

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav letadlové techniky

Návrh stabilizátoru cvičného letounu

Stabilizer design of trainer airplane

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2024

Lucie HUDÍKOVÁ

Studijní program: N0716A270010 – LETECTVÍ A KOSMONAUTIKA

Studijní obor: N071TLBS – Letadla a bezpilotní systémy

Vedoucí práce: Ing. Karel Barák

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Návrh stabilizátoru cvičného letounu* vypracovala samostatně pod vedením Ing. Karla Baráka, s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce, v seznamu použité literatury.

V Praze, dne

.....

Lucie Hudíková

Poděkování

Na tomto místě chci poděkovat Ing. Karlovi Barákovi za odborné vedení mé práce, věcné konzultace a velkou dávku trpělivosti. Dále děkuji Ing. Jiřímu Brabcovi, Ph.D. a Ing. Jakubovi Valentovi za cenné rady a konzultace, a také Ing. Milanovi Dvořákovi, Ph.D. za vstřícný přístup. Velké díky patří i vedoucím a kolegům ze společnosti Aero Vodochody Aerospace a.s., se kterými jsem mohla tuto diplomovou práci konzultovat.

V neposlední řadě chci poděkovat své rodině za podporu a pochopení, svým kočkám (tentokrát dvěma), které mě provázely v nejtěžších chvílích. Nemohu zapomenout ani na kolegu Michala a ostatní přátele, kteří mě drželi nad vodou.

Anotace

Jméno autora: Lucie Hudíková
Název DP: Návrh stabilizátoru cvičného letounu
Anglický název: Stabilizer design of trainer airplane
Rok: 2024
Studijní program: N0716A270010 – Letectví a kosmonautika
Obor studia: N071TLBS – Letadla a bezpilotní systémy
Ústav: Ústav letadlové techniky
Vedoucí DP: Ing. Karel Barák

Bibliografické údaje:	počet stran	104
	počet obrázků	69
	počet tabulek	56
	počet příloh	10

Klíčová slova: Horizontální stabilizátor, návrh konstrukce, MKP, kompozitní materiály, spojování kompozitů, návrh technologie

Abstrakt: Tato práce je zaměřena na technologický a konstrukční návrh kompozitního stabilizátoru cvičného letounu L-39 NG. Cílem je navrhnout stabilizátor s nižší hmotností a menším počtem dílů. Byl navržen technologický postup výroby stabilizátoru a formy pro jejich vyhotovení.

Do konstrukčních výpočtů vstupovaly čtyři návrhy, z nichž jeden byl čistě laminátový a zbylé tři byly sendvičové struktury. Laminátový potah byl pro jeho vysokou hmotnost vyloučen. V následujícím kroku byla provedena analýza metodou konečných prvků, na jejímž základě byly návrhy optimalizovány pevnostně a stabilitně. Z výsledků byla zvolena a popsána jedna výsledná varianta, která nejlépe odpovídala požadavkům na nízkou hmotnost a malý počet dílů konstrukce.

Annotation

Author: Lucie Hudíková
Diploma thesis title: Stabilizer design of trainer airplane
Year: 2024
Study programme: N0716A270010 – Letectví a kosmonautika
Field of study: N071TLBS – Letadla a bezpilotní systémy
Department: Ústav letadlové techniky
Supervisor: Ing. Karel Barák

Bibliographic data: number of pages 104
 number of figures 69
 number of tables 56
 number of annexes 10

Keywords: Horizontal stabilizer, construction design, FEM, composite materials, joining of composites, technology design

Abstract: This work is focused on the technological and structural design of a composite stabilizer for the L-39 NG trainer aircraft. The aim is to design a stabilizer with lower weight and reduced number of parts. The technological procedure of the stabilizer production and the moulds for their manufacture were designed.

Four designs were included in the structural calculations, one of which was pure laminate and the other three were sandwich structures. Laminate coating was eliminated due to its high weight. In the next step, a finite element analysis was carried out to optimise the remaining designs for strength and stability. Among the results, one final design was selected and described, which best met the requirements of low weight and small number of structural parts.

Obsah

Seznam obrázků.....	IX
Seznam tabulek	XI
Seznam použitého softwaru	XIII
Seznam příloh	XIII
Seznam použitých zkratk a jednotek.....	XIV
1 Úvod	1
2 Technická specifikace.....	2
2.1 Stávající konstrukce stabilizátoru.....	2
2.2 Předpokládaná konstrukce stabilizátoru	3
3 Legislativa týkající se návrhu	6
3.1 CS-23 – Vybrané statě.....	6
3.1.1 Shrnutí	8
4 Materiál.....	9
4.1 Kompozity	9
4.1.1 Matrice.....	9
4.1.2 Výztuž.....	11
4.1.3 Vláknová výztuž.....	12
4.2 Strukturní kompozity.....	14
4.2.1 Laminát.....	14
4.2.2 Sandwich	14
4.2.3 Jádro sadnwiche.....	15
4.3 Galvanická koroze	16
4.3.1 Ochrana proti galvanické korozi.....	16
4.4 Volba materiálu	17
4.4.1 Uhlíková vlákna.....	17
4.4.2 Pěnové jádro	17
5 Technologie výroby	18
5.1 Ruční kladení.....	18
5.2 Vakuování.....	18
5.3 Vytvrzování v autoklávu	19
5.4 Navíjení	19
5.5 Pultruze.....	20
5.6 Proces vytvrzování	20
6 Spojování kompozitních materiálů.....	21
6.1 Mechanické spoje	21
6.1.1 Nýtování kompozitů	21
6.2 Lepené spoje.....	23
6.2.1 Metody lepení.....	23
6.2.2 Typy spojů	24
6.2.3 Namáhání a poruchy	24
6.2.4 Lepidla.....	24
7 Návrh technologie pro výrobu stabilizátoru L39NG.....	26
7.1 Sendvičové konstrukce	26
7.2 Návrh formy	26
7.2.1 Formy na potahy.....	27
7.2.2 Formy nosníků.....	28

7.2.3	Formy na žebra	29
7.3	Formování.....	30
7.4	Vytvrzení	31
7.5	Postup výroby a lepení spojů.....	32
8	Zatížení stabilizátoru	33
8.1	Aerodynamické síly	33
8.2	Hmotové síly	34
8.3	Přírůstek síly od závěsů kormidel.....	35
8.4	Reakce od závěsů na trup	37
8.5	Posouvající síla.....	38
8.6	Ohybový moment	40
8.7	Kroutící moment.....	43
9	Dimenzování stabilizátoru.....	46
9.1	Dimenzování pásnic	46
9.2	Dimenzování potahu.....	48
9.2.1	Smykový tok.....	48
9.2.2	Napětí v potahu.....	49
9.2.3	Kritické napětí	49
9.2.4	Tloušťka a hmotnost potahu	50
9.2.5	Porovnání jednotlivých variant návrhů potahu.....	59
10	Pevnostní analýza metodou konečných prvků	60
10.1	Globální MKP model	60
10.1.1	3D geometrie	60
10.2	Příprava modelu pro MKP.....	60
10.2.1	Souřadnicový systém.....	60
10.2.2	2D elementy.....	60
10.2.3	1D elementy.....	62
10.2.4	Návrh materiálu	62
10.2.5	Orientace vláken	63
10.2.6	Okrajové podmínky	64
10.2.7	Zavedení zatížení	64
11	Výsledky simulace.....	65
11.1	Výsledky prvotního návrhu	65
11.2	Optimalizace návrhů.....	67
11.3	Index poruchy a napětí u optimalizovaných variant.....	67
11.4	Ztráta stability u optimalizovaných variant.....	69
11.5	Materiálová skladba.....	70
11.6	Hmotnostní analýza	72
12	Finální zvolená varianta.....	74
13	Závěr.....	78
	Citace	79

Seznam obrázků

Obr. 1: Letoun L-39 NG v jeho typické kamufláži ALFA. [2]	1
Obr. 2: Stabilizátor letounu L-39 NG.	3
Obr. 3: Kostra stabilizátoru letounu L-39 NG	3
Obr. 4: Profil se schematicky znázorněnými nosníky, ukončen zavětrováním VK.	4
Obr. 5: Varianta návrhu stabilizátoru pouze se žebry u závěsů na VK	4
Obr. 6: Varianta návrhu stabilizátoru se dvěma dalšími žebry	5
Obr. 7: Varianta návrhu stabilizátoru pouze se všemi žebry	5
Obr. 8: Dělení výztuží kompozitů [23]	11
Obr. 9: Struktura jednotlivých forem kompozitů. Vlevo částicová výztuž, uprostřed vláknová výztuž, vpravo strukturální kompozit [23].....	11
Obr. 10: Vazby tkaniny. Zleva a) plátno, b) kepr, c) atlas [24]	13
Obr. 11: Struktura sendvičové konstrukce. Převzato z [31]	15
Obr. 12: Voštiny z aramidového papíru [32]	16
Obr. 13: Technologie vakuování. Převzato z [39]	18
Obr. 14: Autokláv [40].....	19
Obr. 15: Technologie navíjení [41].....	20
Obr. 16: Proces pultruze. Převzato z [42]	20
Obr. 17: Schematický postup nýtování samopropichovacími nýty [48]	22
Obr. 18: Vlevo slepý nýt do kompozitu [50], vpravo slepý nýt do kovu [51].....	22
Obr. 19: Insety v sendvičovém dílu s nýty [44]	23
Obr. 20: Příklady typů lepených spojů. Převzato z [52]	24
Obr. 21: Módy namáhání lepených spojů. Převzato z [52]	24
Obr. 22: Ukončení sendvičové struktury na potahu	26
Obr. 23: Catia pohled na horní polovinu formy potahu.....	27
Obr. 24: Catia pohled na obě části formy potahu u sebe	27
Obr. 25: Catia detail tvarového zámku	28
Obr. 26: Catia pohled na polovinu formy hlavního nosníku	28
Obr. 27: Catia přední pohled na polovinu formy hlavního nosníku	29
Obr. 28: Catia pohled na obě poloviny formy hlavního nosníku u sebe	29
Obr. 29: Catia pohled na obě poloviny formy druhého žebra mezi hlavním a pomocným zadním nosníkem.	29
Obr. 30: Catia pohled na polovinu formy druhého žebra mezi hlavním a pomocným zadním nosníkem	30
Obr. 31: Catia pohled na formu žebra od hlavního k zadnímu nosníku	30
Obr. 32: Vytvrzovací cyklus pro HexPly® s epoxidovou matricí 8552 [60]	31
Obr. 33: Graf průběhu posouvající síly T pro minimální případ zatížení, vypočteno se závěsy do VK i bez nich.	38
Obr. 34: Graf průběhu posouvající síly T pro maximální případ zatížení, vypočteno se závěsy do VK i bez nich.	39
Obr. 35: Graf průběhu ohybového momentu M_o pro minimální případ zatížení, vypočteno se závěsy do VK i bez nich.	41
Obr. 36: Graf průběhu ohybového momentu M_o pro maximální případ zatížení, vypočteno se závěsy do VK i bez nich.	41
Obr. 37: Síly a momenty působící na stabilizátor a jejich působiště	43

Obr. 38: Graf kroutícího momentu k těžišti pro případy minimálního i maximálního zatížení	45
Obr. 39: Graf koeficientu vzpěru	50
Obr. 40: Návrh rozložení žeber pro varianty V1 a V2.....	52
Obr. 41: Návrh rozložení žeber pro variantu V3	55
Obr. 42: Návrh rozložení žeber pro variantu V4	57
Obr. 43: Síť v místě uchycení závěsu do trupu s vyznačenými kritickými a varovnými prvky po kontrole kvality sítě, a změněnou geometrií elementů.....	61
Obr. 44: Náhrada závěsů na VK	62
Obr. 45: Náhrada závěsů na trup	62
Obr. 46: Vlevo: okrajové podmínky v rovině symetrie, vpravo: okrajové podmínky v místě uchycení stabilizátoru do trupu.	64
Obr. 47: Zobrazené zatížení v NX Nastran.....	65
Obr. 48: Index poruchy stabilizátoru pro vypočtenou materiálovou tloušťku.....	66
Obr. 49: Napětí ve stabilizátoru pro vypočtenou materiálovou tloušťku	66
Obr. 50: Maximální index lomu pro minimální případ zatížení. Vlevo V2, uprostřed V3, vpravo V4.	68
Obr. 51: Maximální index lomu pro maximální případ zatížení. Vlevo V2, uprostřed V3, vpravo V4.	68
Obr. 52: Maximální absolutní napětí pro minimální případ zatížení. Vlevo V2, uprostřed V3, vpravo V4.....	68
Obr. 53: Maximální absolutní napětí pro maximální případ zatížení. Vlevo V2, uprostřed V3, vpravo V4.....	69
Obr. 54: Selhání stabilizátoru v případě ztráty stability pro minimální případ zatížení. Vlevo V2, uprostřed V3, vpravo V4.....	69
Obr. 55: Selhání stabilizátoru v případě ztráty stability pro maximální případ zatížení. Vlevo V2, uprostřed V3, vpravo V4.....	70
Obr. 56: Rozložení materiálu u potahu stabilizátoru varianty V2	70
Obr. 57: Rozložení materiálu u potahu stabilizátoru varianty V3	71
Obr. 58: Rozložení materiálu u potahu stabilizátoru varianty V4	71
Obr. 59: Index lomu pro zvolenou variantu V2.....	74
Obr. 60: Index lomu pro zvolenou variantu V2 – detail	74
Obr. 61: Maximální absolutní napětí pro zvolenou variantu V2 – detail	75
Obr. 62: Maximální index poruchy (vlevo) a maximální absolutní napětí (vpravo) pro maximální případ zatížení – detail.....	75
Obr. 63: Ztráta stability pro minimální (vlevo) a maximální (vpravo) případ zatížení ..	76
Obr. 64: Graf posouvající síly pro minimální symetrické zatížení	91
Obr. 65: Graf ohybového momentu pro minimální symetrické zatížení	92
Obr. 66: Graf kroutícího momentu pro minimální symetrické zatížení	92
Obr. 67: Graf posouvající síly pro maximální symetrické zatížení	92
Obr. 68: Graf ohybového momentu pro maximální symetrické zatížení	93
Obr. 69: Graf kroutícího momentu pro maximální symetrické zatížení.....	93

Seznam tabulek

Tabulka 1: Materiálové vlastnosti uhlíkových tkanin poskytnutých AVA [36].....	17
Tabulka 2: Materiálové vlastnosti Rohacell® 110 WF. [37].....	17
Tabulka 3: Vytvrzovací proces pro Hexply® s epoxidovou matricí 8552 pro voštinovou a monolitní strukturu. Převzato z [60]	31
Tabulka 4: Zadané nesymetrické aerodynamické zatížení stabilizátoru	34
Tabulka 5: Zadané nesymetrické hmotové zatížení stabilizátoru	35
Tabulka 6: Součet sil působících na stabilizátor od VK.....	36
Tabulka 7: Převedení provozního zatížení na početní	37
Tabulka 8: Zatížení v závěsech pro minimální a maximální případ zatížení	37
Tabulka 9: Procentuální poměr zatížení ze závěsů	37
Tabulka 10: Přerozdělení sil ze závěsů dle zadaných zatížení	37
Tabulka 11: Vypočtené hodnoty průběhu posouvající síly T pro případy se závěsy i bez nich.....	40
Tabulka 12: Vypočtené hodnoty průběhu ohybového momentu M_o pro případy se závěsy i bez nich.....	42
Tabulka 13: Vstupní hodnoty a vypočtený kroutící moment k těžišti M_{kT} pro minimální případ zatížení.....	44
Tabulka 14: Vstupní hodnoty a vypočtený kroutící moment k těžišti M_{kT} pro maximální případ zatížení.....	45
Tabulka 15: Návrh tloušťky pásnic.....	47
Tabulka 16: Návrh tloušťky pásnic v kořenové části stabilizátoru.....	48
Tabulka 17: Vypočtené hodnoty smykového toku	49
Tabulka 18: Vypočtená hmotnost potahu u varianty V1	51
Tabulka 19: Vypočtená napětí a tloušťka potahu pro variantu V1	52
Tabulka 20: Vypočtená hmotnost potahu u varianty V2	53
Tabulka 21: Vypočtená napětí a tloušťka potahu pro variantu V2.....	54
Tabulka 22: Vypočtená hmotnost potahu u varianty V3	55
Tabulka 23: Vypočtená napětí a tloušťka potahu pro variantu V3	56
Tabulka 24: Vypočtená hmotnost potahu u varianty V4	57
Tabulka 25: Vypočtená napětí a tloušťka potahu pro variantu V4.....	58
Tabulka 26: Hmotnostní porovnání navrhovaných potahů.....	59
Tabulka 27: Orientace vláken pro tvorbu materiálů v NX Nastran	64
Tabulka 28: Orientace zatížení při výpočtech v NX Nastran.....	64
Tabulka 29: Porovnání zatížení v první – povrchové – vrstvě materiálů s tabulkovými hodnotami	66
Tabulka 30: Vypočtené maximální indexy poruchy a maximální absolutní napětí pro optimalizované varianty.....	67
Tabulka 31: Vypočtené koeficienty ztráty stability pro optimalizované varianty.....	69
Tabulka 32: Počet vrstev potahu z každé strany jádra u sendvičové struktury stojiny hlavního nosníku.....	71
Tabulka 33: Tloušťka pásnic hlavního nosníku po optimalizaci pro všechny varianty .	72
Tabulka 34: Tloušťka pásnic předního a zadního nosníku a počet vrstev tkaniny na stojinách z každé strany jádra	72
Tabulka 35: Počet vrstev potahu z každé strany jádra u sendvičové struktury žeber.....	72
Tabulka 36: Vypočtené hmotnosti jednotlivých optimalizovaných variant	73

Tabulka 37: Shrnutí tloušťky materiálu nosníků vybrané varianty V2	76
Tabulka 38: Shrnutí tloušťky materiálu potahu vybrané varianty V2	77
Tabulka 39: Shrnutí tloušťky materiálu žeber vybrané varianty V2	77
Tabulka 40: Výpočet symetrického zatížení pro případy minimálního a maximálního zatížení	91
Tabulka 41: Vypočtená hmotnost potahu varianty V2	94
Tabulka 42: Vypočtená hmotnost potahu varianty V3	94
Tabulka 43: Vypočtená hmotnost potahu varianty V3	95
Tabulka 44: Výpočet tloušťky potahu pro variantu V1	96
Tabulka 45: Výpočet tloušťky potahu pro variantu V2	97
Tabulka 46: Výpočet tloušťky potahu pro variantu V3	98
Tabulka 47: Výpočet tloušťky potahu pro variantu V4	99
Tabulka 48: Materiál pásnice hlavního nosníku pro V2	100
Tabulka 49: Materiál pásnice hlavního nosníku pro V3	101
Tabulka 50: Materiál pásnice hlavního nosníku pro V4	102
Tabulka 51: Materiál stojiny hlavního nosníku pro jednotlivé varianty	103
Tabulka 52: Materiál pásnice zadního nosníku pro všechny varianty	103
Tabulka 53: Materiál stojiny zadního nosníku pro všechny varianty	104
Tabulka 54: Materiál potahu korespondující se všemi variantami	104
Tabulka 55: Materiál žeber korespondující se všemi variantami	104
Tabulka 56: Materiál stojiny a pásnice předního nosníku pro všechny varianty	104

Seznam použitého softwaru

Catia V5
MS Excel
MS World
NX Nastran
Software na úpravu grafiky Malování

Seznam příloh

Příloha A	Rohacell® WF 110 materiálový list
Příloha B	Výňatek z materiálového listu HexPly® 8552 – strany 1-3, 5 z šesti
Příloha C	Výňatek z materiálového listu LOCTITE® EA 9394 AERO – strany 1, 3-5 z šesti
Příloha D	Výňatek z materiálového listu HexBond® EA 9686 STRUCTIL – strany 1, 2 ze tří
Příloha E	Přílohy ke kapitole 8. Zatížení
Příloha F	Přílohy ke kapitole 9.2 Dimenzování potahu
Příloha G	Přílohy ke kapitole 10.5 Materiálová skladba

Kompletní 3D modely ve formátu: .stp

Kompletní modely analýzy konečných prvků ve formátu: .fem; .sim

Excel s výpočtem hmotnosti

Seznam použitých zkratk a jednotek

1D	- Jednorozměrný
2D	- Dvojměrný
AD	- Aerodynamické
Al ₂ O ₃	- Oxid hlinitý
AMC 23.423	- Přijatelné způsoby průkazu
AVA	- AERO Vodochody AEROSPACE a.s.
bSAT	- Hloubka střední aerodynamické tělivity
CAA	- Civil Aviation Authority (Úřad pro civilní letectví)
CS-23	- Certification Specifications, legislativní norma EASA
ČSN	- České technické (státní) normy
ČVUT	- České Vysoké Učení Technické
DFy AD	- Přírůstek aerodynamické síly
DFy m	- Přírůstek hmotové síly
DFy z	- Přírůstek od závěsů na VK
EN AW	- Otažení materiálu
EASA	- European Union Aviation Safety Agency (Evropská agentura pro bezpečnost letectví)
f	- Koeficient bezpečnosti (1,5)
FEM	- Finite Element Method (Metoda konečných prvků)
FS	- Fakulta strojní
Fy	- Síla
FyST	- Síla působící na stabilizátor
FyVK	- Síla působící na výškové kormidlo
GPa	- GigaPascal, měrná jednotka tlaku
HM	- Hmota
m	- Hmotnost
Max	- Maximum
MaxVOP	- Maximální případ zatížení vodorovných ocasních ploch
Min	- Minimum
MinVOP	- Minimální případ zatížení vodorovných ocasních ploch
MKP	- Metoda konečných prvků
MS	- Microsoft
M _x VOP	- Klopivý moment na VOP
mm	- milimetr, měrná jednotka vzdálenosti
MPa	- MegaPascal, měrná jednotka tlaku
M _z ST	- Momentový účinek na stabilizátor
NG	- New Generation (Nová Generace)
Nm	- Newton metr
NMM	- Numerické metoda modelování
NX	- NX Nastran, použitý software
OP	- Okrajové podmínky
PAN	- Polyakrylonitril
q	- Smykový tok
R _m	- Mez pevnosti
RBE3	- Rigid body element – druh vazby v NX Nastran

SAT	- Střední aerodynamická tětíva
SiC	- Karbid křemíku
SW	- Sandwich (sendvič)
t	- Tloušťka
T	- Těžiště
Temp.	- Teplota
U	- Plocha
UV	- Ultra violet (ultrafialové)
VA	- Návrhová rychlost obratu
VD	- Maximální nepřekročitelná rychlost
VK	- Výškové kormidlo
VOP	- Vodorovné ocasní plochy
xbST_25	- Poloha aerodynamického středu na ose x
xbVK	- Poloha těžiště VK na ose x
X _z	- Poloha závěsu na ose x
z	- Závěs

1 Úvod

V návaznosti na svého velmi úspěšného předchůdce, letoun L-39, představila společnost Aero Vodochody Aerospace veřejnosti jeho nástupce, L-39NG (New Generation). Jako u původní verze, jde především o cvičný letoun, který lze použít i na krátký boj či průzkumné mise. [1, 2]

Záměrem společnosti bylo vytvořit letoun, který by převzal ty nejlepší vlastnosti již vyvinutých letounů (například L-29 Delfín, L-159 ALCA, nebo výše zmiňovaný L-39 Albatros). Jedná se o dvoumístný tandemově uspořádaný letoun. Mezi významné změny patří modernější proudový motor FJ44-4M a integrované nádrže v křídlech, které snížily původní aerodynamický odpor a zároveň zvýšily kapacitu pro palivo. Další zásadní změnou je využití nových materiálů, čímž byla významně snížena prázdná hmotnost letounu a zvýšena životnost. Letoun je zobrazen na obrázku 1. [1, 2]

Cílem této práce je navrhnout horizontální stabilizátor pro letoun L-39NG z kompozitních materiálů, za účelem snížení hmotnosti a počtu spojovacích součástí, zvýšení životnosti tohoto dílu a zjednodušení technologie výroby. V současné době je díl navržen jako celokovový.



Obr. 1: Letoun L-39 NG v jeho typické kamufláži ALFA. [2]

2 Technická specifikace

L-39NG je dvoumístný tandemově uspořádaný dolnoplošník s klasickými ocasními plochami a zatahovacím podvozkem.

2.1 Stávající konstrukce stabilizátoru

Stabilizátor je tvořen symetrickým průběžným profilem, který je rozdělen do dvou torzních skříní pomocí dvou průběžných nosníků – jednoho hlavního a jednoho pomocného zadního. Oba nosníky jsou zalomené. Hlavní nosník v místě 0,403 m od bodu symetrie ($z_{\pm 0,403}$) a pomocný v místě 0,340 m od bodu symetrie ($z_{\pm 0,340}$). Poloha hlavního nosníku po rozpětí je v místě symetrie ve 47,1 %, v bodě $z_{\pm 0,403}$ je jeho poloha 37,6 % a od bodu zlomu se nosník nachází ve 40 % hloubky profilu. Zadní nosník je umístěn v bodě symetrie v 65,3 % hloubky profilu, v bodě $z_{\pm 0,340}$ je jeho poloha v 56,6 %. Do řezu 0,540 m od roviny symetrie se jeho poloha posouvá na 61,7 % a ke konci polorozpětí je již neměnná.

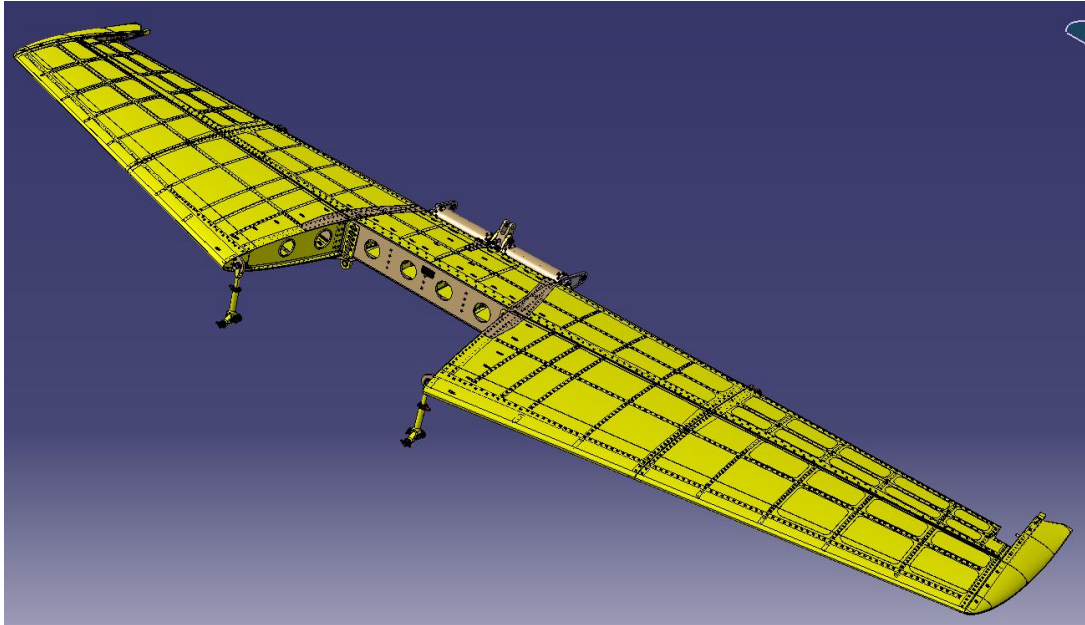
Směrem k náběžné hraně se nachází přední pomocný nosník, který je vymezen druhým a pátým žebrem, a plynule přechází do podélníku. Všechny nosníky mají C profil. Po polorozpětí je 11 žeber, která jsou, kromě druhého, rovnoběžně s rovinou symetrie letounu. Druhé žebro je navrženo dle uchycení vodorovné ocasní plochy na trup. Pro nižší hmotnost konstrukce jsou v nosnících i žebrech vytvořeny odlehčovací otvory.

Potah je vyroben z tenkého plechu z materiálu EN AW-2024-T351. Pro vyšší stabilitu je vyztužena dvěma dalšími podélníky, které jsou umístěny po jednom v každé torzní skříní a jednou příčnou výztuhou mezi třetím a čtvrtým žebrem.

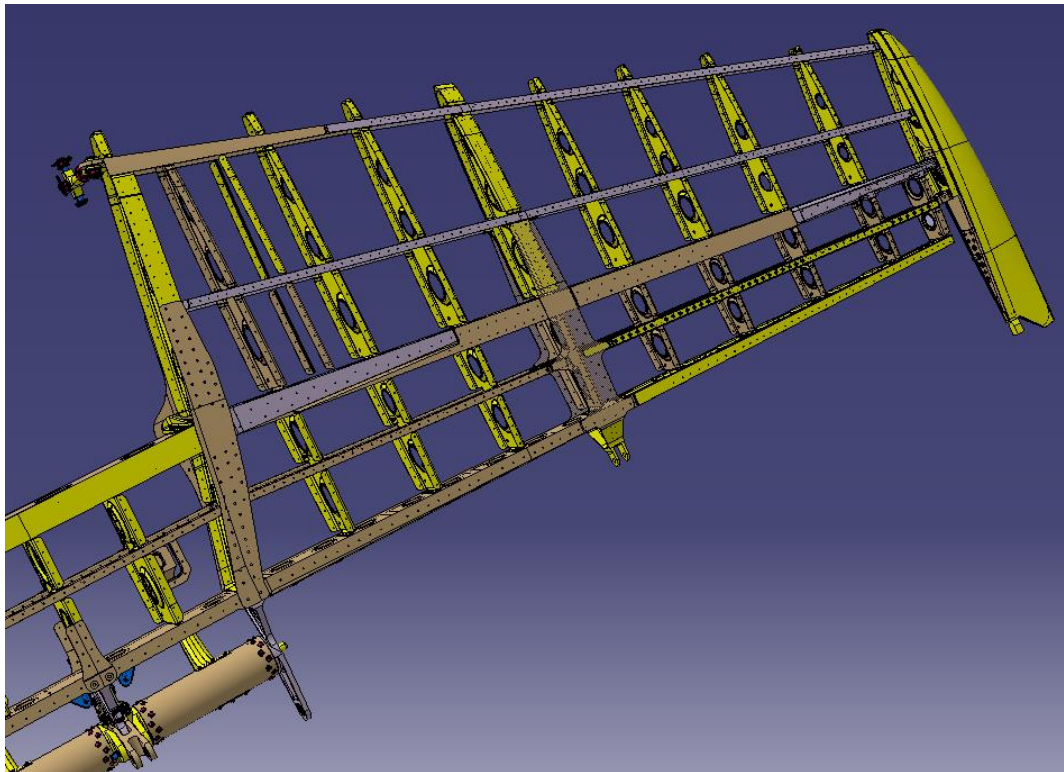
Pro zavěšení na trup je ze stabilizátoru u kořene odstraněn kus potahu, viz obrázek 2. Jsou použity dvě dvojice ocelových závěsů, které pomocí čepů uchytí trup a umožní pouze rotaci v podélné ose stabilizátoru. Závěsy jsou umístěny na předním pomocném nosníku a na hlavním nosníku v blízkosti druhého žebra.

Na zadním nosníku jsou po polorozpětí umístěny tři ocelové závěsy na výšková kormidla (VK), nacházející se v rovinách druhého, šestého a jedenáctého žebra. Hned za nosníkem je ke stabilizátoru připevněno zavětrování VK.

Na obrázku 2 je zobrazena současná konstrukce stabilizátoru z programu Catia V5. Obrázek 3 ukazuje kostru stabilizátoru pod potahem v zobrazení na pravé polovině stabilizátoru.



Obr. 2: Stabilizátor letounu L-39 NG.



Obr. 3: Kostra stabilizátoru letounu L-39 NG

2.2 Předpokládaná konstrukce stabilizátoru

Konstrukce měla dle povahy zadání vycházet z geometrie stávající konstrukce, tudíž tvar i rozložení závěsů zůstaly nezměněny. Tvar (C-profil) a poloha hlavního a předního nosníku zůstaly respektovány. Zadní nosník byl navržen se stejným tvarem a ve stejném místě, s pásnicemi směřujícími opačným směrem, kvůli přenášení zatížení v místech závěsů VK. Za zadním nosníkem bylo doplněno zavětrování VK. Pro odlehčení konstrukce byly navrženy varianty s redukováným počtem žeber. Z konstrukčního návrhu jsou ze stejného důvodu odstraněny podélníky. Profil s nosníky je zobrazen na obrázku 4 níže.



Obr. 4: Profil se schematicky znázorněnými nosníky, ukončen zavětrováním VK.

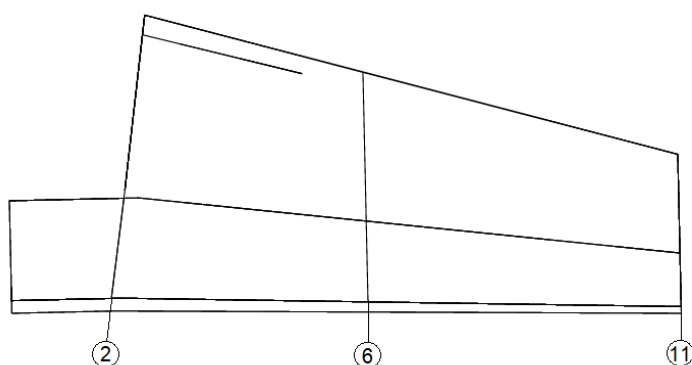
Potah konstrukce byl navržen sendvičovou konstrukcí a byl rozdělen na horní a dolní polovinu. Pro možnost slepení byl uvažován tvarový zámek, čemuž byla přizpůsobena i konstrukce. V první fázi byla navíc uvažována varianta laminátového potahu, která byla po hmotnostní porovnání potahu v kapitole 9.2.5 vyloučena.

V prvotní fázi byly uvažovány tři návrhy umístění žebra, zobrazené na obrázcích níže. V prvním případě byla navržena pouze tři žebra (Obr. 5) – druhé žebro, šesté a jedenácté – tedy žebra, na kterých byly uchyceny závěsy. Druhá varianta (Obr. 6) obsahovala navíc i čtvrté a osmé žebro z původní konstrukce. V posledním případě (Obr. 7) byla do návrhu zahrnuta všechna žebra, kromě žebra 0 a 1 z původního návrhu.

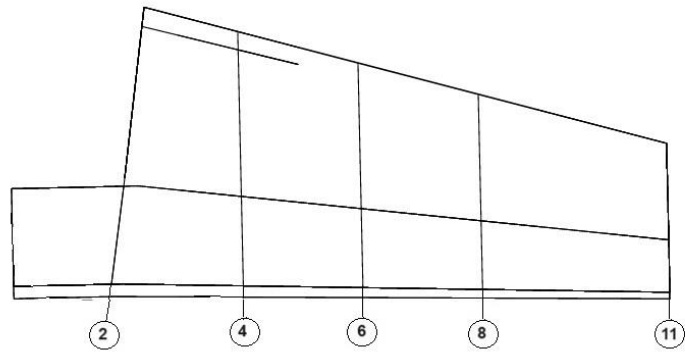
Žebra byla pro účely MKP navržena se sendvičovou strukturou, která byla určena dle pevnostních výpočtů torzních dutin v kapitole 9.2. Tvar žebra byl tvořen C-profilem s lemem 20 mm, aby měla dostatečnou plochu na nalepení k potahu. Protože nebyl proveden samostatný pevnostní návrh žebra, bylo potřeba ověřit v analýze metodou konečných prvků dostatečnou pevnost spoje.

Umístění závěsů a způsob napojení byly respektovány s ohledem na návrh stabilizátoru k již zavedenému letounu.

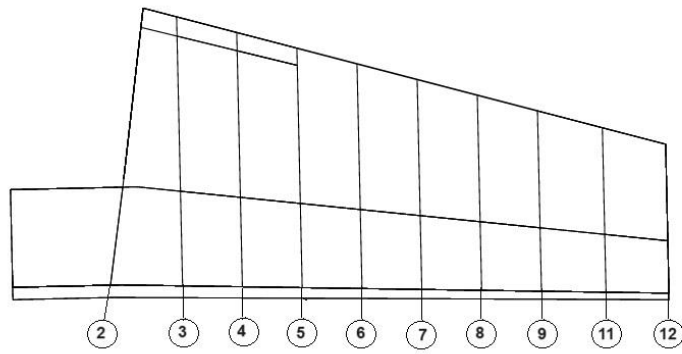
Dále v této práci bude popsán konkrétní postup návrhu, materiál i finální zvolená varianta.



Obr. 5: Varianta návrhu stabilizátoru pouze se žebry u závěsů na VK



Obr. 6: Varianta návrhu stabilizátoru se dvěma dalšími žebry



Obr. 7: Varianta návrhu stabilizátoru pouze se všemi žebry

3 Legislativa týkající se návrhu

Stabilizátor byl navrhován v souladu s následující legislativou.

3.1 CS-23 – Vybrané statě

CS 23.421 Vyvažovací zatížení [3]

- „(a) Vyvažující zatížení na vodorovných ocasních plochách je zatížení nutné pro udržení rovnováhy letounu ve všech letových případech s nulovým klopivým zrychlením.
- (b) Vodorovné vyvažovací ocasní plochy musí být navrženy na vyvažující zatížení pro každý bod provozní obálky obrátů a pro podmínky s klapkami stanovené v CS 23.345.“

CS 23.423 Zatížení při obratech (Viz AMC 23.423) [3]

„Každá vodorovná plocha a její nosná konstrukce a hlavní křídlo u letounů uspořádání kachna nebo u tandemového uspořádání, pokud mají tyto plochy řízení klopení, musí být navrženy na zatížení při obratech vzniklá při následujících podmínkách:

- (a) Rychlé přitažení výškového řízení při rychlosti VA do maximální zadní polohy a rychlý přesun dopředu buď až na doraz řízení, nebo dle úsilí pilota podle toho, co je kritické.
- (b) Rychlé přitažení výškového řízení při rychlosti nad VA následované rychlým přesunem dopředu způsobující následující kombinace normálových a úhlových zrychlení:

Případ	Normálové zrychlení (n)	Úhlové zrychlení (radián/s ²)
Klopení nahoru	1,0	$+\frac{39}{V}n_m(n_m - 1,5)$
Klopení dolů	n_m	$-\frac{39}{V}n_m(n_m - 1,5)$

kde:

(1) n_m = kladný provozní násobek zatížení při obratech použitý při návrhu letounu; a

(2) V = počáteční rychlost v uzlech.

Podmínky uvedené v tomto článku obsahují zatížení odpovídající zatížením, která se mohou vyskytnout při „řízeném obratu“ (obrat, při kterém je řízení výškového kormidla náhle vychýleno jedním směrem a potom náhle přemístěno v opačném směru). Výchylky se mají provádět v takovém časovém sledu, aby nedošlo k překročení provozního násobku zatížení při obratech. Celkové zatížení vodorovných ploch jak v případech klopení dolů, tak i v případech klopení nahoru je představováno součtem vyvažovacích zatížení při rychlosti V a určené hodnotě normálového násobku zatížení n , plus přírůstkem obrátového zatížení od stanovené hodnoty úhlového zrychlení.“

CS 23.425 Zatížení při poryvu [3]

- „(a) Všechny vodorovné plochy, jiné než hlavní křídlo, musí být navrženy na zatížení vyvolaná:
- (1) poryvovými rychlostmi uvedenými v CS 23.333 (c) se zasunutými vztlakovými klapkami; a
 - (2) kladnými a zápornými poryvy o jmenovité rychlosti 7,62 m/s (25 ft/s) při rychlosti VF, která odpovídá letovým případům uvedeným v CS 23.345 (a)(2).
- (b) Vyhrazeno.
- (c) Pro stanovení celkového zatížení vodorovných ocasních ploch pro podmínky stanovené v pododstavci (a) musí být nejdříve určena počáteční vyvažující zatížení pro nezrychlený ustálený let příslušnými návrhovými rychlostmi VF, VC a VD. Celkové zatížení se získá součtem počátečního vyvažujícího zatížení a přírůstku zatížení od poryvů. 1-C-13 CS-23
- (d) Není-li k dispozici racionálnější rozbor, přírůstek zatížení od poryvu musí být vypočítán následujícím způsobem jen u konfigurací letounů s vodorovnými plochami umístěnými vzadu, v případě, že jejich umístění jinde není prokazatelně konzervativní.

$$\Delta L_{ht} = \frac{\rho_0 K_g U_{de} V a_{ht} S_{ht}}{2} \left(1 - \frac{d_\varepsilon}{d_\alpha} \right)$$

kde:

- ΔL_{ht} = přírůstek zatížení vodorovné ocasní plochy (N);
 ρ_0 = hustota vzduchu na hladině moře (kg/m^3);
 K_g = zmírňující součinitel poryvu, definovaný v CS 23.341;
 U_{de} = odvozená rychlost poryvu (m/s);
 V = ekvivalentní rychlost letu letounu EAS (m/s);
 a_{ht} = sklon vztlakové čáry vodorovné ocasní plochy (radián-1);
 S_{ht} = plocha vodorovné ocasní plochy (m^2); a
 $\left(1 - \frac{d_\varepsilon}{d_\alpha} \right)$ = srázový součinitel“

CS 23.427 Nesymetrická zatížení [3]

- „(a) Vodorovné plochy, jiné než hlavní křídlo, a jejich nosná konstrukce musí být navrženy pro nesymetrická zatížení vznikající v důsledku zatáčení osy letounu a účinku vrtulového proudu v kombinaci se zatíženími stanovenými pro letové podmínky uvedené v CS 23.421 až 23.425.
- (b) Nejsou-li k dispozici vhodnější údaje u letounů, které jsou konvenční vzhledem k umístění motorů, křídel, vodorovných ploch jiných než hlavní křídlo a tvaru trupu:
- (1) může se předpokládat, že na jedné straně roviny symetrie působí 100 % maximálního zatížení vyplývajícího z podmínek symetrického letu; a
 - (2) na opačné straně působí $(100 - 10(n-1))$ % tohoto zatížení, kde n je stanovený kladný násobek zatížení při obratech. Tato hodnota však nesmí být větší než 80 %.
- (c) U letounů, které nejsou konvenční (jako letouny s vodorovnými plochami, jinými než hlavní křídlo, majícími zjevné vzepětí nebo podepřenými svislými ocasními plochami), musí být plochy a jejich nosné konstrukce navrženy pro kombinovaná

zátížení vodorovných a svislých ploch vyplývající ze všech předepsaných letových případů uvažovaných samostatně.“

3.1.1 Shrnutí

Dle předpisu byly vodorovné ocasní plochy pro letoun L-39 NG navrženy tak, aby dokázaly vydržet zátížení vyvolané prudkými výchylkami VK a poryvy. Zároveň tato zátížení musela odpovídat požadavkům na nesymetrické zatěžování. To může vzniknout například vlivem zatačení osy letounu. Zátížení bude více popsáno v kapitole 8. [3]

4 Materiál

Posledních 80 let dominují leteckému odvětví hliník a jeho slitiny. V současné době už ale nestačí zvyšujícím se nárokům na ekologii i ekonomii provozu. Letecký průmysl nese požadavky na lehčí materiály s co nejlepšími mechanickými vlastnostmi, které mohou pomoci snížit hmotnost a s ní spojené provozní náklady nebo například spotřebu paliva, a naopak zvýšit dolet a platící zatížení. Z toho důvodu je potřeba vyvíjet nové materiály, nebo vylepšovat ty staré. [4–6]

4.1 Kompozity

Kompozitní materiály zaznamenaly v minulých desetiletích větší a větší oblibu ve většině technických odvětví, nicméně v letectví je jejich vývoj zřejmě největší. K jejich popularitě přispěly jejich dobré měrné vlastnosti (vztažené k jejich hustotě) jako například pevnost; vysoká únavová odolnost, odolnost proti poškození a korozi. [5–8]

Kompozity se vyznačují složením ze dvou nebo více fází, za účelem výrazného zlepšení mechanických vlastností. Toho lze dosáhnout sloučením pevné a tuhé fáze, která je označována jako výztuž, a matrice, která je houževnatější a měkčí. Matrice i vlákna mohou být ze spousty různých materiálů, ale je potřeba pečlivý výběr, aby spolu materiály nereagovaly za zvýšených teplot (což může vést k rozpadu kompozitu) a aby byly vlastnosti co nejlepší pro finální aplikaci. Tvar a orientace vláken určují výsledné vlastnosti a anizotropii materiálu. [9–13]

V letectví je navíc neustálá poptávka po nových materiálech, díky kterým mohou být konstrukce lehčí, což přináší řadu benefitů, jako například nižší náklady sníženou spotřebou paliva a vyšším platícím zatížením nebo delší dolet. Další požadavky plynoucí z vývoje materiálů jsou vylepšené mechanické vlastnosti či lepší odolnost proti korozi. [3, 14]

4.1.1 Matrice

Matrice je monolitický materiál, který spojuje kompozit, přenáší zatížení mezi vlákny a také plní ochrannou funkci vláken – chrání před vnějšími vlivy. Mimo jiné také udává tvar a výslednou kvalitu povrchu. [12, 13, 15]

Materiál může být použit v podstatě jakýkoliv, nicméně používají se matrice kovové, keramické, uhlíkové nebo polymerní. Nejrozšířenější matrice jsou polymerní – využití mají hlavně v komerčních a leteckých aplikacích. Matrice z kovů a keramiky se používají na vysokoteplotní aplikace a matrici z uhlíku lze využít v aplikacích, kde je důležitá odolnost velmi vysokým teplotám. [12, 13, 15, 16]

