,4 mm.



Obrázek 35 Řez zkušebním přípravkem

7.2 Zatížení přípravku

Přípravek přenáší zatížení z tažného oka do přilepeného tkaninového závěsu. Tažné oko je zatěžováno tahem a přes závit rozkládá zatížení do ocelového šestihranu. Dále přes svary do ocelového plechu. Zatížení ocelového plechu a L profilů se dá vyobrazit jako zatížení nosníku se dvěma rotačními podpěrami na okrajích. Přípravek je navržen na požadované zatížení přenášené závěsem $F = 4\,000\text{ N}$.



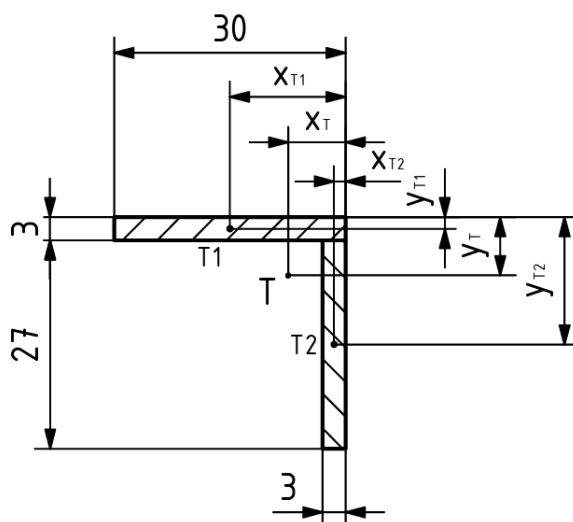
Obrázek 36 Nahrazení přípravku modelovým nosníkem

Síla F vyvolává v modelovém nosníku zatížení posouvající silou a ohybovým momentem. Při zatížení tkaninového závěsu dojde k průhybu hliníkového plechu. V plechu vznikne tahová síla S , která se pomocí třecí síly vyvolané šrouby přenesou do ocelového plechu a L profilů jako tlaková síla. Jelikož je hliníkový plech velmi tenký, není možné jeho průhyb vypočítat analyticky. Proto je nosník počítán bez zatížení silou S a toto zanedbání je kompenzováno vysokou úrovní bezpečnosti. Také je počítáno s tím, že šestihran nepřenáší ohybové zatížení.

7.2.1 Těžiště modelového nosníku

K vypočítání napětí způsobeného ohybem nosníku je potřebné znát polohu jeho těžiště. Ta se vypočítá pomocí statických momentů ploch průřezu. Průřez se rozdělí na menší plochy, u kterých lze polohu těžišť určit z jejich rozměrů.

7.2.1.1 Těžiště L profilu



Obrázek 37 Určení polohy těžiště L profilu

$x_{T1} = 15 \text{ mm}$	$x_{T2} = 1,5 \text{ mm}$
$y_{T1} = 1,5 \text{ mm}$	$y_{T2} = 16,5 \text{ mm}$
$S_1 = 30 \cdot 3 = 90 \text{ mm}^2$	$S_2 = 27 \cdot 3 = 81 \text{ mm}^2$
$S_L = S_1 + S_2 = 90 + 81 = 171 \text{ mm}^2$	

Tabulka 3 Polohy těžišť jednotlivých ploch L profilu

$$x_{TL} = y_{TL} = \frac{x_{T1} \cdot S_1 + x_{T2} \cdot S_2}{S_L} = \frac{15 \cdot 90 + 1,5 \cdot 81}{171} = 8,6 \text{ mm} \quad (7.1)$$

Ze symetrie vychází poloha y_{TL} stejná jako x_{TL} .

7.2.1.2 Těžiště Ocelového plechu

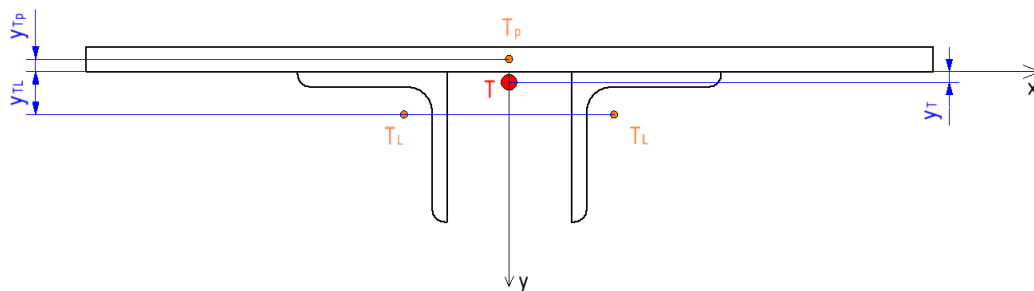
Těžiště ocelového plechu lze snadno určit z jeho geometrie.

$S_p = 5 \cdot 170 = 850 \text{ mm}^2$
$x_{Tp} = 0 \text{ mm}$
$y_{Tp} = -2,5 \text{ mm}$

Tabulka 4 Těžiště ocelového plechu

7.2.1.3 Poloha výsledného těžiště

Výsledné těžiště bude ležet na ose y , jelikož je průřez podél této osy symetrický. Je nutné počítat s dvojnásobkem plochy L profilu, protože jsou na přípravku dva tyto profily.



Obrázek 38 Výsledné těžiště přípravku

$$y_T = \frac{y_{Tp} \cdot S_p + y_{TL} \cdot S_L \cdot 2}{S_p + S_L \cdot 2} = \frac{-2,5 \cdot 850 + 8,6 \cdot 171 \cdot 2}{850 + 171 \cdot 2} = 0,68 \text{ mm} \approx 0,7 \text{ mm} \quad (7.2)$$

7.2.2 Průběh posouvající síly a ohybového momentu

Od zatěžující síly F vzniknou reakční síly R v podpěrách. Tyto síly jsou na obou stranách stejné, jelikož je zatěžující síla uprostřed nosníku. Velikost těchto sil se dopočítá z rovnice rovnováhy. Průběh posouvající síly a ohybového momentu je souměrný podél středu nosníku.

$$F - 2 \cdot R = 0 \quad (7.3)$$

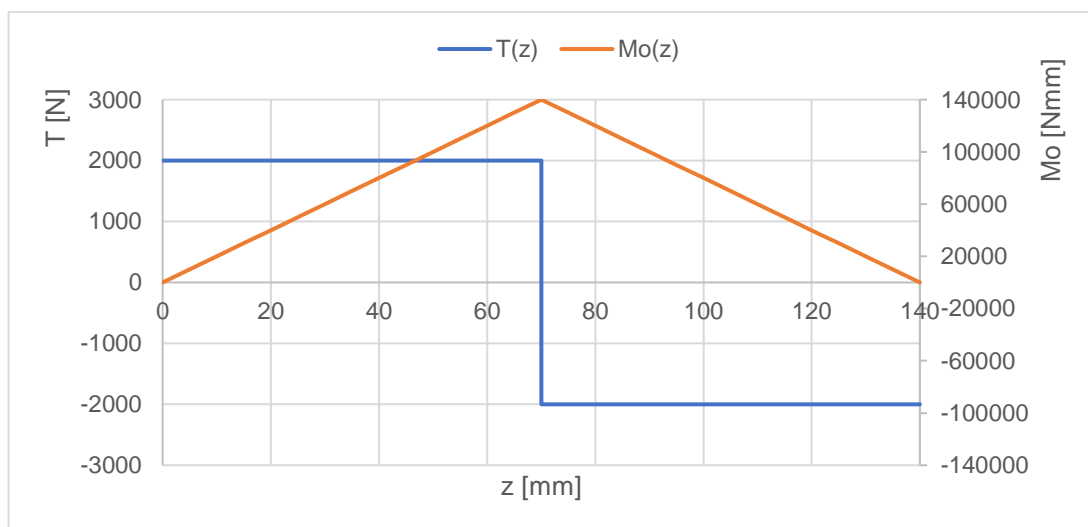
$$R = \frac{F}{2} = \frac{4\,000}{2} = 2\,000 \text{ N} \quad (7.4)$$

Průběh posouvající síly v polovině nosníku:

$$T(z) = R = 2\,000 \text{ N} \quad (7.5)$$

Průběh ohybového momentu v polovině nosníku:

$$M_o(z) = R \cdot z = 2\,000 \cdot z \quad (7.6)$$



Graf 2 Průběh posouvající síly a ohybového momentu zkušebním přípravkem

Maximální ohybový moment M_{oPmax} působí uprostřed nosníku $z_{Mmax} = 70 \text{ mm}$

$$M_{oPmax} = R \cdot z_{Mmax} = 2\,000 \cdot 70 = 140\,000 \text{ N} \cdot \text{mm}. \quad (7.7)$$

7.3 Pevnostní kontrola

V této kapitole je provedena pevnostní kontrola přípravku při působení maximálního ohybového momentu, svarového spoje šestihranu a ocelového plechu.

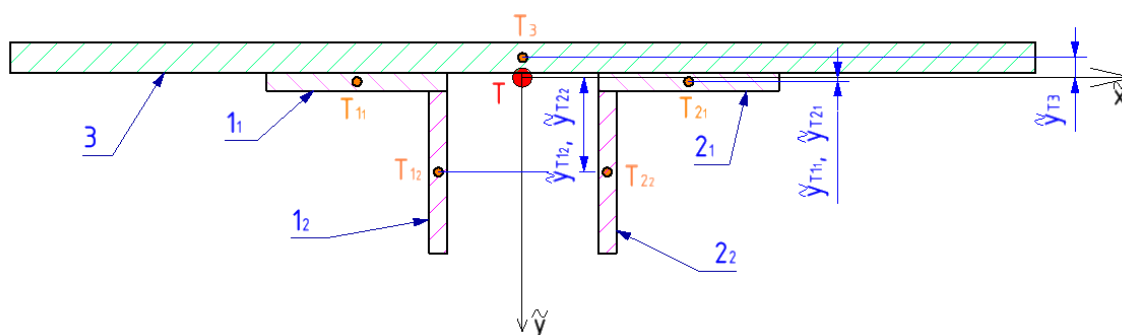
7.3.1 Ohyb přípravku

Přípravek je zatížen ohybovým momentem a posouvající silou. Toto zatížení převážně přenáší ocelový plech a L profily. K výpočtu napětí od ohybu je potřebné dopočítat osový kvadratický moment průřezu. Průřez se rozdělí na menší oblasti s obdélníkovou geometrií, u kterých lze vypočítat osový kvadratický moment podle vzorce

$$J_{xi} = \frac{b_i \cdot h_i^3}{12}. \quad (7.8)$$

Kde b – šířka obdélníku [mm]

h – výška obdélníku [mm]



