

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2023

**PAVEL
TVRZNÍK**



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav letadlové techniky

Návrh technologie výroby malého sportovního letounu z kompozitních materiálů

Design of production technology of a
small sports aircraft from composite
materials

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2023

Pavel TVRZNÍK

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový
Vedoucí práce: Ing. Karel BARÁK

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tvrzník** Jméno: **Pavel** Osobní číslo: **501537**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh technologie výroby malého sportovního letounu z kompozitních materiálů

Název bakalářské práce anglicky:

Design of production technology of a small sports aircraft from composite materials

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je navrhnout technologii výroby malého kompozitního sportovního letadla s ohledem na výrobní možnosti Ústavu letadlové techniky.

Pro vypracování proveďte:

- Rešerši technologií výroby kompozitních materiálů.
- Rešerši spojování kompozitních dílů.
- Výběr technologie výroby pro hlavní konstrukční celky letounu.
- Kalkulaci nákladů jednotlivých technologií.
- Pro vybraný konstrukční celek navrhnete výrobní přípravky a technologii výroby.

Seznam doporučené literatury:

CAMANHO, Pedro a Liyong TONG. Composite Joints and Connections: Principles, Modelling and Testing. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. ISBN 9781845699901.
MIRACLE, D. B. a Steven L. DONALDSON, ed. ASM handbook. Volume 21, Composites. Materials Park: ASM International, c2001. ISBN 0-87170-703-9.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Karel Barák ústav letadlové techniky FS

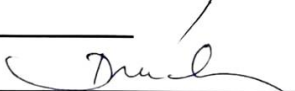
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:


Datum zadání bakalářské práce: **28.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce:


Ing. Karel Barák
podpis vedoucí(ho) práce


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


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

28.4.2023
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

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

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

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Rád bych v první řadě poděkoval mé rodině, která mě po celou dobu studia neúnavně podporovala. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Karlu Barákovi za vedení bakalářské práce, odborné rady, připomínky a trpělivost a také všem ostatním, kteří mi při studiu pomáhali a obětovali mi svůj drahocenný čas.

Anotační list

Jméno autora:	Pavel Tvrzník
Název bakalářské práce:	Návrh technologie výroby malého sportovního letounu z kompozitních materiálů
Rok:	2023
Univerzita:	České vysoké učení technické v Praze – Fakulta strojní
Ústav:	Ústav letadlové techniky
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Karel Barák
Rozsah práce:	106 stran, 42 obrázků, 6 grafů, 18 tabulek
Klíčová slova:	kompozitní materiály, spojování kompozitních materiálů, technologie výroby, podvozková noha, malý sportovní letoun, vakuová infuze, formy, návrh postupu výroby

Anotace:

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem technologie výroby podvozkové nohy malého sportovního letounu z kompozitních materiálů. V první části je provedena rešerše kompozitních materiálů, technologií výroby a metod spojování. Cílem rešerše je poskytnout přehled o vhodných materiálech a postupech výroby konstrukčních celků malého sportovního letounu. V druhé části je proveden výběr technologie výroby podvozkové nohy. Pro zvolenou technologii výroby je proveden detailní návrh forem, přípravků a postupu výroby.

Annotation list

Author:	Pavel Tvrzník
Title of bachelor thesis:	Design of production technology of a small sports aircraft from composite materials
Academic year:	2023
University:	Czech Technical University in Prague – Faculty of mechanical engineering
Department:	Department of Aerospace Engineering
Supervisor:	Ing. Karel Barák
Extent:	106 pages, 42 figures, 6 graphs, 18 tables
Keywords:	composite materials, composite joints, production technology, landing gear, small sports aircraft, vacuum infusion, molds, manufacturing process design

Annotation:

This bachelor's thesis deals with the design of production technology of a small sports aircraft's landing gear from composite materials. The first part of the thesis consists of a research study on composite materials, production technologies, and joining methods. The aim of the research is to provide an overview of suitable materials, and manufacturing processes for production of small sports aircraft's structural components. In the second part, the selection of a manufacturing process for production of the landing gear is carried out. A detailed design of molds, mold core, and the manufacturing process is conducted for chosen technological process.