Keramická matrice

Keramická matrice je stabilní za vysokých teplot, má dobrou tvrdost i korozní odolnost, a to z ní činí velmi atraktivní materiál. V současnosti je v leteckých aplikacích používána například na výfukové trysky. Má velký potenciál pro použití na letecké motory. Její nevýhodou je velmi malá lomová houževnatost. [16, 17]

Kovová matrice

Mezi kovy, které se používají na kovové matrice patří například hliník, hořčík, nikl nebo titan. V letectví mohou najít využití díky vyšší mezi kluzu, nízké teplotní roztažnosti

a odolnosti vysokým teplotám což z nich dělá vhodný materiál do prostředí s velkými změnami teplot; dobré lomové houževnatosti a odolnosti proti opotřebení. [16, 18]

Uhlíková matrice

Vývoj uhlíkových matic začal v 60. letech 20. století, kdy se na trh dostal kompozit o struktuře uhlík/uhlík. K jeho vlastnostem se řadí vysoká teplotní stabilita a vodivost, vysoká tuhost, nebo malá teplotní roztažnost. Dobré mechanické vlastnosti si uchovávají během celého teplotního procesu, nicméně, v oxidické atmosféře je nestabilní již při teplotách 500 °C. Krátkodobě odolávají velmi vysokým teplotám. [5, 19]

Polymerní matrice

Polymerní matrice je ve světě zřejmě nejrozšířenější. Skládá se z nízkomolekulárních jednotek zvaných monomery, které se chemickou reakcí sloučí v polymer. [12, 20]

Polymery jsou jedním z nejlépejších materiálů na matrice. Mezi jejich výhody patří velmi vysoká měrná pevnost a modul, ale jen za nižších operačních teplot. Při vysokých teplotách se stávají buď nestabilními, nebo jsou náchylné k tečení. Dělí se na matrice termoplastické a termosetové. V letectví se v současnosti používají oba druhy, i když každá matrice je vhodná pro jiné použití. [4, 12, 21]

Termoplasty

Termoplasty jsou plasty, které lze, díky nadmolekulární struktuře, opakovaně tavit a znovu nechávat krystalizovat. Tento proces lze teoreticky opakovat do nekonečna, nicméně s každým dalším opakováním se mohou zhoršovat jeho vlastnosti. Na druhou stranu, opětovné tavení a krystalizace je základ recyklace tohoto materiálu. [12, 20]

Oproti termosetům mají termoplasty vyšší tuhost, lomovou energii a mohou mít lepší chemickou odolnost. Obecně pak bývají křehčí a dražší než termosety. Mezi další nevýhody patří náchylnost k tečení za vyšších teplot. Z technologického hlediska mají neomezenou zpracovatelnost a nemusí být uchovávány v chladu, jako v případě některých termosetů. [12, 21]

Termosety

Termoplasty tvoří většinu (až 80 %) polymerních matic na trhu. Díky dlouhodobému působení v oboru jsou cenově dostupnější. V letectví se vyskytují 30-40 let. [12, 15]

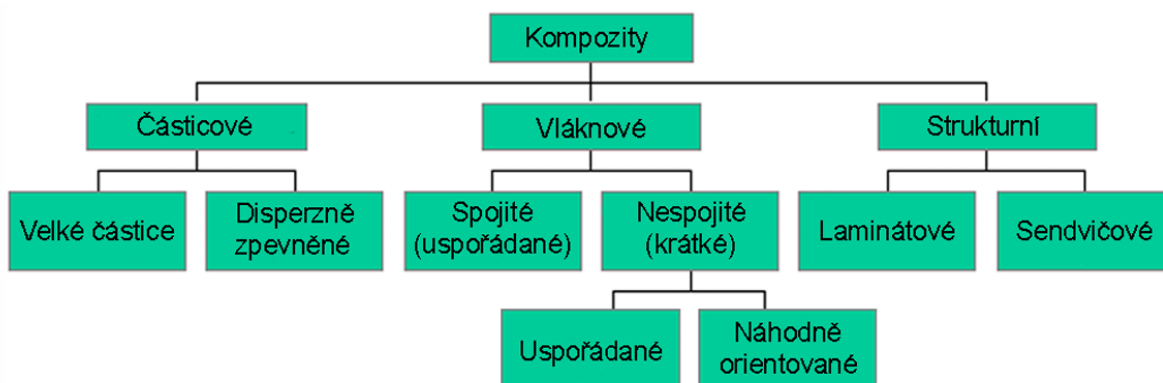
Na rozdíl od termoplastů, termosety nelze po vytvrzení znovu tavit, což je dáno sesíťovanou nadmolekulární strukturou. Vytvrzení probíhá za zvýšené teploty nebo za dodání katalyzátorů. Po zahřátí je jejich zpracovatelnost časově omezená, než dojde k vytvrzení. Poté je materiál nerozpustný a netavitelný. Při následném vystavení vysoké teplotě začíná materiál degradovat. [12, 20]

Mezi hlavní výhody patří dobrá smáčivost vůči výztuži a jednoduché tvarování. Mají dobré mechanické vlastnosti, ale poměrně nízkou lomovou houževnatost a vlivem struktury ztrácí stabilitu za vysokých teplot. Ve formě prepregů potřebují ke skladování velmi nízké teploty a jejich skladovatelnost je omezená. [12, 21]

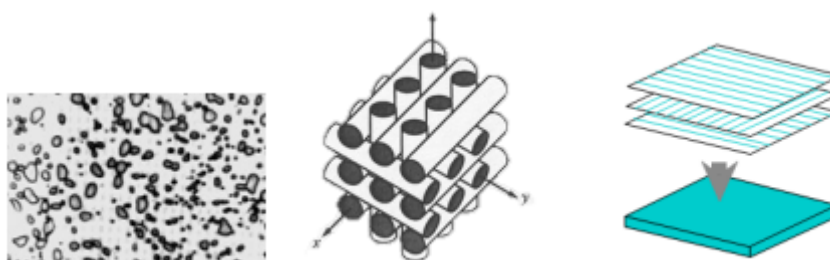
4.1.2 Výztuž

Výztuž v kompozitu je pevnější, tvrdší a tužší než matrice, čím zajišťuje materiálu dostatečnou pevnost a tuhost pro přenos zatížení. Obecné vlastnosti jsou závislé na struktuře a defektech výztuže. Vlastnosti celého kompozitu jsou ovlivněny tvarem, uspořádáním, rozložením výztuže a kvalitou rozhraní mezi výztuží a vláknem. [14, 22, 23]

Výztuž lze dělit dle velikosti a kontinuity na dlouhá vlákna, částice, nebo strukturální kompozity, jako je zobrazeno na obrázku 8. Struktura jednotlivých druhů výztuží je na obrázku 9. [14, 23]



Obr. 8: Dělení výztuží kompozitů [23]



Obr. 9: Struktura jednotlivých forem kompozitů. Vlevo časticová výztuž, uprostřed vláknová výztuž, vpravo strukturální kompozit [23]

Časticové kompozity se vyznačují izotropií mechanických vlastností, díky geometrii a rozložení částic v materiálu. Nejefektivnějšího zpevnění lze dosáhnout malými částicemi pravidelně rozloženými v celém objemu. Částice mají přibližně stejnou velikost ve všech směrech, a mohou mít sférický nebo jiný pravidelný i nepravidelný tvar. Dle velikosti se dělí na mikročástice a makročástice. Mikročástice jsou označovány jako disperzně zpevněné a jedná se například o keramické oxidy a karbidy – Al_2O_3 , SiC . [14, 22, 23]

Kompozity zpevněné částicemi mají menší obsah výztuže v objemu a také jsou méně pevné než kompozity vyztužené vlákny, což je kompenzováno nižší cenou, lehkou výrobou a formováním. [14, 22]

Vláknová výztuž je v kompozitech nejběžnější a nejvýrazněji ovlivňuje jejich mechanické vlastnosti. To je způsobeno štíhlostí vláken – delší vlákna mají větší poměr mezi délkou a průřezem, což zajišťuje efektivnější přenos zatížení mezi materiálem a matricí. Kromě štíhlosti jsou vlastnosti vláknových kompozitů ovlivněny navíc délkou a orientací

vláken. U dlouhých, uspořádaných vláken dochází nejvýrazněji k anizotropii materiálu, která lze rozebrat do dvou extrémů – ve směru osy vláken jsou vlastnosti znatelně lepší než ve směru kolmo na osu. [12, 14, 23]

Vláknové kompozity jsou významné vysokou pevností a chemickou a teplotní odolností. Vyšší pevnost je způsobena menším průměrem vláken, což negativně ovlivňuje cenu materiálu. Nejběžnějšími vlákny jsou v současné době vlákna uhlíková skleněná, anebo polymerní (aramidová, známá pod obchodní značkou Kevlar). [12, 14, 23]

4.1.3 Vlákenná výztuž

Jak bylo zmíněno výše, výztuž ve formě vláken je u kompozitních materiálů nejvyužívanější, protože má největší vliv na jejich vlastnosti. Vlákna lze dělit dle materiálu, ze kterého jsou vyrobena, dle jejich délky (krátká/dlouhá vlákna, která jsou která mají nahodilou nebo uspořádanou orientaci) nebo dle struktury na jednovrstvé a vícevrstvé (konstrukční). [14]

Materiál

Základní dělení materiálů vláken je na organická a anorganická. V letectví jsou nejvíce používána vlákna skleněná, uhlíková (oboje anorganické) a organická aramidová vlákna, známá jako Kevlar. [11, 12, 24, 25]

Skleněná vlákna jsou na trhu k dostání v mnoha druzích, z nich většina je na bázi oxidu křemičitého (SiO_2). Vyrábí se tažením skrz trysky z taveniny a mají amorfní strukturu. Pro lepší tažení lze přidat aditiva, která sníží teplotu skelného přechodu, avšak na úkor maximální teploty použití. Na základě složení se rozlišuje několik druhů vláken, z nich nejběžněji se používají vlákna označená písmenem E, které má elektroizolační vlastnosti. Mezi dalšími druhy je například sklo S, známé také pod označením S2 nebo R. Tento typ má vyšší pevnost v tahu a modul než E-sklo a využívá se například v leteckém průmyslu. Dalšími typy jsou C – chemicky odolná vlákna; D – nízká dielektrická konstanta; nebo M – vysoký modul pružnosti. [11, 12, 25]

Uhlíková vlákna jsou složena z vrstev grafenu, které mezi sebou mají silné vazby a orientují se rovnoběžně s osou vlákna. Zároveň mají vrstvy tendenci orientovat se paralelně vůči sobě. Tímto způsobem vzniká tzv. turbostratická struktura, kdy jsou vrstvy grafenu částečně orientované paralelně vůči sobě a částečně nahodile. Od struktury se dále odvíjí mechanické vlastnosti – čím dokonalejší struktura (méně neuspořádanosti), tím vyšší axiální modul a pevnost. Dle technologie výroby se vlákna dělí na vysokopevnostní a vysokomodulová. Vysokopevnostní vlákna jsou zpracovávána při nižších teplotách (do $1500\text{ }^\circ\text{C}$) a mají nižší hustotu a tuhost než vysokomodulová vlákna. Ta jsou zpracována jako vysokopevnostní vlákna a poté následuje ještě proces karbonizace při teplotách do $2800\text{ }^\circ\text{C}$, při kterém vzniknou grafitová vlákna. Tato vlákna mají vyšší hustotu a tuhost, ale jsou křehčí. [11, 12, 25]

Základními prekurzory uhlíkových vláken jsou buď polyakrylonitril (PAN), nebo pitch, což je anizotropní přírodně komplexní materiál. Výroba probíhá narovnáváním PAN vláken a karbonizací pitche při tahovém napětí, Rovnáním a tažením vláken pod napětím dochází k uspořádání vláken ve směru osy vlákna. Na dokonalosti uspořádání molekul následně závisí modul pružnosti i pevnost – čím lepší uspořádání, tím lepší mechanické vlastnosti.

Naopak dutiny v uspořádání mohou působit jako inhibitory napětí a vést k potenciálnímu selhání. [11, 12, 25]

Polymerní vlákna jsou vyráběna tažením, čím se polymerové řetězce uspořádávají podél osy vlákna. Nejznámější vlákna jsou z aromatického polyamidu (aramidu), známá pod názvem Kevlar. Oproti skleněným a uhlíkovým vláknům má relativně vysokou vrubovou houževnatost, a je proto vhodný například na výrobu neprůstřelných vest. [11]

Forma výztuže

Pro každou aplikaci vláknové výztuže je vhodná jiná forma vláken. Od výrobců jsou vlákna dodávána ve svazcích navinutých na bubnech, z čeho vychází nejjednodušší forma vláken – roving, který je dostačující na výrobky namáhané jednosměrným zatížením. Pro víceosé namáhání je vhodná úprava vláken do forem rohoží nebo tkanin. [25, 26]

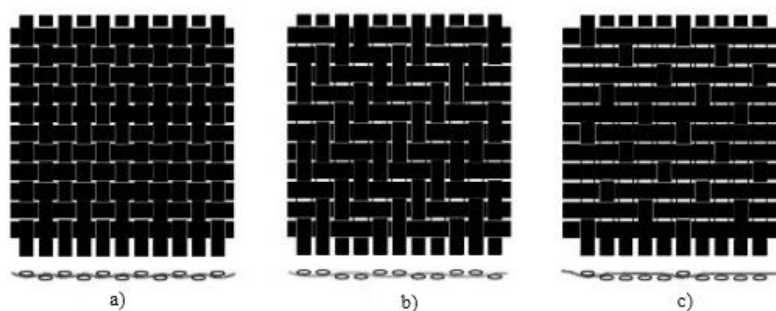
Roving: Jedná se o svazky složené z jednotlivých nekroucených vláken namotaných na cívce. Pro významnější vyztužení může mít i tkanou formu. Je vhodný pro jednosměrnou aplikaci a vlákna se dají dále sekát nebo zaplétat. [25, 26]

Rohož: Rohože se skládají z krátkých sekaných nebo středně dlouhých kontinuálních vláken, naimpregnovaných chemickým pojidlem. Následně se vlákna slisují do ploché rohože. Takto vytvořené rohože mají náhodnou orientaci vláken, což způsobuje izotropii vlastností. [25, 26]

Rohož může být ve dvou typech – vyztužující a povrchová. Vyztužující přenáší zatížení. Zatímco povrchová slouží spíše k estetickým účelům a zjemnění povrchu. [25, 26]

Tkanina: Vlákna se dají zpracovat do tkaných forem o různých vazbách, šířkách i gramážích. Na rozdíl od rohoží mají tkaniny vyšší tuhost a pevnost, protože obsahují vyšší podíl vláken, nicméně jejich křížení přes sebe tyto vlastnosti mírně omezuje. [25, 26]

Vlákna v tkanině mají dva hlavní směry na sebe kolmé – osnovu a útek. Způsob, jakým jsou vlákna vetkána mezi sebou ovlivňuje formovatelnost tkaniny. Jsou tři hlavní typy vazeb – plátno, kepr a atlas. Plátno je nejpevnější a umožňuje snadnou manipulaci bez výrazného třepení tkaniny. Kepr, význačný diagonálním žebrováním, je poddajnější, ale snáz se deformuje a třepí. Oproti plátnové vazbě se více hodí na tvarově složitější součásti. Atlas je z daných vazeb nejméně pevný. Způsob tkaní jednotlivých vazeb je znázorněn na obrázku 10. [24, 27]



Obr. 10: Vazby tkaniny. Zleva a) plátno, b) kepr, c) atlas [24]

Hybridní tkaniny: Tkaniny vyznačující se různými typy vláken nebo struktur, které se mohou aplikovat ve specifických aplikacích. [25, 26]

Prepreg: Prepregy jsou předem naimpregnovaná jednosměrná nebo jiná plochá vlákna. Jako matrice většinou slouží termoplastická nebo reaktoplastická pryskyřice, která se poté nechá částečně vytvrdit a skladuje se do doby aplikace. Reaktoplastické prepregy v tomto stavu jsou náročné na skladování, protože potřebují chlad a mají pouze omezenou životnost, pokud nedojde ke včasnému zpracování, začne se pryskyřice dále vytvrzovat samovolně. Termoplasty oproti tomu nemají takto omezené skladovací podmínky, ale jsou náročnější na manipulaci. [25, 26]

Jedna vrstva se může pohybovat v rozměrech mezi 0,1 – 0,5 mm. Mezi jejich výhody patří velmi nízká hmotnost výsledného produktu a dobré mechanické vlastnosti. Díky přesnému a rovnoměrnému poměru výztuže a matrice je celý proces jednoduše reprodukovatelný a díly jsou homogenní s nízkým obsahem dutin. Nicméně, tato úprava vláken je cenově nákladná, proto je její aplikace omezena na odvětví, kde je primární fokus na kvalitu produkce. [25, 26]

4.2 Strukturní kompozity

Strukturní kompozity jsou uspořádané vrstvy kompozitů spojeny pojivem. Vlastnosti celého kompozitu pak závisí jeho geometrií a na vlastnostech jednotlivých vrstev. Lze je dělit na dva základní typy: lamináty a sendvičové panely. [28]

4.2.1 Laminát

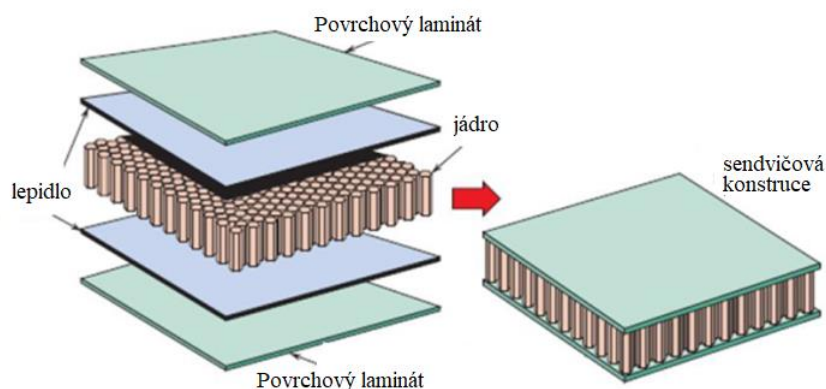
Laminát se skládá z jednotlivých lamin. Lamina je označení pro vlákna uložená v matrici, která mají převážně větší délku a šířku než tloušťku. V zásadě se jedná o jednosměrná vlákna nebo tkaniny, které mají dva různé směry hlavních os – ve směru vláken a kolmo na ně. [28, 29]

Při uspořádání více lamin na sebe vznikne laminát. Laminy lze vrstvit v různé orientaci vláken, tak aby odpovídala požadavkům na namáhání výsledného kompozitu. Pokud jsou vlákna naskládána symetricky dle střední osy výsledného laminátu, jedná se o symetrický laminát. [28, 29]

Celkové vlastnosti lze vypočítat pomocí klasické laminační teorie, pro jejich potvrzení se poté kompozit testuje. [28, 29]

4.2.2 Sandwich

Sendvičové kompozity se skládají ze dvou složek – z tenkých a tuhých plátů, mezi kterými je měkčí jádro o větší tloušťce. Jádro má podstatně nižší hustotu než pláty a může být ve formě pěny, voštin či vrubované. Pláty mohou být kovové, nebo vláknové kompozity. Spojení těchto dvou fází lze provést lepidlem. Kovové pláty je navíc možné nýtovat i svařovat (s kovovými vrubovými jádry) a kompozitové lze vytvrdit spolu s pěnou. Na obrázku 11 je znázorněna struktura sendviče s voštinovým jádrem. [28–30]



Obr. 11: Struktura sendvičové konstrukce. Převzato z [31]

Pro dobrý poměr pevnosti vůči hmotnosti mají velké uplatnění v leteckém a kosmickém průmyslu. Mezi další výhody patří dobrý poměr ohybové tuhosti vůči hmotnosti (při porovnání s monolitní konstrukcí), odolnost vůči mechanické únavě nebo zlepšená teplotní izolace. Nevýhody jsou potřeba zkušených zaměstnanců ve výrobě i kontrole kvality, riziko vzniku defektů v průběhu životnosti v podobě delaminace nebo koroze, které naruší vlastnosti a integritu materiálu. [28–30]

4.2.3 Jádro sadnwiche

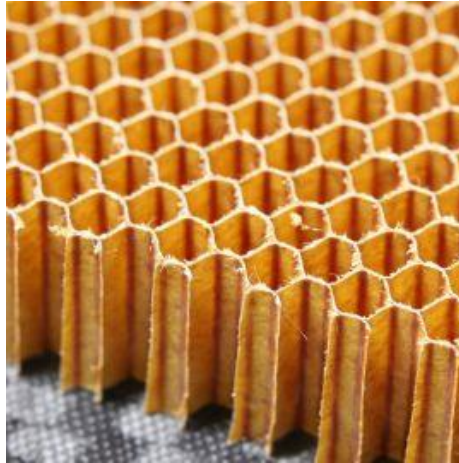
Pro tvorbu sendviče je důležitá vhodná volba jádra, která by měla odpovídat oblasti cíleného použití kompozitu. V současnosti lze vybírat mezi spoustou parametrů, nejdůležitější jsou materiál, hustota a rozměry. Nejběžnější jsou polymerní pěny nebo voštiny z různých materiálů. [24, 30]

Pěnová jádra

Pěnová jádra mají obvykle větší hustotu než voštiny a jsou méně pevné. Lze je tvarovat pouze v jedné rovině a nepoužívají se tak na složité tvary. Nejčastější pěny jsou polyuretanové, polystyrenové (Styrofoam), fenolické nebo pěny z polymetakrylimidu, které jsou známé pod obchodním názvem Rohacell®. Přestože má Rohacell® vyšší pořizovací cenu, je výhodný pro jeho velmi dobré mechanické vlastnosti, jako například tepelná stabilita a odolnost vůči rozpouštědlům. [24, 30]

Voštiny

V anglickém jazyce jsou voštiny známé pod názvem „honeycomb“, díky svému charakteristickému tvaru – šestiúhelníkovým buňkám, které jsou jedna vedle druhé, totiž připomínají včelí plástve, viz obrázek 12. Nicméně, na trhu jsou k dostání i další tvary – FLEXCORE jsou buňky ve tvaru zvonku a jsou velmi flexibilní, což je vhodné pro aplikaci na panely s komplexní geometrií. Dalším tvarem jsou přeexpandované šestiúhelníky, což způsobí obdélníkový tvar buňky. Buňky jsou také velmi flexibilní, ale používají se na kompozity s jednoduššími křivkami. Tuhost je poté ovlivněna i velikostí a hustotou buněk – menší buňky a vyšší hustota materiálu má na svědomí vyšší tuhost. [24, 30]



Obr. 12: Voštiny z aramidového papíru [32]

Vyrábí se naskládáním jednotlivých plátů materiálu na sebe a jejich prolepením na v pravidelných intervalech. Následně je materiál expandován. Neslepené části se roztáhnou a vznikne geometrie šestiúhelníku. [24, 30]

Mezi nejčastější materiály na výrobu voštin patří aramidový papír, kov (například titan, ocel či hliník) nebo skelná tkanina. Konkrétní materiál se volí dle aplikace, například výše uvedené kovy jsou vhodné pro přenos tepla, a naopak aramidový papír zpomaluje hoření a má dobré izolační vlastnosti. [24, 30]

4.3 Galvanická koroze

Galvanická koroze vzniká, když se vodivě spojí dva materiály s odlišným elektrochemickým potenciálem při umístění do elektrolytu. Při této reakci vzniká galvanický proud, který korozně ovlivňuje anodu. Na té se vytvoří korozní produkt, zatím co na katodě se korozní náchylnost snižuje. V galvanickém článku je anoda ten méně ušlechtilý materiál (s nižším potenciálem), více ušlechtilý se chová jako katoda. [8, 33]

Uhlík má oproti většině konstrukčních kovů velmi vysoký elektrochemický potenciál, tudíž ve spojení často tvoří galvanický článek. V kombinaci s těmito kovy pak jsou uhlíková vlákna chráněna a kov podléhá degradaci. Rychlost a agrese reakce je ovlivněna elektrolytem a styčnou plochou – čím větší plocha, tím horší koroze. [8, 3]

4.3.1 Ochrana proti galvanické korozi

Z poznatků uvedených v kapitole 4.3 vyplývá, že před galvanickou korozí lze materiál chránit různými způsoby, například volbou více ušlechtilého materiálu, aby nebyl vysoký rozdíl v elektrochemickém potenciálu uhlíku a kovu, nebo se nabízí možnost zabránit přímému kontaktu daných materiálů. [34]

Titan a jeho slitiny jsou vhodnými spojovacími prvky, přestože mají nižší potenciál. Titan při kontaktu s kyslíkem tvoří na svém povrchu tenkou oxidickou vrstvu, která více přibližuje jeho potenciál k uhlíku. [34, 35]

Dalším způsobem, jak zabránit korozi je nahradit uhlíková vlákna v místě styku, čím bude přerušena vodivý článek. Případně lze vytvořit na hliníkovém materiálu eloxovanou vrstvu, která zabrání přestupu elektronů z jednoho materiálu do druhého. Alternativní možností je slepování dílů pomocí epoxidové pryskyřice. [34]

4.4 Volba materiálu

Materiály na návrh byly ovlivněny dostupností v AVA. Na návrh byla využita uhlíková vlákna dodávaná ve formě prepregu a pro případné sendvičové konstrukce bylo jako jádro zvolena pěna.

4.4.1 Uhlíková vlákna

Vlákna byla uvažována ve dvou formách – tkanina a jednosměrná vlákna. Vazba vláken ve tkanině je pláno. Tloušťka jedné vrstvy byla počítána jako 0,25 mm.

Vybrané materiálové charakteristiky důležité pro návrh a následnou analýzu jsou uvedeny v tabulce 1 níže.

Tabulka 1: Materiálové vlastnosti uhlíkových tkanin poskytnutých AVA [36]

Vlastnosti	Tkanina		Jednosměrná vlákna	
	Osnova	Útek	0°	90°
Pevnost v tahu MPa	650 (635)	60 (600)	1930 (1720)	64
Pevnost v tlaku MPa	840 (740)	780 (670)	1480 (1300)	260 (230)
Pevnost ve smyku MPa	55 (48)		55 (49)	-
Interlaminární smyková pevnost MPa	80 (74)	-	110 (100)	-
Modul pružnosti v tahu GPa	55–70		118–160	7,3–11,7
Modul pružnosti v tlaku GPa	50–70		110–140	9,0–12,0
Modul pružnosti ve smyku GPa	4,0–5,0		3,5–6,0	

Poznámka: hodnoty v tabulce jsou průměrné hodnoty pro daný materiál při teplotě 24 °C. V závorkách jsou uvedeny minimální možné hodnoty.

4.4.2 Pěnové jádro

Jádro je zvoleno na polymetakrylimidové bázi Rohacell® 110 WF. Označení 110 v názvu značí jeho hustotu. Jedná se o typ pěny speciálně navržený pro letecký a kosmický průmysl. [37]

Tloušťka pěny se od dodavatele pohybuje v rozmezí od 5 do 95 mm [37]. Podle požadavků z AVA byla nejmenší tloušťka pěny uvažována 10 mm.

Vybrané materiálové charakteristiky jsou uvedeny v tabulce 2 níže. Materiálový list je součástí přílohy A.

Tabulka 2: Materiálové vlastnosti Rohacell® 110 WF. [37]

Vlastnosti	Rohacell® 110 WF
Hustota [kg/m ³]	110 ± 21
Pevnost v tlaku [MPa]	3,1 (2,2)
Pevnost v tahu [MPa]	3,7 (2,5)
Modul pružnosti v tahu [MPa]	180 (135)
Pevnost ve smyku [MPa]	2,2 (1,75)
Modul pružnosti ve smyku [MPa]	60 (40)

Poznámka: hodnoty v tabulce jsou typické hodnoty pro daný materiál. V závorkách jsou uvedeny minimální možné hodnoty.

5 Technologie výroby

V této kapitole budou popsány způsoby výroby vláknových kompozitů. Typický postup je pro spoustu technologií v základu stejný, liší se poté v dostupnosti technologických zařízení. Po dodání vláken v různých formách je materiál střižen do požadovaného tvaru. Následuje příprava náčiní a pracovního prostoru, kde je poté materiál vrstven na sebe a případně prosycován matricí nebo lepidlem. V závislosti na technologii se materiál nechá vytvrdit. To vše je doprovázeno kontrolou kvality. [25, 29]

V podstatě základní technologií odpovídající popsanému postupu je ruční kladení. Časté procesy, vycházející z této technologie, jsou například vakuování nebo vytvrzování v autoklávu. [25, 29, 38]

Mezi další běžně užívané procesy patří navíjení či pultruze. [29]

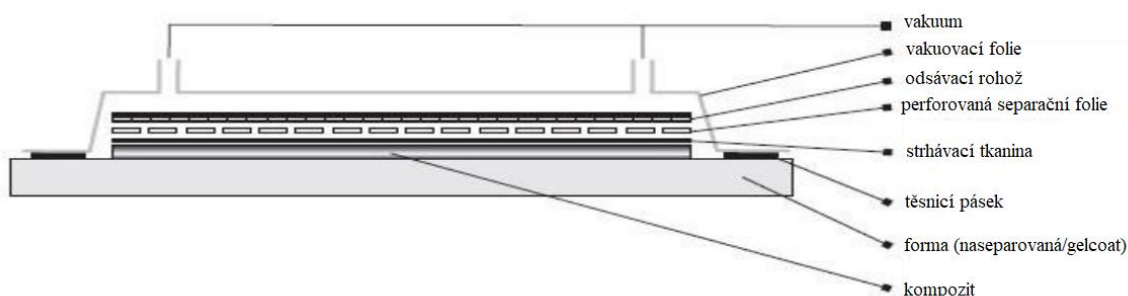
5.1 Ruční kladení

Ruční kladení je nejstarší technologie. Pro výrobu je vyžadována forma (pozitivní či negativní), do které se ručně skládají tkaniny a aplikuje výztuž. Na formu se nejprve nanese separační povlak a gelcoat, který má estetický a ochranný charakter. Vrstvy vláken se skládají jednotlivě a štětcem nebo válečkem se prosytí pryskyřicí. Takto se nechá materiál vytvrdit. [25, 38]

Využití ručního kladení je v současnosti při výrobě malých sérií nebo při výrobě prototypů. Výhodou je zde určitě jednoduchost technologie a malá náročnost na náčiní, nicméně celý proces není velmi produktivní, je potřeba zkušených pracovníků a výrobek má pouze jednu kvalitní stranu. Navíc jak tato, tak i další podobné technologie produkují velké množství jednorázového odpadu. [25, 38]

5.2 Vakuování

Základ je stejný jako u ručního kladení, jen ve fázi před vytvrzením je materiál zabalen do gumového pytle, případně je přes něj vzduchotěsně umístěn pružný film. Následně je odsán vzduch a vytvrzení probíhá pod tlakem přibližně jedné atmosféry. S odsáním vzduchu se zároveň odsává i přebytečná pryskyřice, což zajistí vyšší kvalitu výrobku, větší podíl výztuže a lepší mechanické vlastnosti. Nevýhody jsou obdobné jako u ručního kladení. Na obrázku 13 je zobrazena skladba vrstev při procesu vakuování. [25, 38]



Obr. 13: Technologie vakuování. Převzato z [39]

Vakuování lze doplnit o tlakový vak, který při vytvrzování vytváří dotlak z druhé strany (tlačí na vakuum), čímž jsou ještě zvýšeny mechanické vlastnosti a kvalita výrobku. [25, 38]

5.3 Vytvrzování v autoklávu

Tento proces je opět obdobný jako ruční kladení, ovšem již je vhodný výhradně pro vytvrzování prepregů. Autokláv (Obr. 14) je tlaková komora, ve které při vytvrzování působí na výrobek zvýšená teplota i tlak. [25, 38]



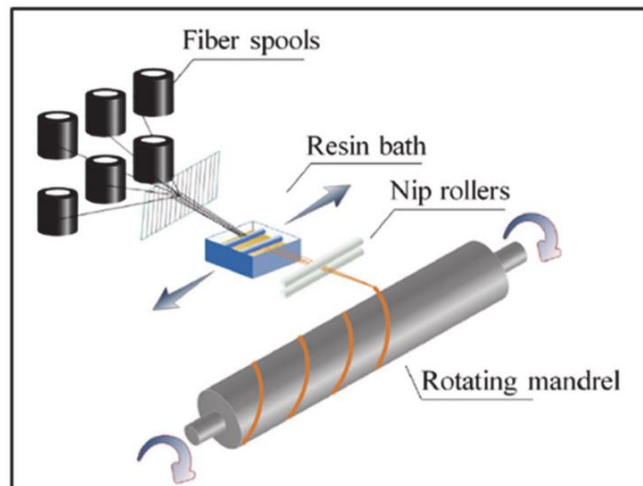
Obr. 14: Autokláv [40]

Obecně se jedná o velmi náročnou technologii s vysokou kvalitou výsledného produktu – ještě vyšší obsah vláken s ještě lepšími mechanickými vlastnostmi. V autoklávu lze vytvrzovat i více součástí najednou, ale vše je omezeno velikostí tlakové komory. Mezi další nevýhody patří například i vyšší nároky na formy, což zvyšuje cenu. [25, 38]

Využití autoklávu je běžné v leteckém průmyslu pro výrobu primárních i sekundárních strukturálních dílů. [25, 38]

5.4 Navíjení

Na obrázku 15 je zobrazen proces navíjení. Jedná se o automatizovanou technologii, při které se navíjí pramence vláken z cívek (fiber spools) na rotující pozitivní formu – rotační trn (rotating mandrel). Ukládací rameno se opakovaně posouvá tam a zpět, čím vytváří úhel mezi vlákny a vyplňuje formu. Vlákna jsou předepjatá, aby bylo jejich kladení přesné. Vlákna jsou nejprve tažena skrz vanu s pryskyřicí (resin bath), poté jdou skrz regulační válce (nip rollers), kde jsou zbavena přebytečného pojiva a poté jsou navíjena. Lze použít i prepreg, čímž odpadá proces impregnace vláken. Jako materiál se používá skleněný, uhlíkový i kevlarový roving. [25, 38]

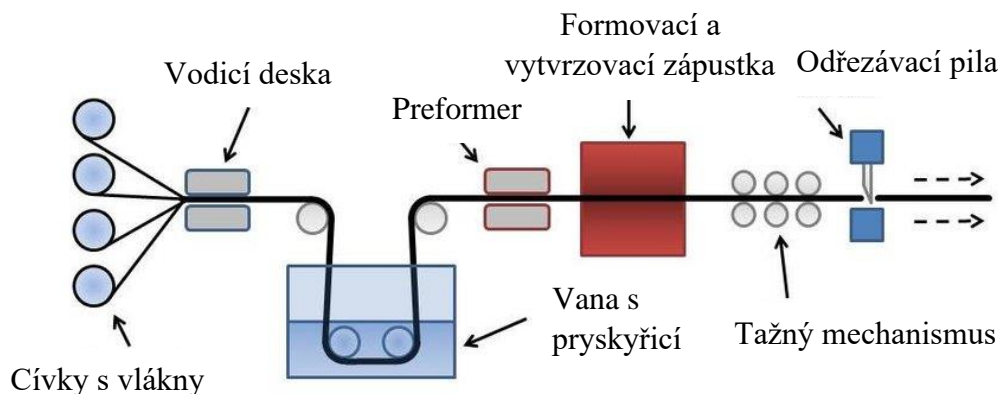


Obr. 15: Technologie navíjení [41]

5.5 Pultruze

Pultruze je kontinuální proces, kdy vznikají tažené profily. Tažení probíhá skrz tvarovanou a nahřátou formu, ve které může proběhnout proces vytvrzení. Výsledný profil výrobku může být dutý, plný nebo i komplexnějších tvarů. [25, 38]

Obdobně jako u navíjení, lze pracovat buď s prepregem, nebo lze materiál prosytit ve vaně s pryskyřicí. Proces je zobrazen na obrázku 16. [25, 38]



Obr. 16: Proces pultruze. Převzato z [42]

5.6 Proces vytvrzování

Vytvrzení je proces, kdy se z kapalně matrice stane pevná hmota. U termosetových matric probíhá chemickou reakcí, vzniklou za působení tepla či jiného vytvrzovacího činitele. V průběhu procesu při zahřátí její viskozita poklesne a poté prudce vzroste. Termoplastové matrice jsou vytvrzovány na základě rekrystalizace z taveného stavu. V obou případech je potřeba přivádět energii k ohřevu, případně tlak, kontrolovaně. Teplota může být pro vytvrzení přiváděna třemi způsoby – vedením (autokláv, pec), prouděním (například tzv. „hot press“) a sáláním (UV/mikrovlnné záření). [43]

V průběhu vytvrzování je snaha dosáhnout kontrolovaného toku pryskyřice, aby došlo k jejímu jednotnému rozložení, co nejlepšímu odstranění dutin a aby se nezměnila orientace vláken. Zároveň je potřeba kontrolovaný přenos tepla, protože příliš vysoká teplota by mohla pryskyřici degradovat. [43]

6 Spojování kompozitních materiálů

Jedním ze základních problémů při návrhu kompozitních konstrukcí jsou návrhy spojů a upevnění kompozitů ke zbylé konstrukci. Spojovat kompozity lze mechanicky, lepením, nebo kombinací těchto dvou metod. Mechanické spoje, jako třeba nýty, mohou být pro konstrukci fatální. Díry pro spoj jsou koncentrátory napětí, čímž oslabují odolnost materiálu vůči lomu. Pokud byla díra vytvořena ještě před vytvrzení, hrozí navíc poškození uspořádání vláken nebo jejich porušení. [44, 45]

Oproti tomu má lepení kompozitů své výhody, mimo jiné, lepidlo absorbuje rázy a dokáže rovnoměrně přenést zatížení skrz styčné plochy. [46]

Spojovat kompozity lze například i svařováním, nicméně je při použití s termosetovou maticí. Ta by vlivem vysoké teploty degradovala. Matrice použitá na prepreg v této práci je termosetová, a z tohoto důvodu nebude tento způsob spojování dále rozebrán. [46]

6.1 Mechanické spoje

Mechanické spoje jsou v kompozitních konstrukcích stále velmi časté. Z velké části je to proto, že samotné lepení nelze vhodně pevnostně testovat, tudíž je v některých případech potřeba použít mechanické spoje i do lepených konstrukcí. Výhody mechanických spojů jsou ty, že pro jejich aplikaci není potřeba předúprava povrchu, v provozu nejsou spoje citlivé na provozní teploty a vlhkost a jsou rozebíratelné. Spojovací součásti mohou být klasické šrouby, kolíky, nebo nýty, kterým bude věnována samostatná podkapitola. [44]

Při návrhu je potřeba dbát na určité konstrukční zásady, protože nesprávně navržený spoj může vést k poruchám. Mimo jiné se jedná o dostatečnou tloušťku laminátu, aby nebyla zvedána hlava šroubů a nýtů, kompatibilitu materiálů s ohledem na galvanickou korozi nebo dostatečné rozteče otvorů. Důležitá je i volba nástroje pro hloubení otvorů, aby lokálně nedegradoval matici generovaným teplem. [44]

Přítomnost díry pro spoj nýty nebo šrouby způsobí materiálu razantní snížení pevnosti v tahu, případně i v tlaku. Tlak, působící na stěnu díry vlivem uložení nýtu nebo šroubu, může vyvolat přílišná napětí, která vedou k poškození. Dalším faktorem poškození mohou být samotné spojovací materiály – prázdná díra je pevnější o 40 % než díra se šroubem/nýtem. [44]

Mezi další poruchy, vyvolané především otvorem pro spoj, jsou přerušená vlákna přenášející zatížení, třepení vláken, případně jejich vytržení z materiálu nebo modifikovaná orientace, pokud je otvor vrtán v ještě nevytvrzeném materiálu a delaminace kompozitu. [44]

V kombinaci s mechanickými spoji je možné použít i lepení, což vytvoří pevnější, nerozebíratelné spoje. [44]

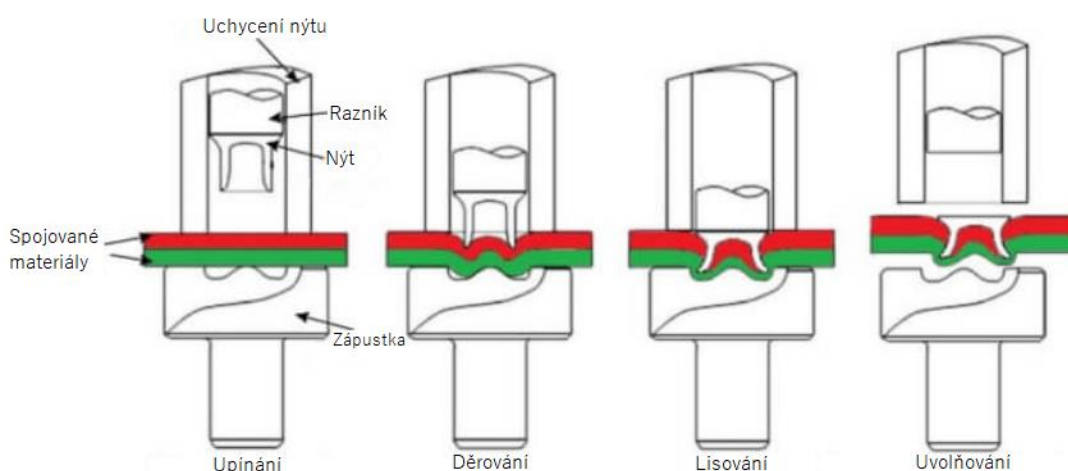
6.1.1 Nýtování kompozitů

Nýtování je forma nerozebíratelných spojů. Kovové nýtování funguje na principu aplikace nýtu do otvoru, kde se z jedné strany opře hlavou a z druhé strany je nýt přechován a vytvoří závěrnou hlavu. Takto aplikované zatížení nelze použít u kompozitů, vedlo by k porušení matrice v okolí spoje. [44, 47]

Pro vytvoření nýtových spojů je potřeba použít jiné typy nýtování, například lze použít slepé nýty, samopropichovací nýty nebo nýtování třením. Případně lze do konstrukce vložit inserty. [44, 47]

Základem třecího nýtování je přenos tepla a natavení spoje i matrice v okolí, tudíž je jeho použití v polymerních kompozitech omezeno na termoplasty. [47]

Samopropichovací nýty lze použít pro spojování stejných či různorodých materiálů. Tvar nýtu je přizpůsoben tomu, aby v povrchu nemusel být předpřipravený otvor, což redukuje počet technologických kroků a zmírní riziko degradace materiálu. Tyto nýty fungují tak, že jsou z jedné strany natlačeny do spojovaných dílů, přičemž prvním dílem projdou skrz. Pod druhým dílem je zápusťka, díky které je ocas nýtu deformován a vytvoří tak pevný spoj. Nevýhodou této metody je, že musí být dostupné obě strany spojovaných součástí. Na obrázku 17 je znázorněn postup nýtování. [47, 48]



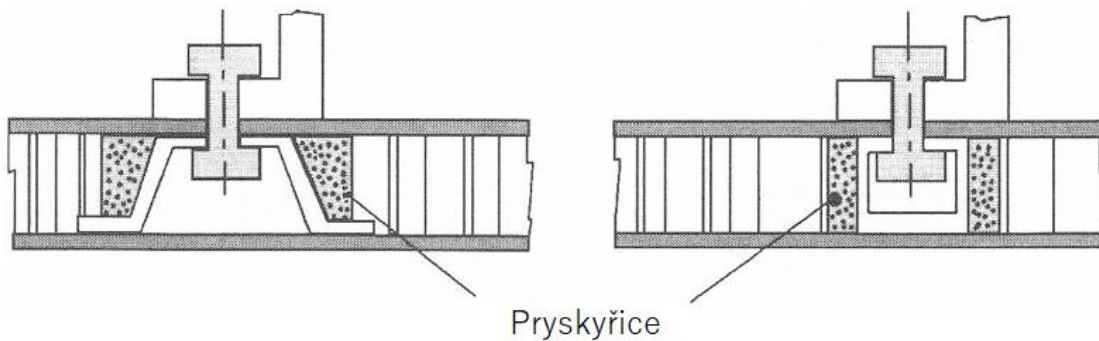
Obr. 17: Schematický postup nýtování samopropichovacími nýty [48]

Slepé nýty jsou uvnitř duté se závitem. Nýt je navrtán na nástroj, vložen a přitlačen do připraveného otvoru. S hlavou stále přitlačenu k povrchu dílu se začne nástroj vyvrtávat, čím je vytvořena závěrná hlava nýtu. Na obrázku 18 je zobrazen rozdíl mezi slepým nýtem do kovu a do kompozitu. [49]



Obr. 18: Vlevo slepý nýt do kompozitu [50], vpravo slepý nýt do kovu [51].