Obrázek 39 Výsledný osový kvadratický moment

oblast	Šířka b_i [mm]	Výška h_i [mm]	Velikost plochy S_i [mm ²]	Vzdálenost od těžiště y_{Ti} [mm]	Osový kvadratický moment J_{xi} [mm ⁴]
1 ₁	30	3	90	0,8	67,5
1 ₂	3	27	81	15,8	4 920,75
2 ₁	30	3	90	0,8	67,5
2 ₂	3	27	81	15,8	4920,75
3	170	5	850	3,2	1 770,83

Tabulka 5 Osový kvadratické momenty jednotlivých ploch

Tyto jednotlivé kvadratické momenty se převedou na výsledný osový kvadratický moment pomocí Steinerovy věty

$$J_{\bar{x}} = \sum_i J_{xi} + \tilde{y}_{Ti}^2 \cdot S_i \quad (7.9)$$

J_{xi} –osové kvadratické momenty jednotlivých oblastí

\tilde{y}_{Ti} – vzdálenost těžiště oblasti k ose, ke které se počítá kvadratický moment $J_{\bar{x}}$

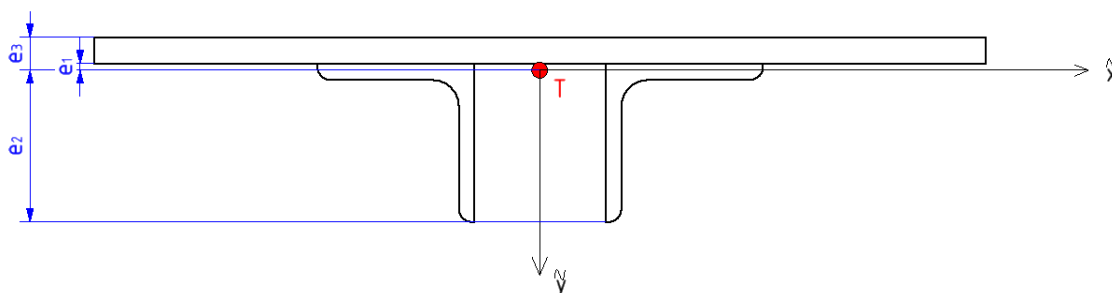
S_i – plocha oblasti

$$J_{\bar{x}} = 2 \cdot (67,5 + 0,8^2 \cdot 90) + 2 \cdot (4\,920,75 + 15,8^2 \cdot 81) + 1\,770,83 + 3,2^2 \cdot 850$$

$$J_{\bar{x}} = 61\,008 \text{ mm}^4 \quad (7.10)$$

Ohybové napětí je spočítáno při zatížení maximálním ohybovým momentem v rovině svarů, v dolní hraně L profilu a na povrchu ocelového plechu

$$\sigma_{oi} = \frac{M_{oPmax}}{J_{\bar{x}}} \cdot e_i = \frac{140\,000}{61\,008} \cdot e_i \quad (7.11)$$



Obrázek 40 Místa počítání napětí

e_i [mm]	σ_{oi} [N · mm ⁻²]
0,7	1,6
29,3	67
-5,3	-12,2

Tabulka 6 Velikosti napětí ve vybraných místech

Maximální napětí od ohybového momentu σ_{o2} působí tahem na spodní hraně L profilů. Reálné napětí je v tomto místě menší, protože není započítána tlaková síla S. Svary mezi L profily a plechem přenáší zatížení σ_{o1} . Jelikož je toto zatížení velmi malé, není potřebné počítat únosnost těchto svarů.

Smykové napětí od posouvající síly:

$$\tau_s = \frac{R}{S_p + 2 \cdot S_L} = \frac{2\,000}{850 + 2 \cdot 171} = 1,68 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (7.12)$$

Výsledné redukované napětí se vypočítá pomocí pevnostní hypotézy HMM

$$\sigma_{red} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_x^2 + \tau_y^2 + \tau_z^2)}. \quad (7.13)$$

V tomto případě

$$\sigma_x = \sigma_{o2}$$

$$\tau_y = \tau_s.$$

Dosazením se výpočet redukovaného napětí zjednoduší na

$$\sigma_{redP} = \sqrt{(\sigma_{o2})^2 + 3 \cdot \tau_s^2} = \sqrt{(67)^2 + 3 \cdot 1,68^2} = 67,06 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}. \quad (7.14)$$

Bezpečnost přípravku:

$$k_{přip} = \frac{235}{\sigma_{redP}} = \frac{235}{67,06} = 3,5 \quad (7.15)$$

7.3.2 Svar plech – šestihran

Svarový spoj je proveden pomocí dvou koutových svarů. Svary jsou zatíženy tahovou silou $F = 4\,000 \text{ N}$. Plocha koutového svaru přenášející zatížení udává délka a tloušťka svaru. Délka svaru l je rovna 30 mm . Tloušťka je určena jako

$$a = 0,7 \cdot t = 0,7 \cdot 5 = 3,5 \text{ mm}. \quad (7.16)$$

a – tloušťka svaru

t – minimální tloušťka svařovaného materiálu

K výpočtu velikosti napětí se používají součinitele anizotropie. Ty přihlížejí k nesourodosti materiálu a k metodě svařování, čímž zvyšují vypočítané působící napětí. Pro velikost koutových svarů $a \leq 7 \text{ mm}$ se také počítá se součinitelem β , který má zlepšující charakter z hlediska únosnosti svaru.

$$\beta = 1,3 - 0,043 \cdot a = 1,3 - 0,043 \cdot 3,5 = 1,1495 \quad (7.17)$$

Výsledné napětí ve svaru se určí:

$$\tau_V = \sqrt{\left(\frac{\tau_{\perp}}{\alpha_{\perp} \cdot \beta}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{\parallel}}{\alpha_{\parallel} \cdot \beta}\right)^2} \quad (7.18)$$

τ_{\perp} - napětí působící v kolmém směru na osu svaru

τ_{\parallel} - napětí působící v rovnoběžném směru s osou svaru

α_{\perp} - součinitel anizotropie v kolmém směru, pro tento případ $\alpha_{\perp} = 0,75$ [32]

α_{\parallel} - součinitel anizotropie v rovnoběžném směru, pro tento případ $\alpha_{\parallel} = 0,65$ [32]

β – součinitel tloušťky svaru

Napětí τ_V lze rovnou porovnat s napětím meze kluzu daného materiálu. V tomto případě působí tahové napětí od síly F v kolmém směru na osu svaru

$$\tau_{\perp} = \frac{F}{2 \cdot a \cdot l} = \frac{4\,000}{2 \cdot 3,5 \cdot 30} = 26,67 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}. \quad (7.19)$$

Dosazením do vzorce (7.18) se dopočítá výsledné napětí ve svaru

$$\tau_V = \sqrt{\left(\frac{26,67}{0,75 \cdot 1,1495}\right)^2} = 30,94 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}. \quad (7.20)$$

Bezpečnost svaru:

$$k_s = \frac{235}{\tau_V} = \frac{235}{30,94} = 7,6 \quad (7.21)$$

8 Experimentální ověření únosnosti závěsu

Výsledné zatížení, které jsou schopné jednotlivé varianty tkaninových závěsů přenést, je zjištěno experimentálně. Všechny vzorky jsou lepeny na hliníkový plech, který se přišroubuje ke zkušebnímu přípravku a jsou zatěžovány do jejich porušení. Během zkoušení dochází k prohýbání hliníkového plechu a tím se mění rozložení sil v jednotlivých částech závěsu. Tím může dojít k přetížení v některých částech, aniž by bylo dosaženo vypočtených pevnostních hodnot. Skutečné křídlo, na které se závěsy navrhují, není dokonale rovné a je tak možné průhyb hliníkového plechu během zkoušek považovat za zakřivení křídla. Pro zavedení zatížení nebyla použita trubka z návrhu v kapitole 6.5.5, ale byla použita ocelová tyč se stejným vnějším průměrem.

8.1 Lepení závěsů

Nejdříve je nutné připravit hliníkové plechy. Jejich povrch musí být čistý a zdrsňený. K prvotnímu očištění je použit aceton, následuje zdrsňení pomocí brusného papíru s drsností 240. Pak je povrch znovu odmaštěn izopropylalkoholem.

K lepení jsou použita kontaktní lepidla. Ta se nanášejí na oba lepené povrchy a před přiložením závěsu k plechu se nechává lepidlo lehce zaschnout. To trvá přibližně 10 až 15 minut, záleží na druhu a tloušťce lepidla. Jelikož je lněná tkanina savá, je nutné na ni nanést více vrstev. Na každý tkaninový závěs byly nanесeny dvě vrstvy. Po každé nanesené vrstvě je necháno lepidlo zaschnout.

Po zaschnutí se obě lepené části k sobě přitlačí. Na velikosti přitlačné síly závisí výsledná pevnost lepeného spoje. K přitlačování je vhodné použít přitlačovací váleček.

Doba schnutí závisí na druhu lepidla. Vzorky lepené chemoprenovým lepidlem od Pattexu byly nechány schnout v rozmezí jednoho až pěti dnů. Při době schnutí jednoho dne nebylo lepidlo plně zaschlé. Při lepení kontaktním lepidlem od 3M je udávaná doba schnutí 3 týdny pro dosažení pevnosti $3,7 \text{ Nmm}^{-2}$.

8.2 Urychlení schnutí lepidla

U neoprenového lepidla od 3M je udávaná pevnost ve smyku $3,12 \text{ Nmm}^{-2}$ při době schnutí 2 týdny při pokojové teplotě, nebo $3,7 \text{ Nmm}^{-2}$ po 3 týdnech schnutí. Během zkoušení tkaninových závěsů by nebylo vhodné čekat dva až tři týdny než vzorky uschnou. Proto byly přilepené závěsy umísťovány do sušičky se zvýšenou teplotou na $36 \text{ }^\circ\text{C}$ a byly zde ponechány po dobu lehce delší než jeden týden.