Obsah

Seznam obrázků	1
Seznam grafů.....	2
Seznam tabulek	2
Seznam příloh	2
Seznam použitých programů.....	3
Použité zkratky.....	3
Použité značení.....	4
1 Úvod	6
2 Současný stav návrhu letounu a podvozkové nohy.....	7
3 Materiály používané v letectví.....	9
3.1 Kovové materiály	9
3.2 Nekovové materiály	9
4 Kompozitní materiály.....	10
4.1 Problémy dílů z kompozitních materiálů.....	11
5 Matrice.....	12
5.1 Polymerní matrice	12
5.2 Uhlíkové matrice.....	16
5.3 Srovnání vlastností vybraných polymerních matric.....	17
6 Výztuže.....	18
6.1 Skelná vlákna.....	18
6.2 Uhlíková vlákna	19
6.3 Aramidová vlákna	20
6.4 Srovnání vlastností vybraných vláken.....	21
7 Tkaní vláken.....	22
7.1 Rozdělení tkanin dle typu vazeb	22
7.2 Orientace vláken.....	25
7.3 Směšovací pravidlo	26
7.4 Prepregy.....	26
8 Sendvičové lamináty	27
8.1 Voštiny.....	27
8.2 Pěny	28
8.3 Balsa	29
8.4 Srovnání jader sendvičových laminátů.....	29
9 Výroba forem a modelů.....	30
10 Technologie výroby dílů z kompozitních materiálů.....	31
10.1 Kladení do otevřené formy.....	31

10.2	Kladení do uzavřené formy	34
10.3	Kontinuální výroba	36
10.4	Lisování za tepla a tlaku.....	36
10.5	Výroba kompozitů s termoplastickou maticí	36
10.6	Srovnání technologických výrobních procesů	37
11	Spojování kompozitních dílů.....	39
11.1	Mechanické spoje	39
11.2	Lepené spoje.....	43
11.3	Srovnání mechanických a lepených spojů u kompozitních materiálů.....	46
12	Příklady použití kompozitních materiálů	47
13	Návrh technologie výroby podvozkové nohy	48
13.1	Porovnání technologií výroby	49
13.2	Volba technologie výroby.....	57
14	Návrh forem a přípravků pro výrobu podvozkové nohy.....	58
14.1	Metody zvýšení prostupnosti pryskyřice	58
14.2	Návrh vzorků pro zjištění prostupnosti pryskyřice.....	58
14.3	Vtoková a odvzdušňovací soustava	61
14.4	Pevná forma.....	61
14.5	Kompozitní forma.....	64
15	Postup výroby podvozkové nohy	67
15.1	Materiály, přípravky a spotřební materiály	67
15.2	Příprava forem.....	68
15.3	Příprava jader a insertů	69
15.4	Příprava suchých tkanin.....	70
15.5	Kladení tkanin do formy	70
15.6	Příprava infuze.....	72
15.7	Infuze a vytvrzení	72
15.8	Dokončovací operace.....	73
16	Závěr	74
17	Použité zdroje	75
18	Přílohy	79