Inserty je možné aplikovat do sendvičové konstrukce. Jejich aplikací se sníží přenášené zatížení do konstrukce. Inserty mohou být závitové, nebo bez závitů, vhodné pro nýtování. Na obrázku 19 níže je zobrazeny inserty s nýty v sendvičové konstrukci. [44]



Obr. 19: Insety v sendvičovém dílu s nýty [44]

6.2 Lepené spoje

Kromě výše uvedených výhod má lepení další benefity – má nízkou hmotnost, umožňuje preciznější geometrii a může sloužit jako izolant, čímž může chránit před galvanickou korozi. Lze spojovat rozdílné nebo velmi tenké materiály, případně lepit velké plochy, výhod je zde opravdu mnoho. Na druhou stranu, je potřeba předem připravit lepený povrch, vytvrzení lepidla trvá poměrně dlouhou dobu, spoje jsou náchylné k odlupu a tečení. Prokázat pevnost je možné pouze destruktivními zkouškami a pro průkazy je potřeba testovat spoje až příliš vysokým zatížením. [44, 46, 52]

Vhodné lepidlo je pro každou aplikaci jiné, nicméně je třeba, aby dokázalo přenést napětí ve spoji. Pro správný výběr lepidla je vhodné znát modul pružnosti materiálu či jeho požadavky na kohezní pevnost. Tvorba kvalitních spojů závisí také na předúpravě lepených částí, vhodném návrhu spoje včetně optimální tloušťky spáry nebo na podmínkách vytvrzení lepidla. [44, 46, 52]

6.2.1 Metody lepení

Existuje několik způsobů, jak lze lepit kompozity. Ty ovlivňují pevnost spoje, nebo například i způsob a mód porušení. Jedná se o co-curing (spoluvytvrzování), co-bonding (v české terminologii by se dalo říci spolulepení), sekundární lepení a lepení rozdílných materiálů. V podstatě se liší fází vytvrzení lepených dílů. [52, 53]

Co-curing

Spoluvytvrzení je proces, při kterém se spojují dva nebo více nevytvrzených dílů. Princip je, že jsou všechny části vytvrzeny současně. [52, 53]

Co-bonding

Touto metodou jsou vytvrzovány díly, z nich vždy alespoň jeden je předem vytvrzený. Pro vláknové kompozity s termosetovou maticí se jedná o efektivní proces, který může minimalizovat potřebu lepidel a mechanických spojů. Zároveň bylo v různých studiích prokázáno, že se jedná o nejpevnější spoj ze zde uvedených. [52–54]

Sekundární lepení

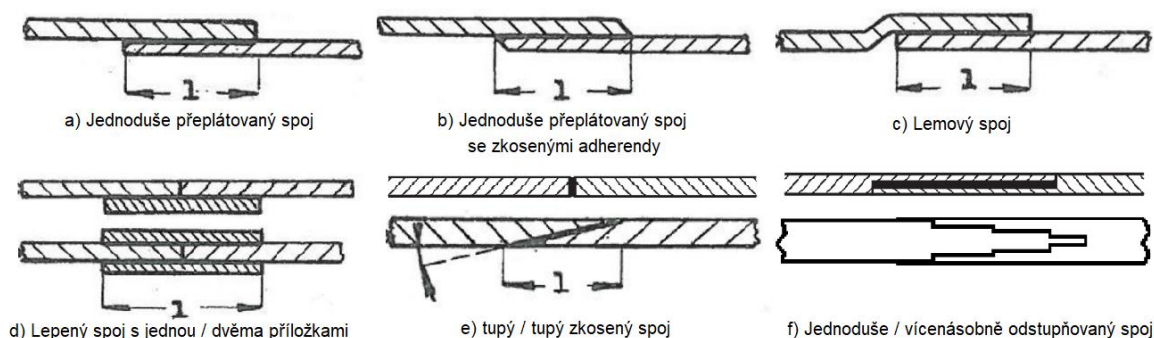
Z anglického *secondary bonding*, jedná se o způsob spojení dvou (nebo více) již vytvrzených dílů. K aplikaci je vždy potřeba lepidlo, které je jediné vytvrzováno. Dále je třeba předupravit lepené plochy, a často je potřeba díly upnout do přípravku, kvůli zachování tvaru. [52–54]

Lepení rozdílných materiálů

V některých případech je výhodné použít například kovové materiály v kombinaci s kompozitními, pro jejich vlastnosti – například kovy jsou výhodnější z hlediska únavové životnosti, ale kompozity jsou podstatně lehčí a konstrukčně vhodnější. Lepení je jedna z možných variant jejich spojení. Proces funguje stejně, jako u sekundárního vytvrzování. Je potřeba mít již vytvrzené kompozitní díly a precizně připravený povrch. [52, 54]

6.2.2 Typy spojů

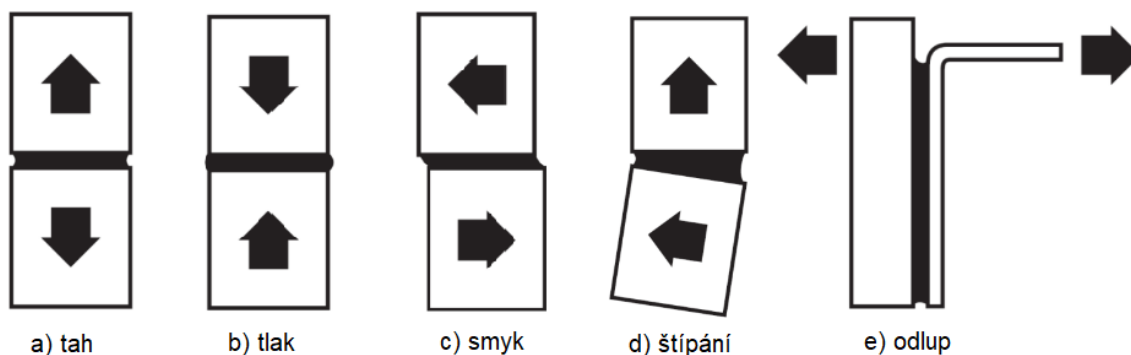
Způsobů, jakým k sobě spojit kompozity, existuje mnoho. Na obrázku 20 jsou příklady spojů uvedeny a pojmenovány.



Obr. 20: Příklady typů lepených spojů. Převzato z [52]

6.2.3 Namáhání a poruchy

Kromě klasických módů namáhání (tahové, tlakové a smykové) jsou lepené spoje namáhány i na štípání či odlup od sebe. Tato namáhání jsou na obrázku 21.



Obr. 21: Módy namáhání lepených spojů. Převzato z [52]

Existují čtyři způsoby, jakými může dojít k poruše. Porucha v adhezi, kdy se od sebe oddělí lepidlo a adherend, porucha v kohezi – nedostatečná soudržnost molekul způsobí poruchu v lepidle, smíšená kohezní a adhezní porucha, při které jsou od sebe díly odtrženy oběma způsoby a porušení v dílu, ve kterém dochází k interlaminární delaminaci. [35, 52]

6.2.4 Lepidla

Pro každou aplikaci je třeba vybrat vhodné lepidlo. V praxi se lze nejčastěji potkat s epoxidy, akryláty, estery, uretany, nebo bismaleimidy. Dále je možnost volit mezi lepidly vytvrzovanými za studena, nebo za tepla. [46, 52]

Epoxid je při lepení nejběžnější. Zaručí vysoce kvalitní spoje a v jeho modifikacích je vhodný pro různá použití. Mezi jeho typy patří modifikovaný epoxid, který je flexibilní, čímž dobře utlumí rázy; jednosložkový epoxid, zaručující vysokou pevnost spoje, ale při vytvrzování je třeba svorky a pec; a dvousložkový epoxid, který nabízí, kromě vysokopevnostní aplikace i jistou univerzálnost v použití. Podobně jako epoxidy lze použít i uretany. [46]

Akrylátových lepidel existuje spousta druhů. Obecně poskytují vysokou pevnost s poměrně krátkou dobou vytvrzování. [46]

Kyanoestery mají nízkou teplotní roztažnost a dobré izolační schopnosti. Navíc mají oproti epoxidům a bismaleimidům velmi malou absorpci vody. [52, 55]

Bismaleimidové pryskyřice jsou známy především pro vysokou teplotu skelného přechodu a tím i odolnost vysokým teplotám. [52, 56]

Teplota vytvrzování je jeden z parametrů pro výběr lepidla. Lepidla vytvrzovaná za tepla (tzv. hot bonding) mají výrazně lepší mechanické vlastnosti (například smyková pevnost se může být vyšší o 5–10 MPa při pokojové teplotě) a jsou dobře odolné environmentálním vlivům okolí. Jejich vytvrzení probíhá při teplotách v rozmezí 120–180 °C. Obvykle jsou ve formě fólií. [44, 52]

Spoje vytvrzené za studena (tzv. cold bonding) jsou vytvrzovány při pokojových teplotách. Pojivo je obvykle ve formě dvousložkové (či vícesložkové) pasty. Spoje jsou více náchylné na odlup a mají obecně horší mechanické vlastnosti. [52]

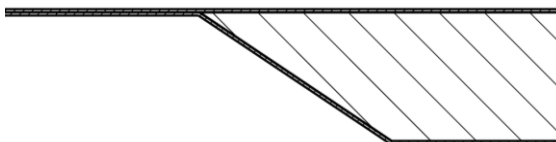
7 Návrh technologie pro výrobu stabilizátoru L39NG

Na základě výše provedené rešerše a požadavků z AVA byla navržena technologie pro výrobu stabilizátoru. Na výrobu bude použit uhlíkový prepreg ve formě tkaniny a jednosměrných vláken, případně pěnové jádro pro výrobu sendvičových prvků. Formou sendviče budou vyrobeny potah, žebra a stojiny nosníků, pásnice nosníků a lemy žeber jsou formou čistého laminátu.

Materiály budou skládány do forem formou ručního kladení a následně proběhne vytvrzení v autoklávu.

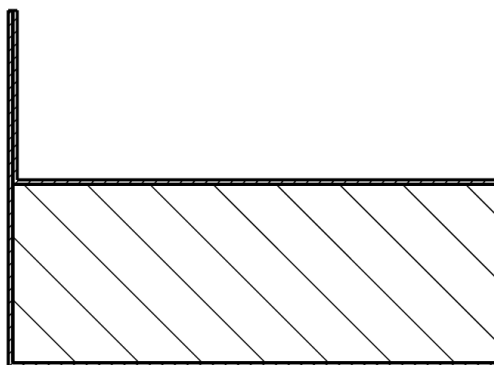
7.1 Sendvičové konstrukce

Dle požadavků AVA byl proveden návrh tak, aby nebyly konstrukce lepeny v místech, kde je ve struktuře pěna. Ta musí být před každým lepeným spojem ukončena a za spojem bude následovat další část pěnového jádra. Pěnová jádra budou ukončena úkosy, aby byl zajištěn plynulý přechod tloušťky materiálu. Na obrázku 22 je zobrazeno ukončení sendvičové struktury na potahu.



Obr. 22: Ukončení sendvičové struktury na potahu

Stojiny a žebra budou mít tloušťku pěny na hranách ukončenou jako je zobrazeno na obrázku 22. V místech, kde nosníky navazují na žebra, bude pěnové jádro přerušeno stejně jako potah.



7.2 Návrh formy

Dle požadavků z AVA byly na formy uvažovány dva druhy materiálů – hliník a uhlíkový kompozit. Hliník má o něco vyšší teplotní roztažnost než uhlíkový kompozit, což by bylo potřeba zohlednit při výrobě forem. Protože byl navržen na stabilizátor kompozitní materiál z uhlíkových vláken, je výhodnější vytvářet formy z uhlíkových vláken. [57, 58]

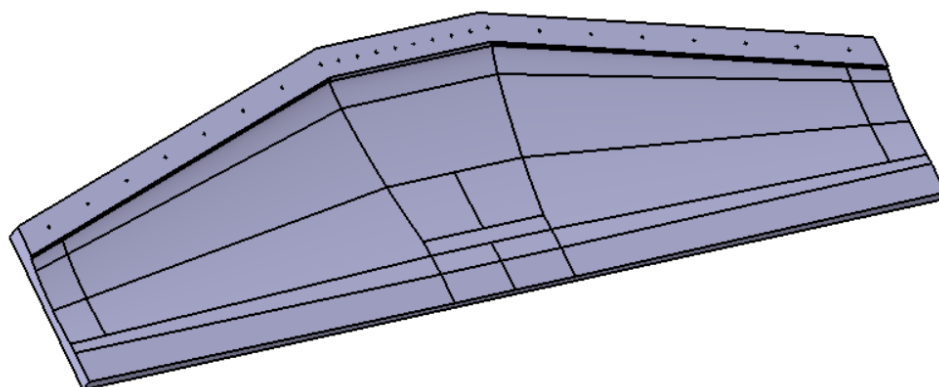
Formy byly tvořeny tak, aby na vodorovné ploše mimo tvarovou část dílu bylo možné umístit odsávací ventil, s přesahem 5 ~ 10 mm.

7.2.1 Formy na potahy

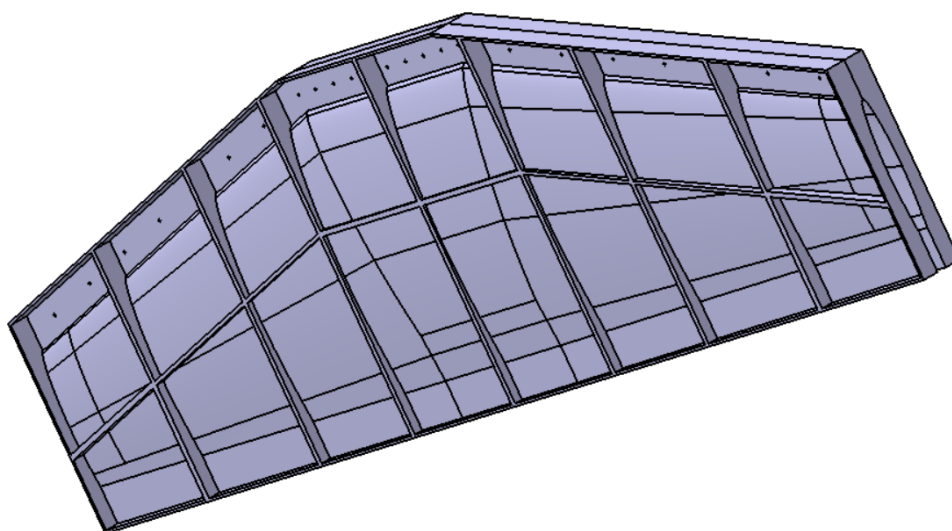
Forma na potah je negativní a je rozdělena na horní a dolní část. Stabilizátor bude vyráběn v celém rozpětí v jednom kuse. Horní a dolní části potahu k sobě budou přidělané pomocí tvarového zámku na náběžné hraně.

Tvarové zámky na formě jsou odnímatelné, aby bylo možné potahy slepit přímo ve formách. Forma je dvoudílné skořepinové konstrukce vyztužená sedmi příčnými žebry a jedním podélným. Tloušťka skořepiny je 10 mm. U náběžné hrany se nachází 24 otvorů o velikosti 10,5 mm pro spojovací prvky o průměru 10 mm. K zajištění formy je potřebná délka šroubů s metrickým závitem minimálně 35 mm (dle [65] je výška pojistné matice ČSN EN ISO 4032 maximálně 8,4 mm, jmenovitá výška podložky pod hlavu i matici ČSN EN ISO 7089, 7090 je 2 mm a tloušťka spojovaného materiálu 20 mm. V praxi nezávisí na konkrétních spojovacích prvcích, uvedené normy jsou zde pouze informativně)

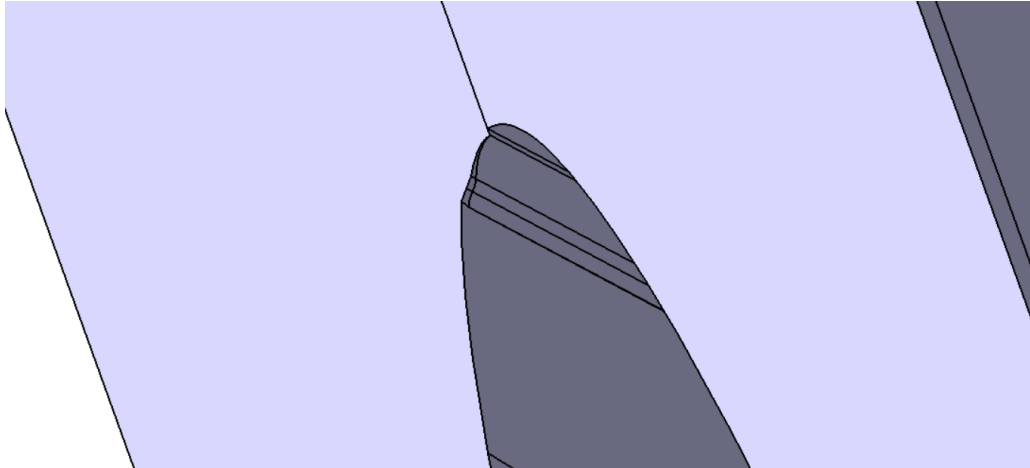
Na obrázcích níže jsou zobrazeny modely formy pro horní potah, uzavřené formy a detail tvarového zámku.



Obr. 23: Catia pohled na horní polovinu formy potahu



Obr. 24: Catia pohled na obě části formy potahu u sebe



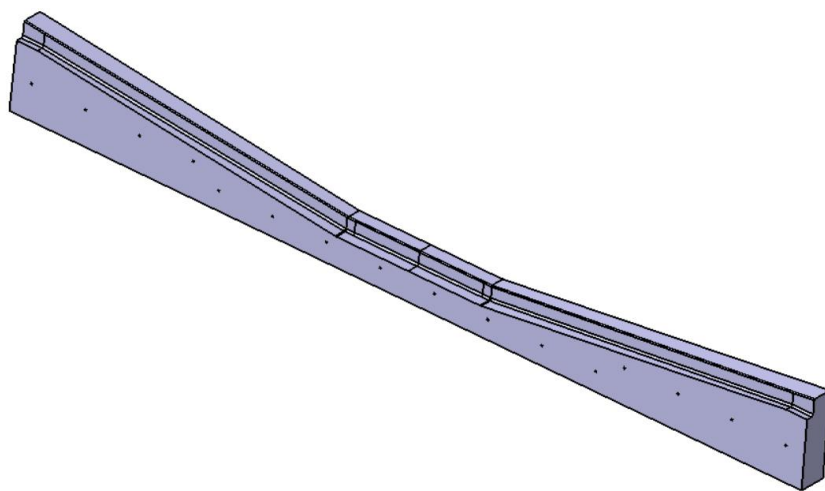
Obr. 25: Catia detail tvarového zámku

7.2.2 Formy nosníků

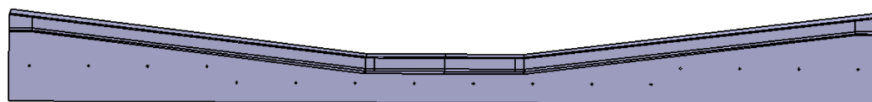
Nosníky budou formovány v negativní dělené formě. Pásnice předního a zadního nosníku by mohly zároveň sloužit jako úkosy, pro snadné vyjmutí z formy, nicméně pásnice hlavního nosníku má vůči stojině vlivem konstrukce úhel menší, než 90° a pásnice směřuje na koncích mírně k sobě. Aby bylo možné nosník vyndat z formy, bylo zapotřebí formu rozdělit. Dvoudílná forma usnadní odformování i u ostatních nosníků, tudíž byla pro všechny nosníky zvolena forma dělené formy.

Nosníky budou vyráběny v průběžné a nedělené v jednom kuse, kromě předního nosníku, který je kratší kvůli spojení stabilizátoru s trupem. Na koncích nosníku byla forma protažena ven z formy, kvůli kompozitní technologii. Rádus na vnitřní hraně nosníku byl 10 mm. Forma byla vytvořena jako skořepina o tloušťce 10 mm. Pro spojení forem bylo navrženo 16 otvorů pro šroubové spoje o průměru 10,5 mm, do kterých lze umístit šrouby o průměru 10 mm. Délka šroubů byla navržena stejně jako pro formu na potah.

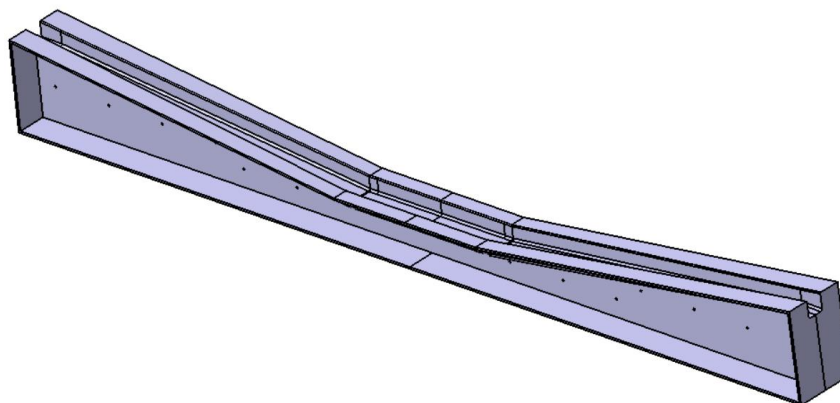
Na obrázcích 26 až 28 je zobrazena forma hlavního nosníku. Ostatní formy na nosníky byly navrženy na stejném principu. Na obrázku 28 je forma spojená.



Obr. 26: Catia pohled na polovinu formy hlavního nosníku



Obr. 27: Catia přední pohled na polovinu formy hlavního nosníku

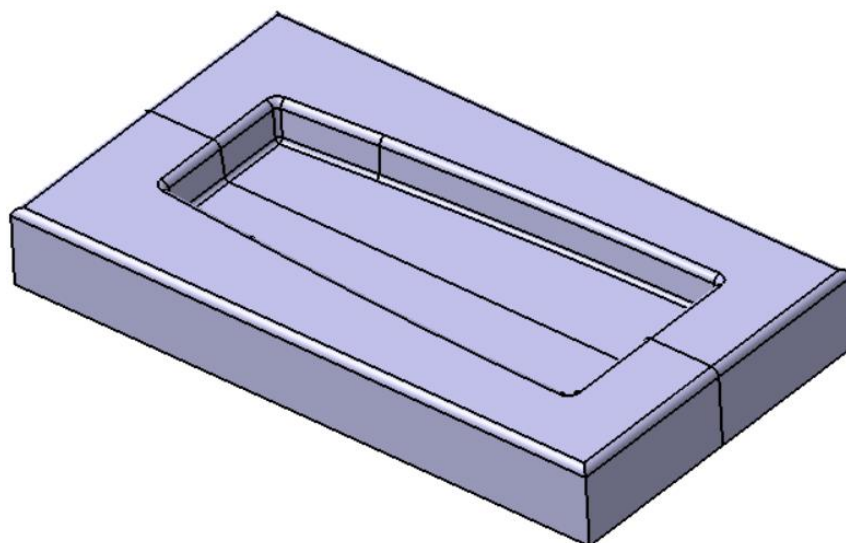


Obr. 28: Catia pohled na obě poloviny formy hlavního nosníku u sebe

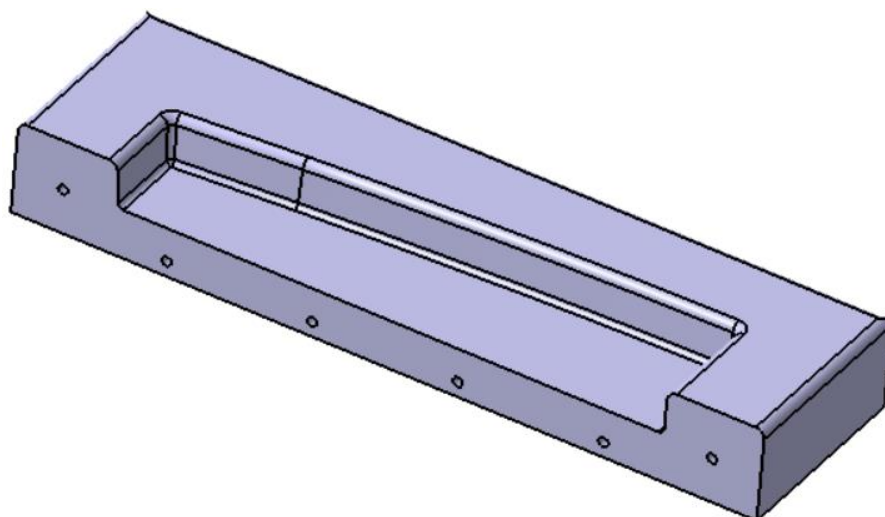
7.2.3 Formy na žebra

Žebra budou formována v jednodílných negativních formách. Žebra musí být dělená dle konstrukce na dva (žebra 6–11), nebo tři (žebra 2–5) díly, aby bylo možné je přilepit k nosníkům. Lepené lemy žebor byly na potahu umístěny tak, že se mírně rozchází od sebe, čím přirozeně vytváří úkoso pro lepší vyjmutí z formy. Druhé žebro mělo lemy orientovány opačným směrem a směřovaly k sobě, proto musí být tato forma dvoudílná.

Dvoudílná forma je dělená v ose symetrie žebra, s otvory 5,5 mm pro šrouby o průměru 5 mm. Na obrázcích 29 a 30 je vyobrazena forma pro část žebra od zadního pomocného nosníku k hlavnímu nosníku, která byla navržena s 6 otvory pro spojovací prvky. Tloušťka skořepiny na spojované ploše je 5 mm na jednom dílu, na zbytku materiálu je její tloušťka 10 mm. Dle výše uvedených norem by měla být délka šroubu s metrickým závitem minimálně 20 mm (matice má výšku 4,7 mm, podložka s výškou 1 mm by měla být pod hlavou šroubu i matice a tloušťka spojovaných dílů je 10 mm [59]).

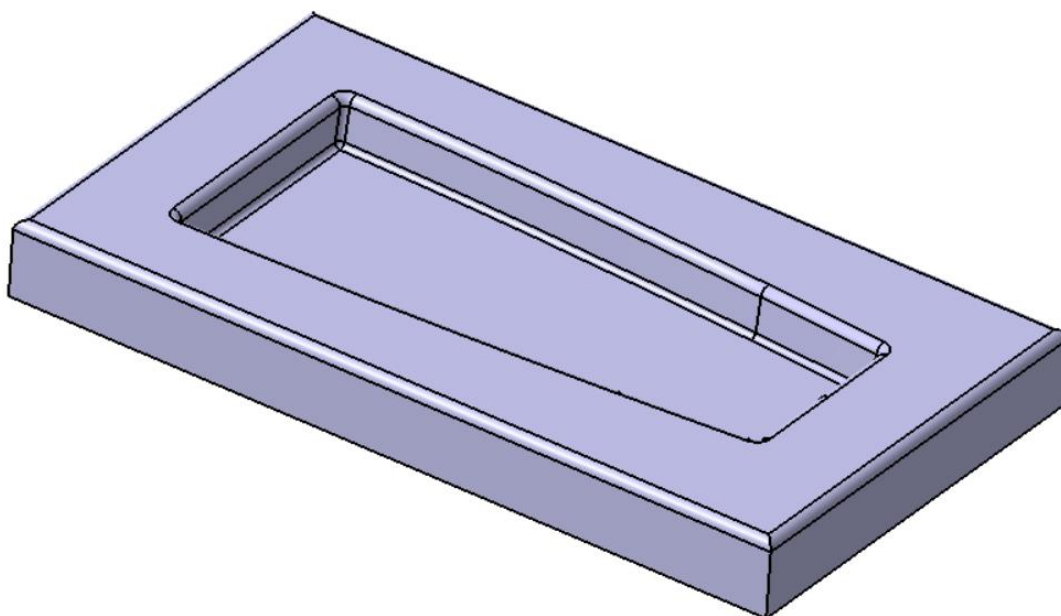


Obr. 29: Catia pohled na obě poloviny formy druhého žebra mezi hlavním a pomocným zadním nosníkem.



Obr. 30: Catia pohled na polovinu formy druhého žebra mezi hlavním a pomocným zadním nosníkem

Pro ostatní žebra byla navržena jednoduchá forma, znázorněná na obrázku 31.



Obr. 31: Catia pohled na formu žebra od hlavního k zadnímu nosníku

7.3 Formování

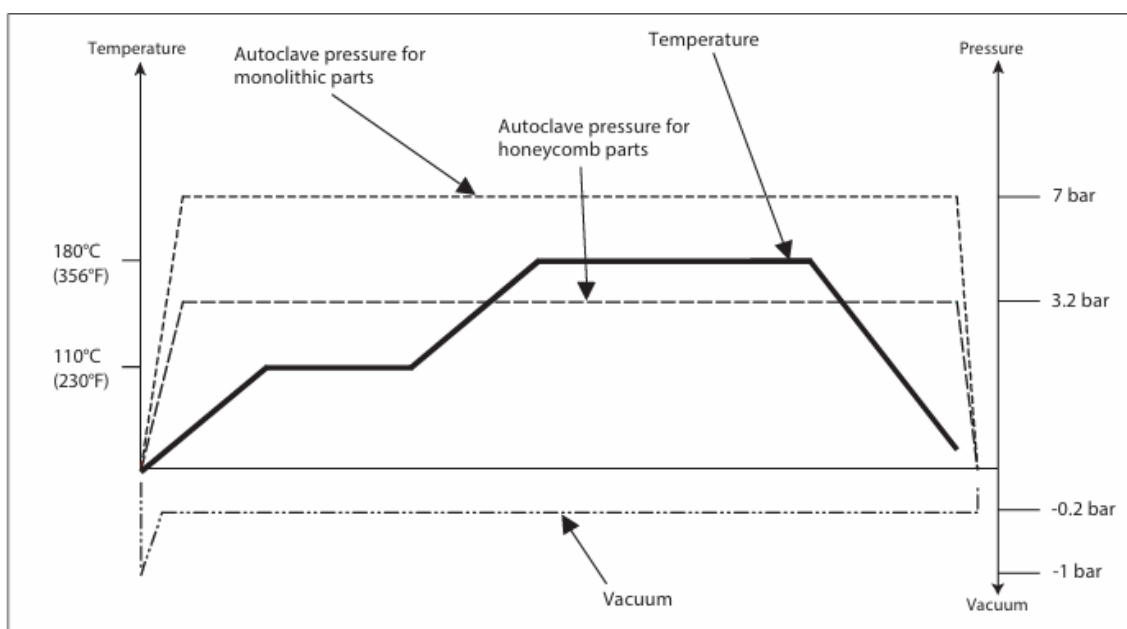
Materiál bude do forem kladen ručně. Po naklazení všech vrstev dle doporučené skladby (viz kapitola 12) budou na materiál naskládány technologické vrstvy – strhávací tkanina, separační folie a odsávací tkanina. Na rovnou plochu formy bude umístěn ventil, pomocí kterého bude odsán vzduch a vytvoří vakuum. Po obvodu formy bude aplikována těsnicí páska, kterou se připevní vakuovací folie.

V místech, kde bude měněna tloušťka potahu musí být tloušťka měněna postupně. Každá další vrstva tkaniny bude ukončena vždy po 20 mm.

7.4 Vytvrzení

Vytvrzení bude probíhat v autoklávu, jehož rozměry musí být dostatečně velké na vytvrzení formy o rozměrech 1,316 m x 4,555 m. Tyto rozměry má forma na potah, která je největší.

Na obrázku 32 je zobrazen vytvrzovací cyklus v autoklávu pro uhlíková nebo skleněná vlákna v epoxidové matrici. Na pravé ose je vynesena tlak, který je třeba nastavit pro vytvrzované materiály – voštinové konstrukce jsou vytvrzovány s tlakem 3,2 baru (0,32 MPa) a monolitní lamináty jsou vytvrzovány pod tlakem 7 barů (0,7 MPa). Na záporné části osy je znázorněn podtlak, který by měl být na začátku 1 bar (0,1 MPa) a následně 0,2 baru (0,02 MPa). Na levé ose je vynesena teplota. Teplotní cyklus, znázorněný tlustou čarou je následovný: Nejprve je materiál postupně ohříván na teplotu 110 °C, na té je výdrž po dobu 60 minut a následně teplota roste až na 180 °C. Na této teplotě je výdrž 120 minut. Na konci cyklu je materiál postupně ochlazován. V grafu nejsou zobrazeny doby trvání jednotlivých částí cyklů, ale platí, že větší tloušťky by měly být vytvrzovány pomaleji než ty menší. [60]



Obr. 32: Vytvrzovací cyklus pro HexPly® s epoxidovou matricí 8552 [60]

V tabulce 3. je uveden postup vytvrzování po jednotlivých fázích pro voštinové a pro monolitní konstrukce. Materiálový list je součástí přílohy B.

Tabulka 3: Vytvrzovací proces pro Hexply® s epoxidovou matricí 8552 pro voštinovou a monolitní strukturu. Převzato z [60]

	Voštinový kompozit	Monolitní kompozit
1.	Aplikace vakua – 1 bar	
2.	Aplikace tlaku v autoklávu – 7 barů	Aplikace tlaku v autoklávu – 3,2 barů
3.	Redukce podtlaku na bezpečnou hodnotu 0,2 baru, když dosáhne přibližně 1 bar	
4.	Zahřívání o 1–3 °C za minutu až na teplotu 110 °C ± 5 °C	
5.	Výdrž na teplotě 110 °C ± 5 °C po dobu 60 minut ± 5 minut	
6.	Zahřívání o 1–3 °C za minutu až na teplotu 180 °C ± 5 °C	
7.	Výdrž na teplotě 180 °C ± 5 °C po dobu 120 minut ± 5 minut	
8.	Ochlazování o 2–5 °C za minutu	
9.	Odtlakování autoklávu při teplotě 60 °C a nižší	

7.5 Postup výroby a lepení spojů

Nejprve budou vyrobeny a vytvrzeny všechny nosníky, žebra a spodní potah. Dle kapitoly 6.2.1 byl navržen proces co-bondingu, kdy budou při výrobě horního potahu do formy vloženy také profily již vytvrzených nosníků. Nosníky budou k potahu přidělány fóliovým lepidlem LOCTITE® EA 9394 AERO. Jedná se o dvousložkové epoxidové lepidlo ve formě pasty, které má vysokou odolnost a je vhodné pro letecké aplikace. Za pokojové teploty bude trvat vytvrzení 3–5 dní. Proces lze urychlit zvýšením teploty až na 93 °C. [61]

Po vytvrzení horního potahu s nosníky budou do potahu vlepena žebra. Ta budou přilepena také lepidlem LOCTITE® EA 9394 AERO. Výňatek s materiálovými vlastnostmi lepidla je součástí přílohy C.

Dalším krokem bude aplikace lepidla na lemy žeber a pásnice, ke kterým bude přidělán spodní potah. Na žebra a pásnice bude použito lepidlo LOCTITE® a na náběžnou hranu bude použito fóliové lepidlo HexBond® EA 9686 STRUCTIL, které je výrobcem určeno pro tyto aplikace. Materiálový list je součástí přílohy D. [62]

Nezbytnou součástí potahu jsou kování pro umístění závěsů na VK a do trupu. Ta budou na připravené stojiny nosníků lepidlem a pro vyšší únosnost spoje mohou být navíc pronýtovány. Tomu by musela být přizpůsobena struktura stojin v daných místech, viz 6.1.

8 Zatížení stabilizátoru

Provozní zatížení působící na letoun bylo zadáno společností Aero Vodochody AEROSPACE a.s. Pro základní návrh konstrukce stabilizátoru byly zadány případy potřebné pro návrh a pevnostní kontrolu.

Zadané síly byly pro obratové zatížení vodorovných ocasních ploch (VOP) při symetrických manévrech v rámci provozní obálky letových násobků. Analýzou případů zatížení bylo zjištěno maximální zatížení stabilizátoru ve směru dolů (MinVOP) a nahoru (MaxVOP). Obratové zatížení na VOP je založeno na požadavcích předpisu CS 23.423. Pomocí matematického modelu letounu bylo simulováno zatížení při symetrických manévrech v rámci letové obálky násobků. Změny násobků byly vždy o deset z možných variant kombinací na základě hranic obálky a násobkových omezení. Analýza byla provedena pro rychlosti v_A a v_D , pro mezní hmotové konfigurace a pro různé výšky letu. Maximální zatížení byla následně vyhodnocena z více než 100 řešených případů. Vlivem aerodynamické koncepce a polohy VOP na trupu je ve zmiňovaných případech rozložení aerodynamických sil po rozpětí rozdílné. Ve směru dolů je zatížení větší.

Dle stavebního předpisu CS 23 bylo zatížení doplněno o klonivý moment M_xVOP , který by za letu byl způsoben nesymetrickým ofukováním ocasních ploch vlivem vybočení. Tyto případy zatížení překrývají ty symetrické, proto jsou prioritní v případě výpočtů. Symetrické případy jsou uvedeny v příloze E. Všechny následující výpočty počítají s nesymetrickým zatížením a nebudou dále značeny indexy.

Polorozpětí křídla je pro základní výpočet rozděleno 13 řezy (značeno z). Při započítání sil zatížení od závěsu byly řezy doplněny o několik stěžejních míst, konkrétně o řez uchycení vnitřního závěsu výškového kormidla a řez zlomu hlavního nosníku.

8.1 Aerodynamické síly

Pro zjednodušení byly aerodynamické (AD) síly na stabilizátor zadány s působištem v 25 % hloubky střední aerodynamické tělivity (b_{SAT}). Poloha těchto bodů je značena x_{bST_25} . Na stabilizátor působí osamocená síla F_yST a klopivý moment M_zST . Na výšková kormidla působí pouze osamocená síla F_yVK s působištem v 73,27 % b_{SAT} .

Na výškové kormidlo působí pouze osamocená síla F_yVK s působištem v 73,27 % b_{SAT} . Poloha působišť je značena x_{bVK} .

Zadané zatížení je uvedeno v tabulce 4.

Tabulka 4: Zadané nesymetrické aerodynamické zatížení stabilizátoru

Působíště síly		Zatížení stabilizátoru				Zatížení VK	
		MinVOP		MaxVOP		MinVOP	MaxVOP
z [m]	xbST_25 [m]	DFyST [N]	MzST [Nm]	DFyST [N]	MzST [Nm]	DFyVK [N]	DFyVK [N]
-2,150	11,246	-272	14	139	28	0	0
-2,085	11,234	-771	41	532	111	-3	394
-1,885	11,197	-1588	93	659	152	-7	887
-1,680	11,159	-2132	138	798	202	-8	1006
-1,490	11,124	-2495	174	874	240	-9	1085
-1,300	11,089	-2767	208	900	265	-10	1183
-1,110	11,054	-3039	244	887	280	-10	1242
-0,920	11,019	-3266	280	824	277	-11	1302
-0,730	10,984	-3538	322	684	244	-11	1321
-0,540	10,949	-3175	305	443	168	-11	1282
-0,340	10,912	0	0	0	0	-5	621
-0,180	10,883	0	0	0	0	0	0
0,000	10,850	0	0	0	0	0	0
0,000	10,850	0	0	0	0	0	0
0,180	10,883	0	0	0	0	0	0
0,340	10,912	0	0	0	0	-6	446
0,540	10,949	-3866	372	319	120	-13	921
0,730	10,984	-4307	392	492	176	-13	949
0,920	11,019	-3976	340	592	199	-13	935
1,110	11,054	-3700	297	637	201	-12	892
1,300	11,089	-3369	253	646	191	-12	850
1,490	11,124	-3037	212	628	172	-11	779
1,680	11,159	-2595	167	573	145	-10	722
1,885	11,197	-1933	114	473	109	-9	637
2,085	11,234	-939	50	382	80	-4	283
2,150	11,246	-331	17	100	20	0	0

8.2 Hmotové síly

Hmotové (HM) síly jsou zadány na základě stávající konstrukce. Protože je kompozitní konstrukce navrhována i pro snížení hmotnosti konstrukce, dané síly by byly v průběhu vývoje ještě aktualizovány, čím by došlo k aktualizaci zatížení.

Na stabilizátoru je zadána osamocená síla FyST s působíštěm v poloze xbST_HM. Tím, že se poloha působíště liší od působíště AD sil, bude mít vliv při výpočtu kroutícího momentu.

Na výškové kormidlo působí osamocená síla FyVK se působíštěm v 73,27 % bSAT.

Zadané zatížení je uvedeno v tabulce 5.

Tabulka 5: Zadané nesymetrické hmotové zatížení stabilizátoru

Působíště síly		Zatížení stabilizátoru		Zatížení VK	
		MinVOP	MaxVOP	MinVOP	MaxVOP
z [m]	xbST_HM [m]	DFyST [N]	DFyST [N]	DFyVK [N]	DFyVK [N]
-2,150		0	0	0	0
-2,085	11,391	44	-60	0	0
-1,885	11,370	70	-96	178	-246
-1,680	11,349	97	-134	73	-100
-1,490	11,330	122	-168	74	-102
-1,300	11,311	147	-203	75	-103
-1,110	11,291	172	-237	76	-105
-0,920	11,272	197	-272	77	-106
-0,730	11,252	222	-306	78	-108
-0,540	11,233	247	-341	79	-109
-0,340	11,212	274	-377	80	-111
-0,180	11,196	274	-377	0	0
0,000	11,178	274	-377	0	0
0,000	11,178	274	-377	0	0
0,180	11,196	274	-377	0	0
0,340	11,212	274	-377	80	-111
0,540	11,233	247	-341	79	-109
0,730	11,252	222	-306	78	-108
0,920	11,272	197	-272	77	-106
1,110	11,291	172	-237	76	-105
1,300	11,311	147	-203	75	-103
1,490	11,330	122	-168	74	-102
1,680	11,349	97	-134	73	-100
1,885	11,370	70	-96	178	-246
2,085	11,391	44	-60	0	0
2,150		0	0	0	0

8.3 Přírůstek síly od závěsů kormidel

Na výšková kormidla působí hmotové a aerodynamické síly, které ovlivní zatížení na stabilizátoru. Pro přerozdělení působících sil do tří závěsů, uchycených na zadním pomocném nosníku, byl určen součet hmotových a AD sil, který byl následně ještě sečten. Síly a jejich sumy jsou v tabulce 6. Síly působící v záporném směru jsou podstatně vyšší než ty kladné, a proto je celková výslednice sil u obou případů zatížení kladná.

Celková síla na VK je

$$\sum_{i=1}^z DFy_{AD_i} + DFy_{m_i} \quad (8.1)$$

Poloha závěsů kormidel v absolutních souřadnicích na ose x je $x = 11,59$ m.

Tabulka 6: Součet sil působících na stabilizátor od VK

	Působíště síly		AD síly		Hmotové síly			
			MinVOP	MaxVOP	MinVOP	MaxVOP	MinVOP	MaxVOP
	z	xbVK ₋₇₃ %	DFyVK	DFyVK	DFyVK	DFyVK	DFyVK	DFyVK
	[m]	[m]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]
Pravé polorozpětí	-2,150	11,603	0	0	0	0	0	0
	-2,085	11,603	-3	394	0	0	-3	394
	-1,885	11,605	-7	887	178	-246	171	641
	-1,680	11,607	-8	1006	73	-100	64	906
	-1,490	11,609	-9	1085	74	-102	65	983
	-1,300	11,610	-10	1183	75	-103	65	1080
	-1,110	11,612	-10	1242	76	-105	66	1138
	-0,920	11,614	-11	1302	77	-106	66	1195
	-0,730	11,616	-11	1321	78	-108	67	1214
	-0,540	11,617	-11	1282	79	-109	69	1173
	-0,340	11,619	-5	621	80	-111	75	511
	-0,180	11,620	0	0	0	0	0	0
	0,000	11,622	0	0	0	0	0	0
	Suma		-	-	-	-	705	9234
Levé polorozpětí	0,000	11,622	0	0	0	0	0	0
	0,180	11,620	0	0	0	0	0	0
	0,340	11,619	-6	446	80	-111	74	336
	0,540	11,617	-13	921	79	-109	66	812
	0,730	11,616	-13	949	78	-108	65	842
	0,920	11,614	-13	935	77	-106	64	829
	1,110	11,612	-12	892	76	-105	63	788
	1,300	11,610	-12	850	75	-103	63	747
	1,490	11,609	-11	779	74	-102	63	677
	1,680	11,607	-10	722	73	-100	63	622
	1,885	11,605	-9	637	178	-246	169	392
	2,085	11,603	-4	283	0	0	-4	283
	2,150	11,603	0	0	0	0	0	0
	Suma		-	-	-	-	686	6327

Dané síly jsou zadány provozním zatížením, proto je nutné sumy vynásobit koeficientem $f = 1,5$. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 7:

Tabulka 7: Převedení provozního zatížení na početní

	Pravé polorozpětí		Levé polorozpětí	
	MinVOP	MaxVOP	MinVOP	MaxVOP
Suma [N]	705	9234	686	6327
$\sum FyVK \cdot f, f = 1,5$ [N]	1057	13852	1029	9490

Z AVA bylo dodefinováno zatížení v závěsech pro minimální a maximální případ nesymetrického zatížení, vždy pro polorozpětí s vyšším zatížením. Z definovaných sil byl určen procentuální poměr a následně byly síly v závěsech přerozděleny dle výsledné síly na VK. Závěsy jsou po polorozpětí umístěny v následujících řezech: vnější je umístěn v $z = \pm 2,085$ m, střední v $z = \pm 1,11$ m a vnitřní v $z = \pm 0,311$ m. Hodnoty a postup výpočtu zatížení je popsán tabulkami 8–10.