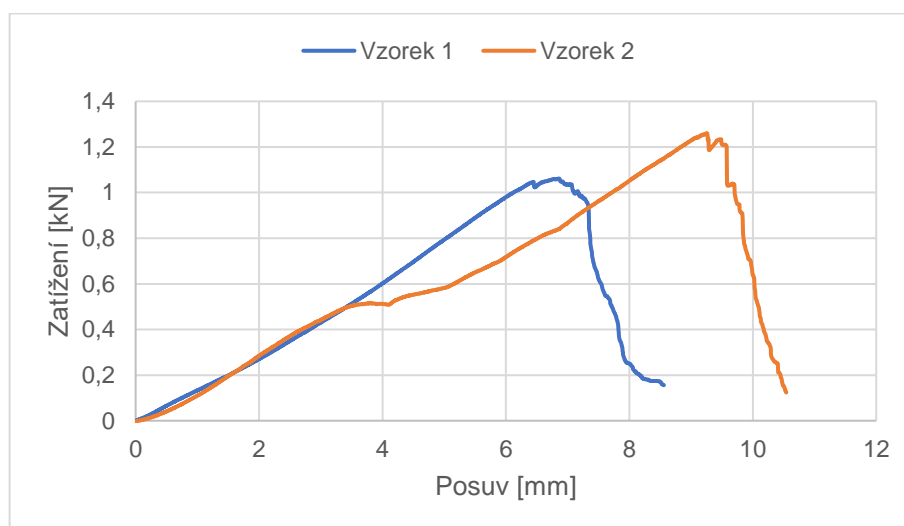


Obrázek 41 Vzorek zkoušky lepidla



Obrázek 42 Porušený vzorek

Pevnost lepidla při těchto podmínkách schnutí byla ověřena pomocí malých vzorků lněné tkaniny přilepené na hliníkový plech. Byly vyzkoušeny dva vzorky široké 30 mm a délka lepeného spoje byla 11 mm a 14 mm. U obou vzorků došlo k přetržení lněné tkaniny. Lepený spoj nebyl porušen. Dosažené pevnosti se pohybovaly blízko pevnosti lepidla ve smyku $3,12 \text{ Nmm}^{-2}$. Tím bylo ověřeno, že je možné urychlit schnutí přilepených tkaninových závěsů.



Graf 3 Zatěžování vzorků lepidel

Vzorek	Lepená plocha [mm ²]	Doba schnutí	Teplota schnutí [°C]	Dosažené zatížení [N]	Pevnost ve smyku [Nmm ⁻²]
1	330	8 dní	36	1062	3,22
2	420	8 dní	36	1260	3

Tabulka 7 Výsledky vzorků lepidel

8.3 Varianta I

Jelikož se jedná o variantu, ve které je zatěžující síla rozložena do nejmenší plochy, byly dosaženy nejnižší hodnoty pevností. Nejdříve bylo použito lepidlo Chemopren Extrém, se kterým ve všech případech došlo k odlepení závěsu od hliníkového plechu. Dosažované hodnoty pevností se pohybovaly v rozmezí 450 – 1 600 N.

Závěs byl pro lepší opakovatelnost výroby nechán ušít na stroji, kde byla nesprávně použita nit Synton 30 místo navržené TYTAN 15. Pevnost nití Synton 30 je podobná nitím TYTAN 30. Tato nižší pevnost se projevila u vzorků lepených lepidlem od 3M, kdy nedošlo k odlepení základny od plechu, ale došlo k přetržení švů. Vzorek 01-07 byl ušit ručně nití TYTAN 15, aby byl ověřen návrh v kapitole 6.5.2. Závěsy byly nechány schnout za zvýšené teploty pro urychlení schnutí lepidla.



Obrázek 43 Zatěžování varianty I

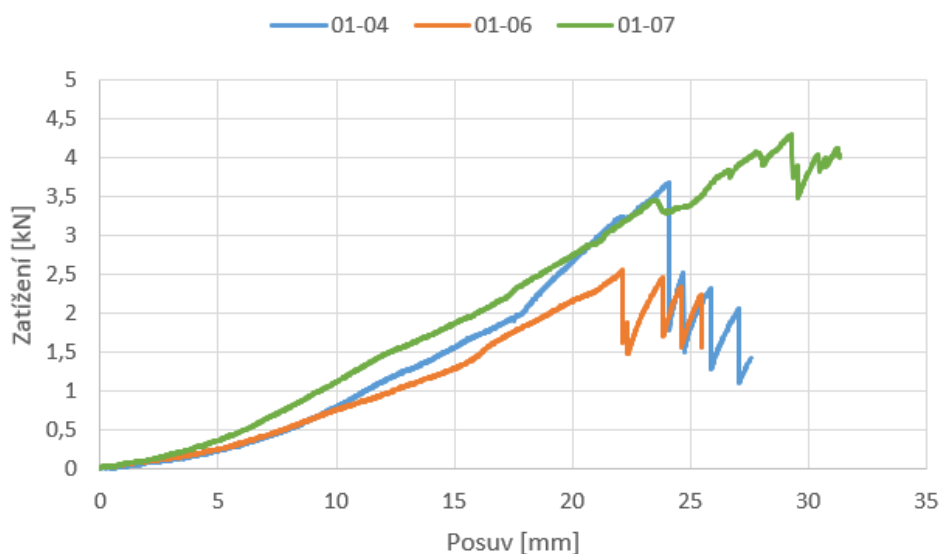
U vzorku 01–02 s dosaženou pevností 450 N se nasáklo lepidlo kolem švů v takové míře, že nastal suchý spoj a v tomto místě došlo k odlepení závěsu.



Obrázek 44 Suchý spoj kolem spodních švů

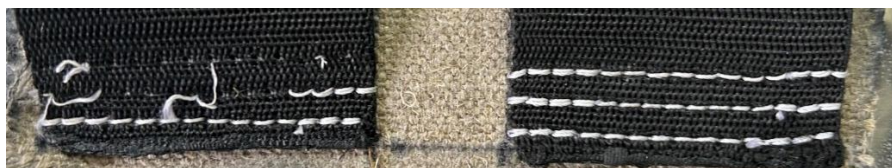
Číslo zkoušky	Lepidlo	Nit'	Způsob šití	Doba schnutí	Teplota schnutí	Pevnost	Způsob porušení
01-00	Pattex Extrém	Synton 30	strojně	1 den	Pokožová	800 N	Odlepení
01-01	Pattex Extrém	Synton 30	strojně	5 dní	Pokožová	1 600 N	Odlepení
01-02	Pattex Extrém	Synton 30	strojně	5 dní	Pokožová	450 N	Odlepení
01-03	Pattex Extrém	Synton 30	strojně	4 dny	Pokožová	1 500 N	Odlepení
01-04	3M 1357	Synton 30	strojně	11 dní	36 °C	3 686 N	Šev
01-05	3M 1357	Synton 30	strojně	11 dní	36 °C	3 730 N	Šev
01-06	3M 1357	Synton 30	strojně	11 dní	36 °C	2 564 N	Šev
01-07	3M 1357	TYTAN 15	ručně	9 dní	36 °C	4 293 N	Základna

Tabulka 8 Výsledky varianty I

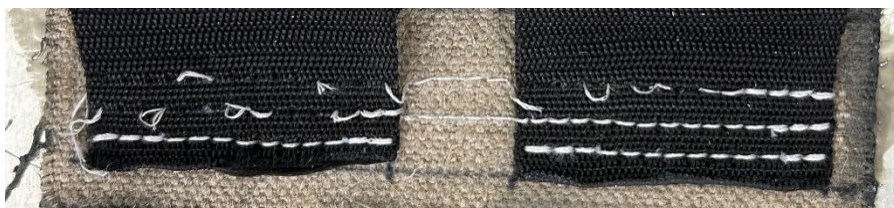


Graf 4 zatěžování varianty I

U vzorků 01-04 až 01-06 došlo k přetržení švů. Vyšší pevnost vzorků 01-04 a 01-05 oproti vzorku 01-06 je vysvětlena tím, že řádky švů mezi základnou a popruhem jsou šity jednotlivě. Tím je každý řádek švů na okrajích zapošíť, a tak je dosaženo vyšší hustoty stehu. Zatímco u vzorku 01-06 jsou švy vedeny přes celou základnu.

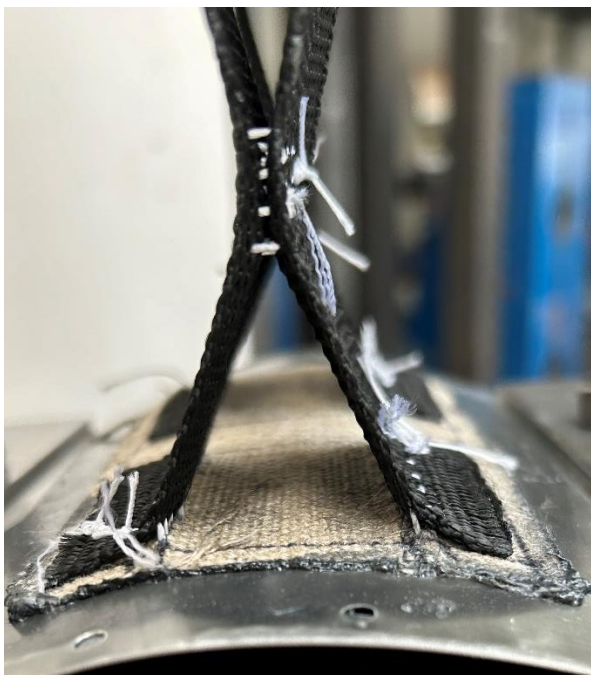


Obrázek 45 Způsob šití popruhů k základně u vzorků 01-04 a 01-05



Obrázek 46 Způsob šití popruhů k základně u vzorku 01-06

U ručně šitého vzorku 01-07 došlo k vytržení švů z lněné základny.