Seznam obrázků

Obr. 1: 3D model podvozkové nohy [1]	7
Obr. 2: Základní rozměry podvozkové nohy [1]	8
Obr. 3: Rozměry vybraných průřezů podvozkové nohy [1].....	8
Obr. 4: Chemická struktura PPS [8]	13
Obr. 5: Chemická struktura PEI [8]	14
Obr. 6: Chemická struktura PEEK [8]	14
Obr. 7: Chemická struktura PEKK [8].....	14
Obr. 8: Chemická struktura diglycidyl ether bisphenol-A [9].....	15
Obr. 9: Diagram rozdělení kompozitních materiálu podle geometrie výztuže [25].....	18
Obr. 10: Materiály použité v draku letounu Boeing 787 Dreamliner [26].....	19
Obr. 11: Objasnění pojmů týkajících se tkanin [29].....	22
Obr. 12: Jednosměrná (UD) tkanina [9].....	23
Obr. 13: Biaxiální tkanina [30].....	23
Obr. 14: Plátňová (a), keprová 2x2 (b) a atlasová (c) vazba [31].....	24
Obr. 15: Části sendvič. laminátu: A – sendvičový panel, B – potahy, C – jádro [34].....	27
Obr. 16: Hexagonální struktura voštiny s vyznačenými hlavními směry zatížení [9].....	28
Obr. 17: Sendvičový laminát s jádrem z PS pěny [37]	28
Obr. 18: Schéma ručního kladení [39]	32
Obr. 19: Schéma vakuového lisování [39]	33
Obr. 20: Příklad obřího autoklávu pro výrobu křídel letounu Boeing 777X [42]	34
Obr. 21: Schéma vakuové infuze [43]	35
Obr. 22: Schéma metody RTM [39]	35
Obr. 23: Delaminace na výstupu díry způsobená vrtáním [56].....	39
Obr. 24: Poruchy mechanických spojů [8].....	40
Obr. 25: Definice geometrie šroubového spoje [11].....	40
Obr. 26: Typy mechanických spojů [45].....	42
Obr. 27: Typy lepených spojů [8].....	43
Obr. 28: Rozdílné průběhy napětí v závislosti na délce spoje [11]	44
Obr. 29: Modifikace zakončení lepených spojů pro příznivější průběh napětí [11]	44
Obr. 30: Průřez podvozkové nohy [1].....	48
Obr. 31: Model prvního vzorku	59
Obr. 32: Model druhého vzorku	59
Obr. 33: Model třetího vzorku.....	60
Obr. 34: Schéma formovací soustavy	61
Obr. 35: Pevná forma v izometrickém a horním pohledu	63
Obr. 36: Popis jednotlivých prvků formy.....	63
Obr. 37: Schéma polohy děr pro inserty v průmětu do půdorysu.....	63
Obr. 38: Kopyto pro výrobu kompozitní formy v izometrickém a horním pohledu	64
Obr. 39: Kompozitní forma	66
Obr. 40: Popis jednotlivých prvků formy.....	66
Obr. 41: 3D model konektoru s maximálními přípustnými rozměry	69
Obr. 42: 3D model pěnových jader a překližkových insertů.....	70

Seznam grafů

Graf 1: Nárůst použití kompozitních materiálů v letectví [8]	9
Graf 2: Pokles meze pevnosti podle orientace vláken [62]	25
Graf 3: Mech. vlastnosti kvazi-izotropního laminátu podle orientace zatěžování [32]	25
Graf 4: Technologie výroby dle požadavků na výkonost kompozitu a produktivity [9]	37
Graf 5: Závislost napětí na E/D a W/D se zvýrazněním typu porušení [11]	41
Graf 6: Závislost kritického zatížení na E/D (a) a W/D (b) [11]	41

Seznam tabulek

Tab. 1: Výhody využití kompozitních materiálů v letectví [9]	10
Tab. 2: Porovnání charakteristických vlastností polymerních materiálů [9] [23]	17
Tab. 3: Konkrétní hodnoty jednotlivých materiálů [9] [24]	17
Tab. 4: Rozdělení skelných vláken [9]	19
Tab. 5: Srovnání vlastností vybraných vláken [9]	21
Tab. 6: Srovnání kompozitních laminátů s běžnou EP a $v_f=50\%$ [9]	21
Tab. 7: Srovnání jader sendvičových laminátů [9]	29
Tab. 8: Srovnání charakteristických vlastností jader	29
Tab. 9: Srovnání technologických postupů [9]	37
Tab. 10: Porovnání mechanických a lepených spojů [11]	46
Tab. 11: Počty vrstev laminátu v jednotlivých konstrukčních řezech [1]	48
Tab. 12: Použité materiály při metodě kladení prepregů z DP [21] [47]	50
Tab. 13: Cena materiálů metody kladení prepregů z DP	51
Tab. 14: Použité materiály při upravené metodě kladení prepregů [22] [21] [47]	52
Tab. 15: Cena materiálů upravené metody kladení prepregů	53
Tab. 16: Použité materiály při metodě vakuové infuze [21] [47]	55
Tab. 17: Cena materiálů metody vakuové infuze	56
Tab. 18: Seznam použitých materiálů	67

Seznam příloh

Příloha 1: Technický list Ponal Standard [48]	79
Příloha 2: Technický list polyesterový lak ICRO [50]	81
Příloha 3: Technický list Interglas 90070 [51]	82
Příloha 4: Technický list Interglas 92125 [52]	84
Příloha 5: Technický list epoxidové pryskyřice LH 160 [53]	86
Příloha 6: Technický list tvrdidla H 146 [54]	91
Příloha 7: Technický list RenGel SW56; Ren HY5159 [55]	93
Příloha 8: Technický list FREKOTE 700-NC [56]	95
Příloha 9: Technický list PS pěna Ravatherm XPS [57]	96
Příloha 10: Technický list Aeroglass 163 [58]	97
Příloha 11: Technický list Vorgelat T35 MGS [59]	98
Příloha 12: Technický list epoxidová pryskyřice LH 288 [60]	105
Příloha 13: 3D model pevné formy (digitální příloha na CD)	106
Příloha 14: 3D model kopyta (digitální příloha na CD)	106