Tabulka 8: Zatížení v závěsech pro minimální a maximální případ zatížení

Případ	Početní zatížení (zaokrouhlo) [kN]			
	Vnější	Střední	Vnitřní	Celkem
MinVOP	0,50	3,30	0,30	4,10
MaxVOP	1,80	9,80	1,90	13,50

Z celkového zatížení byla přepočtena procenta na každém závěsu:

Tabulka 9: Procentuální poměr zatížení ze závěsů

Případ	Početní zatížení [%]		
	Vnější	Střední	Vnitřní
MinVOP	13,33	72,59	14,07
MaxVOP	12,20	80,49	7,32

Po přenásobení celkovým součtem sil na VK je zatížení od závěsů přerozděleno dle tabulky:

Tabulka 10: Přerozdělení sil ze závěsů dle zadaných zatížení

Případ	Polorozpětí	Početní zatížení DFy _{závěs} [N]			
		Vnější	Střední	Vnitřní	Celkem
MaxVOP	Levé	1265	6889	1336	9490
	Pravé	1847	10055	1949	13852
MinVOP	Levé	126	828	75	1029
	Pravé	129	851	77	1057

8.4 Reakce od závěsů na trup

Horizontální stabilizátor je k trupu uchycen dvěma dvojicemi závěsů, které se nachází na hlavním a předním pomocném nosníku. Po polorozpětí se závěsy nachází v místech $z = \pm 0,340$ m a $z = \pm 0,403$ m. Vzhledem k počtu a poloze závěsů do trupu je úloha staticky neurčitá a pro výpočet reakcí je kromě silové rovnováhy potřeba i momentová rovnováha. Pro prvotní odhad jsou reakce od závěsů zanedbány a zatížení bude doplněno o řez v aritmetickém středu výše zmíněných řezů $z = \pm 0,383$ m.

8.5 Posouvající síla

Do původního systému řezů byly vloženy řezy označující vnitřní závěs $z = \pm 0,311$ m, a zlom hlavního nosníku $z = \pm 0,403$ m. Zatížení ze závěsů je připočteno k početnímu zatížení.

Příklad výpočtů početní posouvající síly je zde uvede pro řez $z = -2,085$ pro MinVOP. Protože jsou aerodynamické a hmotové síly zadány jako provozní zatížení, musí být přenásobeny koeficientem $f = 1,5$.

$$T_{p z_i} = (DFy_{AD} + DFy_m) \cdot f + DFy_{závěs} \quad (8.2)$$

$$T_{p z_i} = [(-771,13) + 43,51] \cdot 1,5 + 128,9$$

$$T_{p z_i} = -962,53 \text{ N}$$

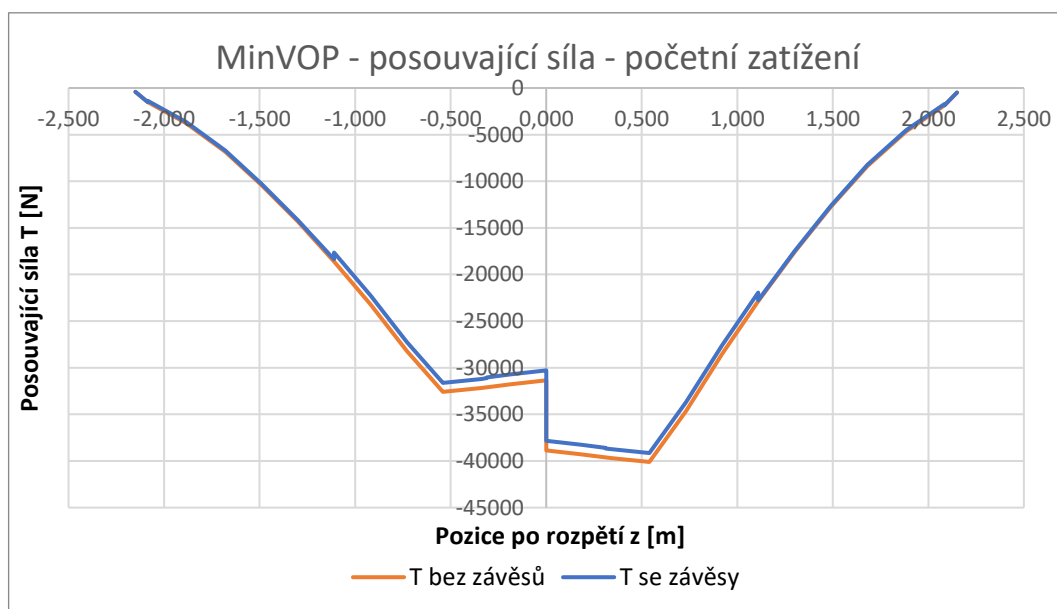
V tabulce výsledků jsou uvedeny výsledky přepočítané jako průběh po polorozpětí, tedy:

$$T_z = T_{p z_{i-1}} + T_{p z_i} \quad (8.3)$$

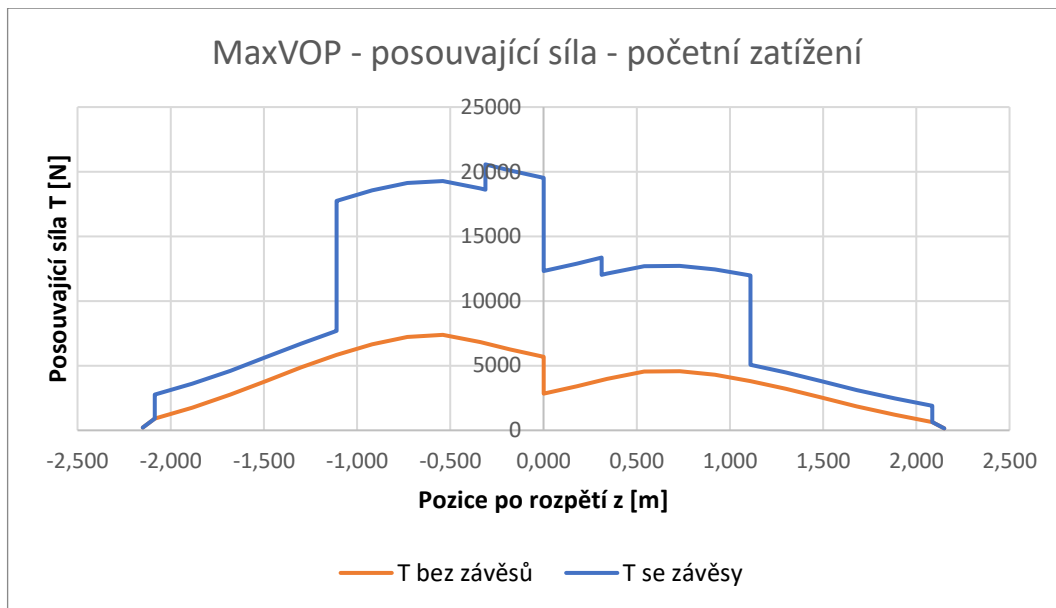
$$T_z = -408,25 + (-962,53)$$

$$T_z = -1370,8 \text{ N}$$

V grafech 33 a 34 níže jsou vyobrazeny průběhy posouvajících sil. Číselné výsledky jsou uvedeny v tabulce 11 níže. Výsledky jsou porovnány jak pro případ bez závěsů od ocasních ploch, tak pro případ s nimi. Posouvající síla je vypočtena analogicky, což obdobně platí i pro další vztahy při výpočtech zatížení. Závěsy působí vždy kladně, takže při minimálních případech odlehčují stabilizátor a v maximálních ho více zatěžují.



Obr. 33: Graf průběhu posouvající síly T pro minimální případ zatížení, vypočteno se závěsy do VK i bez nich.



Obr. 34: Graf průběhu posouvající síly T pro maximální případ zatížení, vypočteno se závěsy do VK i bez nich.

Tabulka 11: Vypočtené hodnoty průběhu posouvající síly T pro případy se závěsy i bez nich.

	Zatížení bez závěsů					Zatížení se závěsy					
	MinVOP		MaxVOP			MinVOP			MaxVOP		
	z	DFy	T	DFy	T	DFy	DFy _z	T	DFy	DFy _z	T
[m]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	
Pravé polorozpětí	-2,150	-408	-408	209	209	-408	-	-408	209	-	209
	-2,085	-1091	-1500	708	917	-1091	129	-1371	708	1847	917
	-1,885	-2277	-3776	844	1761	-2277	-	-3647	844	-	1761
	-1,680	-3053	-6829	997	2758	-3053	-	-6700	997	-	2758
	-1,490	-3559	-10388	1059	3817	-3559	-	-10259	1059	-	3817
	-1,300	-3930	-14318	1045	4862	-3930	-	-14189	1045	-	4862
	-1,110	-4301	-18619	974	5837	-4301	851	-17639	974	10055	5837
	-0,920	-4603	-23222	828	6664	-4603	-	-22242	828	-	6664
	-0,730	-4974	-28196	567	7231	-4974	-	-27216	567	-	7231
	-0,540	-4392	-32588	154	7385	-4392	-	-31608	154	-	7385
	-0,403*	-	-	-	-	-	-	-31327	-	-	6997
	-0,383*	-	-	-	-	-	-	-31286	-	-	6940
	-0,340	410	-32177	-566	6819	410	-	-31198	-566	-	6819
	-0,311*	-	-	-	-	-	77	-25466	-566	1949	7532
-0,180	410	-31767	-566	6253	410	-	-30710	-566	-	8202	
0,000	410	-31356	-566	5687	410	-	-30299	-566	-	7636	
Levé polorozpětí	0,000	410	-38870	-566	2839	410	-	-37967	-566	-	2839
	0,180	410	-39281	-566	3405	410	-	-38377	-566	-	3405
	0,311*	-	-	-	-	-	75	-31744	-566	1336	4587
	0,340	410	-39691	-566	3971	410	-	-38863	-566	-	3971
	0,383*	-	-	-	-	-	-	-38951	-	-	4093
	0,403*	-	-	-	-	-	-	-38992	-	-	4149
	0,540	-5427	-40102	-34	4537	-5427	-	-39273	-34	-	4537
	0,730	-6128	-34674	278	4571	-6128	-	-33846	278	-	4571
	0,920	-5668	-28547	480	4293	-5668	-	-27718	480	-	4293
	1,110	-5292	-22879	600	3813	-5292	828	-22050	600	6889	3813
	1,300	-4832	-17587	665	3214	-4832	-	-17587	665	-	3214
	1,490	-4373	-12755	690	2548	-4373	-	-12755	690	-	2548
	1,680	-3748	-8382	660	1859	-3748	-	-8382	660	-	1859
	1,885	-2794	-4634	565	1199	-2794	-	-4634	565	-	1199
2,085	-1343	-1840	483	634	-1343	126	-1840	483	1265	634	
2,150	-497	-497	150	150	-497	-	-497	150	-	150	

Poznámka: řezy označené * byly přidány až pro výpočet posouvající síly s přidavkem sil od závěsů. Posouvající síla zde byla vypočtena lineární interpolací.

8.6 Ohybový moment

Ohybový moment byl integrován z posouvající síly dle Schwedlerovy věty:

$$M_{o_z} = \int_0^{l/2} T_z dz \quad (8.4)$$

Příklad výpočtu v místě řezu $z = -2,085$ m pro zatížení se závěsy:

$$M_{O_z} = \int_{-2,150}^{-2,085} -1371 dz$$

$$M_{O_z} = 26,5 \text{ Nm}$$

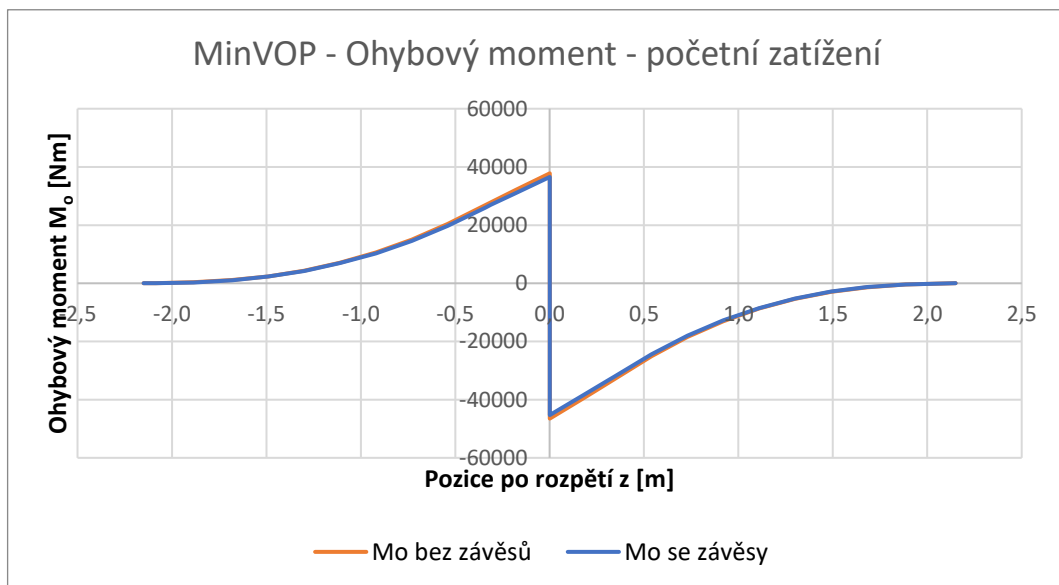
V tabulce výsledků jsou uvedeny výsledky přepočítané jako průběh po polorozpětí, tedy:

$$M_{O_z} = M_{O_{zi-1}} + M_{O_{zi}} \quad (8.5)$$

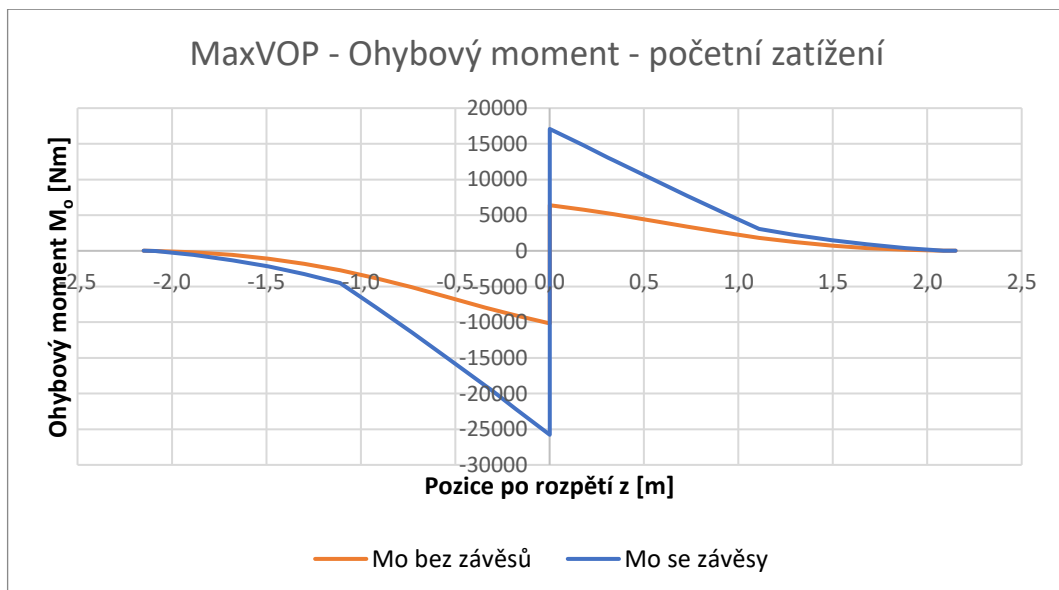
$$M_{O_z} = 0 + 26,5$$

$$M_{O_z} = 26,5 \text{ Nm}$$

V grafech 35 a 36 níže jsou zobrazeny ohybové momenty při porovnání se závěsy na VK a bez nich.



Obr. 35: Graf průběhu ohybového momentu M_o pro minimální případ zatížení, vypočteno se závěsy do VK i bez nich.



Obr. 36: Graf průběhu ohybového momentu M_o pro maximální případ zatížení, vypočteno se závěsy do VK i bez nich.

V tabulce 12 jsou vypočtené hodnoty ohybových momentů.

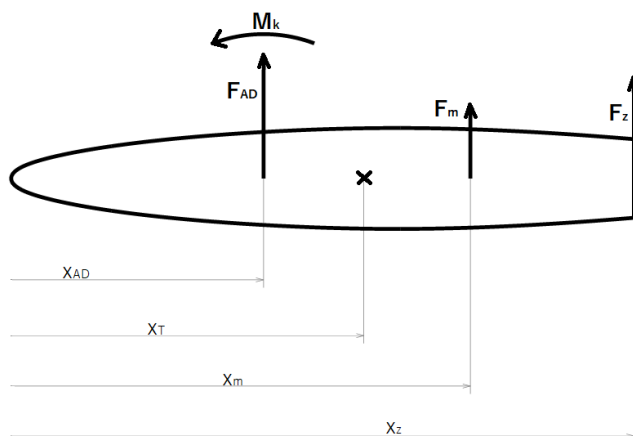
Tabulka 12: Vypočtené hodnoty průběhu ohybového momentu M_o pro případy se závěsy i bez nich.

		Zatížení bez závěsů		Zatížení se závěsy	
		MinVOP	MaxVOP	MinVOP	MaxVOP
z	[m]	M_o		M_o	
		[Nm]		[Nm]	
Pravé polorozpětí	-2,150	0	0	0	0
	-2,085	27	-14	27	-14
	-1,885	326	-197	301	-197
	-1,680	1101	-558	1048	-558
	-1,490	2398	-1082	2321	-1082
	-1,300	4372	-1807	4271	-1807
	-1,110	7092	-2731	6967	-2731
	-0,920	10630	-3840	10318	-3840
	-0,730	15042	-5106	14544	-5106
	-0,540	20399	-6480	19715	-6480
	-0,403*	-	-	24045	-7492
	-0,383*	-	-	24672	-7632
	-0,340	26917	-7957	26017	-7930
	-0,311*	-	-	26922	-8128
	-0,180	32065	-9048	30258	-9115
0,000	37783	-10174	35786	-10591	
Levé polorozpětí	0,000	-46508	6395	-44623	6530
	0,180	-39438	5782	-37715	5917
	0,311*	-	-	-33557	5316
	0,340	-33087	5146	-32430	5201
	0,383*	-	-	-30755	4943
	0,403*	-	-	-29975	4860
	0,540	-25067	4239	-24595	4239
	0,730	-18479	3370	-18164	3370
	0,920	-13055	2555	-12897	2555
	1,110	-8708	1830	-8708	1830
	1,300	-5366	1220	-5366	1220
	1,490	-2943	735	-2943	735
	1,680	-1350	382	-1350	382
	1,885	-400	136	-400	136
	2,085	-32	10	-32	10
2,150	0	0	0	0	

Poznámka: řezy označené * byly přidány až pro výpočet posouvající síly s přídatkem sil od závěsů. Posouvající síla zde byla vypočtena lineární interpolací.

8.7 Kroutící moment

Kroutící moment vzniká od sil a momentů působících na stabilizátor. Výpočet momentu je tedy součtem momentových přírůstků jednotlivých účinků. Pro primární účely byly výpočty provedeny k 25 % b_{SAT} a bez přírůstků sil od závěsů, a následně byl moment přepočten k těžišti (T). Na obrázku 37 jsou znázorněny silové a momentové účinky a jejich působišť, potřebné pro výpočet.



Obr. 37: Síly a momenty působící na stabilizátor a jejich působišť

Kladný směr momentu působí proti směru hodinových ručiček. Kroutící moment je vypočten dle vztahu 8,6 k 25 % b_{SAT} a dle vztahu 8.7 k těžišti.

$$M_k = M_z + DFy_m \cdot (x_m - x_{AD}), \quad (8.6)$$

$$M_k = M_z + DFy_{AD} \cdot (x_{AD} - x_T) + DFy_m \cdot (x_m - x_T) + DFy_z \cdot (x_z - x_T), \quad (8.7)$$

Moment k těžišti byl počítán od konce křídla po řez $z = \pm 0,383$ m. Příklad výpočtu je uveden v řezu $z = -2,085$ m, tedy:

$$M_k = 62 + (-1157) \cdot (11,23 - 11,31) + 65,27 \cdot (11,39 - 11,31) + 129 \cdot (11,51 - 11,31)$$

$$M_k = 181,19 \text{ Nm}$$

Moment byl počítán ze zadaných přírůstků sil, proto je třeba výsledky ještě sečíst od konce křídla po kořen. V tabulkách 13 a 14 níže jsou uvedena vstupní data a dále vypočtené hodnoty pro minimální a maximální případ zatížení.

Tabulka 13: Vstupní hodnoty a vypočtený kroutící moment k těžišti M_{KT} pro minimální případ zatížení.

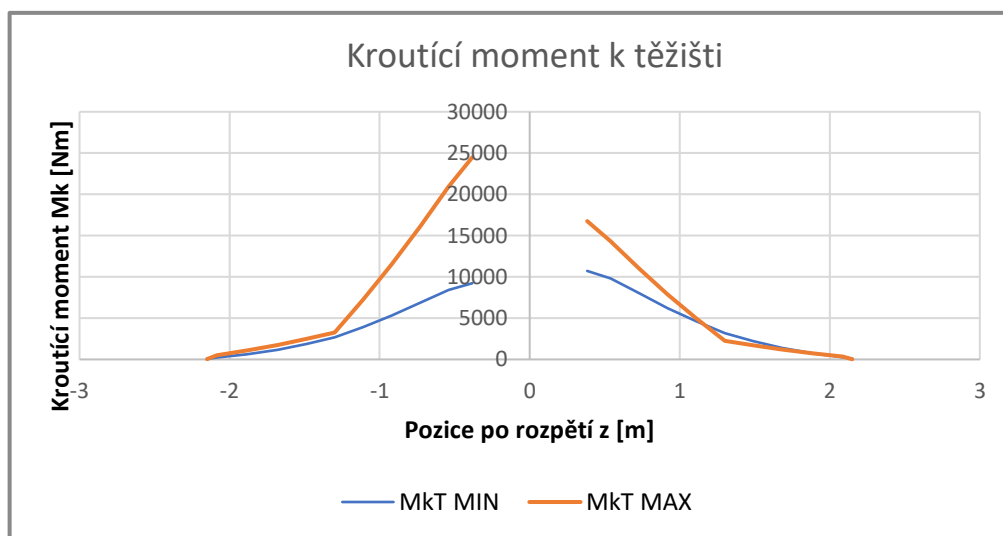
Minimální případ zatížení										
z	x_T	DF_{yAD}	x_{AD}	DF_{ym}	x_m	DF_{yz}	x_z	M_z	M_k	ΣM_k
[m]	[m]	[N]	[m]	[N]	[m]	[N]	[m]	[Nm]	[Nm]	[Nm]
-2,150	11,32	-408	11,25	0	0	0	11,52	21	51	51
-2,085	11,31	-1157	11,23	65	11,39	129	11,51	62	191	242
-1,885	11,28	-2381	11,20	105	11,37	0	11,51	140	389	631
-1,680	11,25	-3198	11,16	145	11,35	0	11,50	206	559	1190
-1,490	11,22	-3742	11,12	183	11,33	0	11,49	261	701	1890
-1,300	11,20	-4151	11,09	221	11,31	0	11,49	312	832	2723
-1,110	11,17	-4559	11,05	258	11,29	851	11,48	366	1334	4057
-0,920	11,14	-4899	11,02	296	11,27	0	11,47	419	1497	5553
-0,730	11,11	-5307	10,98	333	11,25	0	11,46	482	1684	7237
-0,540	11,09	-4763	10,95	371	11,23	0	11,46	458	1660	8898
-0,383*	11,19	-1024	10,78	402	11,14	0	11,45	98	891	9789
0,383*	11,19	-1247	10,78	402	11,14	0	11,45	120	993	11277
0,540	11,09	-5798	10,95	371	11,23	0	11,46	558	1889	10285
0,730	11,11	-6461	10,98	333	11,25	0	11,46	587	1927	8395
0,920	11,14	-5964	11,02	296	11,27	0	11,47	511	1707	6469
1,110	11,17	-5550	11,05	258	11,29	828	11,48	446	1516	4762
1,300	11,20	-5053	11,09	221	11,31	0	11,49	379	996	3246
1,490	11,22	-4556	11,12	183	11,33	0	11,49	318	837	2250
1,680	11,25	-3893	11,16	145	11,35	0	11,50	251	666	1413
1,885	11,28	-2899	11,20	105	11,37	0	11,51	170	462	747
2,085	11,31	-1408	11,23	65	11,39	126	11,51	75	222	285
2,150	11,32	-497	11,25	0	0	0	11,52	26	62	62

Tabulka 14: Vstupní hodnoty a vypočtený kroutící moment k těžišti M_{kT} pro maximální případ zatížení.

Maximální případ zatížení										
z	x_T	DF_{yAD}	x_{AD}	DF_{y_m}	x_m	DF_{y_z}	x_z	M_z	M_{kT}	ΣM_{kT}
[m]	[m]	[N]	[m]	[N]	[m]	[N]	[m]	[Nm]	[Nm]	[Nm]
-2,150	11,32	209	11,25	0	0,00	0	11,52	42	27	27
-2,085	11,31	798	11,23	-90	11,39	1847	11,51	167	617	644
-1,885	11,28	988	11,20	-145	11,37	0	11,51	228	704	1347
-1,680	11,25	1197	11,16	-200	11,35	0	11,50	303	799	2146
-1,490	11,22	1311	11,12	-252	11,33	0	11,49	359	878	3025
-1,300	11,20	1349	11,09	-304	11,31	0	11,49	398	946	3970
-1,110	11,17	1330	11,05	-356	11,29	10055	11,48	420	5236	9206
-0,920	11,14	1235	11,02	-408	11,27	0	11,47	416	5550	14756
-0,730	11,11	1026	10,98	-460	11,25	0	11,46	366	5834	20590
-0,540	11,09	665	10,95	-511	11,23	0	11,46	251	6076	26666
-0,383*	11,19	143	10,78	-554	11,14	0	11,45	54	4817	31483
0,383*	11,19	103	10,78	-554	11,14	0	11,45	39	3308	21535
0,540	11,09	478	10,95	-511	11,23	0	11,46	181	4145	18227
0,730	11,11	737	10,98	-460	11,25	0	11,46	263	3985	14082
0,920	11,14	887	11,02	-408	11,27	0	11,47	298	3794	10097
1,110	11,17	956	11,05	-356	11,29	6889	11,48	302	3582	6302
1,300	11,20	969	11,09	-304	11,31	0	11,49	286	645	2720
1,490	11,22	942	11,12	-252	11,33	0	11,49	258	601	2075
1,680	11,25	860	11,16	-200	11,35	0	11,50	218	548	1474
1,885	11,28	710	11,20	-145	11,37	0	11,51	164	483	926
2,085	11,31	573	11,23	-90	11,39	1265	11,51	120	424	443
2,150	11,32	150	11,25	0	0,00	0	11,52	30	19	19

Poznámka: řezy označené * byly přidány až pro výpočet posouvající síly s přidavkem sil od závěsů. Posouvající síla zde byla vypočtena lineární interpolací.

V obrázku 38 níže jsou zobrazeny kroutící momenty k těžišti pro minimální a maximální případ zatížení.



Obr. 38: Graf kroutícího momentu k těžišti pro případy minimálního i maximálního zatížení

Kroutící zatížení vypočtené ke čtvrtinovému bodu profilu je součástí přílohy.

9 Dimenzování stabilizátoru

Návrh stabilizátoru byl založen na stávající konstrukci VOP. Ze systémových výkresů byly stanoveny charakteristické rozměry, potřebné pro následující pevnostní návrh, rozebraný v této kapitole. Dimenzování stabilizátoru je rozděleno na dimenzování rozměrů pásnic a tloušťky potahu.

9.1 Dimenzování pásnic

Pásnice jsou namáhány zejména na ohyb. Aby bylo zatížení správně přenášeno, je potřeba zjistit minimální průřez pásnic, dle kterého mohou být dimenzovány rozměry. Pásnice jsou součástí hlavního nosníku o C-profilu.

Z výkresu byl stanoven obdélníkový průřez pásnice o konstantní šířce $b = 50$ mm, která byla v návrhu respektována, a proměnné tloušťce. S ohledem na prvotní návrhové výpočty byla tloušťka pásnic zanedbána a určena z výsledku výpočtů.

Minimální průřez lze dopočítat podle vzorce:

$$s_{min} = \frac{M_o}{h \cdot R_m}, \quad (9.1)$$

kde h je efektivní výška nosníku a R_m je mez pevnosti. Efektivní výška byla v primárních výpočtech uvažována jako 0,8 násobek výšky nosníku, místo obvyklé efektivní výšky mezi vertikálními polohami těžišť pásnic. Pásnice v ohybu jsou namáhány tahem i tlakem. Při výpočtech je třeba rozlišit tyto dvě pásnice a tomu přizpůsobit použitou mez pevnosti. Pásnice nosníků stabilizátoru letounu L-39NG jsou navrženy totožně vůči sobě a vzhledem k povaze letadla (armádní cvičný letoun s požadavky na let i při záporných násobcích) je tento koncept zachován, což umožňuje počítat minimální průřez pásnic pouze pro kritičtější případ z rovinného zatěžování. [63, 64]

Pásnice jsou vyrobeny z jednosměrného uhlíkového prepregu o mezi pevnosti v tahu ve směru vláken $R_m = 1930$ MPa a v tlaku ve směru vláken $R_m = 1480$ MPa. Výpočet zde bude uveden pro řez $z = 383$ (tedy pro levé polorozpětí) při minimálním zatížení, protože se jedná o místo s největším napočetým průřezem pásnice. Výška nosníku byla v tomto místě naměřena:

$$H = 136 \text{ mm} = 0,136 \text{ m},$$

a tedy efektivní výška nosníku:

$$h = 0,8 \cdot 0,136$$

$$h = 0,109 \text{ m}.$$

Do vzorce pro minimální průřez pásnic je dosazeno následovně:

$$s_{min} = - \frac{30745}{0,109 \cdot 1480 \cdot 10^6}$$

$$s_{min} = -1,909 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.$$

Po přepočtení do absolutní hodnoty a převedení na mm^2 vyjde:

$$s_{min} = 190,9 \text{ mm}^2.$$

Pro výpočet minimální výšky pásnice je daná plocha vydělena šířkou:

$$h_{p \min} = \frac{s_{min}}{b} \quad (9.2)$$

$$h_{p \min} = \frac{190,9}{50}$$

$$h_{p \min} = 3,82$$

Primární návrh výšky pásnice musí být větší, tedy byla zvolena výška $h_p = 4 \text{ mm}$.

Dopočtené rozměry jsou uvedeny v tabulce 15. Z výsledků je vidět, že největší vliv na průřez pásnice má ohybový moment v minimálním případě v levé polovině křídla. Dle něj byly poté zvoleny rozměry pásnic po daných řezech. Na intervalu $z \in (-0,383; 0,383) \text{ m}$ byla tloušťka pásnic určena interpolací hodnot. Tloušťky pásnic kořenové části jsou uvedeny v tabulce 16.

Tabulka 15: Návrh tloušťky pásnic

z	h	Minimální případ zatížení			Maximální případ zatížení			h _p
		M _o	S _{min}	h _{p min}	M _o	S _{min}	h _{p min}	
[m]	[m]	[Nm]	[mm ²]	[mm]	[Nm]	[mm ²]	[mm]	[mm]
-2,150	0,058	0	0,00	0,00	0	0	0	-
-2,085	0,059	27	0,30	0,01	-14	0,15	0,00	1
-1,885	0,064	301	3,16	0,06	-197	2,07	0,04	1
-1,680	0,069	1048	10,20	0,20	-558	5,43	0,11	1
-1,490	0,074	2321	21,15	0,42	-1082	9,86	0,20	1
-1,300	0,079	4271	36,58	0,73	-1807	15,48	0,31	2
-1,110	0,084	6967	56,30	1,13	-2731	22,07	0,44	2
-0,920	0,088	10318	78,93	1,58	-3840	29,38	0,59	3
-0,730	0,097	14544	101,52	2,03	-5106	35,64	0,71	3
-0,540	0,105	19715	127,11	2,54	-6480	41,78	0,84	4
-0,383	0,109	24672	153,19	3,06	-7632	47,39	0,95	4
0,383	0,109	-30755	190,96	3,82	4943	30,69	0,61	4
0,540	0,105	-24595	158,57	3,17	4239	27,33	0,55	4
0,730	0,097	-18164	126,79	2,54	3370	23,53	0,47	3
0,920	0,088	-12897	98,67	1,97	2555	19,54	0,39	3
1,110	0,084	-8708	70,38	1,41	1830	14,79	0,30	2
1,300	0,079	-5366	45,97	0,92	1220	10,45	0,21	2
1,490	0,074	-2943	26,81	0,54	735	6,70	0,13	1
1,680	0,069	-1350	13,14	0,26	382	3,72	0,07	1
1,885	0,064	-400	4,20	0,08	136	1,43	0,03	1
2,085	0,059	-32	0,37	0,01	10	0,11	0,00	1
2,150	0,058	0	0,00	0,00	0	0	0,00	-

Tabulka 16: Návrh tloušťky pásnic v kořenové části stabilizátoru

z	h	M _o	S _{min}	h _{p min}	h _p
[m]	[m]	[Nm]	[mm ²]	[mm]	[mm]
0	0,110	-44623	-273,90	-5,48	6
0,180	0,110	-37715	-231,50	-4,63	5
0,340	0,110	-32430	-199,35	-3,99	5

9.2 Dimenzování potahu

Tloušťka potahu lze určit z rovnic pro napětí v potahu (9.4) a kritické napětí (9.5), které je potah schopný přenést. Profil křídla je rozdělen na dvě torzní skříně namáhané kroučícím momentem. V reakci na něj vznikají uvnitř potahu vnitřní tečná napětí, vyrovnávající kroučící moment. Vnitřní napětí je označováno jako smykový tok, ze kterého lze dopočítat napětí v potahu. [24]

Tloušťka stojin byla v prvotních výpočtech zanedbána, nicméně prozatím lze předpokládat, že bude mít stejnou tloušťku jako nosník, vzhledem k výpočtům v uzavřených torzních skříních.

9.2.1 Smykový tok

Dle Špundy [65] bylo smykové napětí bráno ze zjednodušeného výpočtu smykového toku, kdy je celý stabilizátor uvažován jako jedna torzní dutina a výpočet lze provést k těžišti profilu. Nejprve bylo potřeba přepočítat kroučící moment k těžišti. V této práci je součástí kapitoly 8.7. Poté lze pomocí Bredtova vztahu dopočítat smykový tok jako:

$$q = \frac{M_{kTi}}{2U}, \quad (9.3)$$

kde M_{kTi} značí kroučící moment v daném řezu a U je plocha v místě řezu. Plocha řezu byla odečtena v programu Catia. Výpočet je pro ukázkou uveden pro řez z = -2,15 m v minimálním případě zatížení. Plocha v daném místě je U = 28940 mm² a tedy:

$$q = \frac{-9,09}{2 \cdot 28940 \cdot 10^{-6}}$$

$$q = -156,99 \text{ Nm.}$$

Vypočtené hodnoty kroučícího momentu a smykového toku v potahu jsou uvedeny v tabulce 17. Smykový tok a kroučící moment pro příslušné minimální či maximální zatížení je označen odpovídajícím indexem.

Tabulka 17: Vypočtené hodnoty smykového toku

z	U	M _{kT min}	M _{kT max}	q _{min}	q _{max}
[m]	mm ²	[Nm]	[Nm]	[Nm]	[Nm]
-2,150	28941	-9	58	-157	996
-2,085	31000	-58	40	-940	643
-1,885	38000	-128	364	-1678	4789
-1,680	46000	-230	797	-2500	8666
-1,490	53000	-361	1314	-3408	12398
-1,300	62000	-520	1891	-4193	15254
-1,110	71000	-884	433	-6226	3049
-0,920	80000	-1102	1053	-6890	6580
-0,730	91000	-1355	1616	-7448	8880
-0,540	101000	-1606	2034	-7952	10068
-0,426	60965	-1625	2060	-7529	9542
-0,403	28941	-1629	2065	-7451	9445
-0,383	31000	-1639	2079	-16392	20790
0,383	60965	-1888	1678	-18882	16783
0,403	101000	-1878	1664	-8590	7612
0,426	91000	-1874	1659	-8682	7685
0,540	80000	-1855	1633	-9185	8084
0,730	71000	-1562	1312	-8581	7208
0,920	62000	-1264	889	-7898	5558
1,110	53000	-1006	429	-7086	3022
1,300	46000	-613	1396	-4941	11256
1,490	38000	-425	971	-4009	9163
1,680	31000	-269	592	-2929	6439
1,885	28941	-148	276	-1944	3626
2,085	60965	-66	39	-1057	630
2,150	101000	-11	41	-191	715

9.2.2 Napětí v potahu

Napětí lze vypočítat jako smykový tok vydělený tloušťkou potahu:

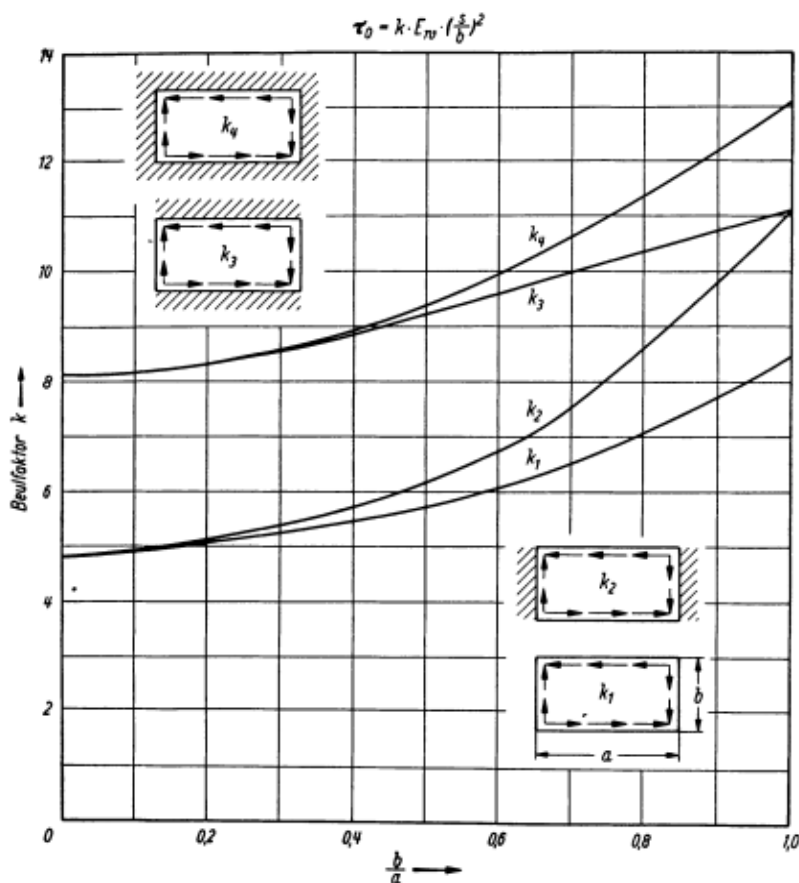
$$\tau = \frac{q}{t}. \quad (9.4)$$

9.2.3 Kritické napětí

Kritické napětí bylo počítáno zvlášť pro přední a zadní torzní skříň. Výsledek lze, dle Funkeho [66], dopočítat dle vztahu:

$$\tau_k = \kappa \cdot k \cdot E \cdot \left(\frac{d}{b}\right)^2, \quad (9.5)$$

kde κ je koeficient reflektující souměrnost potahu. Pro symetrický potah odpovídá $\kappa = 3$. Koeficient k je koeficient vzpěru pro smykové zatížení v závislosti na příčném poměru b/a . Pro případ zatížení stabilizátoru odpovídá v grafu na obrázku 39 křivka k_1 . E je modul pružnosti v tahu, pro tkaninu z uhlíkových vláken odpovídají hodnoty 55–70 GPa, tedy pro výpočet $E = 55$ GPa, d značí tloušťku potahu a b je charakteristický rozměr.



Obr. 39: Graf koeficientu vzpěru

9.2.4 Tloušťka a hmotnost potahu

Tloušťka potahu byla vypočtena dosazením do rovnic pro napětí a kritické napětí. Pro výpočet byl použit poměr 1,3 tak, aby byla do návrhu zanesena jistota:

$$\frac{\tau_k}{\tau} = 1,3. \quad (9.6)$$

Tato jistota musí vyjít při porovnání smykového napětí (počítaného zjednodušeně jednou torzní skříní) s oběma torzními skříněmi počítanými pro kritické napětí.

Pomocí programu MS Excel byla dopočtena minimální možná tloušťka potahu. Při výpočtu byla respektována tloušťka uhlíkového prepregu $t = 0,25$ mm, tedy po vydělení tloušťky potahu tloušťkou materiálu vyšla počet vrstev. Potah byl navrhován od konců křídel po řez $z = \pm 0,383$ m (dále značen jako $z_{0,383}$).

Pro analýzu možných řešení byly vytvořeny čtyři varianty návrhů – čistě laminátový potah pouze s druhým, šikmým žebrem, žebrem u prostředního závěsu a koncovým žebrem (V1); sendvičový potah s žebry jako u V1 (V2); sendvičový potah s žebry jako v laminátovém potahu a dvěma žebry navíc – jedno ve vnitřní polovině křídla a druhé ve vnější (V3) a sendvičový potah s žebry rozmístěnými dle současné konstrukce (V4). Pro referenci jsou V1 a V2 označovány jako „bez žeber“, V3 jako „se dvěma žebry“ a V4 je „se všemi žebry“. Výkresy variant jsou zobrazeny v kapitole 2.

Ke každé variantě byl vypočtena odhadovaná hmotnost počítané části potahu. Výpočty byly založeny na hustotě uhlíkové tkaniny a pěny. Z programu Catia byly zjištěny plochy mezi každými řezy, které byly následně přenásobeny tloušťkou potahu a poté hustotou materiálu. Varianty V1 a V2 lze porovnat pouze na základě tohoto výpočtu, při porovnání s variantou V3 a V4 by bylo zapotřebí započítat také hmotnosti lepidla a žeber ke každé variantě. Nicméně pro primární odhad lze tento výpočet použít. Hustota materiálů je uvedena v kapitole 4.4 Volba materiálu.

Laminátový potah bez žeber

Potah byl složený čistě z uhlíkového prepregu. Na koncích křídel vyšla tloušťka laminátu $t_{V1-2,150} = 1,5$ mm, což odpovídalo 6 vrstvám uhlíkové tkaniny. Maximální vrstva vyšla v řezu $z_{0,383}$, kde $t_{V1\pm 0,383} = 5$ mm, odpovídající 20 vrstvám tkaniny.

Kritické napětí bylo počítáno pro charakteristický rozměr b hloubky torzní skříně a podélný rozměr a a byl od konce křídla k řezu $z_{0,383}$, tedy:

$$a = 2,150 - 0,383$$

$$a = 1,767 \text{ m.}$$

Následně byl podle poměru b/a určen z grafu na obrázku 39 koeficient k .

Hmotnost potahu vyšla $m_{V1} = 42,03$ kg. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce 18. Hmotnost byla počítána pouze pro jednu polovinu křídla, konečná hmotnost je tedy suma po řezech vynásobená dvěma.

Tabulka 18: Vypočtená hmotnost potahu u varianty V1

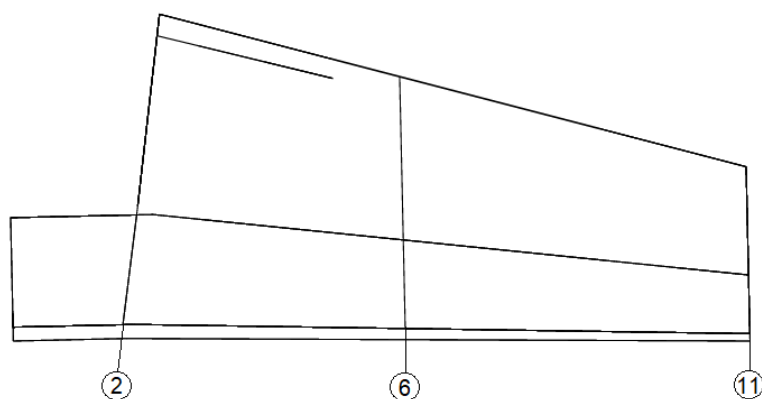
z [m]	Plocha [m ²]	Tloušťka [mm]	Objem [m ³] $\cdot 10^{-3}$	Hmotnost [kg]
-2,150	0,202	1,500	0,302	0,862
-2,085	0,212	1,750	0,371	1,057
-1,885	0,238	2,250	0,536	1,526
-1,680	0,242	2,250	0,545	1,552
-1,490	0,260	2,500	0,650	1,853
-1,300	0,278	2,500	0,695	1,981
-1,110	0,298	3,250	0,969	2,760
-0,920	0,316	3,250	1,027	2,927
-0,730	0,336	3,750	1,260	3,591
-0,540	0,210	4,000	0,840	2,394
-0,383	0,036	5,000	0,180	0,513
Celkem pro polovinu křídla				21,015
Celkem pro celé křídlo				42,031

Návrh je zobrazen na obrázku 40. V tabulce 19 níže jsou dopočtené hodnoty tloušťky potahu. Tabulky byly pro velikost zjednodušeny. Kompletní tabulky jsou uvedeny v příloze F.

Po vypočtení jednotlivých případů poměrů τ_k/τ je v tabulce vybrán pouze případ nejmenší možné vypočtené jistoty.