Obrázek 47 Zatěžování vzorku 01-07

Tím, že došlo k přetržení lněné tkaniny, lze předpokládat, že kdyby byla tato varianta šita strojně nití TYTAN 15, tak by také docházelo k přetržení základny při velmi podobné hodnotě zatížení. Proto je výsledná bezpečnost varianty I počítána z únosnosti vzorku 01-07

$$k_{vI} = \frac{4\,293}{4\,000} = 1,07. \quad (8.1)$$

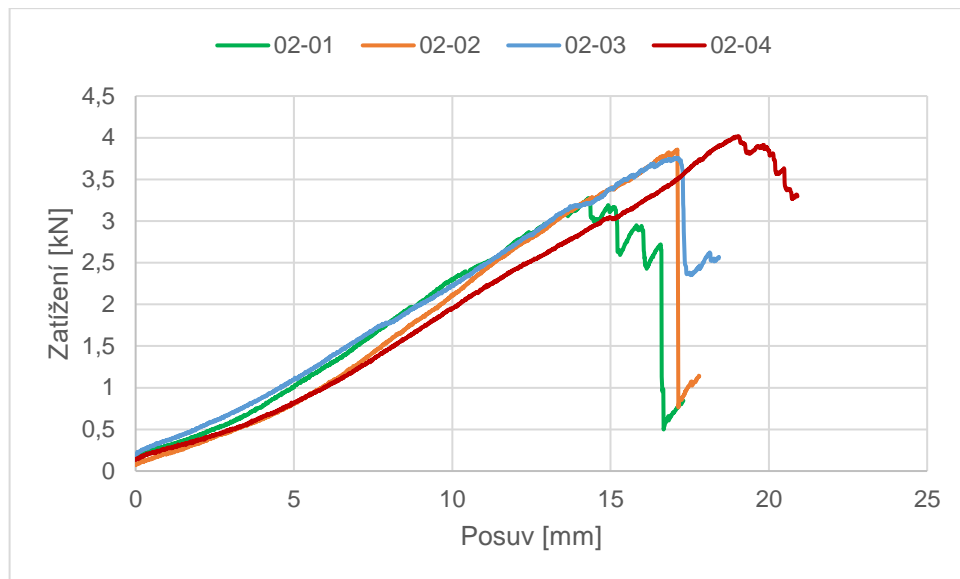
8.4 Varianta II

U této varianty bylo očekáváno, že bude schopna přenést větší zatížení než varianta I. K lepení vzorků bylo použito jen lepidlo 1357 Scotch-Weld. Chemopren Extrém se při lepení první varianty ukázal jako nedostačující, proto už není dále použit. Všechny vzorky byly opět nechány schnout v sušičce za zvýšené teploty.

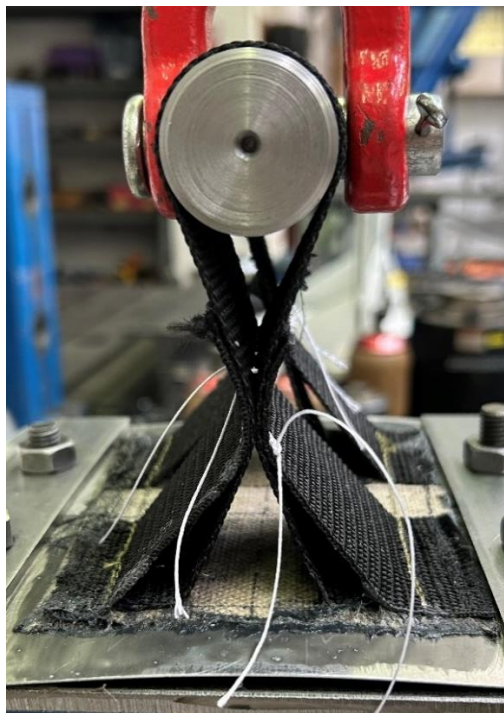
Závěsy byly šity strojně. Při šití byla jako horní niť použita niť TYTAN 30, jako spodní byla nesprávně použita niť Synton 30. Použití této nitě není tak velký problém jako u varianty I, jelikož má podobnou pevnost jako nit TYTAN 30. Švy byly vedeny vždy přes celou základnu z jednoho popruhu do druhé jako u vzorku 01-06.

Číslo vzorku	Lepidlo	Niť	Způsob šití	Doba schnutí	Teplota schnutí	Pevnost	Způsob porušení
02-01	3M 1357	Synton 30	strojně	9 dní	36 °C	3 276 N	Šev
02-02	3M 1357	Synton 30	strojně	9 dní	36 °C	3 858 N	Šev
02-03	3M 1357	Synton 30	strojně	9 dní	36 °C	3 757 N	Šev
02-04	3M 1357	Synton 30	strojně	9 dní	36 °C	4 017 N	Šev

Tabulka 9 Výsledky varianty II



Graf 5 Zatěžování varianty II



Obrázek 48 Vzorek 02-03

U všech závěsů došlo k přetržení nití Synton 30. To ukazuje, že nitě TYTAN 30 jsou pevnější. Průměrná pevnost této varianty je

$$\bar{F}_{II} = 3\,727\text{ N.} \quad (8.2)$$

Bezpečnost této varianty je

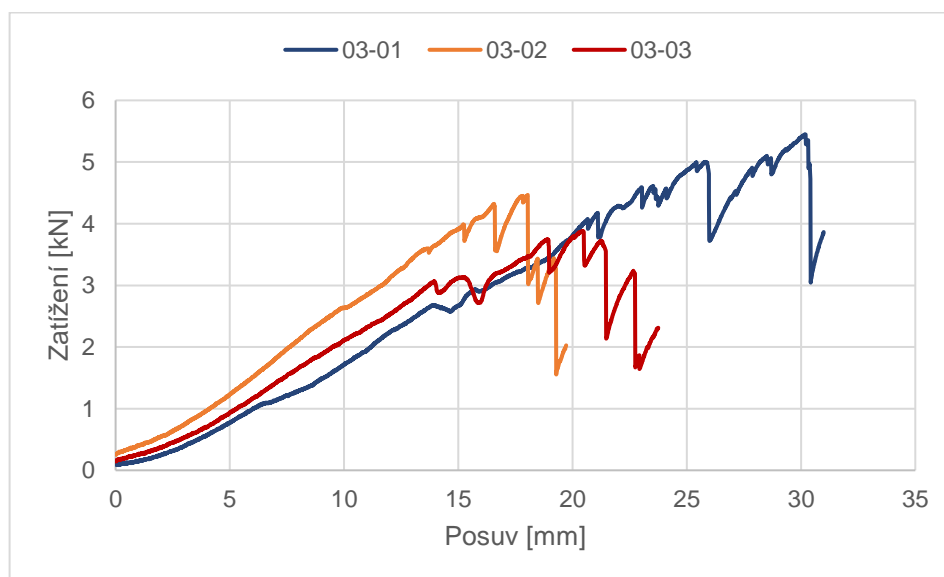
$$k_{vII} = \frac{3\,727}{4\,000} = 0,93. \quad (8.3)$$

8.5 Varianta III

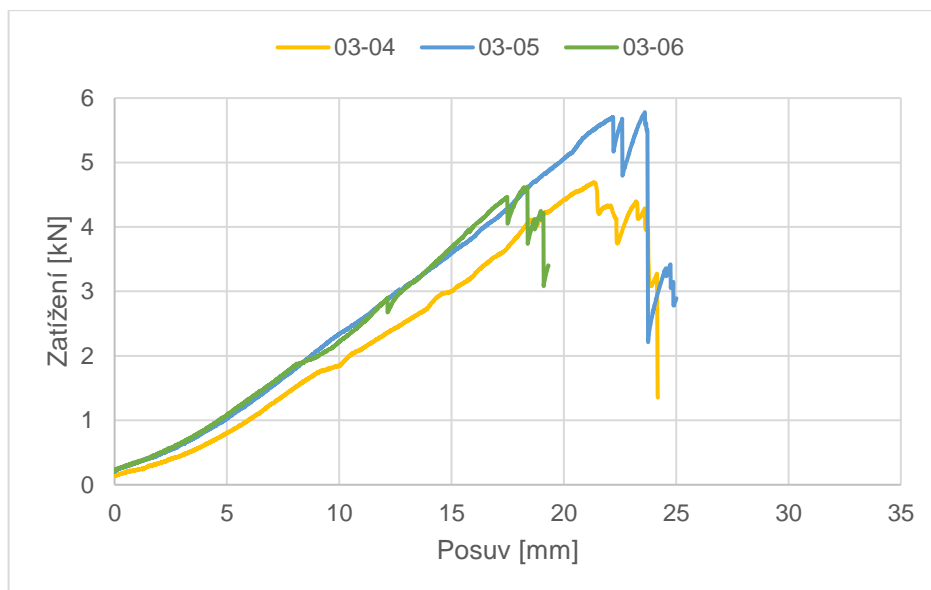
Tato varianta je navržena jako nejunosnější ze všech tří, což také bylo dokázáno během experimentu. Všechny vzorky byly lepeny lepidlem od 3M a šity nití TYTAN 30. Jeden vzorek byl ušit ručně zbylé strojně. Úskalím této varianty je přesnost výroby. Při zatěžování je nutné, aby zabíraly všechny části. Některé vzorky byly přišity tak, že v rozvětvení mezi středovou lněnou tkaninou a popruhem nedošlo k takovému silovému rozložení, jaké bylo popsáno v návrhu a většinu zatížení přenášel popruh. Z určité části k tomu také přispělo prohnutí hliníkového plechu. Toto přetížení popruhu vedlo ve většině případů k porušení švu mezi popruhem a základnou nebo přetržení lněné základny ve švu. Pro porovnání byl ručně ušit nití TYTAN 30 jeden vzorek s přesnou geometrií.