Seznam použitých programů

Adobe Photoshop CS6
Microsoft Office Word 365
Microsoft Office Excel 365
SIEMENS NX

Použité zkratky

FAI	Fédération Aéronatique Internationale, česky Mezinárodní letecká federace
MTOM	Maximum takeoff mass, česky Maximální vzletová hmotnost
UV	Ultraviolet, česky ultrafialové
UD	uni-directional, česky jednosměrné
PPS	polyfenylsulfid
PEI	polyetherimid
PEEK	polyetheretherketon
PEKK	polyetherketonketon
PP	polypropylen
PA6	nylon 6 polyamid
PA12	nylon 12 polyamid
EP	epoxidová pryskyřice
BMI	bismaleimid
GFRP	Glass fiber-reinforced polymer, česky polymer vyztužený skelnými vlákny
PAN	polyacrylonitril
PITCH	ropná smola
CFRP	Carbon fiber-reinforced polymer, česky polymer vyztužený uhlíkovými vlákny
SM	standard modulus, česky standartní (běžný) modul
IM	intermediate modulus, česky střední modul
HM	high modulus, česky vysoký modul
PW	plain weave, česky plátňová vazba
xHS	x harness satin, česky x-vazný atlas
MKP	metoda konečných prvků
KTL	klasická teorie laminátů
PU	polyuretan
PS	polystyren
PVC	polyvinylchlorid
RTM	resin transfer molding, česky vysokotlaké vstřikování

SMC	sheet moulding compound
DMC	dough moulding compound
BMC	bulk moulding compound
ÚLT	Ústav letadlové techniky
CAD	computer aided design, česky počítačem podporované projektování
MDF	medium density fibreboard, česky polotvrdá dřevovláknitá deska
CNC	computer numeric control, česky číslicové řízení
HS	high strength, česky vysokopevnostní
TL	technický list

Použité značení

T_g	[°C]	teplota skelného přechodu
T_z	[°C]	teplota zpracování
T_p	[°C]	provozní teplota
ρ	[g.cm ⁻³]	objemová hustota
E	[GPa]	modul pružnosti v tahu (Youngův modul)
σ_{pt}	[MPa]	mez pevnosti v tahu
ε_p	[%]	prodloužení při přetržení
α	[10 ⁻⁶ .K ⁻¹]	součinitel teplotní roztažnosti
$\frac{\sigma_{Pt}}{\rho}$	[10 ³ .m ² .s ⁻²]	měrná mez pevnosti v tahu
$\frac{E}{\rho}$	[10 ⁶ .m ² .s ⁻²]	měrný modul pružnosti v tahu (měrný Youngův modul)
E_1	[GPa]	modul pružnosti v tahu v podélném směru
$\frac{E_1}{\rho}$	[10 ⁶ .m ² .s ⁻²]	měrný modul pružnosti v tahu v podélném směru
ν	[-]	Poissonova konstanta
FAW	[g.m ⁻²]	fabric areal weight, česky plošná hustota tkaniny
E_2	[GPa]	modul pružnosti v tahu v příčném směru
G	[GPa]	modul pružnosti ve smyku
t_l	[mm]	teoretická tloušťka laminy
ρ_f	[g.cm ⁻³]	objemová hustota výztuže
ν_f	[-]	objemový podíl výztuže
ν_m	[-]	objemový podíl matrice
E_f	[GPa]	modul pružnosti v tahu výztuže

E_m	[GPa]	modul pružnosti v tahu matrice
G_f	[GPa]	modul pružnosti ve smyku výztuže
G_m	[GPa]	modul pružnosti ve smyku matrice
σ_{fpt}	[MPa]	mez pevnosti v tahu výztuže
σ_{mpt}	[MPa]	mez pevnosti v tahu matrice
ρ_m	[g. cm ⁻³]	objemová hustota matrice
σ_{pd}	[MPa]	mez pevnosti v tlaku
$\frac{\sigma_{pd}}{\rho}$	[10 ³ . m ² . s ⁻²]	měrná mez pevnosti v tlaku
τ_p	[MPa]	mez pevnosti ve smyku
E	[mm]	vzdálenost díry od okraje
W	[mm]	efektivní šířka
D	[mm]	průměr díry
E/D	[-]	poměr mezi vzdáleností díry od okraje a průměrem díry
W/D	[-]	poměr mezi efektivní šířkou a průměrem díry
θ	[°]	úhel směru zatížení
V	[m ³]	objem