Tabulka 19: Vypočtená napětí a tloušťka potahu pro variantu V1

Z	q _{min}	q _{max}	t	τ _{min}	τ _{max}	τ _{kmin}	τ _{kmax}	Nejmenší poměr τ _k /τ
[m]	[Nm]	[Nm]	[m]	[Nmm ⁻²]	[Nmm ⁻²]	[Nmm ⁻²]	[Nmm ⁻²]	[-]
-2,150	882	464	0,0015	0,59	0,31	21,40	70,85	36,38
-2,085	3903	10382	0,00175	2,23	5,93	27,06	89,92	4,56
-1,885	8304	17726	0,00225	3,69	7,88	37,12	122,39	4,71
-1,680	12932	23330	0,00225	5,75	10,37	31,13	102,16	3,00
-1,490	17835	28536	0,0025	7,13	11,41	33,04	108,22	2,89
-1,300	21959	32019	0,0025	8,78	12,81	28,73	93,74	2,24
-1,110	28567	64831	0,00325	8,79	19,95	42,68	138,86	2,14
-0,920	34708	92223	0,00325	10,68	28,38	37,73	122,54	1,33
-0,730	39766	113132	0,00375	10,60	30,17	44,83	145,20	1,49
-0,540	44048	132012	0,004	11,01	33,00	45,88	148,18	1,39
-0,383	80283	258205	0,005	16,06	51,64	69,53	217,69	1,35
0,383	92491	176619	0,005	18,50	35,32	66,02	217,69	1,87
0,540	50913	90232	0,004	12,73	22,56	43,30	148,18	1,92
0,730	46128	77373	0,00375	12,30	20,63	43,14	145,20	2,09
0,920	40429	63105	0,00325	12,44	19,42	36,86	122,54	1,90
1,110	33535	44383	0,00325	28,46	13,66	42,12	138,86	1,48
1,300	26176	21935	0,0025	20,37	8,77	28,73	93,74	1,41
1,490	21229	19572	0,0025	18,45	7,83	33,48	108,22	1,81
1,680	15358	16018	0,00225	17,97	7,12	31,87	102,16	1,77
1,885	9823	12183	0,00225	14,90	5,41	38,58	122,39	2,59
2,085	4590	7147	0,00175	14,96	4,08	28,67	89,92	1,92
2,150	1074	333	0,0015	14,15	0,22	22,54	70,85	1,59



Obr. 40: Návrh rozložení žeber pro varianty V1 a V2

Sendvičový potah bez žeber

Druhá varianta kopíruje V1, jen s rozdílnou strukturou potahu. Pro odlehčení je zvolen sendvičový potah s pěnovým jádrem.

Do výpočtů smykového napětí všech sendvičových potahů vstupuje pouze tloušťka tkaniny, protože pěna nepřenáší smykové zatížení, zatímco kritické napětí je počítáno i s tloušťkou pěnového jádra, aby byla zohledněna celá tloušťka potahu. Protože nebylo změněno uspořádání konstrukce, byl postup pro výpočet kritického napětí totožný jako u laminátového potahu. Tyto rozměry jsou uvedeny v příloze.

Protože je podle hustoty materiálu hmotnostně výhodnější přidávat tloušťku pěny než uhlíkového prepregu, bylo zde počítáno s jednou vrstvou tkaniny z každé strany jádra. Zbylou tloušťku materiálu tak, aby vycházel poměr napětí, tvořila pěna.

Výsledná tloušťka potahu v koncovém řezu křídla $t_{V2,2,150} = 2,5$ mm, což odpovídá 2 mm pěny a dvěma vrstvám tkaniny. V řezu $z_{0,383}$ vyšla tloušťka $t_{V2\pm 0,383} = 16,5$ mm, tedy 16 mm pěny. Napočtená hmotnost byla $m_{V2} = 11,13$ kg.

Vzhledem k technologickým omezením a požadavkům z AVA byly rozměry pěny navrženy tak, aby její minimální tloušťka odpovídala 10 mm, tedy v místech, kde byla tloušťka nižší, byl návrh potahu upraven. Ostatní tloušťky zůstaly zachovány. Hmotnost s touto úpravou vyšla $m_{V2_pěna} = 13,43$ kg.

Návrh odpovídá obrázku 40. Vypočtené hodnoty tloušťky potahu a hmotnost jsou v tabulkách 20 a 21.

Tabulka 20: Vypočtená hmotnost potahu u varianty V2

Plocha [m ²]	Prepreg			Jádro		
	Tloušťka [mm]	Objem [m ³ ·10 ⁻³]	Hmotnost [kg]	Tloušťka [mm]	Objem [m ³ ·10 ⁻³]	Hmotnost [kg]
0,202	0,500	0,101	0,287	2,5	0,403	0,044
0,212	0,500	0,106	0,302	3,5	0,636	0,070
0,238	0,500	0,119	0,339	3,5	0,714	0,079
0,242	0,500	0,121	0,345	4,5	0,968	0,106
0,260	0,500	0,130	0,371	5,5	1,300	0,143
0,278	0,500	0,139	0,396	5,5	1,390	0,153
0,298	0,500	0,149	0,425	8,5	2,384	0,262
0,316	0,500	0,158	0,450	8,5	2,528	0,278
0,336	0,500	0,168	0,479	10,5	3,360	0,370
0,210	0,500	0,105	0,299	11,5	2,310	0,254
0,036	0,500	0,018	0,051	16,5	0,576	0,063
celkem pro polovinu polorozpětí			3,744			1,823
celkem celé polorozpětí			7,489			3,645
součet pro vypočtenou tloušťku pěny						11,134

Tabulka 21: Vypočtená napětí a tloušťka potahu pro variantu V2

Z	Q _{min}	Q _{max}	t _{preg}	t _{sw}	τ _{min}	τ _{max}	τ _{kmin}	τ _{kmax}	Nejmenší poměr τ _k /τ
[m]	[Nm]		[mm]		[Nmm ⁻²]		[Nmm ⁻²]		[-]
-2,150	882	464	0,5	2,5	1,76	0,93	59,45	196,81	33,68
-2,085	3903	10382	0,5	3,5	7,81	20,76	108,23	359,69	5,21
-1,885	8304	17726	0,5	3,5	16,61	35,45	89,82	296,17	2,53
-1,680	12932	23330	0,5	4,5	25,86	46,66	124,54	408,66	2,67
-1,490	17835	28536	0,5	5,5	35,67	57,07	162,71	523,81	2,85
-1,300	21959	32019	0,5	5,5	43,92	64,04	141,46	453,70	2,21
-1,110	28567	64831	0,5	8,5	57,13	129,66	296,95	949,87	2,29
-0,920	34708	92223	0,5	8,5	69,42	184,45	261,47	838,18	1,42
-0,730	39766	113132	0,5	10,5	79,53	226,26	351,49	1138,37	1,55
-0,540	44048	132012	0,5	11,5	88,10	264,02	379,21	1224,79	1,44
-0,383	80283	258205	0,5	16,5	160,57	516,41	757,15	2370,60	1,47
0,383	92491	176619	0,5	16,5	184,98	353,24	718,91	2370,60	2,04
0,540	50913	90232	0,5	11,5	101,83	180,46	357,92	1224,79	1,98
0,730	46128	77373	0,5	10,5	92,26	154,75	338,19	1138,37	2,19
0,920	40429	63105	0,5	8,5	80,86	126,21	252,11	838,18	2,00
1,110	33535	44383	0,5	8,5	184,98	88,77	288,11	949,87	1,56
1,300	26176	21935	0,5	5,5	101,83	43,87	139,05	453,70	1,37
1,490	21229	19572	0,5	5,5	92,26	39,14	162,03	523,81	1,76
1,680	15358	16018	0,5	4,5	80,86	32,04	127,49	408,66	1,58
1,885	9823	12183	0,5	3,5	67,07	24,37	93,36	296,17	1,39
2,085	4590	7147	0,5	3,5	52,35	14,29	114,67	359,69	2,19
2,150	1074	333	0,5	2,5	42,46	0,67	62,61	196,81	1,47

Sendvičový potah se dvěma žebry

Potah byl navržen se dvěma žebry navíc, která ovlivňují při výpočtu kritického napětí charakteristický rozměr b přední torzní skříň. Ten byl určen metodou vepsaných kružnic u daných řezů, proto byla v některých řezech uvažována vzdálenost mezi žebry. Zadní torzní skříň zůstala beze změny. Rozměry jsou zaznamenány v tabulce v příloze F.

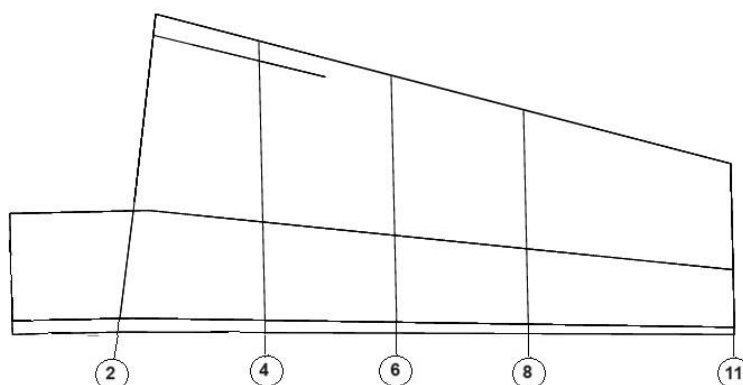
Tloušťka potahu na konci polorozpětí vyšla stejně jako u V2, $t_{V3,2,150} = 2,5$ mm. V řezu $Z_{0,383}$ vyšla tloušťka $t_{V3\pm 0,383} = 9,5$ mm, s tloušťkou pěny 9 mm. Hmotnost tohoto potahu by vyšla $m_{V3} = 10,33$ kg, přičemž 7,5 kg tvoří tkanina.

Tloušťka pěny byla kvůli omezením (viz V2) navrhnutá $t_{pěna} = 10$ mm, což přidá k hmotnosti přibližně 3 kg – $m_{V3,pěna} = 13,27$ kg. Vypočtené hmotnosti jsou uvedeny v tabulce 22. V příloze je uvedena celá tabulka i s výpočtem hmotnosti potahu s 10mm jádrem. Hmotnost této varianty s 10 mm pěnovým jádrem je vypočten stejným způsobem.

Návrh potahu je zobrazen na obrázku 41. Výsledná vypočtená tloušťka potahu je uvedena v tabulce 23.

Tabulka 22: Vypočtená hmotnost potahu u varianty V3

Plocha [m ²]	Prepreg			Jádro		
	Tloušťka [mm]	Objem [m ³ ·10 ⁻³]	Hmotnost [kg]	Tloušťka [mm]	Objem [m ³ ·10 ⁻³]	Hmotnost kg
0,202	0,500	0,101	0,287	2,5	0,403	0,044
0,212	0,500	0,106	0,302	3,5	0,636	0,070
0,238	0,500	0,119	0,339	3,5	0,714	0,079
0,242	0,500	0,121	0,345	4,5	0,968	0,106
0,260	0,500	0,130	0,371	5,5	1,300	0,143
0,278	0,500	0,139	0,396	5,5	1,390	0,153
0,298	0,500	0,149	0,425	6,5	1,788	0,197
0,316	0,500	0,158	0,450	6,5	1,896	0,209
0,336	0,500	0,168	0,479	6,5	2,016	0,222
0,210	0,500	0,105	0,299	7,5	1,470	0,162
0,036	0,500	0,018	0,051	9,5	0,324	0,036
celkem pro polovinu polorozpětí			3,744			1,420
celkem celé polorozpětí			7,489			2,839
součet pro vypočtenou tloušťku pěny						10,328



Obr. 41: Návrh rozložení žeber pro variantu V3

Tabulka 23: Vypočtená napětí a tloušťka potahu pro variantu V3

Z	Q _{min}	Q _{max}	t _{preg}	t _{SW}	τ _{min}	τ _{max}	τ _{kmin}	τ _{kmax}	Nejmenší poměr τ _k /τ
[m]	[Nm]		[mm]		[Nmm ⁻²]		[Nmm ⁻²]		[-]
-2,150	882	464	0,5	2,5	1,76	0,93	59,45	196,81	33,68
-2,085	3903	10382	0,5	3,5	7,81	20,76	108,23	359,69	5,21
-1,885	8304	17726	0,5	3,5	16,61	35,45	89,82	296,17	2,53
-1,680	12932	23330	0,5	4,5	25,86	46,66	124,54	408,66	2,67
-1,490	17835	28536	0,5	5,5	35,67	57,07	181,73	523,81	3,18
-1,300	21959	32019	0,5	5,5	43,92	64,04	182,82	453,70	2,85
-1,110	28567	64831	0,5	6,5	57,13	129,66	257,12	555,46	1,98
-0,920	34708	92223	0,5	6,5	69,42	184,45	257,15	490,15	1,39
-0,730	39766	113132	0,5	6,5	79,53	226,26	330,14	436,24	1,46
-0,540	44048	132012	0,5	7,5	88,10	264,02	439,53	520,94	1,66
-0,383	80283	258205	0,5	9,5	160,57	516,41	705,20	785,85	1,37
0,383	92491	176619	0,5	9,5	184,98	353,24	705,20	785,85	2,00
0,540	50913	90232	0,5	7,5	101,83	180,46	439,53	520,94	2,44
0,730	46128	77373	0,5	6,5	92,26	154,75	330,14	436,24	2,13
0,920	40429	63105	0,5	6,5	80,86	126,21	248,22	490,15	1,97
1,110	33535	44383	0,5	6,5	184,98	88,77	248,22	555,46	1,34
1,300	26176	21935	0,5	5,5	101,83	43,87	177,72	453,70	1,75
1,490	21229	19572	0,5	5,5	92,26	39,14	177,72	523,81	1,93
1,680	15358	16018	0,5	4,5	80,86	32,04	127,49	408,66	1,58
1,885	9823	12183	0,5	3,5	67,07	24,37	93,36	296,17	1,39
2,085	4590	7147	0,5	3,5	52,35	14,29	114,67	359,69	2,19
2,150	1074	333	0,5	2,5	42,46	0,67	62,61	196,81	1,47

Sendvičový potah se všemi žebry

Třetí varianta byla navržena s žebry ve všech řezech počínaje řezem $z = \pm 0,540$ m. To ovlivnilo výpočty kritického napětí jak pro přední, tak pro zadní torzní skříň (viz sendvičový potah). Výpočty jsou v tabulce v příloze F.

Filozofie návrhu materiálu zde byla stejná, jako u sendvičového potahu z V2.

Na konci polorozpětí by byla tloušťka materiálu $t_{V4,2,150} = 1,5$ mm, tedy 0,5 mm tkaniny v jedné vrstvě z každé strany jádra a 1 mm pěnového jádra. V řezu $z_{0,383}$ byla navržena tloušťka $t_{V4\pm 0,383} = 6,5$ mm – 6 mm pěny a 0,5 mm prepregu.

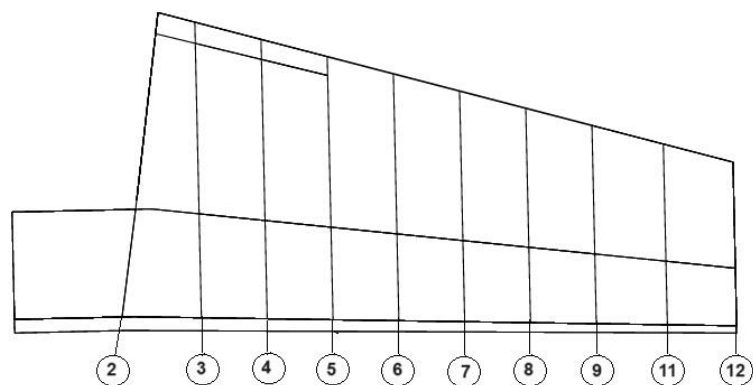
Hmotnost takto navrženého potahu by vyšla $m_{V4} = 9,38$ kg, přičemž 7,5 kg opět tvoří tkanina.

Stejně jako u návrhu výše, i zde byla vlivem technologických omezení a požadavků z AVA vytvořena hmotnostní varianta s tloušťkou jádra 10 mm. Protože nebyla nikde překročena tloušťka jádra 10 mm, vyšla hmotnost stejně jako u V3, tedy $m_{V4, \text{pěna}} = 13,27$ kg. Výpočty jsou uvedeny v tabulce 24.

Tabulka 24: Vypočtená hmotnost potahu u varianty V4

Plocha [m ²]	Prepreg			Jádro		
	Tloušťka [mm]	Objem [m ³ ·10 ⁻³]	Hmotnost [kg]	Tloušťka [mm]	Objem [m ³ ·10 ⁻³]	Hmotnost [kg]
0,202	0,500	0,101	0,287	1,5	0,202	0,022
0,212	0,500	0,106	0,302	2,5	0,424	0,047
0,238	0,500	0,119	0,339	2,5	0,476	0,052
0,242	0,500	0,121	0,345	3,5	0,726	0,080
0,260	0,500	0,130	0,371	3,5	0,780	0,086
0,278	0,500	0,139	0,396	3,5	0,834	0,092
0,298	0,500	0,149	0,425	5,5	1,490	0,164
0,316	0,500	0,158	0,450	4,5	1,264	0,139
0,336	0,500	0,168	0,479	4,5	1,344	0,148
0,210	0,500	0,105	0,299	4,5	0,840	0,092
0,036	0,500	0,018	0,051	6,5	0,216	0,024
celkem pro polovinu polorozpětí			3,744			0,946
celkem celé polorozpětí			7,489			1,891
součet pro vypočtenou tloušťku pěny						9,380

Návrh po polorozpětí je vidět na obrázku 42. Výpočty jsou uvedeny v tabulce 25 níže.



Obr. 42: Návrh rozložení žeber pro variantu V4

Tabulka 25: Vypočtená napětí a tloušťka potahu pro variantu V4

Z	Q _{min}	Q _{max}	t _{preg}	t _{SW}	τ _{min}	τ _{max}	τ _{kmin}	τ _{kmax}	Nejmenší poměr τ _k /τ
[m]	[Nm]		[mm]		[Nmm ⁻²]		[Nmm ⁻²]		[-]
-2,150	882	464	0,5	1,5	1,76	0,93	425,27	425,27	240,95
-2,085	3903	10382	0,5	5,5	7,81	20,76	616,82	888,23	29,71
-1,885	8304	17726	0,5	5,5	16,61	35,45	588,63	731,35	16,60
-1,680	12932	23330	0,5	5,5	25,86	46,66	681,69	681,69	14,61
-1,490	17835	28536	0,5	5,5	35,67	57,07	681,69	681,69	11,94
-1,300	21959	32019	0,5	5,5	43,92	64,04	681,69	681,69	10,65
-1,110	28567	64831	0,5	5,5	57,13	129,66	681,69	681,69	5,26
-0,920	34708	92223	0,5	4,5	69,42	184,45	456,34	456,34	2,47
-0,730	39766	113132	0,5	4,5	79,53	226,26	456,34	456,34	2,02
-0,540	44048	132012	0,5	4,5	88,10	264,02	873,03	412,91	1,56
-0,383	80283	258205	0,5	6,5	160,57	516,41	1821,50	861,51	1,67
0,383	92491	176619	0,5	6,5	184,98	184,98	1821,50	861,51	4,66
0,540	50913	90232	0,5	4,5	101,83	101,83	873,03	412,91	4,06
0,730	46128	77373	0,5	4,5	92,26	92,26	456,34	456,34	4,95
0,920	40429	63105	0,5	4,5	80,86	80,86	456,34	456,34	5,64
1,110	33535	44383	0,5	5,5	184,98	353,24	681,69	681,69	1,93
1,300	26176	21935	0,5	3,5	101,83	180,46	276,05	276,05	1,53
1,490	21229	19572	0,5	3,5	92,26	154,75	276,05	276,05	1,78
1,680	15358	16018	0,5	3,5	80,86	126,21	276,05	276,05	2,19
1,885	9823	12183	0,5	2,5	67,07	88,77	121,62	151,10	1,37
2,085	4590	7147	0,5	2,5	52,35	43,87	127,44	183,52	2,43
2,150	1074	333	0,5	1,5	42,46	39,14	425,27	425,27	10,02

9.2.5 Porovnání jednotlivých variant návrhů potahu

V tabulce 26 níže jsou uvedeny hmotnosti jednotlivých variant. Hodnoty v závorkách udávají hmotnost počítané části potahu dle dostupných technologií.

Z porovnání je vidět, že nejlehčí potah je ve V4. Nicméně, jak již bylo zmíněno výše, jedná se čistě o potah, a lze předpokládat, že s dodanými žebry a lepením bude výsledná hmotnost vyšší než u V3 i V2. Hmotnost V3 je vyšší než u V2, avšak obdobně platí, že je potřeba pro celkové porovnání započítat i žebra a lepení.

V1 má přibližně čtyřikrát větší hmotnost, což je dáno vysokou hustotou uhlíkového prepregu.

Vlivem technologických požadavků z AVA vyšla hmotnost potahů V3 a V4 stejná, tedy po započítání hmotností žeber a lepidla by byla hmotnost varianty V4 určitě vyšší. Varianta V2 má sice vyšší hmotnost, nicméně pouze o necelých 200 gramů.

Z rozboru výsledků bylo předpokládáno, že varianta V2 bude mít nejnižší hmotnost, protože je potah vyztužen nejmenším počtem žeber a zároveň je samotná hmotnost potahu menší než u čistě laminátového potahu.

Tabulka 26: Hmotnostní porovnání navrhovaných potahů.

Varianta	V1 – laminát	V2 – SW bez žeber	V3 – SW a 2 žebra	V4 – SW a žebra
Hmotnost [kg]	42,03	11,13 (13,43)	10,33 (13,27)	9,38 (13,27)

10 Pevnostní analýza metodou konečných prvků

Analýza metodou konečných prvků (MKP) byla provedena pro kontrolu pevnostních výpočtů a pro ověření ztráty stability v programu NX Nastran.

Do výpočtů byly zavedeny pouze tři varianty potahů, a to sendvičový potah bez žeber, se dvěma žebry a sendvičový potah se všemi žebry. Model byl uzpůsoben tomu, aby šlo mezi variantami snadno přepínat vyjmutím sítě žeber z řešiče.

Řešiče byly pro výpočty použity celkem 2 – pro pevnostní výpočty byl použit *SOL 101 Linear statics* a pro ověření stabilizátoru na ztrátu stability byl použit lineární řešič *SOL 105 Linear buckling*.

10.1 Globální MKP model

Pro analýzu MKP bylo nejprve potřeba vytvořit globální model se zavedením sil a okrajových podmínek. Konstrukční prvky v modelu byly vytvořeny jako 2D element typu SHELL. Elementy, ve kterých je zavedena síla jsou poté vytvořeny jako 1D element typu RBE3.

10.1.1 3D geometrie

Geometrie potahu byla vytvořena díky konstrukčním výkresům a referenční geometrii potahu a systémových rovin dodané od AVA. Model je tvořen v programu Catia V5. Ze systémových rovin byly odečteny rozměry poloh hlavního nosníku, obou pomocných nosníků a žeber v řezech pro výpočet zatížení, viz kapitola 8.

Referenční geometrie potahu je dodána jako celá plocha na polorozpětí, proto bylo nejdříve potřeba oříznout vnitřní část, kde je potah zavěšen na trup. Dalším krokem bylo vytvoření ploch žeber a nosníků. Žebra byla vytvořena dle původního systému, ve kterém jejich pozice odpovídá jednotlivým řezům po polorozpětí, s výjimkou kořenového šikmého žebra, které se nachází mezi řezy $Z_{+0,311}$ a Z_{+540} . Původní systém obsahoval žebra v řezech Z_0 a $Z_{\pm 180}$, která byla v návrhu z důvodu úspory hmotnosti odstraněna. Nosníky byly vytvořeny díky geometrii odečtené ze systému rovin.

10.2 Příprava modelu pro MKP

Síť model byla připravena s pomocí 2D a 1D elementů.

10.2.1 Souřadnicový systém

Souřadnicový systém používaný při analýze je umístěn následovně: nosníky od kořene polorozpětí ke konci byly orientovány ve směru $-y$, kladný směr osy x působil proti směru letu a kladný směr osy z směřoval dolů.

10.2.2 2D elementy

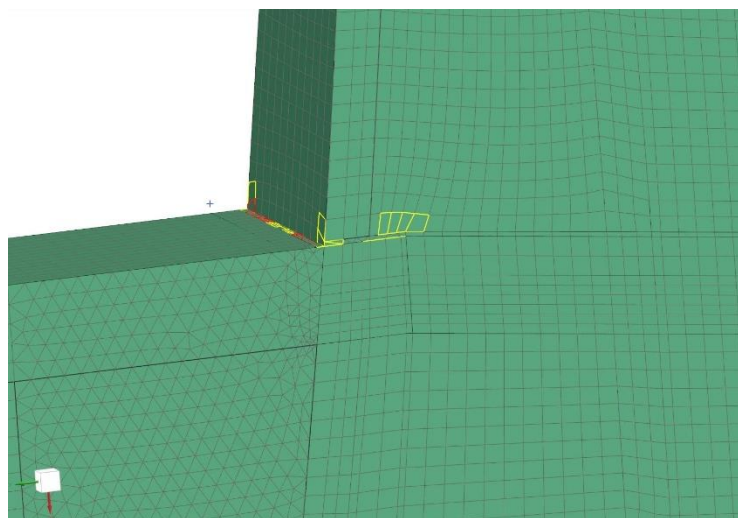
2D elementy byly použity při síťování potahu a ostatních ploch. Aby bylo možné přiřadit síti různé materiálové charakteristiky, bylo tomu potřeba uzpůsobit geometrii stabilizátoru. Plocha potahu byla nejdříve rozdělena v místech, kde budou k potahu přilepeny pásnice a žebra, s tolerancí šířky pásu 2,5 mm z každé strany. Šířka pásnic je tvořena dle původního návrhu konstrukce. Rozměry byly odečteny v programu Catia V5. V těchto místech je

z technologického důvodu jiná skladba materiálu. Poté byla pásnice hlavního nosníku rozdělena do dílčích segmentů dle návrhu tloušťky pásnice, viz 9.1.

Pro správnou návaznost sítě byly všechny styčné plochy rozděleny. Prostředky pro dělení byly plochy tělesa – žebra a nosníky. Následně byly díly sešity pomocí funkce „Stitch“, což zajistilo, že na sebe síť různých elementů v hranách navazovaly.

Veškeré plochy jsou tvořeny elementy vysítovanými metodou Paver. Stabilizátor byl vysítován postupně od největších ploch k nejmenším. Elementy byly tvořeny 2D mapovanou sítí s kontrolovanou velikostí elementů na hranách. Velikost elementů byla zvolena 10 mm. Primárně byla síť tvořena čtvercovými elementy CQUAD4 nebo CQUAD8, které definují membránový nebo skořepinový prvek. Na modelu byly plochy, ve kterých tato síť nedokázala vytvořit vhodné elementy, proto byly v daných případech elementy změněny na trojúhelníky CTRIA6, definující skořepinový prvek s šesti body sítě [67].

Vadné elementy a jim odpovídající plochy byly identifikovány při kontrole sítě po jejím vytvoření. Prvky byly kontrolovány především v okolí výskytu závěsů do trupu, protože tam bylo předpokládáno velké zatížení. Chybné elementy se vyskytovaly na ploše pásnice mezi řezy $Z_{\pm 0,180}$ a $Z_{\pm 0,403}$. V části pásnice a v přilehlém potahu byly provedena změna elementů, jak je vidět na obrázku 43. Po této úpravě byly elementy v pořádku, případně pouze varovné místo kritických. Na obrázku je také vidět oblast mezi nosníkem, druhým žebrem a potahem, kde jsou vyznačeny kritické (červené) a varovné (žluté) elementy. Zde se vyskytovala chybná geometrie sítě i po úpravách, nicméně její kvalita nebyla zlepšena, a proto byly zachovány původní čtvercové prvky.



Obr. 43: Síť v místě uchycení závěsu do trupu s vyznačenými kritickými a varovnými prvky po kontrole kvality sítě, a změněnou geometrií elementů.

V místech se zhoršenou kvalitou sítě bylo potřeba počítat s chybou zanesenou systémem do výpočtu.

Kvalita sítě byla nižší i v některých dalších plochách, nicméně ty neměly přílišný vliv na výsledky, protože se nenacházely na velmi zatížených místech.

Po kontrole kvality byly zkontrolovány i směry orientace materiálu a směry normál sítě, aby bylo zaručeno správné umístění materiálu do modelu.

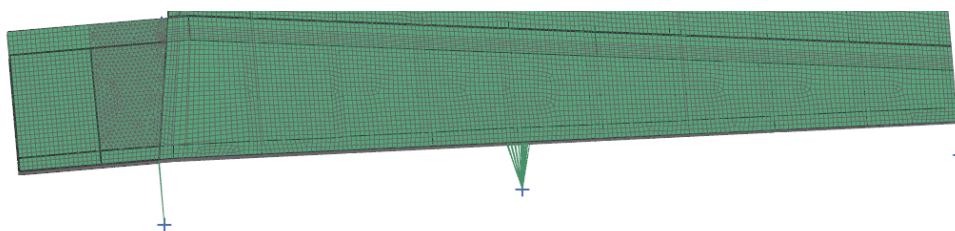
10.2.3 1D elementy

Elementy 1D byly vytvořeny za účelem zavedení zatížení a závěsů do modelu. Zatížení bylo zavedeno v místě řezů pomocí elementů RBE3. Takto vytvořené elementy byly ohraničeny tvarem potahu.

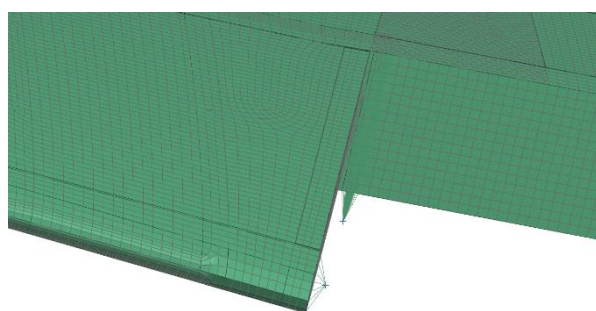
Pro zavedení závěsů a reakcí z nich byl zvolen zjednodušený způsob. V místech os čepů byly vytvořeny body reprezentující daný závěs. Závěsy na výšková kormidla se nacházejí v rovinách příslušných řezů, ve výšce poloviny pomocného nosníku. Poloha na ose x je $x = 11,59$ m v absolutních souřadnicích. Pro vnější závěs jsou elementy vytvořeny prvkem RBE3 a tvoří tzv. „spider“ spojení mezi bodem a hranou pomocného nosníku v daném řezu, které přenáší zatížení z bodu do celé hrany. Střední a vnitřní závěs byl simulován obdobně, jen byl bod propojen s vytvořenými plochami na pomocném nosníku, což odpovídá uchycení závěsů v současnosti.

Lze předpokládat, že trup bude mít podstatně nižší tuhost než kompozitní potah, a proto byly závěsy do trupu tvořeny také prvky RBE3. Obdobně jako závěsy na VK, i zde byl použit zjednodušený případ v podobě rozvedení „spidera“ z bodu. Body byly vytvořeny v osách rotací čepů, které se nacházejí na hlavním a předním pomocném nosníku. Na hlavním nosníku je umístěna příložka, tudíž se osa rotace čepu nachází pod nosníkem.

Závěsy na VK jsou zobrazeny na obrázku 44, závěsy do trupu jsou na obrázku 45.



Obr. 44: Náhrada závěsů na VK



Obr. 45: Náhrada závěsů na trup

10.2.4 Návrh materiálu

V systému NX bylo nutné vytvořit systém materiálů odpovídající materiálům zadaným z AVA. K tomu byla využita předem vytvořená knihovna poskytnutá k výuce NMM na FS ČVUT. Z té byly vybrány materiály, které odpovídaly potřebným novým materiálům (tedy pěna, uhlíková tkanina a uhlíková jednosměrná vlákna) a ty byly zkopírovány do stávající simulace. Úpravou materiálových hodnot vznikly použité materiály. Vlastnosti vybraných materiálů jsou v kapitole 4.4. [68]

Z materiálu byly vytvořeny různé skladby potahů, ke kterým bylo potřeba doplnit interlaminární smykovou pevnost dle materiálových charakteristik a kritérium porušení. To bylo vybráno dle Hoffmana.

V základním návrhu byly stojiny i žebra navrženy stejně jako potah. Vlivem požadavků z AVA byly tyto komponenty navrženy jako sendvič s 10 mm pěnovým jádrem a jednou vrstvou potahu z každé strany.

Pásnice hlavního nosníku byly rozděleny do segmentů dle řezů a následně jim byla přiřazena tloušťka materiálu dle návrhu v kapitole 9.1. Materiálová skladba pásnic byla tvořena vrstvami potahu, ke kterým má být pásnice přidělána, přechodovou vrstvou ze stojiny (tedy 1 vrstva tkaniny z každé strany pásnice) a jednosměrným prepregem s počtem vrstev tak, aby výsledná tloušťka jednosměrných vláken a tkaniny odpovídala tloušťce pásnice. Potah tvořil tloušťku navíc, která nijak neovlivnila návrhovou tloušťku pásnic.

V místech, kde bylo potřeba více vrstev na pásnici byly prokládány jednosměrné prepregy tkaninou tak, aby byly vždy maximálně tři vrstvy stejného typu materiálu se stejnou orientací.

Potah byl tvořen sendvičovou strukturou. V místech, kde se napojovala žebra nebo pásnice byl potah přerušen a byla zde upravena skladba materiálu. V těchto napojeních byla jako materiál navržena tkanina z potahu spojená s lemy žeber, případně s pásnicí. Tento krok byl zvolen z technologických důvodů, aby bylo možné vlepít nosníky a žebra do potahu.

Pro účely pevnostních výpočtů nebyly vrstvy pásnice odstupňovány postupně, jako by byly při výrobě, tudíž mezi jednotlivými segmenty byl vždy rozdíl 1 mm.

Pásnice pomocných nosníků byly v prvotním návrhu určeny tlusté 3 mm. Postup skladby materiálu byl stejný jako u pásnic hlavního nosníku.

10.2.5 Orientace vláken

Protože se v simulaci jednalo o anizotropní materiál, musela tomu být uzpůsobena orientace sítě, aby bylo možné vypočítat adekvátně vlastnosti. Pro potah, nosníky a pásnice byla orientace sítě určena vektorem $-y$. Sítě žeber a jejich napojení k potahu byly určeno vektorem $-z$.

V dalším kroku byly v programu Catia V5 odečteny úhly komponent, pokud měla jejich orientace odchylku od výše zvolených směrů. Dle těchto hodnot byla určena orientace vláken, aby při výpočtech byla dodržena přesná orientace. Odečtené úhly orientace materiálu jsou zobrazeny v tabulce 27. Všechny plochy, které nebyly rovnoběžné s některou z os, byly natočeny po směru hodinových ručiček, tudíž úhel otočení materiálu musel být vždy odečten od voleného směru orientace. Pokud byly na potahu v jedné skladbě vrstvy dvou různých struktur a orientací, musela vždy zůstat orientace příslušící danému celku. Například na lomených pásnicích byl potah vždy pod úhly 0° nebo 45° , přestože pásnice měly nulovou orientaci s úhlem $-7,068^\circ$.

Tabulka 27: Orientace vláken pro tvorbu materiálů v NX Nastran

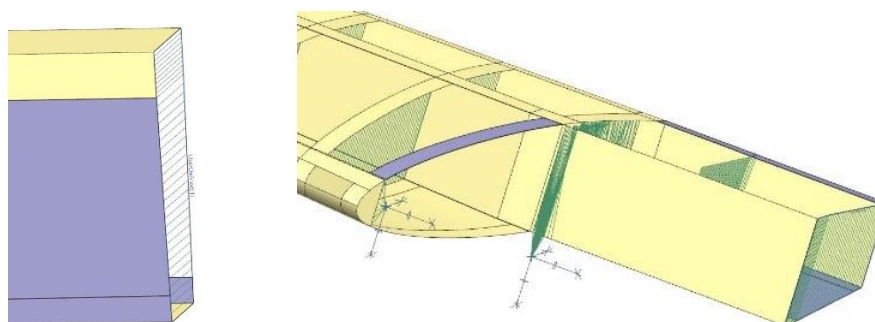
Plocha	Orientace vůči směru $-y$ [°]
Pásnice hlavního nosníku od $Z_{\pm 0,403}$	-7,068
Pásnice pomocného nosníku od $Z_{\pm 0,340}$	-2,133
Pásnice předního nosníku	-14,908
-	Orientace vůči směru $-z$ [°]
Šikmé žebro: NH – hlavní nosník	-7,757
Šikmé žebro: hlavní – pomocný nosník	-8,444

10.2.6 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky (OP) byly vytvořeny v místě řezu 0, který značí polovinu křídla. Pro vytvoření symetrické vazby byly odstraněny možnosti pohybu v ose y a rotace kolem osy x a z . Vazba byla přidělena všem hranám v tomto řezu.

Další okrajové podmínky byly zavedeny v místech zavěšení na trup, kdy ve vytvořených bodech (viz 9.2) byly odejmuty všechny stupně volnosti, kromě rotace kolem osy x .

Takto vytvořené okrajové podmínky se při využití NX Nastran nevíce přiblížily realitě. Zavedení OP je na obrázku 46.



Obr. 46: Vlevo: okrajové podmínky v rovině symetrie, vpravo: okrajové podmínky v místě uchycení stabilizátoru do trupu.

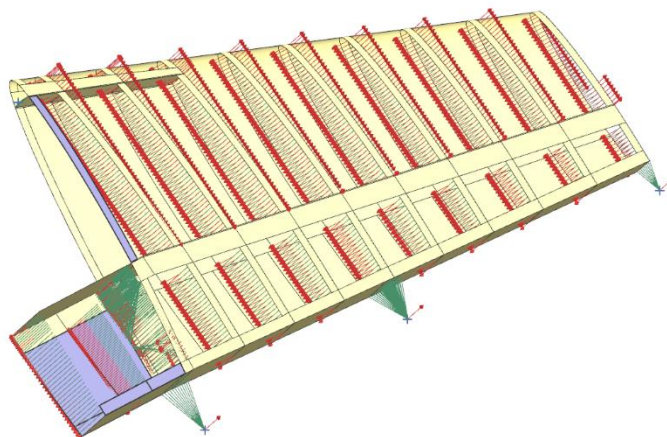
10.2.7 Zavedení zatížení

Zatížení bylo zavedeno po jednotlivých řezech, do předem vytvořených elementů 1D. Umístění a velikosti sil a momentů byly převzaty z kapitoly 5. Zatížení. Směr působení zatížení byl určován dle vektorů, přesné umístění je v tabulce 28.

Tabulka 28: Orientace zatížení při výpočtech v NX Nastran

Druh zatížení	Orientace vektoru dle osy	
	Minimální případ zatížení	Maximální případ zatížení
Aerodynamická síla	z	$-z$
Hmotová síla	$-z$	z
Síla od závěsů VK	$-z$	$-z$
Moment	y	y

Na obrázku 47 jsou červenými šipkami znázorněny síly a momenty pro minimální případ zatížení.



Obr. 47: Zobrazené zatížení v NX Nastran

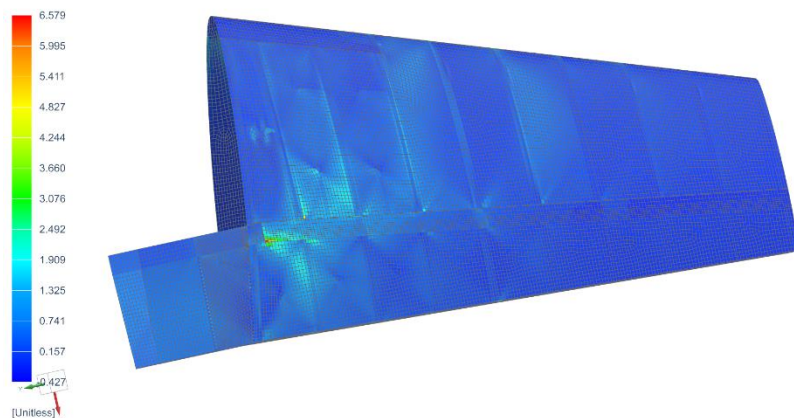
11 Výsledky simulace

V analýze výsledků bylo důležité pozorovat index porušení vrstev a index porušení lepených spojů. Ty musely vždy vyjít mezi 0 a 1. Pro index lepených spojů vycházely ve všech případech velmi nízké hodnoty, a při dalších analýzách bylo pouze u konečného výsledku ověřeno, že je index stále v daných mezích.

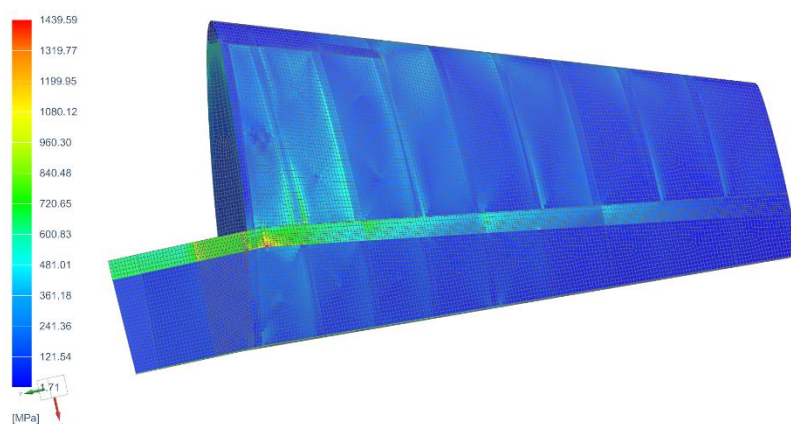
11.1 Výsledky prvotního návrhu

Nejprve byl analyzován model potahu se všemi žebry, se skladbou materiálu odpovídající dosavadním výpočtům. Model byl simulován pouze pro případ minimálního zatížení, protože je více kritický. Výsledky byly vyhodnoceny nejprve napříč všemi vrstvami. Při této analýze byl nejvyšší index porušení 6,579 v místě přechodu změny tloušťky pásnice v řezu $Z_{\pm 0,403}$.

Po prohlédnutí jednotlivých vrstev byla identifikována slabá místa konstrukce, podle kterých bylo upraveno uspořádání a tloušťka vrstev materiálu. K identifikaci bylo využito vypočtené napětí v jednotlivých vrstvách, kde bylo vidět normálové namáhání vrstev potahu v jednotlivých osách a smykové namáhání v jednotlivých rovinách. Na obrázcích 48 a 49 níže jsou zobrazeny index poruchy a zatížení stabilizátoru.



Obr. 48: Index poruchy stabilizátoru pro vypočtenou materiálovou tloušťku



Obr. 49: Napětí ve stabilizátoru pro vypočtenou materiálovou tloušťku

Na obrázcích je vidět, že kromě přechodu tloušťky pásnice v místě zlomu nosníku, byly nejvíce zatíženy pásnice hlavního nosníku ve značné délce, žebra 3 a 4 a okolní potah. Vysoký index poruchy je vidět v části potahu mezi prvními třemi žebry.

Po rozboru zatížení první vrstvy v jednotlivých směrech byl zvolen další postup optimalizace materiálu. Napětí bylo hodnoceno v nativním souřadnicovém systému, tedy směr 11 byl ve směru orientace vláken uvedené při charakterizaci materiálu, směr 22 je na ně kolmý a směr 12 značí zatížení ve smyku. Při porovnání s materiálovým napětím (v tabulce 29) je vidět, že MKP výpočet výrazně převyšuje smykovou pevnost, a tudíž bylo vhodným krokem doplnit do části potahu tkaninu posunutou o 45 stupňů vůči dané orientaci tkaniny na potahu.

Tabulka 29: Porovnání zatížení v první – povrchové – vrstvě materiálu s tabulkovými hodnotami

	11 (osnova)		22 (útek)		12 (smyk)
	Tah [MPa]	Tlak [MPa]	Tah [MPa]	Tlak [MPa]	[MPa]
MKP výpočet	566,39	701,74	632,23	483,23	-126,43 – 119,64
Pevnostní charakteristiky materiálu	650	840	640	780	55

Primární výpočty byly tedy nedostatečné, pravděpodobně vlivem zanedbání některých vlivů (více v kapitolách 8 a 9). Lze je považovat pouze za orientační, pro prvotní návrh uspořádání materiálu. Z toho důvodu byla pevnostní analýza podrobena pouze varianta V4, která by měla vyjít stabilně nejlépe (díky rozložení žeber), poté byly návrhy podrobeny optimalizaci.

11.2 Optimalizace návrhů

Po analýze prvního výpočtu a určení kritických míst byla předefinována materiálová skladba stabilizátoru. Vrstvy prepregů byly upravovány dvěma způsoby: přidáním materiálu nebo změnou orientace vláken. V průběhu několika dalších simulací byl materiál optimalizován tak, aby index porušení vrstev v žádné z vrstev nevyšel vyšší než 1. Významné změny byly provedeny na většině plochy potahu, na pásnicích i stojině hlavního nosníku, na potahu u šikmého a středního žebra a na pásnicích pomocného nosníku v místech zavedených sil od středního a vnějšího závěsu. Dále byl materiál upraven na druhém, třetím a šestém žeburu a v přilehlých oblastech.

Po vytvoření pevnostně vhodného návrhu byla provedena analýza na ztrátu stability. Opět byla upravována materiálová skladba. Nejprve byly odebrány některé vrstvy potahu a dle lokálního selhání v MKP řešení byly vrstvy opět přidávány, dokud nevyšlo selhání alespoň 1,1; což značí 10 % rezervu k selhání. Stabilitní výpočty budou uvedeny u výsledků jednotlivých variant. Nejčastěji se ztráta stability projevila na pásnicích anebo na potahu.

Po stabilitní kontrole byly pevnostní výpočty zkontrolovány a v případě potřeby byla skladba materiálu znovu upravena.

V následujících kapitolách budou popsány výsledky jednotlivých variant.