Číslo vzorku	Lepidlo	Nit'	Způsob šití	Doba schnutí	Teplota schnutí	Pevnost	Způsob porušení
03-01	3M 1357	TYTAN 30	ručně	9 dní	36 °C	5 451 N	Šev, základna
03-02	3M 1357	TYTAN 30	strojně	9 dní	36 °C	4 467 N	Šev
03-03	3M 1357	TYTAN 30	strojně	9 dní	36 °C	3 883 N	Odlepení
03-04	3M 1357	TYTAN 30	strojně	9 dní	36 °C	4 691 N	Odlepení
03-05	3M 1357	TYTAN 30	strojně	9 dní	36 °C	5 780 N	Šev
03-06	3M 1357	TYTAN 30	strojně	9 dní	36 °C	4 627 N	Šev

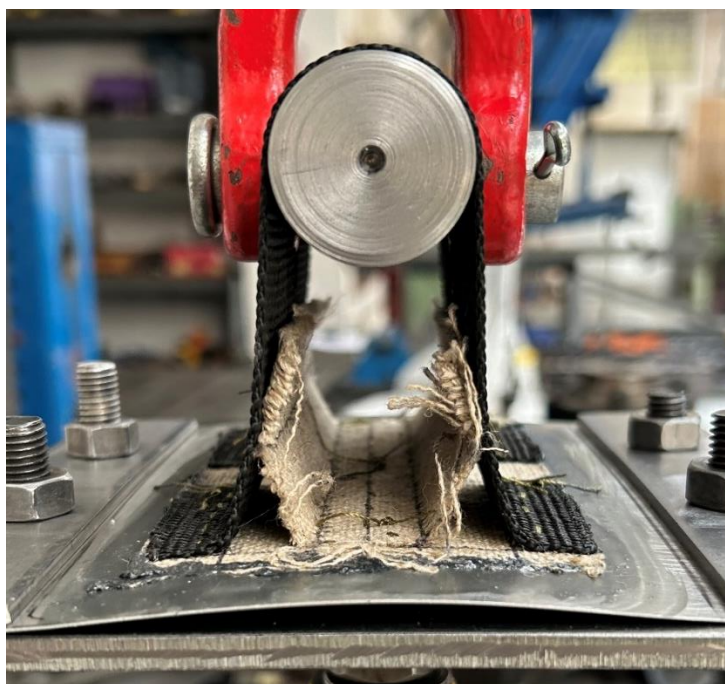
Tabulka 10 Výsledky varianty III



Graf 6 Zatěžování varianty III



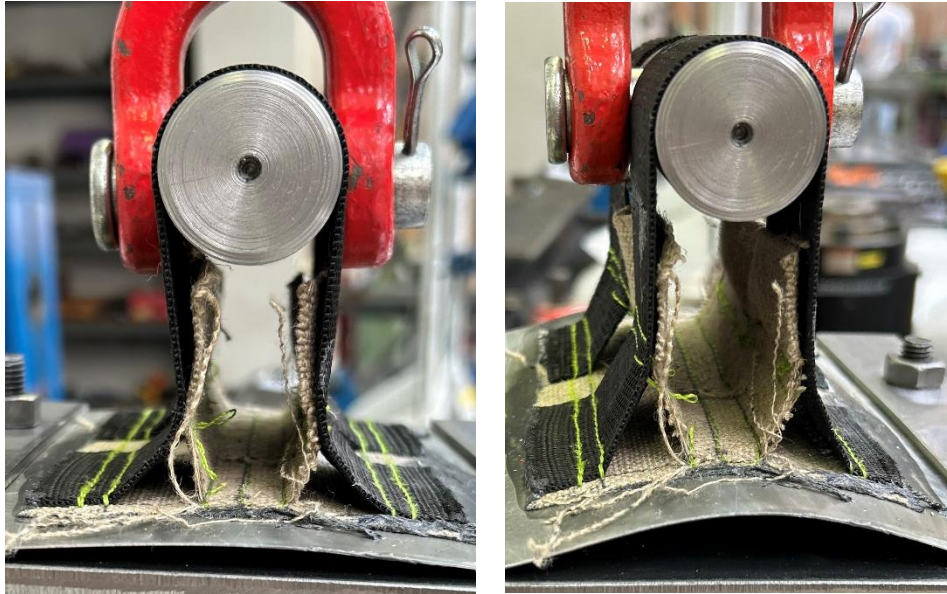
Graf 7 Zatěžování varianty III



Obrázek 49 Zatěžování vzorku 03-01

Vzorek 03-01 šitý ručně dosáhl druhé nejvyšší hodnoty pevnosti. Je to dané tím, že jeho geometrie se přesně podobala návrhu. K určitému snížení pevnosti došlo prohnutím plechu a větším zatížením švů mezi základnou a popruhem.

U vzorku 03-05 byla středová lněná část přišita k popruhu křivě takovým způsobem, že při pronutí hliníkového plechu došlo k podobnému rozložení zatížení jako v návrhu, a tím bylo dosaženo nejvyšší pevnosti ze všech zkoušených vzorků. Vzorek 03-02 byl ušit tak, že docházelo k velmi výraznějšímu přetížení polypropylenového popruhu a následně došlo k přetržení lněné tkaniny. Použití nití TYTAN 30 se tímto ukázalo jako hraniční, v některých případech došlo k jejich přetržení a jindy zas k roztržení lněné tkaniny.



Obrázek 50 Závěs 03-05 před zatížením (vlevo) a během zatížení (vpravo)



Obrázek 51 Závěs 03-02, v levé části lze vidět větší přetížení popruhu

U vzorků 03-03 a 03-04 došlo k odlepení základny od plechu. Toto odlepení bylo s největší pravděpodobností způsobeno nedostatečným očištěním plechu před lepením nebo slabým přitlačením závěsu k plechu po nalepení.

Jako u jediné ze všech zkoušených variant došlo k porušení švů ve středové části u vzorku 03-06. Už před zkouškou bylo patrné, že jsou řádky švů volné a dále po začátku zatěžování došlo k jejich úplnému uvolnění.

Průměrná hodnota zatížení přeneseného touto variantou je

$$\bar{F}_{III} = 4\,817\text{ N.} \quad (8.4)$$

Bezpečnost této varianty je

$$k_{vIII} = \frac{4\,817}{4\,000} = 1,2. \quad (8.5)$$

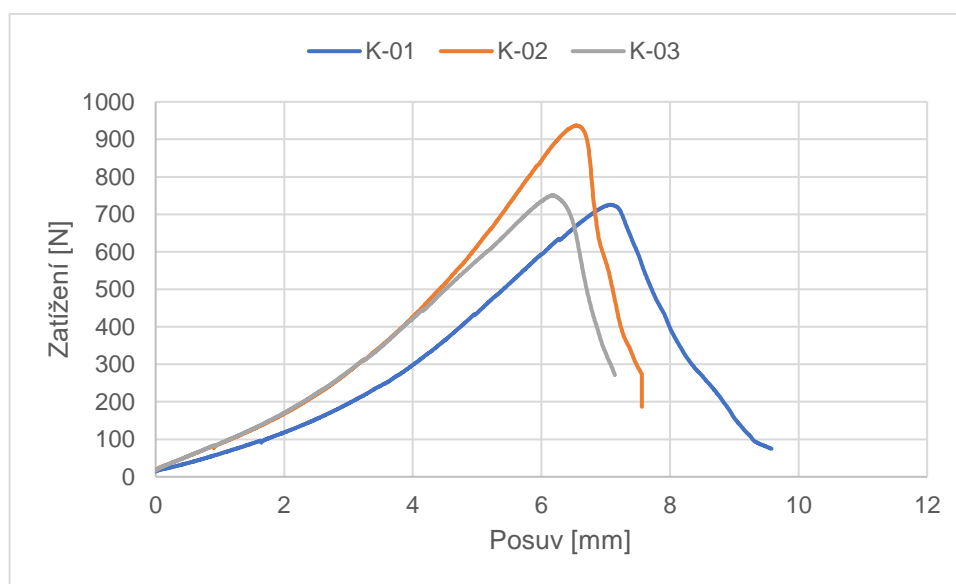
Všechny řádky švů byly z důvodu zjednodušení výroby vedeny z jednoho popruhu do druhého jako u vzorku 01-06. Z geometrie varianty III pak vychází, že by hodnota únosnosti měla být přibližně dvojnásobkem únosnosti vzorku 01-06. Tomu odpovídá průměrná pevnost varianty III \bar{F}_{III} .

8.6 Zkouška lepidla na kompozitních vzorcích

Je vhodné, aby bylo možné použít závěsy na kovové i kompozitní křídla. Pevnost závěsů byla zkoušena na hliníkovém podkladu. K vyzkoušení únosnosti lepidla 1357 Scotch-Weld na kompozitech byly vytvořeny tři vzorky lněné tkaniny přilepené na kompozitní materiál složený ze skelných vláken a epoxidové pryskyřice. Vzorky byly nechány schnout 10 dní při teplotě 36°C. Rozměry vzorků byly obdobné použitým v kapitole 8.2, šířka byla 30 mm a lepená výška se pohybovala okolo 10 mm.

Vzorek	Lepená plocha [mm ²]	Doba schnutí	Teplota schnutí [°C]	Dosažené zatížení [N]	Pevnost ve smyku [Nmm ⁻²]
K-01	270	10 dní	36	726	2,69
K-02	312	10 dní	36	937	3,00
K-03	315	10 dní	36	751	2,38

Tabulka 11 Pevnosti lepidla na kompozitních vzorcích



Graf 8 Zatěžování kompozitních vzorků

U všech tří zkoušených vzorků došlo k odlepení tkaniny od kompozitu. Ani u jednoho ze vzorků nebylo dosaženo pevnosti lepidla 3,12 Nmm⁻². Při lepení na hliníkový plech v kapitole 8.2 nedošlo k porušení lepeného spoje, ale k přetržení tkaniny. Z toho vyplývá, že při lepení na kompozit je únosnost lepeného spoje nižší než na plech a bylo by vhodné vyzkoušet pevnost tkaninových závěsů na kompozitním podkladu. Je možné, že pevnost závěsů bude stejná jako u hliníkového podkladu, protože vždy u nejvyšších dosažených zatížení došlo k přetržení švů nebo základny.

8.7 Zhodnocení experimentu

Z provedených pevnostních zkoušek závěsů je patrné, že nebylo dosaženo navržené úrovně bezpečnosti 2 při zatížení silou 4 000 N. Nejdříve docházelo k odlepení základny od podkladu při použití lepidla Chemopren Extrém. To bylo vyřešeno použitím pevnějšího lepidla od 3M. Následně došlo k porušení švů nebo při větším zatížení k přetržení základny.

K určitému odchýlení od návrhových výpočtů nejspíše došlo tím, že závěsy byly lepeny na hliníkový plech, který se během zatěžování prohýbal. Tím měnil silové rozložení v závěsu a přetěžoval nebo odlehčoval nosné části. Křídlo, na které by byl závěs nalepený také není dokonale rovné, a proto je toto snížení pevnosti nerovností podkladu z hlediska bezpečnosti do určité míry přijatelné.

Další částí, kterou je nutné zhodnotit je náročnost výroby. Závěsy první varianty jsou nejjednodušší ze všech tří, čímž je jejich výroba snazší. Také jsou mnohem méně citlivé na přesnost výroby. U variant II a III je nutné dodržet rozměrové přesnosti, aby došlo ke správnému rozložení zatížení a tím dosaženo co nejvyšší únosnosti. To značně komplikuje jejich výrobu a také je většinou uděláno více chyb při šití, protože je nutné sešít více částí.

U varianty I nebyly zkoušky plně odpovídající návrhu. To bylo způsobeno použitím nití s nižší pevností a tím bylo dosaženo nižší únosnosti. U ručně šitého vzorku bylo dosaženo maximální pevnosti Iněné základny. Z toho lze předpokládat, že by i u strojem šitých vzorků nedocházelo k porušení švů, ale k přetržení základny, a tím by nemusel být tak velký rozptyl výsledných pevností.