1 Úvod

Kompozitní materiály mají díky svým dobrým mechanickým vlastnostem při nízké měrné hmotnosti velký potenciál využití v letectví. Pro kompozitní materiály je možné nalézt využití napříč celým letounem. Jednotlivé součásti letounu mají specifické požadavky na mechanické a fyzikální vlastnosti. Z tohoto důvodu je nutné volit pro různé konstrukční celky odlišné materiály a postupy výroby.

V této práci bude proveden rešerše a srovnání kompozitních materiálů, technologií výroby a metod spojování kompozitních materiálů. Cílem rešerše bude výběr potenciálně vhodné kompozitní materiály, technologické postupy a metody spojování pro výrobu vybraných konstrukčních celků malého sportovního letounu z hlediska mechanických a fyzikálních vlastností, potenciálu na snížení hmotnosti letounu a finančních nákladů.

V praktické části budou porovnány potenciálně vhodné technologie výroby podvozkové nohy malého sportovního letounu navržené v DP Ing. Richarda Širokého „Návrh přistávacího zařízení rychlostního letounu“. Konceptní návrh malého sportovního letounu byl vypracován v DP Ing. Jakuba Valenty „Konceptní návrh rychlostního letounu“.

Z porovnávaných metod bude zvolen technologický postup vhodný pro výrobu podvozkové nohy. Výběr bude proveden s ohledem na obtížnost výroby, dosažitelnou kvalitu výrobku, použité materiály a výrobní náklady. Pro zvolený technologický postup budou navrženy formy a přípravky a popsán postup výroby. [1] [2]

2 Současný stav návrhu letounu a podvozkové nohy

V koncepčním návrhu bylo zvoleno, že letoun bude navržen a certifikován dle předpisu UL-2 z roku 2019, dle kterého je maximální hmotnost letounu 600 kg a maximální pádová rychlost 83 km.h⁻¹. To umožní navrhnout letoun s MTOM nad 300 kg a křídlem, jež má díky vyšší pádové rychlosti větší plošné zatížení a menší aerodynamický odpor.

Letoun bude soutěžit v kategorii Aeroplanes (FAI) a to konkrétně v kategorii C-1a/o pro kratší tratě, což umožní snížení maximální hmotnosti během letu pod 300 kg díky menšímu množství paliva, a v kategorii C-1a pro delší tratě, kde potřeba vyššího množství paliva způsobí zvýšení maximální hmotnosti během letu nad 300 kg.

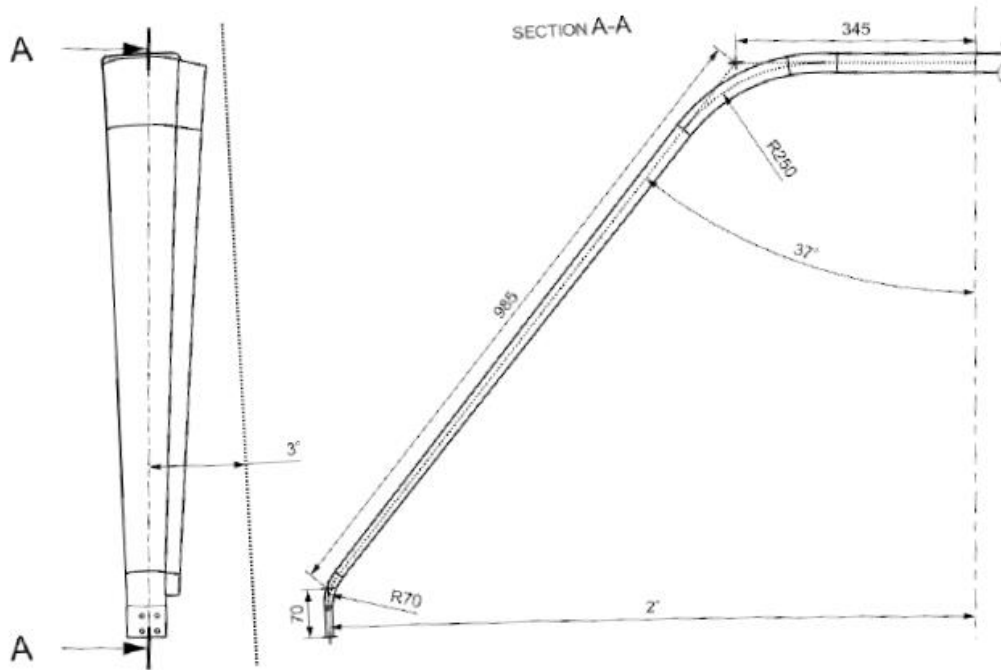
V DP Ing. Richarda Širokého byl proveden konstrukční návrh přistávacího zařízení, zejména pak podvozkové nohy, na kterou bude zaměřena praktická část této práce.