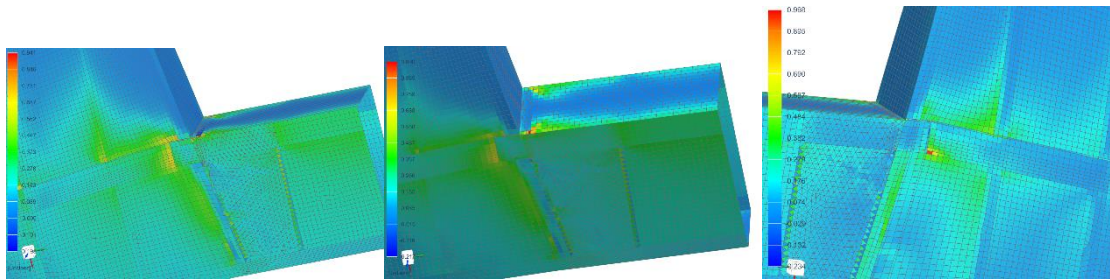
11.3 Index poruchy a napětí u optimalizovaných variant

Indexy po několika různých úpravách vyšly všechny pod 1 ve všech částech stabilizátoru. Napětí a indexy pro jednotlivé varianty a případy zatížení jsou uvedeny v tabulce 30.

Tabulka 30: Vypočtené maximální indexy poruchy a maximální absolutní napětí pro optimalizované varianty

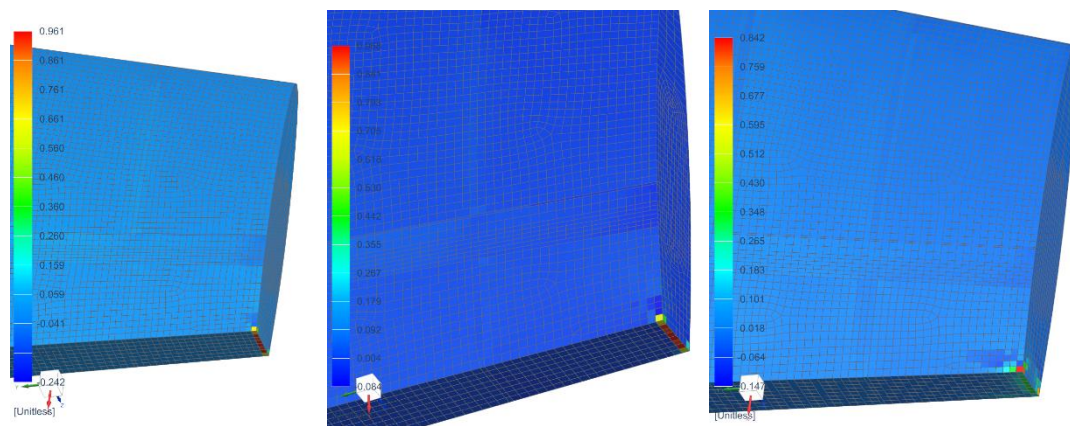
	V2		V3		V4	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Max. index poruchy [-]	0,941	0,961	0,990	0,968	0,998	0,842
Max. absolutní napětí [MPa]	739,83	560,85	739,49	563,75	829,69	423,68

Na obrázcích 50 a 51 níže jsou zobrazeny oblasti s nejvyššími indexy zatížení pro minimální a maximální případ.



Obr. 50: Maximální index lomu pro minimální případ zatížení. Vlevo V2, uprostřed V3, vpravo V4.

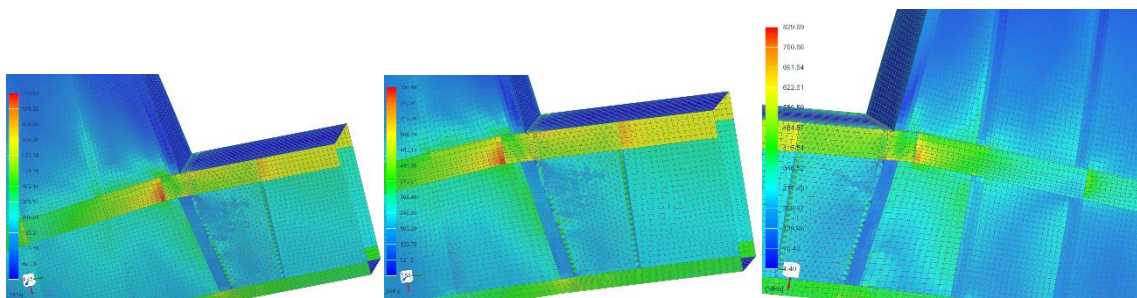
Vlevo a uprostřed je největší index na tlačené straně, vpravo je na tažené. Pro první dvě varianty (V2 a V3) se jedná o zatížení na hlavním nosníku, v místě zavedení zatížení závěsů na trup, ve variantě V4 je nejvíce náchylná k poruše tažená strana – spojení pásnice na zlomu nosníku. Ve skutečnosti lze předpokládat v tomto místě napětí nižší, protože pásnice by byla vícenásobně odstupňována, což by zpevnilo dané místo.



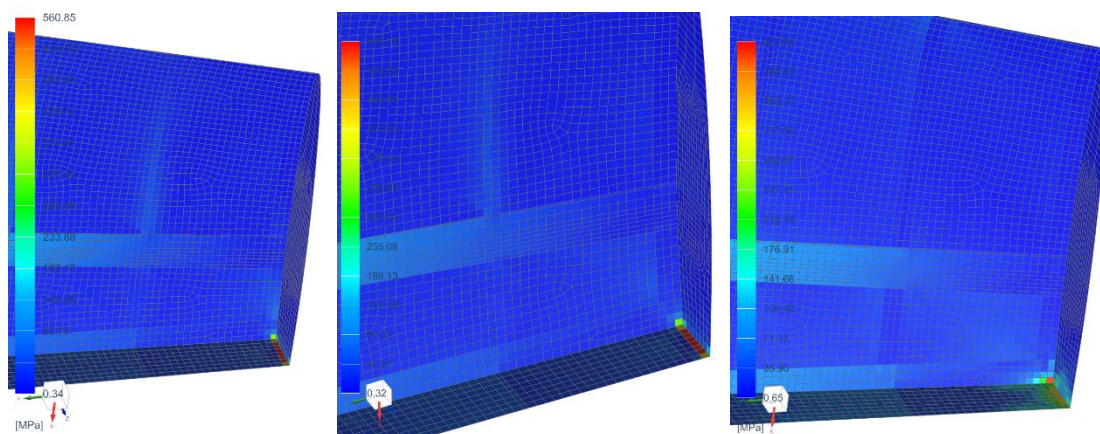
Obr. 51: Maximální index lomu pro maximální případ zatížení. Vlevo V2, uprostřed V3, vpravo V4.

V maximálním případě je největší index vždy na elementech na konci nosníku, což je v místě, kde byla zavedena síla od vnějšího VK. V případech V2 a V3 byla více namáhána stojina, v případě V4 pásnice.

Maximální napětí bylo přidružené k místům s největším indexem, viz obrázky 52 a 53.



Obr. 52: Maximální absolutní napětí pro minimální případ zatížení. Vlevo V2, uprostřed V3, vpravo V4.



Obr. 53: Maximální absolutní napětí pro maximální případ zatížení. Vlevo V2, uprostřed V3, vpravo V4.

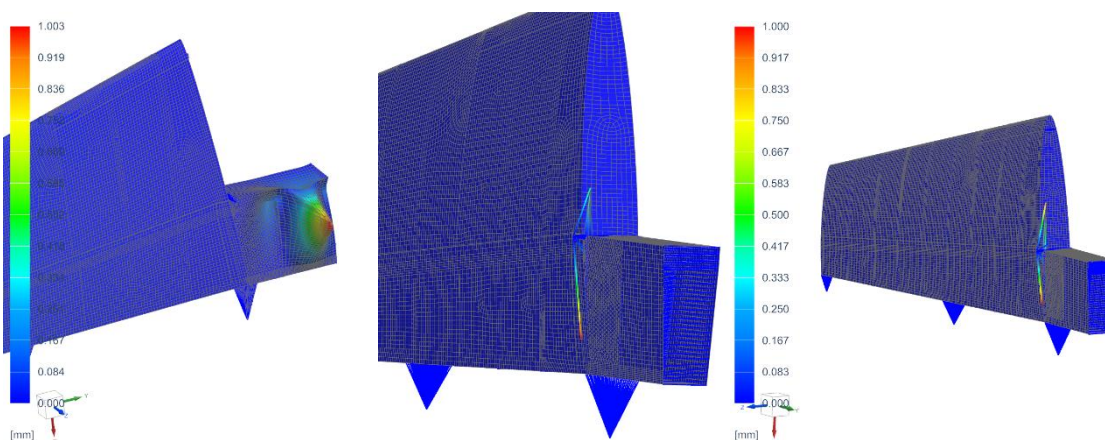
11.4 Ztráta stability u optimalizovaných variant

Pro ztrátu stability bylo důležité, aby koeficient u prvního módu vyšel vyšší než 1, a aby v dalších módech byla jeho hodnota stále vyšší. Koeficient u módů značí procenta porušení. V tabulce 31 jsou shrnuty výsledky stabilitní analýzy MKP pro prvních pět módů.

Tabulka 31: Vypočtené koeficienty ztráty stability pro optimalizované varianty

Koeficient z analýzy ztráty stability						
Mód	V2		V3		V4	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1.	1,13	3,12	1,26	2,47	1,43	2,44
2.	1,32	3,25	1,31	2,49	1,51	2,47
3.	1,37	3,35	1,35	3,21	1,57	3,25
4.	1,40	3,51	1,39	3,25	1,59	3,25
5.	1,41	3,71	1,42	3,25	1,65	3,73

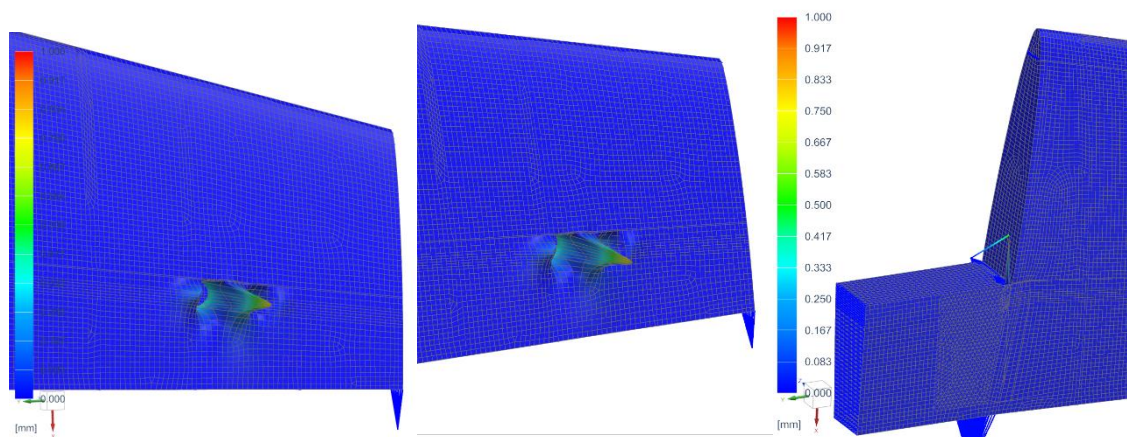
Na obrázku 54 níže jsou znázorněny poruchy v prvním móde namáhání pro všechny varianty v minimálním a maximálním případě zatížení. Kvůli lepší viditelnosti byla z prostředního obrázku oříznuta stupnice, nicméně je totožná, jako zbylé dvě.



Obr. 54: Selhání stabilizátoru v případě ztráty stability pro minimální případ zatížení. Vlevo V2, uprostřed V3, vpravo V4.

Ve variantě V2 došlo ke ztrátě stability na potahu o roviny symetrie stabilizátoru. Pro vyšší koeficient a menší možnost selhání by bylo možné potah v tomto místě ještě lokálně vyztužit. U zbylých dvou variant došlo ke ztrátě stability v místě uchycení závěsu do trupu.

Vlivem menšího množství žeber došlo při maximálním případě zatížení ke ztrátě stability u variant V2 a V3 na pásnici skoro na konci polorozpětí (mezi řezy $Z_{\pm 1,680}$ a $Z_{\pm 1,885}$). Ve variantě V4 na ploše, do které je zavedeno uchycení závěsu do trupu. Poruchy jsou znázorněny na obrázku 55. Pro lepší zobrazení byla z prostředního obrázku oříznuta stupnice, nicméně je totožná, jako zbylé dvě.

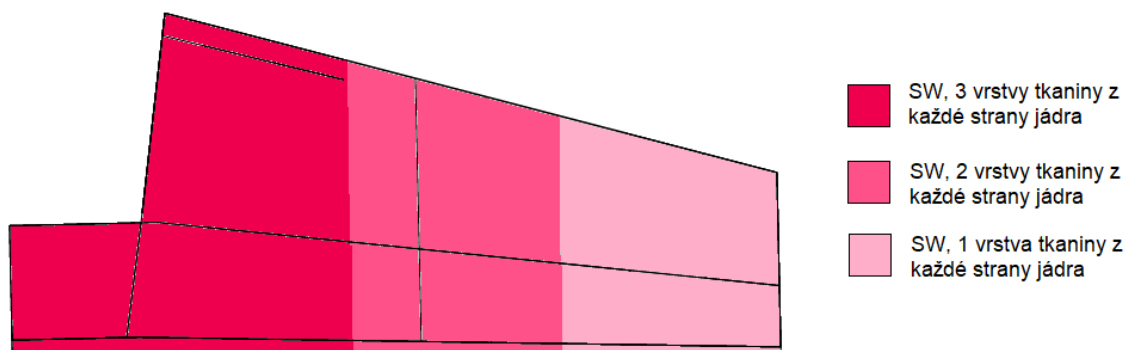


Obr. 55: Selhání stabilizátoru v případě ztráty stability pro maximální případ zatížení. Vlevo V2, uprostřed V3, vpravo V4

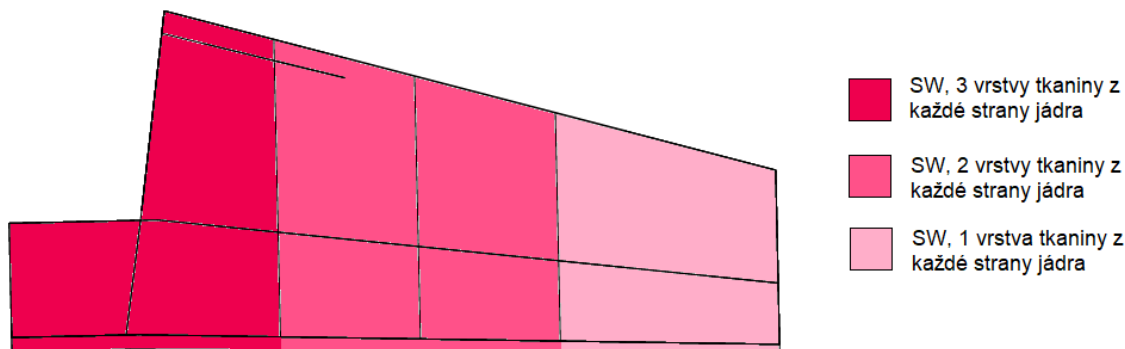
11.5 Materiálová skladba

Do optimalizovaných variant byl materiál volen tak, aby byly splněny pevnostní i stabilitní výpočty a zároveň bylo materiálu přidáno co nejméně. Celková materiálová skladba všech variant je uvedena v příloze F. Zde budou uvedeny pouze informace týkající se tloušťky materiálu nebo počtu vrstev tkaniny.

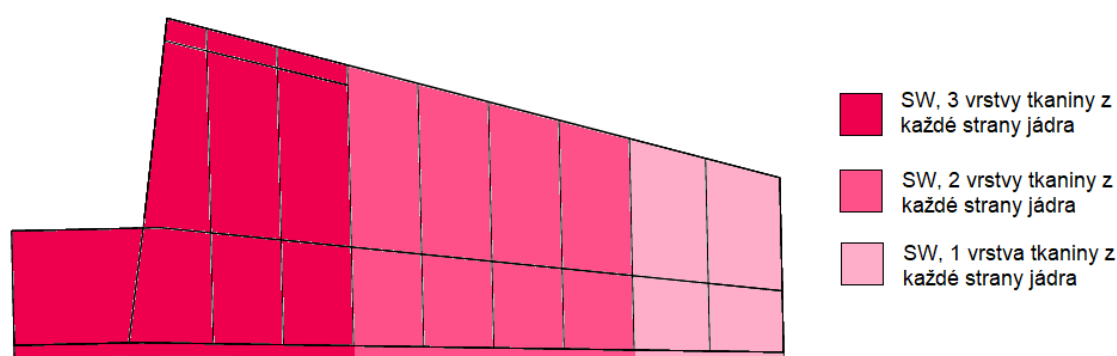
Potah, žebra a stojiny nosníků zůstaly tvořeny sendvičem. Tloušťka jádra zůstala nezměněná. Na obrázcích 56–59 jsou zobrazeny počty vrstev potahu, jak byly navrženy u jednotlivých variant.



Obr. 56: Rozložení materiálu u potahu stabilizátoru varianty V2



Obr. 57: Rozložení materiálu u potahu stabilizátoru varianty V3



Obr. 58: Rozložení materiálu u potahu stabilizátoru varianty V4

Stojina hlavního potahu byla vyztužena po částech kritická v pevnostních výpočtech. Nejčastěji se jednalo o přesazený index ve spojích mezi hranami žebër, stojinou a potahem. Umístění bylo spíše u kořenové části, a proto nosník v koncových dvou až třech řezech zůstal nezměněný. Postupně byl navyšován počet vrstev tkaniny, kdy maximálního počtu bylo potřeba vždy mezi řezy $Z_{\pm 0,340}$ a $Z_{\pm 730}$. Vrstvy tkaniny v jednotlivých řezech na stojině jsou popsány v tabulce 32 níže. Index řezu označuje konečný řez, kde nastala změna materiálu, bráno od kořene stabilizátoru (tedy od Z_0 do $Z_{\pm 0,340}$ je značeno jako $Z_{\pm 0,340}$). Z tabulky jsou odstraněny řezy, ve kterých se nemění skladba.

Tabulka 32: Počet vrstev potahu z každé strany jádra u sendvičové struktury stojiny hlavního nosníku

	Počet vrstev v SW struktuře (z jedné strany jádra) [-]				
	$Z_{\pm 0,340}$	$Z_{\pm 0,730}$	$Z_{\pm 1,110}$	$Z_{\pm 1,490}$	$Z_{\pm 2,085}$
V2	2	5	3	3	1
V3	2	7	3	3	1
V4	3	5	3	2	1

Pásnice hlavního nosníku byly upravovány tak, aby vrstva tkaniny, která byla napojena do pásnice odpovídala vrstvám na stojině. V některých případech tyto vrstvy neodpovídaly. V těchto místech jsou vrstvy tkaniny řešeny jako lokální výztuž stojiny nebo pásnice. Tloušťka pásnic je shrnuta v tabulce 33 níže.

Tabulka 33: Tloušťka pásnic hlavního nosníku po optimalizaci pro všechny varianty

	Tloušťka pásnice [mm]							
	Z±0,180	Z±0,403	Z±0,730	Z±0,920	Z±1,110	Z±1,490	Z±1,680	Z±2,085
V2	6,50	7,50	5,75	4,00	4,00	3,25	1,75	1,00
V3	6,25	7,25	5,75	5,25	5,25	3,25	1,00	1,00
V4	6,00	7,00	5,25	3,50	3,00	1,75	1,00	1,00

Přední i zadní nosník byly v návrhu upravovány velmi málo a pro všechny tři varianty zůstaly neměnné. Tloušťky a počty vrstev tkaniny na pěnovém jádru jsou uvedeny v tabulce 34 níže.

Tabulka 34: Tloušťka pásnic předního a zadního nosníku a počet vrstev tkaniny na stojinách z každé strany jádra

		Počet vrstev v SW struktuře z jedné strany jádra [-]						
		Z±0,426	Z±0,540	Z±0,730	Z±0,920	Z±1,130	Z±1,885	Z±2,085
Stojina	Přední nosník	-	1	1	1	-	-	-
	Zadní nosník	1	1	1	1	3	1	3
		Tloušťka pásnice [mm]						
Pásnice	Přední nosník	-	1,00	1,00	1,00	-	-	-
	Zadní nosník	2,00	2,00	2,00	2,00	2,25	2,00	3,00

Žebra byla vyztužena maximálně jednou vrstvou tkaniny navíc, a to pouze některá. Počet vrstev laminátu z každé strany jádra je uveden v tabulce 35. Žebro 6 bylo materiálovou skladbou rozděleno na dva kusy. Hodnota před lomítkem platí pro část od náběžné hrany k hlavnímu nosníku, za lomítkem platí pro část od hlavního nosníku k pomocnému.

Tabulka 35: Počet vrstev potahu z každé strany jádra u sendvičové struktury žeber

Žebro	Počet vrstev v SW struktuře z jedné strany jádra [-]									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
V2	2	-	-	-	1 / 2	-	-	-	-	2
V3	2	-	2	-	1 / 2	-	1	-	-	2
V4	2	1	1	1	1 / 2	1	1	1	1	2

11.6 Hmotnostní analýza

Pro porovnání hmotnosti jednotlivých variant byl stabilizátor rozdělen do několika celků v závislosti na skladbě materiálu a na příslušnosti k jednotlivým konstrukčním prvkům. Hmotnost byla vypočtena pro jednotlivé celky na základě znalosti hustoty uhlíkového prepregu a pěnového jádra. Veškeré plochy a rozměrové údaje byly odečteny z programu Catia V5. Plošné rozměry byly následně přenásobeny tloušťkou materiálu v dané struktuře

Jednotlivé celky byly rozděleny následovně: Nosníky byly počítány každý zvlášť a byly rozděleny na stojinu a pásnice. Potahy v oblasti žeber byly jeden celek a žebra byla také jeden celek. Posledním celkem byl potah. Potahy v oblasti žeber a potahy byly mezi sebou upravovány dle odpovídající varianty (V2/V3/V4).

V tabulce 36 níže jsou uvedeny vypočtené hmotnosti jednotlivých variant.

Tabulka 36: Vypočtené hmotnosti jednotlivých optimalizovaných variant

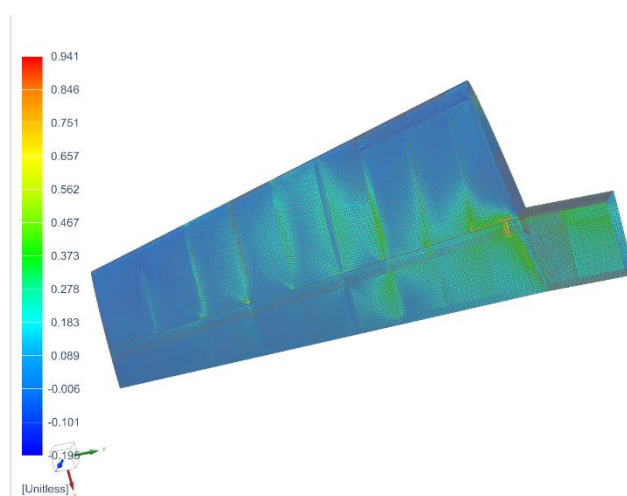
Výpočetní celek			Hmotnost [kg]		
			V2	V3	V4
Nosník	Stojina	Hlavní	1,242	1,396	1,253
		Přední	0,076	0,076	0,076
		Zadní	0,619	0,619	0,619
	Pásnice	Hlavní	2,970	3,000	2,606
		Přední	0,201	0,186	0,201
		Zadní	1,149	1,132	1,165
Potah žebra			0,697	1,064	1,962
Žebra			0,751	1,224	1,890
Potah			9,301	8,229	7,505
Celkem			17,005	16,927	17,277

Z tabulky je vidět, že hmotnostní rozdíly jsou velmi malé, nicméně nejlépe vychází varianta V3.

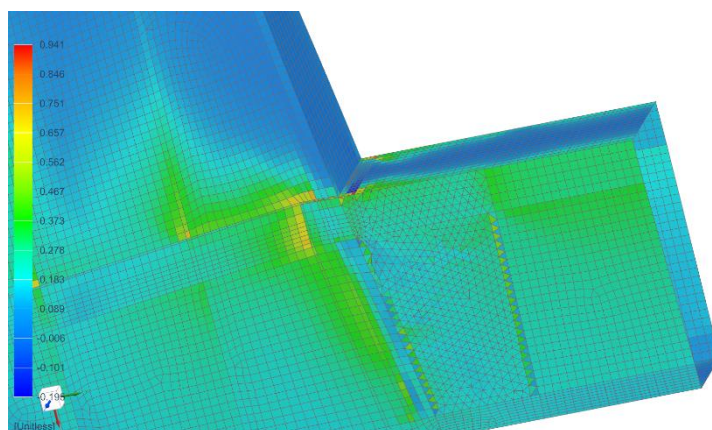
12 Finální zvolená varianta

Přestože v analýze hmotnosti vychází nejlépe varianta V3, se třemi žebry u závěsů na VK a dvěma žebry navíc, byla jako konečná varianta s ohledem k požadavkům z AVA zvolena V2. Varianta V2 má pouze 3 žebra umístěná v místech závěsů a nejlépe splňuje požadavky na minimální počet lepených kusů. Navíc hmotností vychází těžší jen o 78 gramů.

Pro úplnost jsou zde shrnuty výsledky MKP a materiálová skladba této varianty. Na obrázcích 59 a 60 jsou zobrazeny indexy poruchy. Nejvíce kritické místo při minimálním případě zatížení bylo na stojině hlavního nosníku, v místě zavedení náhrady závěsů do trupu. Index zde dosahuje hodnoty 0,941. Dle barev je vidět průběh indexu na zbytku potahu v obrázku 59.

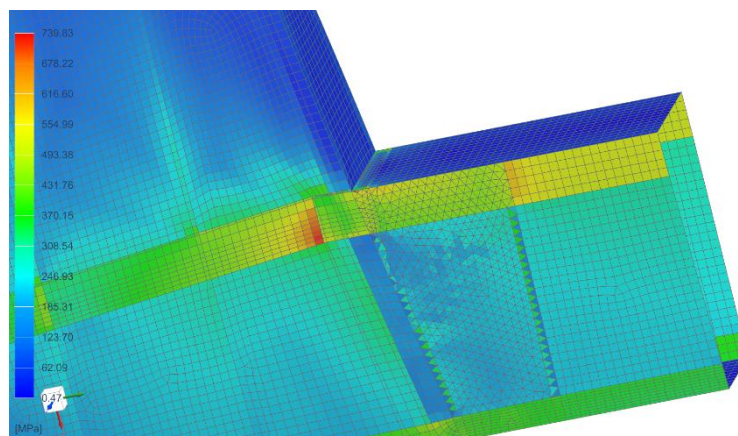


Obr. 59: Index lomu pro zvolenou variantu V2



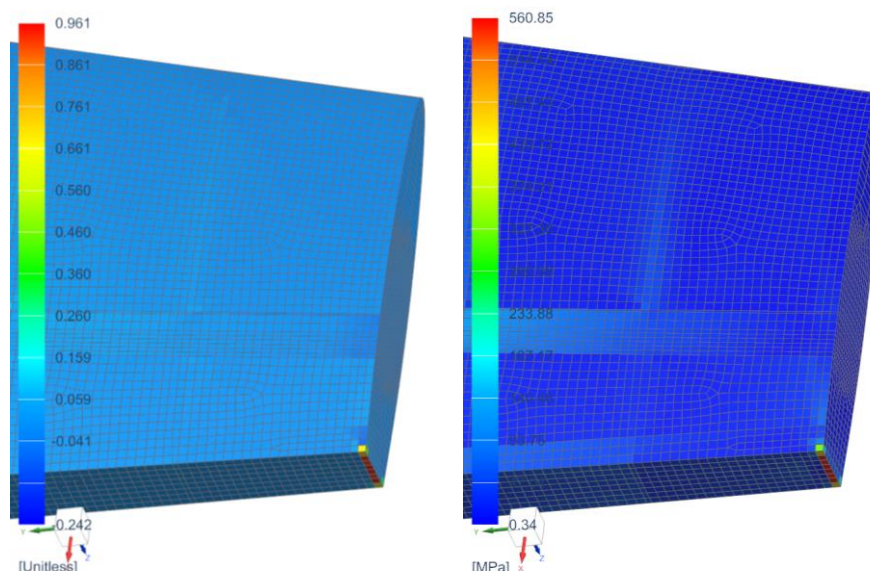
Obr. 60: Index lomu pro zvolenou variantu V2 – detail

Na dalším obrázku (61) je vidět detail absolutního napětí v místě kritického indexu. Nejvyšší napětí je vypočteno na přechodu mezi 7,5 mm tlustou a 5,75 mm tlustou pásnicí a má hodnotu 739,83 MPa. Dle modelu je tloušťka změněna skokově o 1,75 mm. Při konstrukci by bylo třeba dbát na postupné sesazování tloušťky (viz kapitola 7).



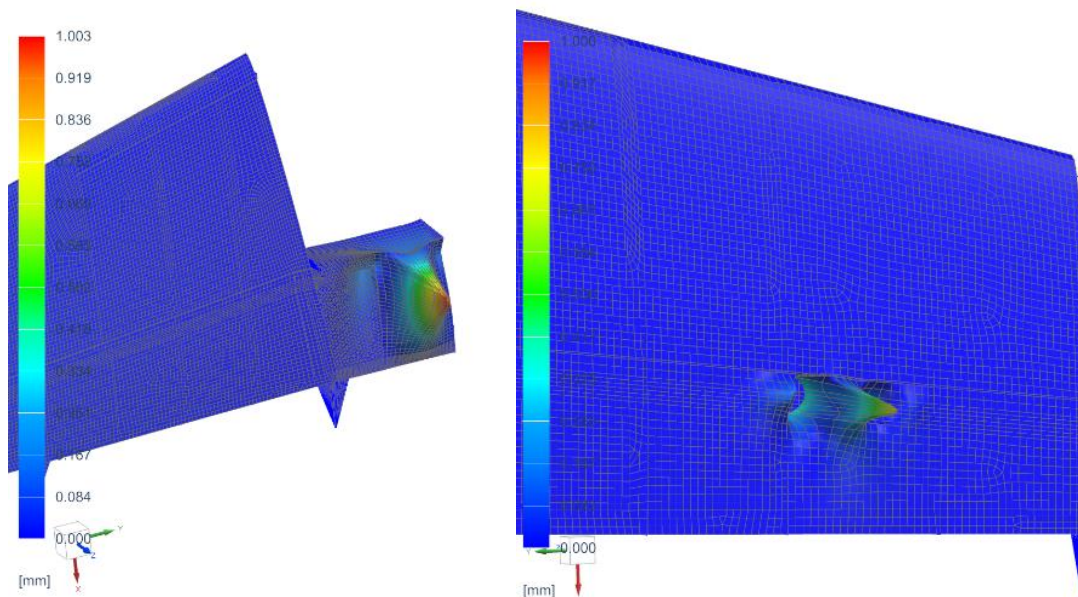
Obr. 61: Maximální absolutní napětí pro zvolenou variantu V2 – detail

V případě maximálního zatížení bylo nejvíce kritické místo na konci polorozpětí, kam byla zavedena do jedné hrany náhrada vnějšího závěsu VK. Na obrázku 62 jsou vidět v detailu index poruchy a maximální absolutní zatížení v tomto místě. Index má v tomto místě hodnotu 0,961 a maximální napětí je 560,85 MPa.



Obr. 62: Maximální index poruchy (vlevo) a maximální absolutní napětí (vpravo) pro maximální případ zatížení – detail

Výpočty pro ztrátu stability vyšly pro minimální i maximální případ zatížení s poměrně velkou rezervou. Při optimalizaci tohoto návrhu byla nejprve splněna podmínka stability, nicméně pevnost byla nedostatečná a musel být přidán materiál, což pozitivně ovlivnilo stabilitu. V minimálním případě zatížení byla rezerva pro ztrátu stability 43 % (1,43) a v maximálním případě 144 % (2,44). Na obrázcích níže jsou vidět místa, kde by došlo k poruše. Z obrázku 63 lze vidět, že pro minimální případ zatížení dojde k poškození v kořenové části potahu. Aby byla stabilita ještě zvýšena, je možné zde přidat další vrstvu tkaniny do sendvičové konstrukce. V maximální případě by byla poškozená pásnice až u konce polorozpětí.



Obr. 63: Ztráta stability pro minimální (vlevo) a maximální (vpravo) případ zatížení

V tabulkách 37–39 níže bude shrnut materiál. Jsou uvedeny pouze tloušťky laminátových potahů, vrstvy tkaniny sendvičových potahu z jedné strany jádra a tloušťka sendvičové struktury. V příloze G jsou uvedeny tabulky s přesnou materiálovou orientací a skladbou. V polích, kde je před (nebo za) hodnotou uveden řez v závorce platí, že daná hodnota platí od (nebo do) daného řezu.

Tabulka 37: Shrnutí tloušťky materiálu nosníků vybrané varianty V2

	Tloušťky pásnic [mm]							
	Z±0,180	Z±0,403	Z±0,730	Z±0,920	Z±1,110	Z±1,490	Z±1,680	Z±2,085
Hlavní nosník	6,50	7,50	5,75	4,00	4,00	3,25	1,75	1,00
Přední nosník	-	(Z±0,403) 1,00	1,00	1,00	-	-	-	
Zadní nosník	2,00	2,00	2,00	2,00	2,25	2,25 (Z±1,300)	2,00	3,00
	Vrstvy tkaniny z jedné strany jádra jednotlivých stojin [-]							
Hlavní nosník	2	2	5	3	3	3	1	1
Přední nosník	-	(Z±0,403) 1	1	1	-	-	-	
Zadní nosník	1	1	1	1	3	3 (Z±1,300)	1	3
	Tloušťka stojiny jednotlivých nosníků [mm]							
Hlavní nosník	11,0	11,0	12,5	11,5	11,5	11,5	10,5	10,5
Přední nosník		(Z±0,403) 10,5	10,5	10,5				
Zadní nosník	10,5	10,5	10,5	10,5	11,5	11,5 (Z±1,300)	10,5	11,5

Tabulka 38: Shrnutí tloušťky materiálu potahu vybrané varianty V2

	Počet vrstev tkaniny z každé strany jádra [-]		
	Z±0,920	Z±1,490	Z±2,085
Potah	3	2	1
	Tloušťka potahu [mm]		
	11,5	11,0	10,5

Žebro 6 mělo dělenou materiálovou skladbu. Hodnota před lomítkem značí část žebra od náběžné hrany k hlavnímu nosníku, hodnota za lomítkem značí část od hlavního nosníku k zadnímu.

Tabulka 39: Shrnutí tloušťky materiálu žeber vybrané varianty V2

Žebra	Počet vrstev v SW struktuře z jedné strany jádra [-]		
		2	6
	2	1 / 2	2
	Tloušťka jednotlivých žeber [mm]		
	11,0	10,5 / 11,0	11,0

13 Závěr

V této diplomové práci byl proveden konstrukční a technologický návrh vodorovného stabilizátoru cvičného letounu L-39NG. Nejprve byla provedena rešerše zaměřená na současný stav konstrukce a dále na materiály a jejich spojování. Dle této rešerše byl navržen technologický postup pro výrobu kompozitních dílů a jejich spojení.

Jako součást návrhu technologie byly navrženy formy pro jednotlivé díly. Formy byly navrženy z uhlíkového kompozitu, který je shodný s materiálem na stabilizátor, tudíž není třeba řešit obtíže spojené s rozdílnou teplotní roztažností a podobně. Formy byly navrženy tak, aby umožnily výrobu průběžných dílů a lepení stabilizátoru přímo v nich.

Konstrukční návrh byl proveden na základě zatížení dodaného od AERO Vodochody AEROSPACE a.s. Výpočty vycházely ze zjednodušeného principu, například byl zanedbán vliv aktuátorů, vliv změny hmotnosti stabilizátoru a další. Z napočítaných ohybových a krouticích momentů bylo vypočteno dimenzování pásnice hlavního nosníku a tloušťka potahu, což byly hodnoty, ze kterých byl určen základní materiálový vstup pro analýzu metodou konečnými prvky v programu NX Nastran. Dle základních výpočtů byl navržen potah sendvičové konstrukce s tloušťkou pěny 10 mm a jednou vrstvou uhlíkové tkaniny z každé strany, což dohromady tvořilo potah o tloušťce 10,5 mm. Pásnice hlavního nosníku byla navržena 6 mm tlustá u kořene s klesající tloušťkou. Na konci polorozpětí byla navržena tloušťka pásnice 1 mm.

Do kontrolní analýzy vstupovaly tři varianty návrhů. Varianta s označením V2, která měla pouze tři žebra, umístěná vhodně pro zavedení závěsů VK, varianta V3, která navíc měla další dvě žebra umístěná tak, aby podélně dělila torní skříně a varianta V4, která počtem žeber téměř odpovídala původní konstrukci.

Analýza metodou konečných prvků byla zpracována na základě ploch modelu. Jistým zjednodušením zde byly závěsy, které byly nahrazeny pouze 1D elementy zavádějícími sílu ze závěsů do konstrukce. Při ověření konstrukčních výpočtů bylo vyvozeno, že původní vstupy do MKP analýzy jsou nedostatečné. Index poruchy materiálu vyšel v nejhorsím místě 6,579, přičemž cílem bylo, aby vyšel pod 1. Toho bylo dosaženo postupně u všech tří variant úpravou materiálové skladby. Pro kompozitní materiály je důležitým faktorem také analýza ztráty stability, která bylo provedena poté, co vyšly pevnostní výpočty.

Varianta, která byla nakonec zvolena byla vybrána na základě počtu hmotnostní analýzy a počtu kusů. Při výpočtech hmotnosti bylo zjištěno, že všechny tři varianty se od sebe liší v řádech desetin kilogramu. Při volbě varianty bylo přihlédnuto i k počtu kusů konstrukce. Zde jednoznačně vycházela nejlépe varianta s nejmenším počtem žeber a byla proto zvolena jako finální návrh.

Pro další pokračování této práce by bylo vhodné zaměřit se převážně na konstrukční část, kde by bylo možné iteračními procesy dojít k podstatně přesnějšimu výsledku. V analýze MKP by bylo možné důkladněji analyzovat chování stabilizátoru a materiálovou skladbu. Například v této práci byl použit pro výpočet lineární model ztráty stability, přesnější by bylo použít nelineární.

Co se týče technologické části, v budoucnu by mohl být návrh doplněn o nýtované spoje, vzhledem k nedostatečným nedestruktivním způsobům ověření lepeného spoje [47].

Citace

- [1] GROHMAN, Jan. Nový český cvičný letoun L-39 Next Generation. In: *Armádní noviny* [online]. 2014, 18. 7. 2014 [cit. 2024-06-08]. Dostupné z: <https://www.armadninoviny.cz/l-39-next-generation.html>
- [2] Přípravení pro vaše mise: L-39NG. In: AERO VODOCHODY AEROSPACE A.S. *Aero.cz* [online]. 2024 [cit. 2024-06-08]. Dostupné z: <https://www.aero.cz/l-39ng/>
- [3] EVROPSKÁ AGENTURA PRO BEZPEČNOST LETECTVÍ. *CERTIFIKAČNÍ SPECIFIKACE PRO LETOUNY KATEGORIE NORMÁLNÍ, CVIČNÁ, AKROBATICKÁ A PRO SBĚRNOU DOPRAVU CS-23*. 3. 2012. In: *caa.cz*. Dostupné z: https://www.caa.cz/wp-content/uploads/2019/07/CS-23_konsolidovane_Amdt_3_CZ.pdf
- [4] PARVEEZ, Bisma et al. Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review. Online. *Polymers*. 2022, roč. 14, č. 22. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/22/5007>. [cit. 2023-12-30].
- [5] ENSWARA PRASAD, N. a WANHILL, R. J. H. (ed.). *Aerospace Materials and Material Technologies*. Online. Springer, 2017. ISBN 978-981-10-2134-3. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-981-10-2134-3.pdf>. [cit. 2023-12-30].
- [6] POGOSYAN, M. et al. Aircraft composite structures integrated approach: a review. Online. In: *Journal of Physics*. 2021. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1925/1/012005/pdf>. [cit. 2023-12-30].
- [7] Recent advances in the development of aerospace materials. Online. *Progress in Aerospace Sciences*. 2018, č. 97, s. 22-34. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0376042117301483>. [cit. 2023-12-30].
- [8] YARI, Mehdi. All Articles Corrosion Corrosive Process Galvanic Corrosion of Metals Connected to Carbon Fiber Reinforced Polymers. In: *Corrosionpedia.com* [online]. 2021, 25. 3. 2021 [cit. 2024-06-08]. Dostupné z: <https://www.corrosionpedia.com/2021/03/25/galvanic-corrosion-of-metals-connected-to-carbon-fiber-reinforced-polymers>
- [9] Mrázová, Mária. (2013). Advanced composite materials of the future in aerospace industry. *INCAS BULLETIN*. 5. 139-150. 10.13111/2066-8201.2013.5.3.14.
- [10] AMERICAN COMPOSITES MANUFACTURERS ASSOCIATION. What are composites? AMERICAN COMPOSITES MANUFACTURERS ASSOCIATION. *Compositeslab.com* [online]. b.r., b.r., 2024 [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://compositeslab.com/composites-101/what-are-composites/index.html>
- [11] HULL, D. a T. W. CLYNE. *An introduction to composite materials*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. ISBN 0-521-38855-4.
- [12] NGO, Tri-Dung. *Composite and Nanocomposite Materials; From Knowledge to Industrial Applications* [online]. London: IntechOpen, 2020 [cit. 2024-05-19]. ISBN 978-1-98985-462-6. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=9kr9DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=P>

- A3&dq=tri+dung+ngo&ots=PSWBo3YShd&sig=1VbH5FQS9PgtFv4GAKYL1vA9qU0&redir_esc=y#v=onepage&q=tri%20dung%20ngo&f=false
- [13] SHARMA, Arun Kumar, Rakesh BHANDARI, Amit AHERWAR a Rūta RIMAŠAUSKIENĖ. Matrix materials used in composites: A comprehensive study. IN: *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319337691>
- [14] HUSSEIN, Suhair G. *Composite materials* [online]. In: . 2019, s. 29 [cit. 2024-06-07]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/330668996_composite_materials
- [15] GARDNER BUSINESS MEDIA INC. *Materials & Processes: Resin matrices for composites. CompositesWorld* [online]. 2016, 25.3.2016, 29.6.2022 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/the-matrix>
- [16] ZHANG, Xuesong, Yongjun CHEN a Junling HU. *Recent advances in the development of aerospace materials* [online]. 2018. Stratford: Elsevier, 2018 [cit. 2024-05-19]. ISSN 0376-0421. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.01.001](https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.01.001)
- [17] FU, Zeyu, Heng LUO, Aimin PANG, Kechao ZHOU a Haitang YANG. *Research progress of ceramic matrix composites for high temperature stealth technology based on multi-scale collaborative design*; [online]. 2018. Elsevier, 2018 [cit. 2024-05-19]. ISSN 2238-7854. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.01.001](https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.01.001)
- [18] PLANSEE COMPOSITE MATERIALS GMBH. *Metal Matrix Composites: Properties, Production, and Applications; matmatch.com* [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://matmatch.com/learn/material/metal-matrix-composites>
- [19] JIANQING, Qi, Tao WEIPING, Wang YONG a Xue GUANWU. *Synthesis and Application of Carbon Matrix Composites, Materials Physics and Chemistry* [online]. In: *researchdate.net*, 2018 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: [doi:10.18282/mpc.v1i1.563](https://doi.org/10.18282/mpc.v1i1.563)
- [20] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery; publi.cz* [online]. Code Creator, 2016 [cit. 2024-05-19]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/02.html>
- [21] SEHGAL, Anuj Kumar, Chandan JUNEJA, Jagjit SINGH a Sachin KALSI. *Comparative analysis and review of materials properties used in aerospace Industries: An overview; Materials Today: Proceedings; sciencedirectassets.com* [online]. 2022 [cit. 2024-05-19]. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478532106416>
- [22] RAJAK, Dipen Kumar, Durgesh D. PAGAR, Ravinder KUMAR a Catalin I. PRUNCU. *Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials; Journal of Materials Research and Technology* [online]. ELSEVIER, 2019 [cit. 2024-05-19]. ISSN 2238-7854. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.068](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.068)
- [23] Kompozitní materiály: Částicové a vláknové kompozity, výroba kompozitů. In: MUNI. *Is.muni.cz* [online]. 2014 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/ped/podzim2014/TE2BP_MTK1/um/11_kompozity.pdf