Varianta II nebyla schopna přenést ani požadované zatížení 4 000 N. Její bezpečnost je 0,93. Tím, že obtížnost její výroby je podobná variantě III a dosažené zatížení bylo menší, není další použití této varianty vhodné. Zvýšení pevnosti by výrazně pomohlo použití pevnějších nití.

Nejvyšší dosažené průměrné pevnosti bylo dosaženo variantou III a to 4 817 N, maximální pevnost této varianty byla 5 780 N a minimální 3 883 N. Tento poměrně velký rozptyl hodnot je způsobený tím, že u dvou nejnižších hodnot pevností nedošlo k porušení závěsu, ale došlo k jeho odlepení zapříčiněného špatným přilepením.

9 Návrh úprav

K dosažení navrhované bezpečnosti 2 je potřebné navrhnout určité úpravy závěsů.

9.1 Volba pevnějších materiálů

Z hlediska volby materiálů je možná úprava jen v použitých nitích. Nejvhodnější a nejbezpečnější by bylo používat ve všech švech nitě TYTAN 15. Tím by bylo dosaženo určitého předimenzování, ale byla by jistota, že švy dokážou přenést větší zatížení než je pevnost lněné základny, jak bylo zjištěno u varianty I.

Polypropylenové popruhy dokázaly přenést zatížení ve všech případech a jejich udávaná pevnost převyšuje navrhované zatížení. Případně by bylo možné použít jeden popruh široký přes celou základnu a uprostřed vystříhnout otvor pro zatěžující třmen. Tím by byla zjednodušena výroba.

Neoprenové lepidlo 1357 Scotch-Weld je také pevnostně dostačující.

Vhodné by bylo použití pevnějšího materiálu pro základnu. Lněná tkanina použitá u všech vzorků byla nejpevnější z nabízených přírodních tkanin vhodných k lepení. Tím je volba lepšího materiálu značně omezena.

9.2 Zvětšení závěsu

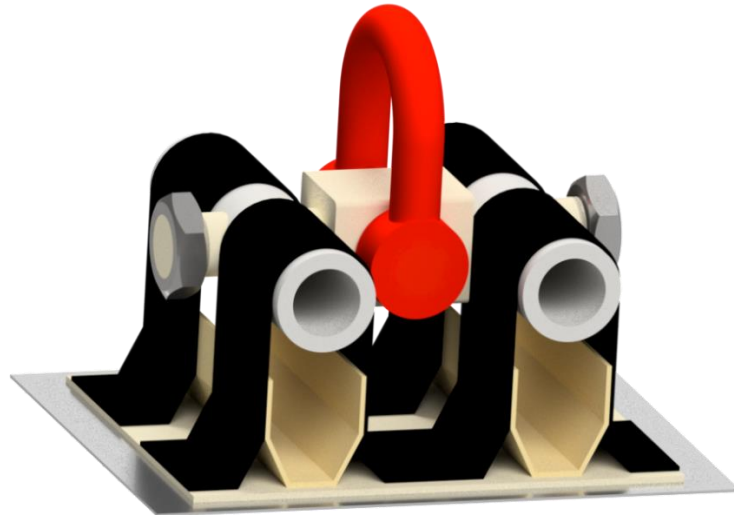
Možností zvýšení únosnosti je zvětšení závěsu. Tím by bylo dosaženo delších švů mezi popruhy a základnou a rozložení zatěžující síly do větší plochy. Za předpokladu, že by prodlužování švů lineárně zvyšovalo únosnost, musela by být délka závěsu u první varianty alespoň dvojnásobná a také by musely být použity nitě TYTAN 15.

U varianty III by měly být jednotlivé popruhy široké alespoň 85 mm místo použitých 50 mm. Při delších švech by došlo také ke zvýšení obtížnosti šití, a to by mohlo vést k více vadám.

Pro použití větších závěsů by bylo nutné navrhnout delší trubku pro zavedení zatížení.

9.3 Použití více závěsů v jedné lokalitě

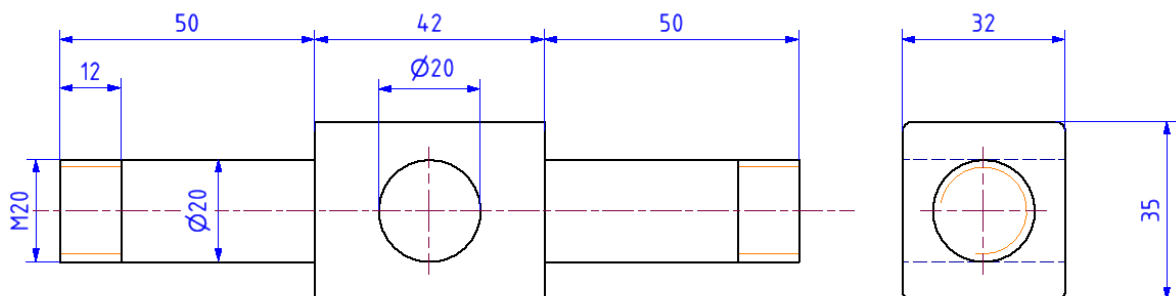
Jednoduchým návrhem dosažení bezpečnosti 2 je použití dvou již pevnostně vyzkoušených závěsů umístěných vedle sebe. Dva závěsy by byly nalepeny na potah křídla vedle sebe a pomocí krátkého nosníku by do každého závěsu bylo zavedeno poloviční zatížení 2 000 N. Z výsledků experimentu by k tomu byla vhodná varianta III i při ponechání nití TYTAN 30, tedy v přesně takovém stavu, v jakém byly zkoušeny, a k tomu by bylo dosaženo vyšší úrovně bezpečnosti než 2. Případně by bylo možné použít variantu I, ale je nutné použít nitě TYTAN 15. K tomu je potřebné sehnat šicí stroj, který dokáže tyto nitě šít. Také by bylo vhodné udělat statistickou zkoušku, zda se strojně šité vzorky pevnostně podobají otestovanému ručně šitému.



Obrázek 52 Použití dvou závěsů

V navrženém modelu jsou závěsy přilepeny přímo vedle sebe, aby bylo jednodušší jejich lepení a nedošlo k určitému vychýlení jednoho ze závěsů vůči druhému. Také by bylo možné oba závěsy vyrobit na jedné základně. To by zjednodušilo jejich lepení. Nicméně by byla pracnější jejich výroba, při šití jednoho závěsu by mohl překážet ten druhý. Celková velikost lepené plochy je 160x130 mm.

Zatížení je do závěsů zavedeno pomocí krátkého nosníku, který má uprostřed otvor pro třmen. Nosník je proveden přímo trubkami v závěsech. Na koncích jsou matice, které brání vypadnutí trubky při uvolnění závěsu. Nosník je z oceli S235.



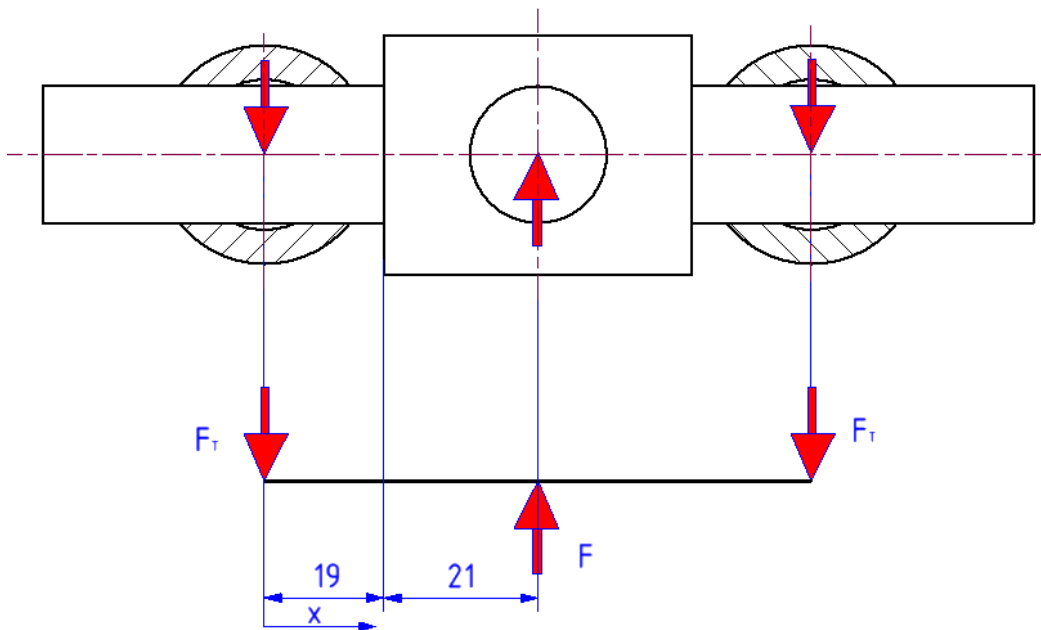
Obrázek 53 Nosník pro zavedení zatížení

Na jeden závěs působí síla 2 000 N. Z průměrné únosnosti varianty III je možné určit bezpečnost

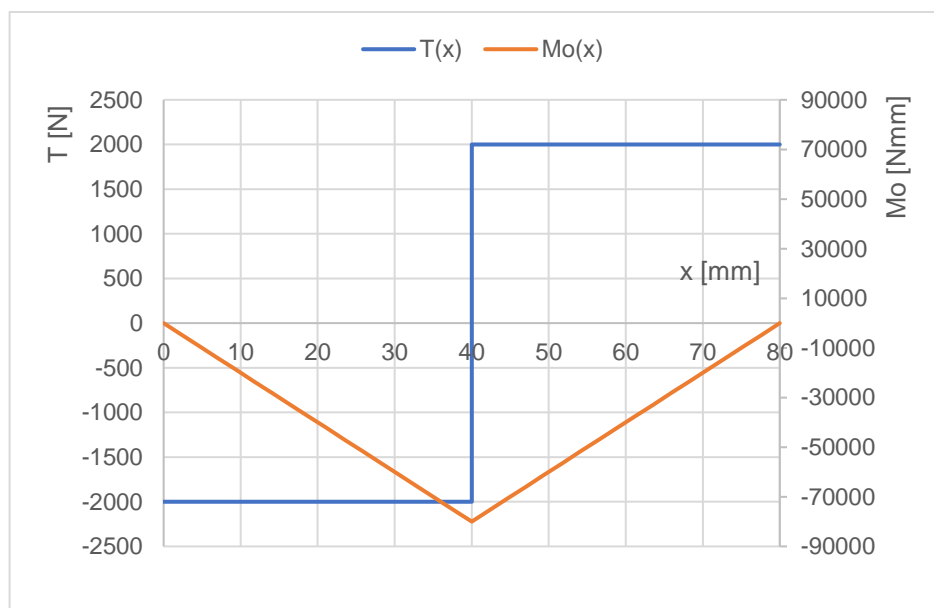
$$k_{vz} = \frac{4\,817}{2\,000} = 2,41. \quad (9.1)$$

9.3.1 Pevnostní kontrola nosníku

Nosník je zatížen ohybovým momentem, posouvající silou a otláčením v místě kontaktu s trubkami a také třmenem. Výpočet je obdobný pevnostní kontrole trubky v závěsu v kapitole 6.5.5. Kontrola je provedena v místě přechodu kruhového průřezu na čtvercový a také v rovině otvoru pro třmen. Opět je postačující řešit zatížení poloviny nosníku kvůli symetrii.