Podvozková noha byla navržena jako nedělená pružnice s nosníkovou konstrukcí ze třech nosníků, kde prostřední nosník je pouze v nejvíce namáhané části. Jednotlivé nosníky se skládají ze stojin a dvou pásnic – horní a spodní. Pásnice budou rozprostřeny po celém vnitřním obvodu průřezu nohy.

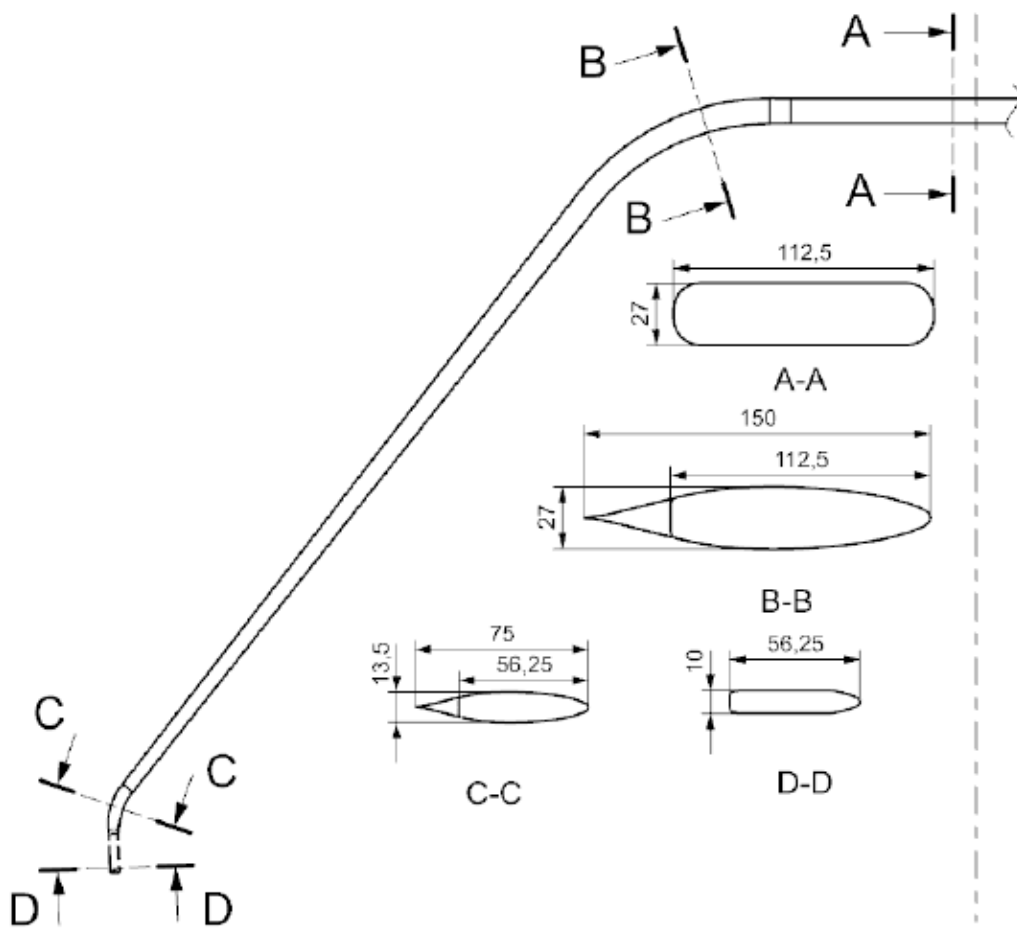
Tvar zvolené podvozkové nohy je znázorněn na Obr. 1, Obr. 2 a Obr. 3. Jako průřez podvozkové nohy byl zvolen symetrický letecký profil *NACA 66(3)-018*. V návrhu konstrukce byla provedena optimalizace pomocí MKP, na základě které byly pro jednotlivé konstrukční řezy zvoleny různé tloušťky pásnic a stojin, a tudíž i rozdílné počty vrstev laminátu. Počty vrstev a typy laminátu budou popsány v kapitole [1] [2] [3]