- [24] HANZLÍK, Jan. *Pevnostní návrh leteckých konstrukcí*. Zlín, 2020. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/48747/hanzl%C3%ADk_2020_dp.pdf?sequence=-1
- [25] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [26] GARDNER BUSINESS MEDIA INC. Materials & Processes: Fiber formats for composites. *Composites World* [online]. 2016, 17.3.2016, 7.3.2023 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/fiber-reinforcement-forms>
- [27] ADDCOMPOSITES. *What are the Terminology, Types, and Formats of Reinforcement Fiber?* *Addcomposites.com* [online]. 2022, 24.7.2022 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.addcomposites.com/post/reinforcement-fibers-terminology-types-and-formats#:~:text=Types%20of%20Fiber%20Reinforcement%201%20Carbon%20Fibers%20Carbon,3%20Natural%20fiber%20...%204%20Aramid%20fibers%20>
- [28] EGBO, Munonyedi Kelvin. *A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering; Journal of King Saud University – Engineering Sciences* [online]. 2021 [cit. 2024-05-19]. ISSN 1018-3639. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.07.007>
- [29] RATWANI, Mohan M. *Composite Materials and Sandwich Structures – A Primer* [online]. In: *dtic.mil* NATO. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA571921.pdf?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTAAR0IOcBKQG4srjuKs1Wzw2kRmKO9POgC3WdKWCqk49tm74gbl0nGgNnpOf8_aem_Ad9Q7ioizylX2-JhCUpHH5dALTnQ7D2kqVPYLJsP2kw0uFXWbEWQjzCIDEOETrUpyECZuaH1k_GOfk0YUTrSBV_
- [30] ADDCOMPOSITES. *Sandwich Structures and Cores* [online]. 2021, 16.11.2021 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.addcomposites.com/post/sandwich-structures-and-cores>
- [31] SIVÁK, Peter; DELYOVÁ, Ingrid a DIABELKOVÁ, Patrícia. Analysis of Sandwich Structures by the FEM. Online. *American Journal of Mechanical Engineering*. Roč. 2017, č. 5, s. 243-246. Dostupné z: <https://pubs.sciepub.com/ajme/5/6/2/index.html#Figure1>. [cit. 2024-06-06].
- [32] ROCK WEST COMPOSITES. Aramid Honeycomb Core. *Rockwestcomposites.com* [online]. [cit. 2024-06-08]. Dostupné z: <https://www.rockwestcomposites.com/aramid-honeycomb-series>
- [33] JAMES, Robin, Tae Hee KIM a Ram M. NARAYANAN. Prognostic investigation of galvanic corrosion precursors in aircraft structures and their detection strategy. In: *ResearchGate* [online]. 2017, s. 29 [cit. 2024-06-07]. Dostupné z: doi:10.1117/12.2259797
- [34] SHAN, Meile, Kang GUO, Guoqing GOU, Zhenghong FU, Bangjian YANG a Wei LU. Effect of anodizing on galvanic corrosion behavior of T300 CFRP/5083P-O Al bolted joints. In: *Wiley Online Library* [online]. 2019, 7. 10. 2019, - [cit. 2024-06-08]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1002/maco.201911235>

- [35] HUDÍKOVÁ, Lucie. *MODERNÍ TRENDY A VÝVOJOVÉ SMĚRY V OBLASTI ANODICKÉ OXIDACE A JEJICH UŽITÍ V LETECKÉM PRŮMYSLU*. Praha, 2021. Bakalářská práce. ČVUT Praha. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/97276/F2-BP-2021-Hudikova-Lucie-Moderni%20trendy%20a%20vyvojove%20smery%20v%20oblasti%20anodicke%20oxidace%20a%20jejich%20uziti%20v%20leteckem%20prumyslu.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [36] AERO VODOCHODY AEROSPACE a.s. Interní dokument.
- [37] EVONIK INDUSTRIES AG. FIRST CHOICE FOR AERONAUTIC AND AEROSPACE APPLICATIONS ROHACELL® WF. <https://performance-foams.evonik.com/> [online]. 2017 [cit. 2024-06-07]. Dostupné z: <https://performance-foams.evonik.com/en/products-and-solutions/rohacell/rohacell-wf-170043.html>
- [38] POLÁK, Ondřej. *Polymerní kompozity s vláknovou a tkaninovou výztuží*. Praha, 2021. Diplomová. ČVUT.
- [39] *Technologie výroby kompozitů*. Online. In: HAVEL COMPOSITES ESHOP. © 2018-2024. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/Technologie%20v%20C3%BDroby%20kompozit%20C5%AF.pdf>. [cit. 2024-06-06].
- [40] *AUTOCAD COD 433R*. Online. © 2023. Dostupné z: <https://www.kralovopolska.cz/cz/reference/reference-tlakove-a-netlakove-nadoby/autoklav-cod-433r>. [cit. 2024-06-06].
- [41] CHATZINAS, Panagiotis; TSIOURVA, Dora; TSOUVALIS, Elias P. a BILALIS, Nicholas G. Comparison of Fiber Content Measuring Methods of Filament Wound CFRPs. Online. In: . June 2021. Dostupné z: https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/352225692_Comparison_of_Fiber_Content_Measuring_Methods_of_Filament_Wound_CFRPs. [cit. 2024-06-06].
- [42] HAGHANI, Reza a YANG, Jincheng. Application of FRP materials for construction of culvert road bridges--manufacturing and life-cycle cost analysis. Online. In: . June 2016. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/335601265_Application_of_FRP_materials_for_construction_of_culvert_road_bridges--manufacturing_and_life-cycle_cost_analysis. [cit. 2024-06-06].
- [43] SMITH, Timothy J. *Curing problems in composite manufacture*. In: ADVANCED MANUFACTURING RESEARCH CENTRE. *Aerosociety.com* [online]. Říjen 2016 [cit. 2024-06-07]. Dostupné z: https://www.aerosociety.com/media/5409/2-curing-problems-in-composite-manufacture.pdf?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMATAAR2E_BIYZxXNdy0TBmKDvjH8DxrOD3YX4wTbA0JWoKgc1XKpV_7tjHqXYbM_aem_AUzpZeWUGktR9PRJLW6RDcQmhZ4N5nX_sNEfX-w280wnSy2Q1Cg-p2a4LC-DjNkvU-Tcbpxfkm5ElybTHi9UepmK
- [44] GAY, Daniel, Suong V. HOA a Stephen W. TSAI. *Composite Materials Design and Applications* [online]. CRC Press, 2002 [cit. 2024-06-08]. ISBN 9780429134968. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1201/9781420031683](https://doi.org/10.1201/9781420031683)

- [45] THOPPUL, Srinivasa D., Joana FINEGAN a Ronald F. GIBSON. Mechanics of mechanically fastened joints in polymer–matrix composite structures – A review. *Composites Science and Technology* [online]. 2009(69), 301-329 [cit. 2024-06-07]. ISSN 0266-3538. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.09.037>
- [46] ANTALA INDUSTRIA S.L. The Essential Guide to Bonding Composites. ANTALA INDUSTRIA S.L. *Antala Specialty Chemicals* [online]. 2020, 26. 05. 2020 [cit. 2024-06-08]. Dostupné z: https://www.antala.uk/bonding-composites-guide/?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTAAAR2avXXvXymYby-m_yh7HuQzsGMax1fZ0qx0SQnfa2bPHazqBPyO4X9JbY0_aem_AbPwkYdHVKwhVtqFN-PGu6UcT5vT0Das-IaSgXgJ59StxUcZ-12y4ngp9nVnW7LwoNxo8u3ArXT8bYC_sfmddO64
- [47] GALIŃSKA, Anna a Cezary GALIŃSKI. Mechanical Joining of Fibre Reinforced Polymer Composites to Metals—A Review. Part II: Riveting, Clinching, Non-Adhesive Form-Locked Joints, Pin and Loop Joining. *Polymers* [online]. 2020, 12(8), <https://doi.org/10.3390/polym12081681> [cit. 2024-06-07]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/8/1681>
- [48] PENG, Augustin. 7 typů nýtů a jejich použití [online]. In: SHENZHEN DEK MANUFACTURING CO., LTD. 2024, 19. 4. 2024 [cit. 2024-06-07]. Dostupné z: <https://www.dekmake.com/cs/7-druh%C5%AF-n%C3%BDt%C5%AF-a-jejich-pou%C5%BEit%C3%AD/>
- [49] RIVKLE® SFC (Smart for Composites) - The blind rivet nut especially for composite materials. In: BÖLLHOFF GROUP. *YouTube* [online]. 2024 [cit. 2024-06-07]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=X2sysHswUgI>
- [50] BÖLLHOFF. RIVKLE® SFC Standard blind rivet nuts for fibre-reinforced polymer plastics [online]. [cit. 2024-06-07]. Dostupné z: <https://eshop.boellhoff.de/en/Riveting-technology/RIVKLE-Blind-rivet-nuts/RIVKLE-SFC/RIVKLE-SFC-Standard-blind-rivet-nuts-for-fibre-reinforced-polymer-plastics.html#:~:text=RIVKLE%C2%AE%20SFC%20Standard%20blind%20rivet%20nuts%20for%20fibre-reinforced,as%20per%20ISO%206H%20%28ISO%2068-1%29%20-%20Corr>
- [51] WÜRTH, SPOL. S R.O. SLEPÝ NÝT, VELKÁ PLOCHÁ HLAVA [online]. [cit. 2024-06-07]. Dostupné z: <https://eshop.wuerth.cz/Kategorie-produktu/Slepy-nyt-vel.-pl.-hl.-hlinik-oc.-A2-st.-pev./31463513010705.cyid/3146.cgid/cs/CZ/CZK/>
- [52] CABRNOCH, Bohuslav. *Výukové materiály k předmětu Letecké a kosmické technologie: Lepení leteckých konstrukcí, 2023/ 2024.*
- [53] BUDGE, Sandip, M.D. BANEJA, Silvio Romero DE BARROS a Lucas F.M. DA SILVA. An updated review of adhesively bonded joints in composite materials. *International Journal of Adhesion and Adhesives* [online]. 2017 (72), 30-42 [cit. 2024-06-08]. ISSN 0143-7496. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.10.010>
- [54] ZANJANI, Jamal Seyyed Monfared a Ismet BARAN. Co-Bonded Hybrid Thermoplastic-Thermoset Composite Interphase: Process-Microstructure-Property Correlation. *National library od medicine* [online]. Basel, 2021, 14(2), 291 [cit. 2024-06-08]. Dostupné z: doi:10.3390/ma14020291

- [55] HALE, Arturo. Chapter 9 - Thermosets. *Composites Science and Technology* [online]. 2002, **2002**(3), 295-354 [cit. 2024-06-07]. ISSN 1573-4374. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S1573-4374\(02\)80012-7](https://doi.org/10.1016/S1573-4374(02)80012-7)
- [56] EVONIK INDUSTRIES AG. *BISMALEIMIDES COMPIMIDE®* <https://performance-foams.evonik.com/> [online]. 2017 [cit. 2024-06-07]. Dostupné z: <https://composites.evonik.com/en/products-services/matrix-systems/thermosets/COMPIMIDE>
- [57] KRATINA, Jakub. Lineární teplotní roztažnost materiálů. *E-konstrukter* [online]. 2014, 7. 4. 2014 [cit. 2024-06-08]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/linearni-teplotni-roztaznost-mateialu>
- [58] Composite Profiles. In: RÖCHLING ENGINEERING PLASTIC SE&CO. KG. *Roehling.com* [online]. 2019 [cit. 2024-06-08]. Dostupné z: https://www.roehling.com/fileadmin/downloads/Roehling_Industrial/Brochures/EN/Durostone/Durostone-Glastic-Composite_Profiles-DE-EN-FR.pdf
- [59] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4.
- [60] HexPly® 8552 Epoxy matrix (180°C/356°F curing matrix). In: HEXCEL CORPORATION. *Hexel.com* [online]. 2023 [cit. 2024-06-08]. Dostupné z: [https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexPly_8552_eu_DataSheet\(1\).pdf](https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexPly_8552_eu_DataSheet(1).pdf)
- [61] LOCTITE® EA 9394 AERO – Dual cartridge 1.0/case. In: HENKEL. *Henkel Adhesive Technologies* [online]. 2024 [cit. 2024-06-08]. Dostupné z: https://www.henkel-adhesives.com/us/en/product/structural-adhesives/loctite_ea_9394_aero.549729.html
- [62] HexBond® Adhesives Selector Guide. In: HEXCEL CORPORATION. *Hexel.com* [online]. 2024 [cit. 2024-06-08]. Dostupné z: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexBondSelectorGuide.pdf
- [63] HERTEL, Heinrich. *Bauelemente, Bemessungen und Konstruktionen von Flugzeugen und anderen Leichtbauwerken*. 2. Berlin, Heidelberg, New York, Springer: Springer Verlag, 1980. ISBN 978-3-642-52843-9.
- [64] SLAVĚTÍNSKÝ, Dušan. *O letadlech: Nosníková křídla* [online]. In: . 2007, 20.8.2007 [cit. 2024-05-19].
- [65] ŠPUNDA, Jaromír. *Pevnostní výpočet a navrhování materiálově úsporných tenkostěnných konstrukcí, 5. část*. Praha: Dům techniky ČVTS, 1973. ISBN Číslo publikace 60/725a/73.
- [66] FUNKE, Herbert. *Systematische Entwicklung von Ultra-Leichtbaukonstruktionen in Faserverbund-Wabensandwichbauweise am Beispiel eines Kleinflugzeuges*. Paderborn, 2001. ISBN 3-00-008670-6. Disertační práce. Universität-Gesamthochschule Paderborn.
- [67] CQUAD4 vs CQUAD8 vs CQUADR. In: SIEMENS. *Siemens community* [online]. 2016, 7. 11. 2016 [cit. 2024-06-09]. Dostupné z: <https://community.sw.siemens.com/s/question/0D54O000061xmgCSAQ/cquad4-vs-cquad8-vs-cquadr>
- [68] BARÁK, Karel. *Podklady pro výuku předmětu Numerické metody v modelování: Kompozity* [online].

Příloha A – Rohacell® WF 110 materiálový list

ROHACELL®

Product Information

ROHACELL® WF/WF-HT

STRUCTURAL FOAM FOR THE MOST DEMANDING MANUFACTURING PROCESS CONDITIONS

ROHACELL® WF foam core has been specifically designed for the use in the aerospace industry. Based on polymethacrylimide (PMI) chemistry, it is engineered to meet demanding requirements from aircraft manufacturers and has led to many specifications for more than 30 years, including MIL-PRF-46194A, WL 5.1460, WL 5.1461 and others.

PROCESSING AND PRODUCTION

ROHACELL® core makes it possible to produce sandwich components in a single process step (co-curing), resulting in reduced overall production time and reduced costs up to 25 % over other sandwich composites solutions.

ROHACELL® WF can take curing temperatures up to 130 °C (266°F) and pressures up to 0.7 MPa (102 psi). After a heat treatment (HT) process, ROHACELL® WF-HT can even be used at curing temperatures of 180 °C (356 °F) and at pressures of 0.7 MPa (102 psi).

ROHACELL® WF / WF-HT is highly suitable with autoclave technologies and vacuum infusion processes, including RTM and VARTM.

WEIGHT SAVINGS

When building composite sandwich components, lightweight ROHACELL® WF / WF-HT has a closed cell structure that ensures the resin stays exactly where you want it – in the interface between the core and face sheet. This eliminates excess and unnecessary resin that adds undesirable weight to the finished part.

Additionally, ROHACELL® WF / WF-HT offers high thermal/mechanical properties in all three dimensions to be considered as isotropic behaviour, resulting in no need for any kind of potting or reinforcement in the area of load introductions and edges.

Overall, ROHACELL® can contribute to reducing the weight of the entire sandwich composite part by up to 20 % in comparison to other composite solutions.

THERMOFORMING AND SHAPING

ROHACELL® WF / WF-HT can be easily thermoformed or CNC machined to meet customer requirements, bringing tremendous manufacturing advantages.

High precision, pre-shaped and ready-to-use foam cores in complex or simple geometries can also be directly supplied by the ROHACELL® Shapes Department.

Evonik Operations GmbH | ROHACELL® WF/WF-HT | January 2024

ROHACELL®

Property	Test Method	Unit	51 WF	71 WF	110 WF	200 WF	300 WF
Density	ISO 845	kg/m ³	52 ± 12	75 ± 15	110 ± 21	205 ± 35	300 ± 60
	ASTM D 1622	lbs/ft ³	3.25	4.68	6.87	12.81	18.7
Compressive Strength	ISO 844	MPa	0.6 (0.4)	1.3 (1.05)	3.1 (2.2)	9.0 (6.4)	17.8 (7.9)
	ASTM D 1621	psi	87 (58)	188 (152)	449 (319)	1305 (928)	2580 (1150)
Tensile Strength	ISO 527-2	MPa	1.6 (0.88)	2.2 (1.56)	3.7 (2.5)	6.8 (5.37)	12.0 (8.1)
	ASTM D 638	psi	232 (128)	319 (227)	536 (369)	986 (780)	1740 (1180)
Elastic Modulus	ISO 527-2	MPa	75 (45)	105 (75)	180 (135)	350 (270)	580 (300)
	ASTM D 638	ksi	10.9 (6.5)	15.2 (10.8)	26.1 (19.5)	50.8 (39.1)	84.1 (43.5)
Shear Strength	DIN 53294	MPa	0.8 (0.5)	1.3 (1.0)	2.2 (1.75)	5.0 (3.6)	8.3 (5.2)
	ASTM C 273	psi	116 (72)	188 (145)	348 (253)	725 (426)	1203 (760)
Shear Modulus	DIN 53294	MPa	20 (14)	34 (24.1)	60 (40)	120 (100)	360 (200)
	ASTM C 273	ksi	2.9 (2.0)	4.9 (3.5)	8.7 (5.8)	17.4 (14.5)	52.2 (19.0)
Strain at Break	ISO 527-2	%	3.0	3.0	2.5	3.0	2.8
	ASTM D 638						
Coefficient of Thermal Expansion		1/K*10E-5	3.1	3.1	3.1	3.8	3.5
Compressive Creep Resistance ± 4 % for Non-HT Material	Temperature	°C	130	130	130	130	130
	Pressure	MPa	0.2	0.3	0.4	0.7	0.7
	Time	h	2	2	4	2	2
Compressive Creep Resistance ± 4 % for HT Material	Temperature	°C	180	180	190	180	180
	Pressure	MPa	0.25	0.5	0.7	0.7	0.7
	Time	h	2	2	4	2	2

Technical data of our products are typical values for nominal density and minimum values in 0.

Disclaimer
ROHACELL® is a registered trademark of Evonik Industries and its subsidiaries.

This information and all technical and other advice are based on Evonik's present knowledge and experience. However, Evonik assumes no liability for such information or advice, including the extent to which such information or advice may relate to third party intellectual property rights. Evonik reserves the right to make any changes to information or advice at any time, without prior or subsequent notice. EVONIK DISCLAIMS ALL REPRESENTATIONS AND WARRANTIES, WHETHER EXPRESS OR IMPLIED, AND SHALL HAVE NO LIABILITY FOR MERCHANTABILITY OF THE PRODUCT OR ITS FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE (EVEN IF EVONIK IS AWARE OF SUCH PURPOSE), OR OTHERWISE. EVONIK SHALL NOT BE RESPONSIBLE FOR CONSEQUENTIAL, INDIRECT OR INCIDENTAL DAMAGES (INCLUDING LOSS OF PROFITS) OF ANY KIND. It is the customer's sole responsibility to arrange for inspection and testing of all products by qualified experts. Reference to trade names used by other companies is neither a recommendation, nor an endorsement of the corresponding product, and does not imply that similar products could not be used.

Evonik Operations GmbH | Smart Materials
High Performance Polymers
Performance Foams
64293 Darmstadt, Germany
Phone +49 6151 18-1005

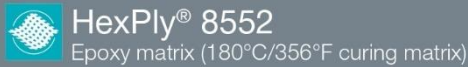
Evonik Corporation
Theodore, Alabama USA
Phone +1 866 764-6235

Evonik Specialty Chemicals (Shanghai) Co., Ltd.
Shanghai, China
Phone +86 21 6119 3788

Evonik Operations GmbH | ROHACELL® WF/WF-HT | January 2024



Příloha B – Výňatek z materiálového listu HexPly® 8552 – strany 1-3, 5 z šesti



Product Data Sheet

Description

HexPly® 8552 is a high performance tough epoxy matrix for use in primary aerospace structures. It exhibits good impact resistance and damage tolerance for a wide range of applications.

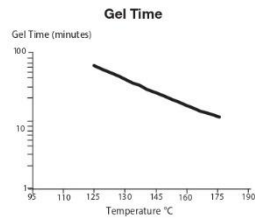
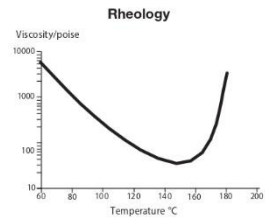
HexPly® 8552 is an amine cured, toughened epoxy resin system supplied with unidirectional or woven carbon or glass fibres.

HexPly® 8552 was developed as a controlled flow system to operate in environments up to 121°C (250°F).

Benefits and Features

- Toughened epoxy matrix with excellent mechanical properties
- Elevated temperature performance
- Good translation of fibre properties
- Controlled matrix flow in processing
- Available on various reinforcements
- Excellent drape and tack

Resin Matrix Properties



Copyright © 2013 – Hexcel Corporation – All Rights Reserved.

1



Product Data Sheet

Prepreg Properties - HexPly® 8552 UD Carbon Prepregs

Physical Properties

	Units	AS4	IM7
Fibre Density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.79 (0.065)	1.77 (0.064)
Filament count/tow		12K	12K
Resin density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.30 (0.047)	1.30 (0.047)
Nominal Cured Ply Thickness 8552 /35%/134	mm (inch)	0.130 (0.0051)	0.131 (0.0052)
Nominal Fibre Volume	%	57.42	57.70
Nominal Laminate Density	g/cm ² (lb/in ²)	1.58 (0.057)	1.57 (0.057)

Mechanical Properties

Test	Units	Temp °C (°F)	Condition	AS4	IM7
0° Tensile Strength	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	1903 (267)	2572 (373)
		25 (77)	Dry	2207 (320)	2724 (395)
		91 (195)	Dry	-	2538 (368)*
90° Tensile Strength	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	-	174 (25.3)
		25 (77)	Dry	81 (11.7)	64 (9.3)
		93 (200)	Dry	75 (10.9)	92 (13.3)*
0° Tensile Modulus	GPa (msi)	-55 (-67)	Dry	134 (19.4)	163 (23.7)
		25 (77)	Dry	141 (20.5)	164 (23.8)
		91 (195)	Dry	-	163 (23.7)*
90° Tensile Modulus	GPa (msi)	-	-	-	-
		25 (77)	Dry	10 (1.39)	12 (1.7)
		93 (200)	Dry	8 (1.22)	10 (1.5)*
0° Compression Strength	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	1586 (230)	-
		25 (77)	Dry	1531 (222)	1690 (245)
		91 (195)	Dry	1296 (184)	1483 (215)
0° Compression Modulus	GPa (msi)	-55 (-67)	Dry	124 (18)	-
		25 (77)	Dry	128 (18.6)	150 (21.7)
		91 (195)	Dry	122 (17.7)	162 (23.5)
0° ILSS (Shortbeam shear)	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	164 (23.8)	-
		25 (77)	Dry	128 (18.5)	137 (19.9)
		91 (195)	Dry	122 (14.7)	94 (13.8)*
		25 (77)	Wet	117 (16.9)	115 (16.7)
		71 (160)	Wet	84 (12.2)	80 (11.6)**
		91 (195)	Wet	78 (11.3)	-
In-plane Shear Strength	MPa (ksi)	25 (77)	Dry	114 (16.6)	120 (17.4)
		93 (200)	Dry	105 (15.2)	106 (15.4)*

Bold 93°C (200°F) Bold* 104°C (220°F) Bold 82°C (180°F)**

Copyright © 2013 – Hexcel Corporation – All Rights Reserved.

2



HexPly® 8552
Epoxy matrix (180°C/356°F curing matrix)



Product Data Sheet

Prepreg Properties - HexPly® 8552 Woven Carbon Prepregs (AS4 Fibre)

Physical Properties

	Units	AGP193-PW	AGP 280-5H
Fibre Type		AS4 3K	AS4 3K
Fibre density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.77 (0.065)	1.77 (0.065)
Weave		Plain	5HS
Mass	g/m ² (oz/yd ²)	193 (5.69)	286 (8.44)
Weight Ratio, Warp : Fill		50 :50	50 :50
Nominal cured ply thickness @ 37% resin content	mm (inch)	0.195 (0.0076)	0.289 (0.0114)
Nominal Fibre Volume	%	55.29	55.29
Nominal Laminate Density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.57 (0.057)	1.57 (0.057)

Mechanical Properties

Test	Units	Temp °C (°F)	Condition	AGP193-PW	AGP280- 5H
0° Tensile Strength	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	766 (111)	828 (120)
			Dry	828 (120)	876 (127)
			Dry	-	903 (131)
90° Tensile Strength	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	710 (103)	752 (109)
			Dry	793 (115)	800 (116)
			Dry	759 (110)	772 (112)
0° Tensile Modulus	GPa (msi)	-55 (-67)	Dry	86 (9.5)	70 (10.2)
			Dry	68 (9.9)	67 (9.7)
			Dry	-	69 (10)
90° Tensile Modulus	GPa (msi)	-55 (-67)	Dry	66 (9.6)	67 (9.7)
			Dry	66 (9.5)	66 (9.5)
			Dry	68 (9.6)	65 (9.4)
0° Compression Strength	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	959 (139)	-
			Dry	883 (128)	924 (134)
			Dry	759 (110)	752 (109)
0° Compression Modulus	GPa (msi)	-55 (-67)	Dry	60 (8.7)	-
			Dry	60 (8.7)	64 (9.3)
			Dry	61 (8.8)	67(9.7)
0° ILSS (Shortbeam shear)	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	101 (14.6)	-
			Dry	84 (12.2)	79 (11.4)
		25 (77)	Dry	70 (10.2)	-
			Wet	75 (10.9)	69 (10)
		25 (77)	Wet	72 (10.4)	-
			Wet	59 (8.5)	-

Bold 93°C (200°F) Bold* 104°C (220°F) Bold 82°C (180°F)**



HexPly® 8552
Epoxy matrix (180°C/356°F curing matrix)



Product Data Sheet

Curing Conditions

Cure cycle for monolithic components

1. Apply full vacuum (1 bar).
2. Apply 7 bar gauge autoclave pressure.
3. Reduce the vacuum to a safety value of 0.2 bar when the autoclave pressure reaches approximately 1 bar gauge.
4. Heat at 1 - 3°C/min (2-5°F/min) to 110°C ± 5°C (230°F ± 9°F)
5. Hold at 110°C ± 5°C (230°F ± 9°F) for 60 minutes ± 5 minutes.
6. Heat at 1-3°C/min (2-5°F/min) to 180°C ± 5°C (356°F ± 9°F)
7. Hold at 180°C ± 5°C (356°F ± 9°F) for 120 minutes ± 5 minutes.
8. Cool at 2 - 5°C (4-9°F) per minute
9. Vent autoclave pressure when the component reaches 60°C (140°F) or below.

Cure cycle for honeycomb sandwich components

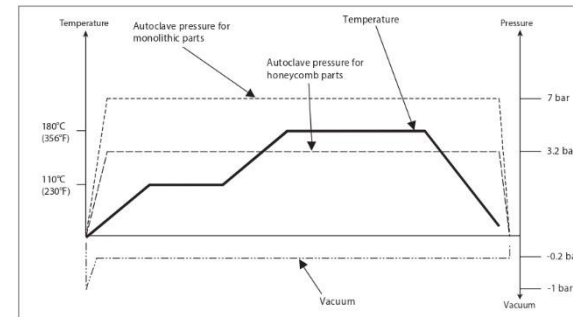
1. Apply full vacuum (1 bar).
2. Apply 3.2 bar gauge autoclave pressure.
3. Reduce the vacuum to a safety value of 0.2 bar when the autoclave pressure reaches approximately 1 bar gauge.
4. Heat at 1 - 3°C/min (2-5°F/min) to 110°C ± 5°C (230°F ± 9°F)
5. Hold at 110°C ± 5°C (230°F ± 9°F) for 60 minutes ± 5 minutes.
6. Heat at 1-3°C/min (2-5°F/min) to 180°C ± 5°C (356°F ± 9°F)
7. Hold at 180°C ± 5°C (356°F ± 9°F) for 120 minutes ± 5 minutes.
8. Cool at 2 - 5°C (4-9°F) per minute
9. Vent autoclave pressure when the component reaches 60°C (140°F) or below.

Note: For both cure cycles - at each stage, use the temperature shown by the leading thermocouple.

Heat-up rates are dependent on component thickness, eg, slow heat-up rates should be used for thicker components and large tools. Accurate temperature measurements of the component should be made during the cure cycles by using thermocouples.

Performance testing should accompany alternative cure cycles to ensure suitability for the particular application.

Curing Cycle for Honeycomb and Monolithic Components



Příloha C – Výňatek z materiálového listu LOCTITE® EA 9394 AERO – strany 1, 3-5 z šesti



Technical Process Bulletin

LOCTITE EA 9394 AERO Epoxy Paste Adhesive (KNOWN AS Hysol EA 9394)

INTRODUCTION

LOCTITE EA 9394 AERO is a two-part structural paste adhesive, which cures at room temperature and possesses excellent strength to 350°F/177°C and higher. Its thixotropic nature and excellent high temperature compressive strength also make it ideal for potting, filling and liquid shim applications. LOCTITE EA 9394 AERO is qualified to MMM-A-132 Rev B, Type I, Class 3, Form 3, Group 1.

The mechanical properties in this data sheet are also valid for LOCTITE EA 9394S AERO. LOCTITE EA 9394S AERO is only available in Semkits and differs from LOCTITE EA 9394 AERO as it has 1 part less thixotrope in the Part B to aid packaging. All other mechanical and handling properties similar.

FEATURES

- Room Temperature Cure
- Good Gap Filling Capabilities
- 350°F/177°C Performance
- Potting Material
- Room Temperature Storage
- Outstanding Mechanical Properties
- Long Pot Life
- Low Toxicity

Uncured Properties

	<u>Part A</u> Gray	<u>Part B</u> Black	<u>Mixed</u> Gray
Color			
Viscosity, 77°F	4000-8000 Poise	200-700 Poise	1600 Poise
Brookfield, HBT	Spdl 7 @ 20 rpm	Spdl 4 @ 20 rpm	Spdl 5 @ 20 rpm
Viscosity, 25°C	400-800 Pa·S	20-70 Pa·S	160 Pa·S
Brookfield, HBT	Spdl 7 @ 2.09 rad/sec	Spdl 4 @ 2.09 rad/sec	Spdl 5 @ 2.09 rad/sec
Density (g/ml)	1.50	1.00	1.36
Shelf Life			
@ <77°F/25°C	1 year	1 year	

This material will normally be shipped at ambient conditions, which will not alter our standard warranty, provided that the material is placed into its intended storage upon receipt. Premium shipment is available upon request.



1 of 6



Technical Process Bulletin

LOCTITE EA 9394 AERO Epoxy Paste Adhesive (KNOWN AS Hysol EA 9394)

- Do not allow the adhesive to sit in the static mixer unattended for more than 90 minutes.
 - The material is curing within the static mixer and when pressure is re-applied back onto the plungers, back pressure will occur and potentially result in cartridge failure.

Failure to follow the recommended procedures stated in this TDS will void the Warranty of the Adhesive.

Note: Special precautions are recommended to minimize carbonate formation in large assemblies subject to extended open times in humid environments. A special memo is available upon request from Henkel providing users with suggestions for minimizing carbonate formation.

Curing - LOCTITE EA 9394 AERO may be cured for 3 to 5 days @ 77°F/25°C to achieve normal performance. Accelerated cures up to 200°F/93°C (for small masses only) may be used as an alternative. For example, 1 hour @ 150°F/66°C will give complete cure.

Cleanup - It is important to remove excess adhesive from the work area and application equipment before it hardens. Denatured alcohol and many common industrial solvents are suitable for removing uncured adhesive. Consult your supplier's information pertaining to the safe and proper use of solvents.

Bond Strength Performance

Tensile Lap Shear Strength - tested per ASTM D1002 after curing for 5 days @ 77°F/25°C. Adherends are 2024-T3 bare aluminum treated with phosphoric acid anodized per ASTM D3933.

Test Temperature, °F/°C	Typical Results	
	psi	MPa
-67/-55	3,300	22.7
77/25	4,200	28.9
180/82	3,000	20.7
200/93	2,900	20.0
250/121	2,300	15.8
300/149	1,600	11.0
350/177	1,200	8.3
400/204	600	4.1



3 of 6



Technical Process Bulletin

LOCTITE EA 9394 AERO Epoxy Paste Adhesive (KNOWN AS Hysol EA 9394)

After Exposure to/Test Temperature	Typical Results	
	psi	MPa
Room Temperature Control (no exposure)	4,300	29.6
77°F/25°C Water - 7 days @77°F/25°C	4,100	28.2
Isopropyl Alcohol - 7 days @77°F/25°C	4,000	27.6
Hydraulic Oil - 7 days @77°F/25°C	4,100	28.2
JP-4 Fuel - 7 days @ 77°F/25°C	4,200	28.9

Peel Strength

T-Peel strength tested per ASTM D1876 after curing for 5 days @ 77°F/25°C. Adherends are 2024-T3 AlClad aluminum treated with phosphoric acid anodized per ASTM D3933.

Test Temperature, °F/°C	Typical Results	
	Lb/in	N/2 mm
77/25	5	22

Bell Peel strength tested per ASTM D3167 after curing for 7 days @ 77°F/25°C. Adherends are 2024-T3 AlClad aluminum treated with phosphoric acid anodized per ASTM D3933.

Test Temperature, °F/°C	Typical Results	
	Lb/in	N/25mm
77/25	20	89

Service Temperature

Service temperature is defined as that temperature at which this adhesive still retains 1000 psi(6.9 MPa) using test method ASTM D1002 and is 350°F/177°C.

Bulk Resin Properties

Tensile Properties - tested using 0.125 inch/ 3.18 mm castings per ASTM D638.

Tensile Strength @ 77°F/25°C	6,675 psi	46.0 MPa
Tensile Modulus @ 77°F/25°C	615 ksi	4,237 MPa
Shear Modulus, dry @ 77°F/25°C	212 ksi	1,461 MPa
Shear Modulus, wet @ 77°F/25°C	149 ksi	1,027 MPa
Elongation at Break @77°F/25°C	1.66%	
Shore D Hardness, @ 77°F/25°C	88	
Tg dry	172°F	78°C
Tg wet	154°F	68°C



4 of 6



Technical Process Bulletin

LOCTITE EA 9394 AERO Epoxy Paste Adhesive (KNOWN AS Hysol EA 9394)

Compressive Properties - tested with rectangular specimens 0.5 in/12.7 mm width by 1.0 in/25.4 mm length by 0.5 in/12.7 mm height per ASTM D695.

Compressive Strength, °F/°C	psi	MPa
	77/25	10,000

Electrical Properties - tested per ASTM D149, D150.

	0.1 KHz	1.0 KHz	10.0 KHz
	Dielectric Constant	7.72	7.51
Dissipation Factor	.017	.022	.033
Thermal Conductivity	7.92 x 10 ⁻⁴ cal/sec-cm ⁻² C		[0.331 W/(m·K)]
Volume Resistivity	4.05 x 10 ¹³ ohm-cm		[4.05 x 10 ¹¹ ohm]
Surface Resistivity	4.60 x 10 ¹³ ohm		
Coefficient of Thermal Expansion	55.6µm/m°C @ 40°C		
	80.6µm/m°C @ 100°C		

Handling Precautions

Do not handle or use until the Material Safety Data Sheet has been read and understood.
For industrial use only.

DISPOSAL INFORMATION

Dispose of spent remover and paint residue per local, state and regional regulations. Refer to HENKEL TECHNOLOGIES MATERIAL SAFETY DATA SHEET for additional disposal information.

PRECAUTIONARY INFORMATION

General:

As with most epoxy based systems, use this product with adequate ventilation. Do not get in eyes or on skin. Avoid breathing the vapors. Wash thoroughly with soap and water after handling. Empty containers retain product residue and vapors so obey all precautions when handling empty containers.



5 of 6

Příloha D – Výňatek z materiálového listu HexBond® EA 9686 STRUCTIL – strany 1, 2 ze tří



Product Data Sheet

Description

HexBond™ EA9686 is a 120°C/250°F cure film adhesive designed for metal, composite and honeycomb bonding applications. Its formulation based on epoxy resin provides a structural resistance over a large temperature range with a good toughness.

Features

- Good peel strength
- Cure from 110°C/230°F to 135°C/275°F (the adhesive can withstand cure up to 177°C/350°F)
- Storage life: 1 year at or below -18°C/0°F + 4 weeks at room temperature (≤ 23°C/73°F)
- Low volatile content (< 1%)

Applications

- Metal-to-metal bonding
- Sandwich construction
- Composite-to-composite bonding

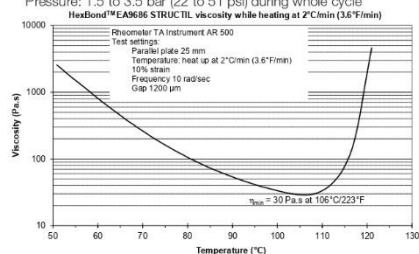
Form

	Areal Weight (psf // g/m ²)	Color	Support	Roll Width (mm)
EA9686.03 NW	0.03 / 146	Pink	Nylon non-woven (17g/m ²)	915
EA9686.06 K	0.06 / 292	Pink	Polyester knit (13 g/m ²)	915
EA9686.09 K	0.09 / 438	Pink	Polyester knit (13 g/m ²)	915

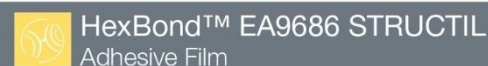
Instructions For Use

Refer to the Safety Data Sheet before handling.

- To avoid any moisture, allow the adhesive to warm at room temperature before opening the waterproof polyethylene bag
- Bonding surfaces should be clean, dry and properly prepared
- Remove protective liners before bonding (release paper and polyethylene film)
- Typical cure cycles: 5h at 110°C/230°F, 2h at 121°C/250°F, 1.5h at 135°C/275°F
Heat up rate: 0.5°C to 5.5°C/min (1°F to 10°F/min)
Pressure: 1.5 to 3.5 bar (22 to 51 psi) during whole cycle



Copyright © 2019 - Hexcel Corporation - All Rights Reserved.



Product Data Sheet

Bond Strength Performance After Cure

Test	Test Temperature (°C/°F)	EA9686.03 NW	EA9686.06 K	EA9686.09 K
Lap shear strength ⁽¹⁾ (MPa / psi)	23 / 73	35 / 5067	39 / 5656	42 / 6091
	100 / 212	26 / 3770	28 / 4061	30 / 4351
	120 / 248	22 / 3190	23 / 3335	25 / 3626
	100 / 212 after WA ⁽²⁾		14 / 2030	
Floating roller peel ⁽²⁾ (N/25 mm // lb/in)	23 / 73	200 / 45	208 / 47	205 / 46
	100 / 212	205 / 46	210 / 47	212 / 47

Glass Transition Temperature

Cure Cycle	State	Tg Onset (°C/°F)
5h at 110°C / 230°F	As received	129 / 264
	Wet ⁽³⁾	89 / 192
1.5h at 135°C / 275°F	As received	125 / 257
	Wet ⁽³⁾	89 / 192

⁽¹⁾ According to EN 2243-1, on aluminum 2024T3 clad treated with sulfo-chromic acid etch, cure 2h at 120°C/248°F (2°C/min)
⁽²⁾ According to ISO 04_26_300B, on aluminum 2024T3 clad treated with sulfo-chromic acid etch, cure 2h at 120°C/248°F (2°C/min)
⁽³⁾ Wet ageing: 70°C/158°F, 85% relative humidity, saturation

This information is provided for informal purposes only, without legal responsibility and does not constitute a specification. Users are expected to perform adequate verification and testing to ensure that materials meet required specification.

For more information

Hexcel is a leading worldwide supplier of composite materials to aerospace and industrial markets. Our comprehensive range includes:

- HexTow® carbon fibers
- HexForce® reinforcements
- HiMax™ multiaxial reinforcements
- HexPly® prepregs
- HexAM™ additive manufacturing
- HexMC® molding compounds
- HexFlow® RTM resins
- HexTool® tooling materials
- HexWeb® honeycombs
- Engineered core
- Acousti-Cap® sound attenuating honeycomb
- Engineered products
- Polyspeed™ laminates

For US quotes, orders and product information call toll-free 1-800-688-7734. For other worldwide sales office telephone numbers and a full address list, please go to:

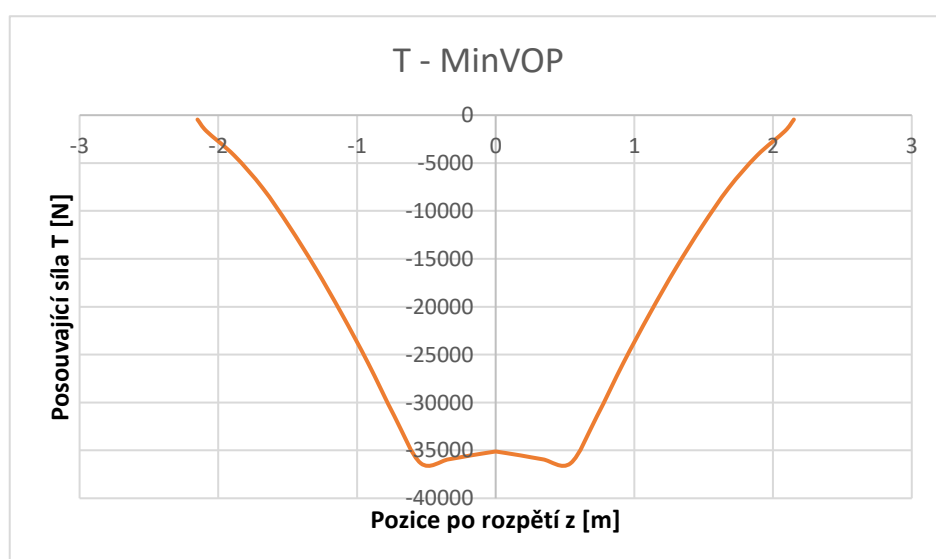
<http://www.hexcel.com/contact/salesoffice>

©2019 Hexcel Corporation - All rights reserved. Hexcel Corporation and its subsidiaries ("Hexcel") believe that the technical data and other information provided herein was materially accurate as of the date this document was issued. Hexcel reserves the right to update, revise or modify such technical data and information at any time. Any performance values provided are considered representative but do not and should not constitute a substitute for your own testing of the suitability of our products for your particular purpose. Hexcel makes no warranty or representation, express or implied, including but not limited to the implied warranties of merchantability and fitness for a particular purpose, and disclaims any liability arising out of or related to, the use of or reliance upon any of the technical data or information contained in this document.