Obrázek 54 Výpočetní nosník



Graf 9 Průběh posouvající síly a ohybového momentu přes celý nosník

Průběh posouvající síly v polovině nosníku:

$$T = -F_T = -2\,000\text{ N} \quad (9.2)$$

Průběh ohybového momentu v polovině nosníku:

$$M_o = -F_T \cdot x = -2\,000 \cdot x\text{ Nmm} \quad (9.3)$$

Osový kvadratický moment v kruhovém průřezu je

$$J_{zO} = \frac{\pi \cdot d^4}{64} = \frac{\pi \cdot 20^4}{64} = 7\,854 \text{ mm}^4. \quad (9.4)$$

Osový kvadratický moment v rovině otvoru pro třmen:

$$J_{z\boxtimes} = \frac{b^3 \cdot n}{12} - \frac{d^3 \cdot n}{12} = \frac{35^3 \cdot 32}{12} - \frac{20^3 \cdot 32}{12} = 93\,000 \text{ mm}^4 \quad (9.5)$$

Kde n je šířka čtvercové části nosníku, b je její výška a d je průměr otvoru pro třmen a také průměr kruhové části pro trubku.

Napětí způsobené ohybem v přechodu z kruhového průřezu na čtvercový:

$$\sigma_{oO} = \frac{M_O(x = 19)}{J_{zO}} \cdot \left(-\frac{d}{2}\right) = \frac{-2\,000 \cdot 19}{7\,854} \cdot \left(-\frac{20}{2}\right) = 48,38 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (9.6)$$

Smykové napětí v tomto místě:

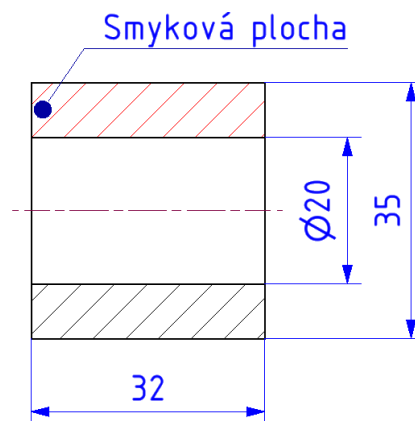
$$\tau_o = \frac{T}{\pi \cdot \frac{d^2}{4}} = \frac{-2\,000}{\pi \cdot \frac{20^2}{4}} = -6,37 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (9.7)$$

Redukované napětí v tomto místě:

$$\sigma_{redO} = \sqrt{\sigma_{oO}^2 + (\sqrt{3} \cdot \tau_o)^2} = \sqrt{48,38^2 + [\sqrt{3} \cdot (-6,37)]^2} = 49,62 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (9.8)$$

Napětí od ohybu v rovině otvoru pro třmen:

$$\sigma_{o\boxtimes} = \frac{M_O(x = 40)}{J_{z\boxtimes}} \cdot \left(-\frac{b}{2}\right) = \frac{-2\,000 \cdot 40}{93\,000} \cdot \left(-\frac{35}{2}\right) = 15,05 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (9.9)$$



Obrázek 55 Řez nosníkem v rovině otvoru pro třmen

Smykové napětí v tomto místě přenáší pouze plocha průřezu nosníku nad otvorem pro třmen, viz Obrázek 55 červené šrafování.

$$\tau_{\boxtimes} = \frac{T}{\left(\frac{b}{2} - \frac{d}{2}\right) \cdot n} = \frac{-2\,000}{\left(\frac{35}{2} - \frac{20}{2}\right) \cdot 32} = -8,33 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (9.10)$$

Třmen v otvoru způsobí tlakové napětí:

$$\sigma_p = \frac{F}{d \cdot n} = \frac{4\,000}{20 \cdot 32} = 6,25 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (9.11)$$

Výsledné redukované napětí se určí hypotézou H.M.H.

$$\sigma_{red\boxtimes} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_x^2 + \tau_y^2 + \tau_z^2)} \quad (9.12)$$

Kde $\sigma_x = \sigma_{o\boxtimes}$

$\sigma_y = -\sigma_p$

$\tau_z = \tau_{\boxtimes}$

zbylá napětí jsou nulová

$$\begin{aligned} \sigma_{red\boxtimes} &= \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_{o\boxtimes} + \sigma_p)^2 + (-\sigma_p)^2 + (-\sigma_{o\boxtimes})^2 + 6(\tau_{\boxtimes}^2)} = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(15,05 + 6,25)^2 + (-6,25)^2 + (-15,05)^2 + 6(-8,33)^2} \quad (9.13) \\ \sigma_{red\boxtimes} &= 23,83 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \end{aligned}$$

Bezpečnost je určena pro σ_{red0}

$$k_n = \frac{\sigma_k}{\sigma_{red0}} = \frac{235}{49,62} = 4,74. \quad (9.14)$$

10 Závěr

V této práci byly navrženy a pevnostně ověřeny pomocí experimentu tři varianty tkaninových závěsů, pomocí kterých je možné zavádět zatížení do konstrukce letadla během pevnostních zkoušek. Vhodným rozmístěním těchto závěsů po křídle je možné určovat rozložení zatížení po hloubce křídla.

Nejdříve byla provedena rešerše používaných metod statických zkoušek křídel. Následoval popis mechanismů adheze a návrh vhodných lepidel a materiálů. Dále byl proveden návrh tří variant tkaninových závěsů, lišící se obtížností výroby a rozložením zatěžující síly do konstrukce. Pro všechny tři varianty byla navržena stejná ocelová trubka pro zavedení zatížení do závěsu. Také byl navržen přípravek pro provedení experimentálních zkoušek.

Výroba závěsů neprobíhala dle očekávání. Nepodařilo se sehnat šicí stoj, který by dokázal šít pevnější nitě. To se také projevilo během pevnostních zkoušek, kdy docházelo ve většině případů k přetrhávání švů. U žádné z variant nebylo dosaženo navrhované únosnosti.

Nejpevnějším tvarem závěsu je varianta III s průměrnou pevností 4 817 N. Úroveň bezpečnosti při zatížení silou 4 000 N je 1,2.

K dosažení požadované bezpečnosti byly navrženy úpravy závěsů. Jako nejvhodnější možností dosažení vyšší únosnosti je použití dvou závěsů nalepených vedle sebe. K tomu by byly použity závěsy třetí varianty, u kterých bylo dosaženo nejvyššího průměrného zatížení. Výsledná úroveň bezpečnosti by převyšovala požadovanou bezpečnost pro navrhovanou zatěžující sílu.

11 Seznam použité literatury

- [1] KANESAN, Gunasegaran, Shuhaimi MANSOR a Ainullotfi ABDUL-LATIF. Validation of UAV Wing Structural Model for Finite Element Analysis. In: *Jurnal Teknologi* [online]. 2014, , s. 3 [cit. 2023-11-04]. 71.2. ISSN 2180-3722. Dostupné z: doi:10.11113/jt.v71.3710
- [2] HO, Randy Phuc. *Development of an Experimental Apparatus with the Capability to Test Semi-Monocoque UAS Wings*. United States -- Oklahoma: Oklahoma State University, 2022. ISBN 9798363508738. Order No. 29163713.
- [3] December 10, 2010: Onex Static Load Tests Complete. In: *Sonex* [online]. 2010 [cit. 2023-12-06]. Dostupné z: <https://www.sonexaircraft.com/onexarchive-121010/>
- [4] LOKOS, William, Candida OLNEY, Tony CHEN a Natalie CRAWFORD. *STRAIN-GAGE LOADS CALIBRATION TESTING OF THE ACTIVE AEROELASTIC WING F/A-18 AIRPLANE* [Online]. 1. NASA Dryden Flight Research Center, 2002. Dostupné také z: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20020063604>
- [5] LEVINE, Jay a Elena JOHNSON. NASA Armstrong Assists with Complex F/A-18E Tests. In: *NASA* [online]. 2022, Last updated Sep 28, 2023 [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/armstrong/nasa-armstrong-assists-with-complex-f-a-18e-tests/>
- [6] BENDER, Scott. *QUASI-STATIC STRUCTURAL ANALYSIS OF AN EXPERIMENTAL AIRCRAFT WING* [online]. Daytona Beach, Florida, 2022 [cit. 2023-11-04]. Dostupné z: <https://commons.erau.edu/edt/673/>. Doctoral Dissertations and Master's Theses. Embry-Riddle Aeronautical University.
- [7] Interesting wing load test. In: *Institute of aerospace engineering VUT* [online]. [cit. 2023-12-07]. Dostupné z: <https://lu.fme.vutbr.cz/en/interesting-wing-load-test/>
- [8] *Transfer: Výzkum a vývoj pro letecký průmysl* [online]. Praha: Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s., 2007 [cit. 2023-11-04]. číslo 6. ISSN 1801 - 9315. Dostupné z: <http://www.vzlu.cz/>
- [9] DOMUN, Yuvraj. *What Makes an Aircraft Fly?* [online]. 2016 [cit. 2024-01-11]. Dostupné z: <https://www.engineeringclicks.com/makes-aircraft-fly/>
- [10] KUNDU, Ajoy, Mark PRICE a David RIORDAN. *Theory and practice of aircraft performance*. Chichester: Wiley, 2016. Aerospace series (Wiley). ISBN 978-111-9074-175.
- [11] ČESKÁ REPUBLIKA. *UL 2 – Část I.: Požadavky letové způsobilosti SLZ Ultralehké letouny řízené aerodynamicky* [online]. In: . Praha: Letecká amatérská asociace ČR, 2019 [cit. 22.4.2024]. Dostupné z: <https://www.laacr.cz/predpisy/ul-2-cast-i/>
- [12] OSTEN, Miloš. *Práce s lepidly a tmely*. 2. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1982.

- [13] *Handbook of adhesives and surface preparation: technology, applications and manufacturing*. 1st pub. Editor Sina EBNESAJJAD. Oxford: William Andrew, 2011. PDL handbook series (William Andrew). ISBN 978-1-4377-4461-3.
- [14] MAHADESHWARA, Manoj Rajankunte. Adhesion: Definition, Theory and Types. In: *Tribonet* [online]. 2022 [cit. 2024-01-11]. Dostupné z: <https://www.tribonet.org/wiki/adhesion-definition-theory-and-types/>
- [15] DROBNÝ, Daniel. *Lepení plastů* [online]. 2020 [cit. 2024-01-11]. Dostupné z: <https://www.lepidla.cz/clanky/lepeni-plastu>
- [16] OSTEN, Miloš a Josef MLEZIVA. *Práce s lepidly a tmely*. Vyd. 3., přeprac. a zkrác., v Gradě vyd. 1. Praha: Grada, 1996. Profi & hobby. ISBN 80-7169-338-3.
- [17] MATSUO, T. Fibre materials for advanced technical textiles. *Textile Progress* [online]. 2008, **40**(2), 87-121 [cit. 2023-11-16]. ISSN 0040-5167. Dostupné z: doi:10.1080/00405160802133028
- [18] Encyklopedie plastů: Polyestery (PES). In: *Samosebou.cz* [online]. 2020 [cit. 2023-11-16]. Dostupné z: <https://www.samosebou.cz/2020/11/30/encyklopedie-plastu-polyestery-pes/>
- [19] HORROCKS, Richard a Subhash ANAND. *Handbook of technical textiles*. Woodhead Publishing Limited, 2000. ISBN 1 85573 385 4.
- [20] SHAKIBA, Mohamadreza, Erfan REZVANI GHOMI, Fatemeh KHOSRAVI et al. Nylon—A material introduction and overview for biomedical applications. *Polymers for Advanced Technologies* [online]. 2021, **32**(9), 3368-3383 [cit. 2023-11-16]. ISSN 1042-7147. Dostupné z: doi:10.1002/pat.5372
- [21] Encyklopedie plastů: Polypropylen (PP). In: *Samosebou.cz* [online]. 2019 [cit. 2023-11-16]. Dostupné z: <https://www.samosebou.cz/2019/10/25/encyklopedie-plastu-polypropylen-pp/>
- [22] Encyklopedie plastů: Polyethyleny (PE, LDPE I HDPE). In: *Samosebou.cz* [online]. 2020 [cit. 2023-11-16]. Dostupné z: <https://www.samosebou.cz/2020/02/28/encyklopedie-plastu-polyethyleny-pe-ldpe-i-hdpe/>
- [23] ASIM, M., Khalina ABDAN, M. JAWAID, M. NASIR, Zahra DASHTIZADEH, M. ISHAK a M. HOQUE. A Review on Pineapple Leaves Fibre and Its Composites. *International Journal of Polymer Science* [online]. 2015, **2015**, 4 [cit. 2024-01-07]. ISSN 1687-9422. Dostupné z: doi:10.1155/2015/950567
- [24] CHARLET, K., S. EVE, J.P. JERNOT, M. GOMINA a J. BREARD. Tensile deformation of a flax fiber. *Procedia Engineering* [online]. 2009, **1**(1), 233-236 [cit. 2023-11-29]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2009.06.055
- [25] *Bushman.cz* [online]. 2020 [cit. 2023-11-29]. Dostupné z: <https://bushman.cz/len-milovany-i-zavrhovany/>
- [26] HLAVATÝ, František a Vladimír MORAVEC. *Vazby a rozbory tkanin 1. 4*. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1988.

- [27] MAMDOUH, Fatmaa, Maysa REDA, Heba ABD EL-AZIZ a Hanan OTHMAN. Overview of different fabric structures. *Journal of Textiles, Coloration and Polymer Science* [online]. 2022, **19**(2), 291-306 [cit. 2023-11-19]. ISSN 2682-1958. Dostupné z: doi:10.21608/jtcps.2022.152641.1131
- [28] Z historie čalounických materiálů - tkané textilie. In: *Nábytek dnes* [online]. [cit. 2024-01-11]. Dostupné z: <https://www.nabytek-dnes.cz/z-historie-calounickych-materialu-tkane-textilie-p144>
- [29] KAMENICKÁ, Petra. *Konstrukce popruhů* [online]. 2005 [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/87350>. Diplomové práce.
- [30] Popruh šíře s reflexním prošitím. In: *Mojelátky* [online]. [cit. 2024-01-13]. Dostupné z: <https://www.mojelatky.cz/Popruh-sire-s-reflexnim-prositim-d73115.htm>
- [31] DOSEDĚLOVÁ, Ivana. *Analýza vlastností spojů technických konfekcí s ohledem na způsob zatěžování*. Liberec, 2011. Dostupné také z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/39036>. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [32] ŠVEC, Vladimír. *Části a mechanismy strojů: spoje a části spojovací*. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04138-3.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Pytllová metoda [3]	10
Obrázek 2 Hydraulické válce zatěžující křídlo [5].....	11
Obrázek 3 Rozložení sil ve whiffletree [2].....	12
Obrázek 4 Použití kleštin [7]	12
Obrázek 5 Tvar lepené destičky s táhlem [6].....	13
Obrázek 6 Rozložení destiček po křídle [6].....	13
Obrázek 7 Přilepené tkaninové závěsy na křídlo [8].....	14
Obrázek 8 Rozložení tlaku na profilu [9].....	15
Obrázek 9 Mechanická adheze [14].....	16
Obrázek 10 Difuzní teorie [14].....	17
Obrázek 11 Smáčivost povrchu [15].....	17
Obrázek 12 Plátňová vazba [28]	22
Obrázek 13 Keprová vazba [28].....	22
Obrázek 14 Atlasová vazba [28]	22
Obrázek 15 Textilní popruh [30]	23
Obrázek 16 Návrh tvaru závěsu varianty I	25
Obrázek 17 Výsledný návrh první varianty závěsu.....	25
Obrázek 18 Návrh tvaru závěsu varianty II	26
Obrázek 19 Model varianty II.....	26
Obrázek 20 Návrh varianty III.....	27
Obrázek 21 Model varianty III.....	27
Obrázek 22 Přeplátovaný šev (levý) a hřbetový šev (pravý).....	28
Obrázek 23 Steh 301 [31]	28
Obrázek 24 Steh 401 [31]	28
Obrázek 25 Rozložení sil v závěsu varianty I	29
Obrázek 26 Deformační podmínka.....	31
Obrázek 27 Rozložení sil v závěsu varianty II	32
Obrázek 28 Rozložení sil v závěsu varianty III	34
Obrázek 29 Zatížení působící na polovinu trubky	36
Obrázek 30 Polární souřadnice.....	38
Obrázek 31 Výsledný osový kvadratický moment.....	39
Obrázek 32 Smyková plocha.....	39
Obrázek 33 Element trubky	40
Obrázek 34 Model zkušebního přípravku.....	42
Obrázek 35 Řez zkušebním přípravkem	43
Obrázek 36 Nahrazení přípravku modelovým nosníkem.....	43
Obrázek 37 Určení polohy těžiště L profilu.....	44
Obrázek 38 Výsledné těžiště přípravku	45
Obrázek 39 Výsledný osový kvadratický moment.....	46
Obrázek 40 Místa počítání napětí.....	47
Obrázek 41 Vzorek zkoušky lepidla	51
Obrázek 42 Porušený vzorek	51
Obrázek 43 Zatěžování varianty I.....	52
Obrázek 44 Suchý spoj kolem spodních švů	52
Obrázek 45 Způsob šití popruhů k základně u vzorků 01-04 a 01-05	53
Obrázek 46 Způsob šití popruhů k základně u vzorku 01-06	53

Obrázek 47 Zatěžování vzorku 01-07	54
Obrázek 48 Vzorek 02-03	55
Obrázek 49 Zatěžování vzorku 03-01	57
Obrázek 50 Závěs 03-05 před zatížením (vlevo) a během zatížení (vpravo).....	58
Obrázek 51 Závěs 03-02, v levé části lze vidět větší přetížení popruhu	58
Obrázek 52 Použití dvou závěsů	62
Obrázek 53 Nosník pro zavedení zatížení	62
Obrázek 54 Výpočetní nosník	63
Obrázek 55 Řez nosníkem v rovině otvoru pro třmen	64

Seznam tabulek

Tabulka 1 Hranice oblastí v polárních souřadnicích.....	38
Tabulka 2 Osově kvadratické momenty jednotlivých oblastí	39
Tabulka 3 Polohy těžišť jednotlivých ploch L profilu.....	44
Tabulka 4 Těžiště ocelového plechu.....	44
Tabulka 5 Osově kvadratické momenty jednotlivých ploch.....	46
Tabulka 6 Velikosti napětí ve vybraných místech	47
Tabulka 7 Výsledky vzorků lepidel	51
Tabulka 8 Výsledky varianty I	53
Tabulka 9 Výsledky varianty II	54
Tabulka 10 Výsledky varianty III.....	56
Tabulka 11 Pevnosti lepidla na kompozitních vzorcích.....	59

Seznam grafů

Graf 1 Průběh posouvající síly a ohybového momentu v polovině trubky.....	37
Graf 2 Průběh posouvající síly a ohybového momentu zkušební přípravkem	45
Graf 3 Zatěžování vzorků lepidel	51
Graf 4 zatěžování varianty I.....	53
Graf 5 Zatěžování varianty II	55
Graf 6 Zatěžování varianty III	56
Graf 7 Zatěžování varianty III	57
Graf 8 Zatěžování kompozitních vzorků	59
Graf 9 Průběh posouvající síly a ohybového momentu přes celý nosník.....	63

Seznam použitých programů

MS Word
MS Excel
Autodesk Inventor

Seznam příloh

Příloha 1 Výkres varianty I

Příloha 2 Výkres varianty II

Příloha 3 Výkres varianty III

Příloha 4 Model varianty I

Příloha 5 Model varianty II

Příloha 6 Model varianty III