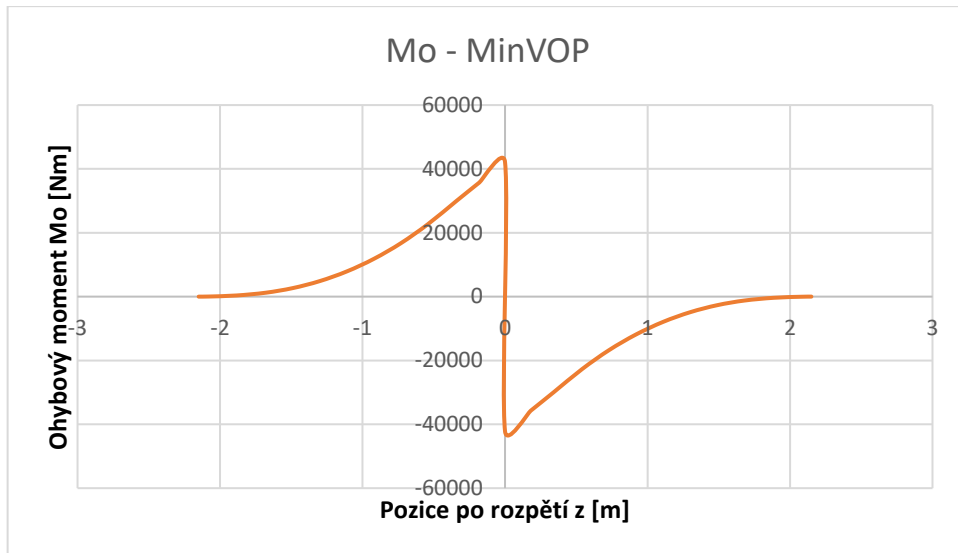
Příloha E – Přílohy ke kapitole 8. Zatížení

Tabulka 40: Výpočet symetrického zatížení pro případy minimálního a maximálního zatížení

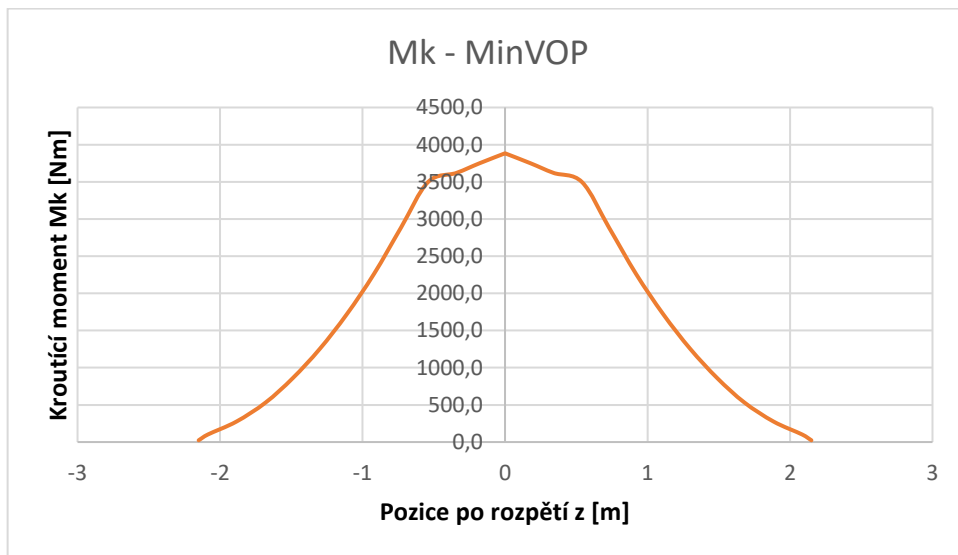
z	MinVOP				MaxVOP			
	DFy	T	M _o	M _k 25%	DFy	T	M _o	M _k 25%
[m]	[N]	[N]	[Nm]	[Nm]	[N]	[N]	[Nm]	[Nm]
-2,150	-453	-453	0	23,3	180	180	0	36,3
-2,085	-1217	-1670	29	101,8	596	775	-12	165,6
-1,885	-2535	-4205	363	275,2	705	1480	-167	336,6
-1,680	-3400	-7605	1225	531,6	828	2308	-470	559,1
-1,490	-3966	-11571	2670	858,7	874	3183	-909	816,0
-1,300	-4381	-15953	4869	1253,0	855	4038	-1513	1090,5
-1,110	-4796	-20749	7900	1720,2	787	4825	-2281	1366,9
-0,920	-5136	-25884	11842	2260,0	654	5479	-3197	1620,9
-0,730	-5551	-31435	16760	2884,2	422	5901	-4238	1812,5
-0,540	-4910	-36345	22733	3497,4	60	5961	-5360	1883,3
-0,340	410	-35934	30002	3620,6	-566	5395	-6552	1713,5
-0,180	410	-35524	35751	3749,2	-566	4829	-7415	1536,2
0,000	410	-35113	42146	3883,8	-566	4263	-8284	1350,5
0,000	410	-35113	-42146	3883,8	-566	4263	8284	1350,5
0,180	410	-35524	-35751	3749,2	-566	4829	7415	1536,2
0,340	410	-35934	-30002	3620,6	-566	5395	6552	1713,5
0,540	-4910	-36345	-22733	3497,4	60	5961	5360	1883,3
0,730	-5551	-31435	-16760	2884,2	422	5901	4238	1812,5
0,920	-5136	-25884	-11842	2260,0	654	5479	3197	1620,9
1,110	-4796	-20749	-7900	1720,2	787	4825	2281	1366,9
1,300	-4381	-15953	-4869	1253,0	855	4038	1513	1090,5
1,490	-3966	-11571	-2670	858,7	874	3183	909	816,0
1,680	-3400	-7605	-1225	531,6	828	2308	470	559,1
1,885	-2535	-4205	-363	275,2	705	1480	167	336,6
2,085	-1217	-1670	-29	101,8	596	775	12	165,6
2,150	-453	-453	0	23,3	180	180	0	36,3



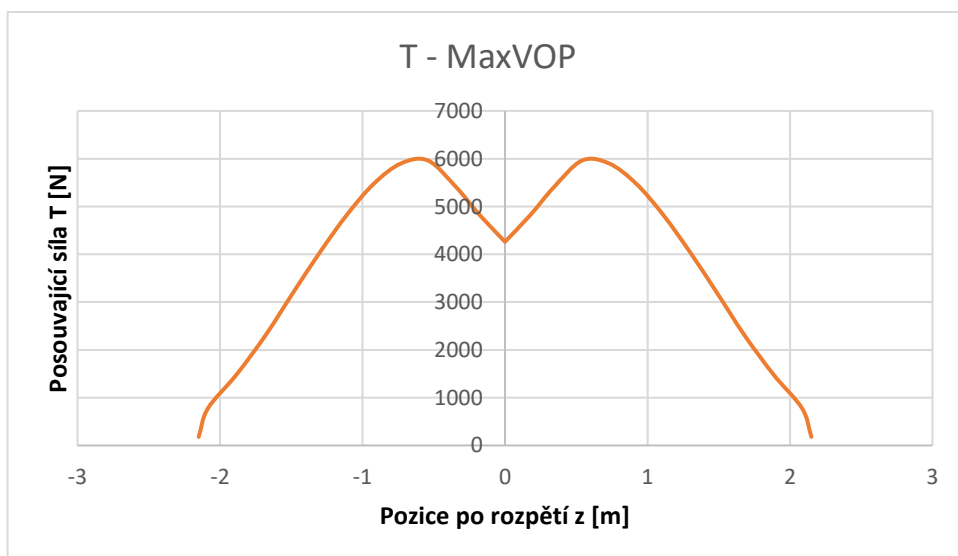
Obr. 64: Graf posouvající síly pro minimální symetrické zatížení



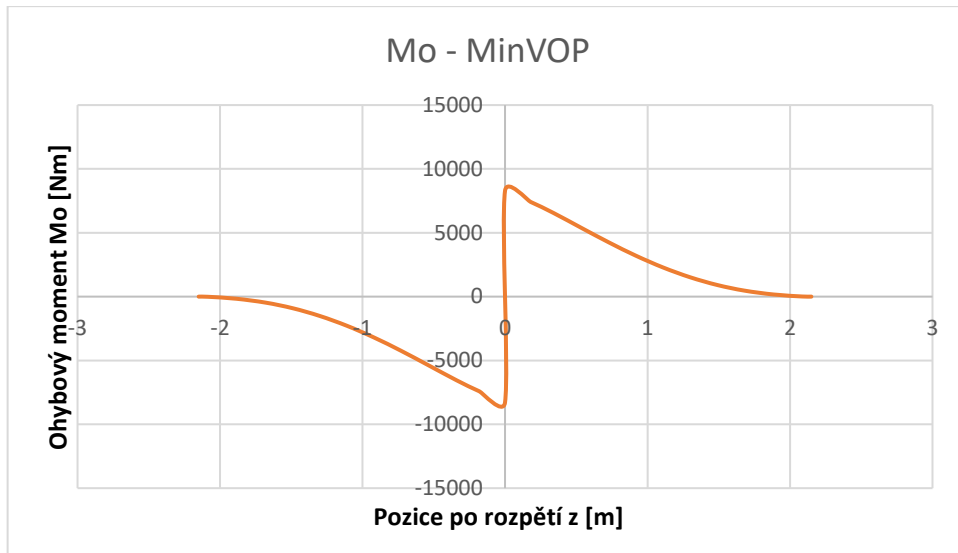
Obr. 65: Graf ohybového momentu pro minimální symetrické zatížení



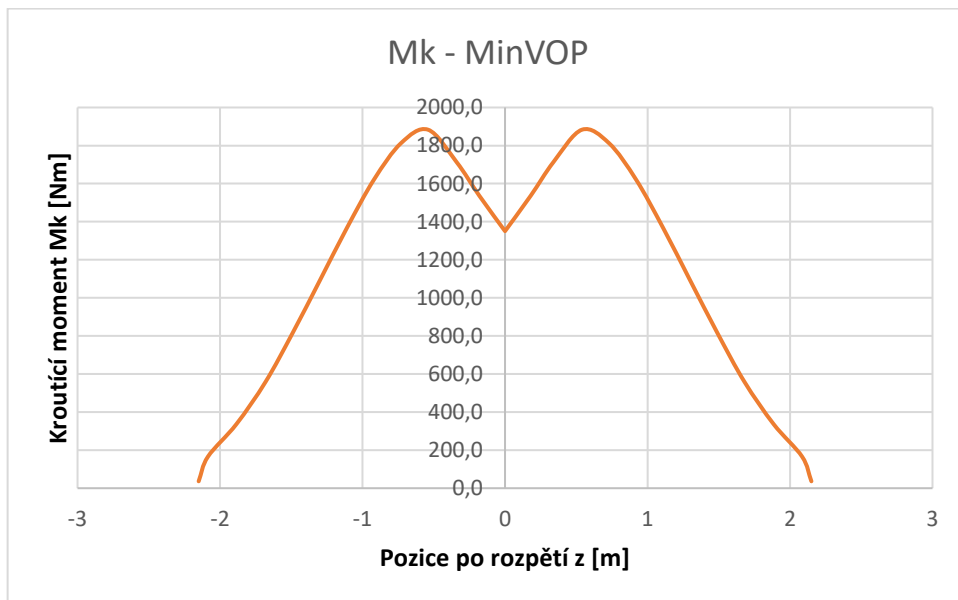
Obr. 66: Graf kroutícího momentu pro minimální symetrické zatížení



Obr. 67: Graf posouvající síly pro maximální symetrické zatížení



Obr. 68: Graf ohybového momentu pro maximální symetrické zatížení



Obr. 69: Graf kroutícího momentu pro maximální symetrické zatížení

Příloha F – Přílohy ke kapitole 9.2 Dimenzování potahu

Tabulka 41: Vypočtená hmotnost potahu varianty V2

plocha	Prepreg			Jádro			Jádro 10 mm		
	tloušťka	objem	hmotnost	tloušťka	objem	hmotnost	tloušťka	objem	hmotnost
[m ²]	[mm]	[m ³ ·10 ⁻³]	[kg]	[mm]	[m ³ ·10 ⁻³]	[kg]	[mm]	[m ³ ·10 ⁻³]	[kg]
0,202	0,500	0,101	0,287	2,5	0,403	0,044	10	2,015	0,222
0,212	0,500	0,106	0,302	3,5	0,636	0,070	10	2,120	0,233
0,238	0,500	0,119	0,339	3,5	0,714	0,079	10	2,380	0,262
0,242	0,500	0,121	0,345	4,5	0,968	0,106	10	2,420	0,266
0,260	0,500	0,130	0,371	5,5	1,300	0,143	10	2,600	0,286
0,278	0,500	0,139	0,396	5,5	1,390	0,153	10	2,780	0,306
0,298	0,500	0,149	0,425	8,5	2,384	0,262	10	2,980	0,328
0,316	0,500	0,158	0,450	8,5	2,528	0,278	10	3,160	0,348
0,336	0,500	0,168	0,479	10,5	3,360	0,370	10,5	3,528	0,388
0,210	0,500	0,105	0,299	11,5	2,310	0,254	11,5	2,415	0,266
0,036	0,500	0,018	0,051	16,5	0,576	0,063	16,5	0,594	0,065
celkem pro polovinu polorozpětí			3,744						
celkem celé polorozpětí			7,489						
součet pro vypočtenou tloušťku pěny						11,134			

Tabulka 42: Vypočtená hmotnost potahu varianty V3

plocha	Prepreg			Jádro			Jádro 10 mm		
	tloušťka	objem	hmotnost	tloušťka	objem	hmotnost	tloušťka	objem	hmotnost
[m ²]	[mm]	[m ³ ·10 ⁻³]	[kg]	[mm]	[m ³ ·10 ⁻³]	[kg]	[mm]	[m ³ ·10 ⁻³]	[kg]
0,202	0,500	0,101	0,287	2,5	0,403	0,044	10	2,015	0,222
0,212	0,500	0,106	0,302	3,5	0,636	0,070	10	2,120	0,233
0,238	0,500	0,119	0,339	3,5	0,714	0,079	10	2,380	0,262
0,242	0,500	0,121	0,345	4,5	0,968	0,106	10	2,420	0,266
0,260	0,500	0,130	0,371	5,5	1,300	0,143	10	2,600	0,286
0,278	0,500	0,139	0,396	5,5	1,390	0,153	10	2,780	0,306
0,298	0,500	0,149	0,425	6,5	1,788	0,197	10	2,980	0,328
0,316	0,500	0,158	0,450	6,5	1,896	0,209	10	3,160	0,348
0,336	0,500	0,168	0,479	6,5	2,016	0,222	10	3,360	0,370
0,210	0,500	0,105	0,299	7,5	1,470	0,162	10	2,100	0,231
0,036	0,500	0,018	0,051	9,5	0,324	0,036	10	0,360	0,040
celkem pro polovinu polorozpětí			3,744						
celkem celé polorozpětí			7,489						
součet pro vypočtenou tloušťku pěny						10,328			

Tabulka 43: Vypočtená hmotnost potahu varianty V3

plocha	Prepreg			Jádro			Jádro 10 mm		
	tloušťka	objem	hmotnost	tloušťka	objem	hmotnost	tloušťka	objem	hmotnost
[m ²]	[mm]	[m ³] \cdot 10 ⁻³	[kg]	[mm]	[m ³] \cdot 10 ⁻³	[kg]	[mm]	[m ³] \cdot 10 ⁻³	[kg]
0,202	0,500	0,101	0,287	1,5	0,202	0,022	10	2,015	0,222
0,212	0,500	0,106	0,302	2,5	0,424	0,047	10	2,120	0,233
0,238	0,500	0,119	0,339	2,5	0,476	0,052	10	2,380	0,262
0,242	0,500	0,121	0,345	3,5	0,726	0,080	10	2,420	0,266
0,260	0,500	0,130	0,371	3,5	0,780	0,086	10	2,600	0,286
0,278	0,500	0,139	0,396	3,5	0,834	0,092	10	2,780	0,306
0,298	0,500	0,149	0,425	5,5	1,490	0,164	10	2,980	0,328
0,316	0,500	0,158	0,450	4,5	1,264	0,139	10	3,160	0,348
0,336	0,500	0,168	0,479	4,5	1,344	0,148	10	3,360	0,370
0,210	0,500	0,105	0,299	4,5	0,840	0,092	10	2,100	0,231
0,036	0,500	0,018	0,051	6,5	0,216	0,024	10	0,360	0,040
celkem pro polovinu polorozpětí			3,744			0,946			2,890
celkem celé polorozpětí			7,489			1,891			5,781
součet pro vypočtenou tloušťku pěny						9,380			13,269

Tabulka 44: Výpočet tloušťky potahu pro variantu VI

M _{kmin}	M _{kmax}	U	z	Q _{min}	Q _{max}	t	τ _{min}	τ _{max}	Přední torzní skříň			Zadní torzní skříň			τ _{k přední}	τ _{k zadní}	min		max		nejmenší poměr τ _k / τ
									b	b/a	k	b	b/a	k			přední	zadní	přední	zadní	
									[m]	[-]	[-]	[m]	[-]	[-]			τ _k /τ	τ _k /τ	τ _k /τ	τ _k /τ	
Nm	Nm	mm ²	[m]	[Nm]	[Nm]	[mm]	[Nmm ⁻²]	[Nmm ⁻²]	[m]	[-]	[-]	[m]	[-]	[-]	[Nmm ⁻²]	[Nmm ⁻²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
51	27	28941	-2,150	882	464	1,50	0,59	0,31	0,296	0,168	5,057	0,160	0,091	4,909	21,40	70,85	36,38	120,43	69,26	229,28	36,38
242	644	31000	-2,085	3903	10382	1,75	2,23	5,93	0,306	0,173	5,027	0,166	0,094	4,919	27,06	89,92	12,13	40,32	4,56	15,16	4,56
631	1347	38000	-1,885	8304	17726	2,25	3,69	7,88	0,338	0,192	5,089	0,184	0,104	4,940	37,12	122,39	10,06	33,16	4,71	15,54	4,71
1190	2146	46000	-1,680	12932	23330	2,25	5,75	10,37	0,371	0,210	5,136	0,201	0,114	4,961	31,13	102,16	5,42	17,77	3,00	9,85	3,00
1890	3025	53000	-1,490	17835	28536	2,50	7,13	11,41	0,402	0,227	5,167	0,218	0,123	4,982	33,04	108,22	4,63	15,17	2,89	9,48	2,89
2723	3970	62000	-1,300	21959	32019	2,50	8,78	12,81	0,432	0,244	5,199	0,234	0,133	4,993	28,73	93,74	3,27	10,67	2,24	7,32	2,24
4057	9206	71000	-1,110	28567	64831	3,25	8,79	19,95	0,462	0,262	5,236	0,251	0,142	5,014	42,68	138,86	4,86	15,80	2,14	6,96	2,14
5553	14756	80000	-0,920	34708	92223	3,25	10,68	28,38	0,493	0,279	5,258	0,267	0,151	5,025	37,73	122,54	3,53	11,47	1,33	4,32	1,33
7237	20590	91000	-0,730	39766	113132	3,75	10,60	30,17	0,523	0,296	5,289	0,284	0,161	5,041	44,83	145,20	4,23	13,69	1,49	4,81	1,49
8898	26666	101000	-0,540	44048	132012	4,00	11,01	33,00	0,554	0,313	5,326	0,300	0,170	5,062	45,88	148,18	4,17	13,46	1,39	4,49	1,39
9789	31483	60965	-0,383	80283	258205	5,00	16,06	51,64	0,562	0,318	5,326	0,310	0,175	5,072	69,53	217,69	4,33	13,56	1,35	4,22	1,35
11277	21535	60965	0,383	92491	176619	5,00	18,50	35,32	0,562	0,318	5,057	0,310	0,175	5,072	66,02	217,69	3,57	11,77	1,87	6,16	1,87
10285	18227	101000	0,540	50913	90232	4,00	12,73	22,56	0,554	0,313	5,027	0,300	0,170	5,062	43,30	148,18	3,40	11,64	1,92	6,57	1,92
8395	14082	91000	0,730	46128	77373	3,75	12,30	20,63	0,523	0,296	5,089	0,284	0,161	5,041	43,14	145,20	3,51	11,80	2,09	7,04	2,09
6469	10097	80000	0,920	40429	63105	3,25	12,44	19,42	0,493	0,279	5,136	0,267	0,151	5,025	36,86	122,54	2,96	9,85	1,90	6,31	1,90
4762	6302	71000	1,110	33535	44383	3,25	28,46	13,66	0,462	0,262	5,167	0,251	0,142	5,014	42,12	138,86	1,48	4,88	3,08	10,17	1,48
3246	2720	62000	1,300	26176	21935	2,50	20,37	8,77	0,432	0,244	5,199	0,234	0,133	4,993	28,73	93,74	1,41	4,60	3,27	10,68	1,41
2250	2075	53000	1,490	21229	19572	2,50	18,45	7,83	0,402	0,227	5,236	0,218	0,123	4,982	33,48	108,22	1,81	5,87	4,28	13,82	1,81
1413	1474	46000	1,680	15358	16018	2,25	17,97	7,12	0,371	0,210	5,258	0,201	0,114	4,961	31,87	102,16	1,77	5,69	4,48	14,35	1,77
747	926	38000	1,885	9823	12183	2,25	14,90	5,41	0,338	0,192	5,289	0,184	0,104	4,940	38,58	122,39	2,59	8,21	7,13	22,60	2,59
285	443	31000	2,085	4590	7147	1,75	14,96	4,08	0,306	0,173	5,326	0,166	0,094	4,919	28,67	89,92	1,92	6,01	7,02	22,02	1,92
62	19	28941	2,150	1074	333	1,50	14,15	0,22	0,296	0,168	5,326	0,160	0,091	4,909	22,54	70,85	1,59	5,01	101,54	319,17	1,59

Tabulka 45: Výpočet tloušťky potahu pro variantu V2

M _{kmin}	M _{kmax}	U	z	Q _{min}	Q _{max}	f _{pepař}	f _{sw}	τ _{min}	τ _{max}	Přední torzní skříň			Zadní torzní skříň			τ _{k přední}	τ _{k zadní}	min		max		nejmenší poměr τ _k / τ				
										b	b/a	k	b	b/a	k			přední	zadní	přední	zadní					
																							τ _k /τ	τ _k /τ	τ _k /τ	τ _k /τ
																							[-]	[-]	[-]	[-]
Nm	Nm	mm ²	[m]	[Nm]	[Nm]	[mm]	[mm]	[Nmm ⁻²]	[Nmm ⁻²]	[m]	[-]	[-]	[m]	[-]	[-]	[Nmm ⁻²]	[Nmm ⁻²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]				
51	27	28941	-2,150	882	464	0,5	2,5	1,76	0,93	0,296	0,168	5,057	0,160	0,091	4,909	59,45	196,81	33,68	111,51	64,13	212,30	33,68				
242	644	31000	-2,085	3903	10382	0,5	3,5	7,81	20,76	0,306	0,173	5,027	0,166	0,094	4,919	108,23	359,69	13,87	46,08	5,21	17,32	5,21				
631	1347	38000	-1,885	8304	17726	0,5	3,5	16,61	35,45	0,338	0,192	5,089	0,184	0,104	4,940	89,82	296,17	5,41	17,83	2,53	8,35	2,53				
1190	2146	46000	-1,680	12932	23330	0,5	4,5	25,86	46,66	0,371	0,210	5,136	0,201	0,114	4,961	124,54	408,66	4,81	15,80	2,67	8,76	2,67				
1890	3025	53000	-1,490	17835	28536	0,5	5,5	35,67	57,07	0,402	0,227	5,167	0,218	0,123	4,982	162,71	523,81	4,56	14,69	2,85	9,18	2,85				
2723	3970	62000	-1,300	21959	32019	0,5	5,5	43,92	64,04	0,432	0,244	5,199	0,234	0,133	4,993	141,46	453,70	3,22	10,33	2,21	7,08	2,21				
4057	9206	71000	-1,110	28567	64831	0,5	8,5	57,13	129,66	0,462	0,262	5,236	0,251	0,142	5,014	296,95	949,87	5,20	16,63	2,29	7,33	2,29				
5553	14756	80000	-0,920	34708	92223	0,5	8,5	69,42	184,45	0,493	0,279	5,258	0,267	0,151	5,025	261,47	838,18	3,77	12,07	1,42	4,54	1,42				
7237	20590	91000	-0,730	39766	113132	0,5	10,5	79,53	226,26	0,523	0,296	5,289	0,284	0,161	5,041	351,49	1138,37	4,42	14,31	1,55	5,03	1,55				
8898	26666	101000	-0,540	44048	132012	0,5	11,5	88,10	264,02	0,554	0,313	5,326	0,300	0,170	5,062	379,21	1224,79	4,30	13,90	1,44	4,64	1,44				
9789	31483	60965	-0,383	80283	258205	0,5	16,5	160,57	516,41	0,562	0,318	5,326	0,310	0,175	5,072	757,15	2370,60	4,72	14,76	1,47	4,59	1,47				
11277	21535	60965	0,383	92491	176619	0,5	16,5	184,98	353,24	0,562	0,318	5,057	0,310	0,175	5,072	718,91	2370,60	3,89	12,82	2,04	6,71	2,04				
10285	18227	101000	0,540	50913	90232	0,5	11,5	101,83	180,46	0,554	0,313	5,027	0,300	0,170	5,062	357,92	1224,79	3,51	12,03	1,98	6,79	1,98				
8395	14082	91000	0,730	46128	77373	0,5	10,5	92,26	154,75	0,523	0,296	5,089	0,284	0,161	5,041	338,19	1138,37	3,67	12,34	2,19	7,36	2,19				
6469	10097	80000	0,920	40429	63105	0,5	8,5	80,86	126,21	0,493	0,279	5,136	0,267	0,151	5,025	252,11	838,18	3,12	10,37	2,00	6,64	2,00				
4762	6302	71000	1,110	33535	44383	0,5	8,5	184,98	88,77	0,462	0,262	5,167	0,251	0,142	5,014	288,11	949,87	1,56	5,13	3,25	10,70	1,56				
3246	2720	62000	1,300	26176	21935	0,5	5,5	101,83	43,87	0,432	0,244	5,199	0,234	0,133	4,993	139,05	453,70	1,37	4,46	3,17	10,34	1,37				
2250	2075	53000	1,490	21229	19572	0,5	5,5	92,26	39,14	0,402	0,227	5,236	0,218	0,123	4,982	162,03	523,81	1,76	5,68	4,14	13,38	1,76				
1413	1474	46000	1,680	15358	16018	0,5	4,5	80,86	32,04	0,371	0,210	5,258	0,201	0,114	4,961	127,49	408,66	1,58	5,05	3,98	12,76	1,58				
747	926	38000	1,885	9823	12183	0,5	3,5	67,07	24,37	0,338	0,192	5,289	0,184	0,104	4,940	93,36	296,17	1,39	4,42	3,83	12,16	1,39				
285	443	31000	2,085	4590	7147	0,5	3,5	52,35	14,29	0,306	0,173	5,326	0,166	0,094	4,919	114,67	359,69	2,19	6,87	8,02	25,16	2,19				
62	19	28941	2,150	1074	333	0,5	2,5	42,46	0,67	0,296	0,168	5,326	0,160	0,091	4,909	62,61	196,81	1,47	4,64	94,02	295,53	1,47				

Tabulka 46: Výpočet tloušťky potahu pro variantu V3

M _{kmin}	M _{kmax}	U	z	Q _{min}	Q _{max}	f _{pepař}	f _{sw}	τ _{min}	τ _{max}	Přední torzní skříň			Zadní torzní skříň			τ _{k přední}	τ _{k zadní}	min		max		nejmenší poměr τ _k / τ				
										b	b/a	k	b	b/a	k			přední	zadní	přední	zadní					
																							τ _k /τ	τ _k /τ	τ _k /τ	τ _k /τ
																							[-]	[-]	[-]	[-]
51	27	28941	-2,150	882	464	0,5	2,5	1,76	0,93	0,296	0,170	5,057	0,160	0,091	4,909	59,45	196,81	33,68	111,51	64,13	212,30	33,68				
242	644	31000	-2,085	3903	10382	0,5	3,5	7,81	20,76	0,306	0,175	5,027	0,166	0,094	4,919	108,23	359,69	13,87	46,08	5,21	17,32	5,21				
631	1347	38000	-1,885	8304	17726	0,5	3,5	16,61	35,45	0,338	0,194	5,089	0,184	0,104	4,940	89,82	296,17	5,41	17,83	2,53	8,35	2,53				
1190	2146	46000	-1,680	12932	23330	0,5	4,5	25,86	46,66	0,371	0,212	5,136	0,201	0,114	4,961	124,54	408,66	4,81	15,80	2,67	8,76	2,67				
1890	3025	53000	-1,490	17835	28536	0,5	5,5	35,67	57,07	0,380	0,218	5,141	0,218	0,123	4,982	181,73	523,81	5,09	14,69	3,18	9,18	3,18				
2723	3970	62000	-1,300	21959	32019	0,5	5,5	43,92	64,04	0,380	0,218	5,141	0,234	0,133	4,993	182,82	453,70	4,16	10,33	2,85	7,08	2,85				
4057	9206	71000	-1,110	28567	64831	0,5	6,5	57,13	129,66	0,380	0,218	5,141	0,251	0,142	5,014	257,12	555,46	4,50	9,72	1,98	4,28	1,98				
5553	14756	80000	-0,920	34708	92223	0,5	6,5	69,42	184,45	0,380	0,218	5,141	0,267	0,151	5,025	257,15	490,15	3,70	7,06	1,39	2,66	1,39				
7237	20590	91000	-0,730	39766	113132	0,5	6,5	79,53	226,26	0,327	0,187	5,064	0,284	0,161	5,041	330,14	436,24	4,15	5,49	1,46	1,93	1,46				
8898	26666	101000	-0,540	44048	132012	0,5	7,5	88,10	264,02	0,327	0,187	5,064	0,300	0,170	5,062	439,53	520,94	4,99	5,91	1,66	1,97	1,66				
9789	31483	60965	-0,383	80283	258205	0,5	9,5	160,57	516,41	0,327	0,187	5,064	0,310	0,175	5,072	705,20	785,85	4,39	4,89	1,37	1,52	1,37				
11277	21535	60965	0,383	92491	176619	0,5	9,5	184,98	353,24	0,327	0,187	5,064	0,310	0,175	5,072	705,20	785,85	3,81	4,25	2,00	2,22	2,00				
10285	18227	101000	0,540	50913	90232	0,5	7,5	101,83	180,46	0,327	0,187	5,064	0,300	0,170	5,062	439,53	520,94	4,32	5,12	2,44	2,89	2,44				
8395	14082	91000	0,730	46128	77373	0,5	6,5	92,26	154,75	0,327	0,187	5,064	0,284	0,161	5,041	330,14	436,24	3,58	4,73	2,13	2,82	2,13				
6469	10097	80000	0,920	40429	63105	0,5	6,5	80,86	126,21	0,380	0,218	5,141	0,267	0,151	5,025	248,22	490,15	3,07	6,06	1,97	3,88	1,97				
4762	6302	71000	1,110	33535	44383	0,5	6,5	184,98	88,77	0,380	0,218	5,141	0,251	0,142	5,014	248,22	555,46	1,34	3,00	2,80	6,26	1,34				
3246	2720	62000	1,300	26176	21935	0,5	5,5	101,83	43,87	0,380	0,218	5,141	0,234	0,133	4,993	177,72	453,70	1,75	4,46	4,05	10,34	1,75				
2250	2075	53000	1,490	21229	19572	0,5	5,5	92,26	39,14	0,380	0,218	5,141	0,218	0,123	4,982	177,72	523,81	1,93	5,68	4,54	13,38	1,93				
1413	1474	46000	1,680	15358	16018	0,5	4,5	80,86	32,04	0,371	0,212	5,258	0,201	0,114	4,961	127,49	408,66	1,58	5,05	3,98	12,76	1,58				
747	926	38000	1,885	9823	12183	0,5	3,5	67,07	24,37	0,338	0,194	5,289	0,184	0,104	4,940	93,36	296,17	1,39	4,42	3,83	12,16	1,39				
285	443	31000	2,085	4590	7147	0,5	3,5	52,35	14,29	0,306	0,175	5,326	0,166	0,094	4,919	114,67	359,69	2,19	6,87	8,02	25,16	2,19				
62	19	28941	2,150	1074	333	0,5	2,5	42,46	0,67	0,296	0,170	5,326	0,160	0,091	4,909	62,61	196,81	1,47	4,64	94,02	295,53	1,47				

Tabulka 47: Výpočet tloušťky potahu pro variantu V4

M _{kmin}	M _{kmax}	U	z	Q _{min}	Q _{max}	f _{spaz}	f _{sw}	τ _{min}	τ _{max}	Přední torzní skříň			Zadní torzní skříň			τ _{k přední}	τ _{k zadní}	min		max		nejmenší poměr τ _k / τ				
										b	b/a	k	b	b/a	k			přední	zadní	přední	zadní					
																							τ _k /τ	τ _k /τ	τ _k /τ	τ _k /τ
																							[-]	[-]	[-]	[-]
51	27	28941	-2,150	882	464	0,5	1,5	1,76	0,93	0,065	0,037	4,840	0,065	0,037	4,840	425,27	425,27	240,95	240,95	458,74	458,74	240,95				
242	644	31000	-2,085	3903	10382	0,5	5,5	7,81	20,76	0,200	0,113	4,943	0,166	0,094	4,919	616,82	888,23	79,03	113,80	29,71	42,78	29,71				
631	1347	38000	-1,885	8304	17726	0,5	5,5	16,61	35,45	0,205	0,116	4,956	0,184	0,104	4,940	588,63	731,35	35,44	44,04	16,60	20,63	16,60				
1190	2146	46000	-1,680	12932	23330	0,5	5,5	25,86	46,66	0,190	0,108	4,930	0,190	0,108	4,930	681,69	681,69	26,36	26,36	14,61	14,61	14,61				
1890	3025	53000	-1,490	17835	28536	0,5	5,5	35,67	57,07	0,190	0,108	4,930	0,190	0,108	4,930	681,69	681,69	19,11	19,11	11,94	11,94	11,94				
2723	3970	62000	-1,300	21959	32019	0,5	5,5	43,92	64,04	0,190	0,108	4,930	0,190	0,108	4,930	681,69	681,69	15,52	15,52	10,65	10,65	10,65				
4057	9206	71000	-1,110	28567	64831	0,5	5,5	57,13	129,66	0,190	0,108	4,930	0,190	0,108	4,930	681,69	681,69	11,93	11,93	5,26	5,26	5,26				
5553	14756	80000	-0,920	34708	92223	0,5	4,5	69,42	184,45	0,190	0,108	4,930	0,190	0,108	4,930	456,34	456,34	6,57	6,57	2,47	2,47	2,47				
7237	20590	91000	-0,730	39766	113132	0,5	4,5	79,53	226,26	0,190	0,108	4,930	0,190	0,108	4,930	456,34	456,34	5,74	5,74	2,02	2,02	2,02				
8898	26666	101000	-0,540	44048	132012	0,5	4,5	88,10	264,02	0,137	0,078	4,904	0,200	0,113	4,943	873,03	412,91	9,91	4,69	3,31	1,56	1,56				
9789	31483	60965	-0,383	80283	258205	0,5	6,5	160,57	516,41	0,137	0,078	4,904	0,200	0,113	4,943	1821,50	861,51	11,34	5,37	3,53	1,67	1,67				
11277	21535	60965	0,383	92491	176619	0,5	6,5	184,98	184,98	0,137	0,078	4,904	0,200	0,113	4,943	1821,50	861,51	9,85	4,66	9,85	4,66	4,66				
10285	18227	101000	0,540	50913	90232	0,5	4,5	101,83	101,83	0,137	0,078	4,904	0,200	0,113	4,943	873,03	412,91	8,57	4,06	8,57	4,06	4,06				
8395	14082	91000	0,730	46128	77373	0,5	4,5	92,26	92,26	0,190	0,108	4,930	0,190	0,108	4,930	456,34	456,34	4,95	4,95	4,95	4,95	4,95				
6469	10097	80000	0,920	40429	63105	0,5	4,5	80,86	80,86	0,190	0,108	4,930	0,190	0,108	4,930	456,34	456,34	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64				
4762	6302	71000	1,110	33535	44383	0,5	5,5	184,98	353,24	0,190	0,108	4,930	0,190	0,108	4,930	681,69	681,69	3,69	3,69	1,93	1,93	1,93				
3246	2720	62000	1,300	26176	21935	0,5	3,5	101,83	180,46	0,190	0,108	4,930	0,190	0,108	4,930	276,05	276,05	2,71	2,71	1,53	1,53	1,53				
2250	2075	53000	1,490	21229	19572	0,5	3,5	92,26	154,75	0,190	0,108	4,930	0,190	0,108	4,930	276,05	276,05	2,99	2,99	1,78	1,78	1,78				
1413	1474	46000	1,680	15358	16018	0,5	3,5	80,86	126,21	0,190	0,108	4,930	0,190	0,108	4,930	276,05	276,05	3,41	3,41	2,19	2,19	2,19				
747	926	38000	1,885	9823	12183	0,5	2,5	67,07	88,77	0,205	0,116	4,956	0,184	0,104	4,940	121,62	151,10	1,81	2,25	1,37	1,70	1,37				
285	443	31000	2,085	4590	7147	0,5	2,5	52,35	43,87	0,200	0,113	4,943	0,166	0,094	4,919	127,44	183,52	2,43	3,51	2,90	4,18	2,43				
62	19	28941	2,150	1074	333	0,5	1,5	42,46	39,14	0,065	0,037	4,840	0,065	0,037	4,840	425,27	425,27	10,02	10,02	10,86	10,86	10,02				

Příloha G – Přílohy ke kapitole 10.5 Materiálová skladba

Vysvětlivky k tabulkám:

- C tkanina / tkanina – Uhlíkový prepreg ve formě plátna
- C UD / UD – Uhlíkový prepreg ve formě jednosměrných vláken
- 2x / 3x – počet vrstev materiálu o stejné orientaci

Tabulka 48: Materiál pásnice hlavního nosníku pro V2

Pásnice hlavního nosníku pro V2															
Z±0,180		Z±0,403		Z±0,730		Z±0,920		Z±1,110		Z±1,490		Z±1,680		Z±2,085	
Materiál	Úhel	Materiál	Úhel	Materiál	Úhel	Materiál	Úhel	Materiál	Úhel	Materiál	Úhel	Materiál	Úhel	Materiál	Úhel
2 x tkanina	45	C tkanina	90	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932
3 x UD	0	2 x tkanina	45	C tkanina	-7,068	C tkanina	82,932	C tkanina	-7,068	C tkanina	37,932	C UD	-7,068	C UD	-7,068
C tkanina	0	C tkanina	90	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068
3 x UD	0	3 x C UD	0	C tkanina	37,932	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C tkanina	-7,068
C tkanina	0	C tkanina	0	C tkanina	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068
2 x UD	0	3 x C UD	0	C tkanina	37,932	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C tkanina	-7,068	C UD	-7,068
2 x tkanina	0	C tkanina	0	3 x C UD	-7,068	C tkanina	-7,068	C tkanina	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C tkanina	37,932
2 x UD	0	3 x C UD	0	C tkanina	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C tkanina	-7,068		
C tkanina	0	C tkanina	0	3 x C UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068		
3 x UD	0	C tkanina	0	C tkanina	-7,068	C tkanina	-7,068	C tkanina	-7,068	C UD	-7,068				
C tkanina	0	3 x C UD	0	3 x C UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068				
3 x UD	0	C tkanina	0	C tkanina	37,932	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C tkanina	37,932		
2 x tkanina	45	3 x C UD	0	C tkanina	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C tkanina	37,932		
	0	C tkanina	90	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932						
	0	2 x tkanina	45	C tkanina	37,932	C tkanina	82,932	C tkanina	-7,068						
	0	C tkanina	90	C tkanina	-7,068	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932						
				C tkanina	37,932										

Tabulka 49: Materiál pásnice hlavního nosníku pro V3

Pásnice hlavního nosníku pro V3													
Z±0,180		Z±0,403		Z±0,730		Z±1,110		Z±1,490		Z±1,680		Z±2,085	
Materiál	Úhel	Materiál	Úhel	Materiál	Úhel	Materiál	Úhel	Materiál	Úhel	Materiál	Úhel	Materiál	Úhel
2 x tkanina	45	C tkanina	90	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932
3 x UD	0	2 x tkanina	45	C tkanina	-7,068	C tkanina	-7,068	C tkanina	37,932	C UD	-7,068	C UD	-7,068
C tkanina	0	C tkanina	90	C tkanina	37,932	C tkanina	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068
3 x UD	0	3 x UD	0	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932	C UD	-7,068	C tkanina	-7,068	C tkanina	37,932
C tkanina	0	C tkanina	0	C tkanina	-7,068	3 x UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068		
2 x UD	0	3 x UD	0	C tkanina	37,932	C tkanina	-7,068	C tkanina	-7,068	C UD	-7,068		
C tkanina	0	C tkanina	0	3 x UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C tkanina	37,932		
2 x UD	0	2 x UD	0	C tkanina	-7,068	C UD	-7,068	C tkanina	-7,068				
C tkanina	0	C tkanina	0	3 x UD	-7,068	C tkanina	-7,068	C UD	-7,068				
3 x UD	0	2 x UD	0	C tkanina	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068				
C tkanina	0	C tkanina	0	3 x UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068				
3 x UD	0	3 x UD	0	C tkanina	37,932	C tkanina	-7,068	C tkanina	37,932				
2 x tkanina	45	C tkanina	0	C tkanina	-7,068	3 x UD	-7,068	C tkanina	37,932				
		3 x UD	0	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932						
		C tkanina	90	C tkanina	37,932	C tkanina	-7,068						
		2 x tkanina	45	C tkanina	-7,068	C tkanina	-7,068						
		C tkanina	90	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932						

Tabulka 50: Materiál pásnice hlavního nosníku pro V4

Pásnice hlavního nosníku pro V4															
Z±0,180		Z±0,403		Z±0,730		Z±0,920		Z±1,110		Z±1,490		Z±1,680		Z±2,085	
Materiál	Úhel	Materiál	Úhel	Materiál	Úhel	Materiál	Úhel	Materiál	Úhel	Materiál	Úhel	Materiál	Úhel	Materiál	Úhel
2 x tkanina	45	C tkanina	90	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932
3 x UD	0	2 x tkanina	45	C tkanina	-7,068	C tkanina	82,932	C tkanina	-7,068	C tkanina	37,932	C UD	-7,068	C UD	-7,068
C tkanina	0	C tkanina	90	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068
3 x UD	0	3 x UD	0	C tkanina	37,932	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C tkanina	-7,068	C tkanina	37,932
C tkanina	0	C tkanina	0	C tkanina	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068		
2 x UD	0	3 x UD	0	C tkanina	37,932	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C tkanina	-7,068	C UD	-7,068		
2 x tkanina	0	C tkanina	0	3 x UD	-7,068	C tkanina	-7,068	C tkanina	-7,068	C UD	-7,068	C tkanina	37,932		
2 x UD	0	3 x UD	0	C tkanina	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C tkanina	-7,068				
C tkanina	0	C tkanina	0	3 x UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068				
3 x UD	0	2 x UD	0	C tkanina	-7,068	C tkanina	-7,068	C tkanina	-7,068	C UD	-7,068				
C tkanina	0	C tkanina	0	3 x UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068				
3 x UD	0	3 x UD	0	C tkanina	37,932	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C tkanina	37,932				
2 x tkanina	45	C tkanina	0	C tkanina	-7,068	C UD	-7,068	C UD	-7,068	C tkanina	37,932				
		3 x UD	0	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932						
		C tkanina	90	C tkanina	37,932	C tkanina	82,932	C tkanina	-7,068						
		2 x tkanina	45	C tkanina	-7,068	C tkanina	37,932	C tkanina	37,932						
		C tkanina	90	C tkanina	37,932										

Tabulka 51: Materiál stojiny hlavního nosníku pro jednotlivé varianty

Stojina hlavního nosníku									
Z±0,340		Z±0,730		Z±1,110		Z±1,490		Z±2,085	
Materiál	Orientace	Materiál	Orientace	Materiál	Orientace	Materiál	Orientace	Materiál	Orientace
Stojina V2									
C tkanina	[45] ₂	C tkanina	[45/0/45/0/45]	C tkanina	[45/0/45]	C tkanina	[45/0/45]	C tkanina	[45]
Pěna	0	Pěna	0	Pěna	0	Pěna	0	Pěna	0
C tkanina	[45] ₂	C tkanina	[45/0/45/0/45]	C tkanina	[45/0/45]	C tkanina	[45/0/45]	C tkanina	[45]
Stojina V3									
C tkanina	[45] ₂	C tkanina	[45/0/45/0/45/0/45]	C tkanina	[45/0/45]	C tkanina	[45/0/45]	C tkanina	[45]
Pěna	0	Pěna	0	Pěna	0	Pěna	0	Pěna	0
C tkanina	[45] ₂	C tkanina	[45/0/45/0/45/0/45]	C tkanina	[45/0/45]	C tkanina	[45/0/45]	C tkanina	[45]
Stojina V4									
C tkanina	[45/0/45]	C tkanina	[45/0/45/0/45]	C tkanina	[45/0/45]	C tkanina	[45] ₂	C tkanina	[45]
Pěna	0	Pěna	0	Pěna	0	Pěna	0	Pěna	0
C tkanina	[45/0/45]	C tkanina	[45/0/45/0/45]	C tkanina	[45/0/45]	C tkanina	[45] ₂	C tkanina	[45]

Tabulka 52: Materiál pásnice zadního nosníku pro všechny varianty

Pásnice zadního nosníku									
Z±0,340		Z±0,920		Z±1,300		Z±1,885		Z±2,085	
Materiál	Orientace	Materiál	Orientace	Materiál	Orientace	Materiál	Orientace	Materiál	Orientace
C tkanina	[45]	C tkanina	[42,867]	C tkanina	[43/-2/43]	C tkanina	[42,867]	C tkanina	[43/-2/43]
C UD	[0] ₂	C UD	[-2,133] ₂	C UD	[-2,133] ₃	C UD	[-2,133] ₂	C UD	[-2,133] ₂
C tkanina	[0] ₂	C tkanina	[-2,133] ₂	C tkanina	[43/-2/43]	C tkanina	[-2,133] ₂	C tkanina	[43/-2/43]
C UD	[0] ₂	C UD	[-2,133] ₂			C UD	[-2,133] ₂		
C tkanina	[45]	C tkanina	[42,867]			C tkanina	[42,867]		

Tabulka 53: Materiál stojiny zadního nosníku pro všechny varianty

Stojina zadního nosníku							
Z±0,340		Z±0,920		Z±1,300		Z±1,885	
Materiál	Orientace	Materiál	Orientace	Materiál	Orientace	Materiál	Orientace
C tkanina	[45]	C tkanina	[42,867]	C tkanina	[43/-2/43]	C tkanina	[42,867]
C UD	[0] ₂	C UD	[-2,133] ₂	C UD	[-2,133] ₃	C UD	[-2,133] ₂
C tkanina	[0] ₂	C tkanina	[-2,133] ₂	C tkanina	[43/-2/43]	C tkanina	[-2,133] ₂
C UD	[0] ₂	C UD	[-2,133] ₂			C UD	[-2,133] ₂
C tkanina	[45]	C tkanina	[42,867]			C tkanina	[42,867]

Tabulka 54: Materiál potahu korespondující se všemi variantami

Potah 1		Potah 2		Potah 3	
Materiál	Orientace	Materiál	Orientace	Materiál	Orientace
C tkanina	[45]	C tkanina	[45] ₂	C tkanina	[45/0/45]
Pěna	0	Pěna	0	Pěna	0
C tkanina	[45]	C tkanina	[45] ₂	C tkanina	[45/0/45]

Poznámka: značení 1, 2, 3 značí počet vrstev tkaniny z každé strany jádra. Konkrétní rozmístění potahu je ve stati práce v kapitole 11.5.

Tabulka 55: Materiál žeber korespondující se všemi variantami

Žebra			
V2: 6-0 / V3: 6-0, 8 / V4: 3-5, 6-0, 7-10		V2, V4: 2, 6-1 a 11 / V3: 2, 4, 6-1 a 11	
Materiál	Orientace	Materiál	Orientace
C tkanina	[45]	C tkanina	[45] ₂
Pěna	0	Pěna	0
C tkanina	[45]	C tkanina	[45] ₂

Poznámka: 6-1 značí část žebra od hlavního nosníku k pomocnému, 6-0 značí část žebra od náběžné hrany k hlavnímu nosníku.

Poznámka: V tabulce je značeno, jaká žebra u dané varianty se týkají dané skladby.

Tabulka 56: Materiál stojiny a pásnice předního nosníku pro všechny varianty

Stojina předního nosníku		Pásnice předního nosníku	
Materiál	Orientace	Materiál	Orientace
C tkanina	[45]	C tkanina	[30,093]
Pěna	0	C UD	[-14,907] ₂
C tkanina	[45]	C tkanina	[30,093]