Obr. 1: 3D model podvozkové nohy [1]



Obr. 2: Základní rozměry podvozkové nohy [1]



Obr. 3: Rozměry vybraných průřezů podvozkové nohy [1]

3 Materiály používané v letectví

Pro výrobu prvních draků letounů v počátcích 20. století se používalo dřevo a plátno. Na přelomu 20. a 30. let 20. století se ukázala konstrukce ze dřeva pro komerční letouny jako nevyhovující a byla postupně nahrazena celokovovou konstrukcí draku letounu. [4]

3.1 Kovové materiály

Kovové materiály se v letectví hojně využívají i v dnešní době. Jsou to oceli a slitiny hliníku, titanu a hořčíku.

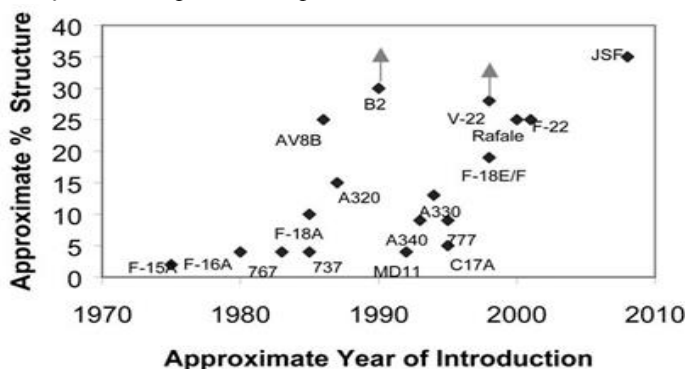
Nejznámějším kovovým materiálem používaným v letectví je Dural – slitina hliníku (90-96 %) a mědi (4-6 %) s přísadkami hořčíku a manganu. Dural má vysokou pevnost a tvrdost, při zachování nízké hmotnosti a je dobře obrobitelný. Na druhou stranu má nízkou korozivzdornost a obtížně se svařuje a eloxuje. Korozivzdornost se dá zvýšit povlakováním čistým hliníkem, tzv. Alclad. V letectví se nejčastěji používá Dural 2024, 6063 a 7075.

U kovových materiálů pro letectví dochází ke stálému zlepšování vlastností, příkladem kovového materiálu „budoucnosti“ je slitina hliníku s lithiem. Lithium v této slitině zajišťuje nižší hmotnost a zároveň zlepšuje mechanické vlastnosti – 1 % obsahu lithia ve slitině zajistí snížení hmotnosti o 3 % a zvýšení pevnosti o 10 až 15%. [5] [6] [7]

3.2 Nekovové materiály

Mezi nekovové materiály patří již zmíněné dřevo a plátno. Dřevo, konkrétně balsa, se využívá i v dnešní době samostatně v konstrukci kluzáků nebo jako jádro sendvičových laminátů. Od 70. let 20. století se v letectví začalo využívat dalších nekovových materiálů – kompozitních materiálů.

Graf 1: Nárůst použití kompozitních materiálů v letectví



V Graf 1 je vidět strmý růst v procentuálním zastoupení kompozitních materiálů ve struktuře letounů. [8]

4 Kompozitní materiály

Kompozitními se označují materiály ze dvou a více odlišných materiálů s výrazným rozhraním. Tímto spojením je docíleno vlastností, kterých by jednotlivé materiály osamoceně nedosáhly. Výsledné vlastnosti kompozitu jsou lepší než ty, které by vznikly součtem vlastností osamocených materiálů, tzv. synergický efekt. Spojováním základních materiálů se dosahuje lepších mechanických vlastností při nižší hustotě, což je výhodné v návrhu letounů. Dalšími vlastnostmi, kterých lze dosáhnout vhodnou kombinací základních materiálu je tepelná a elektrická vodivost, chemická a tepelná odolnost apod.

Za kompozity se dá považovat široké spektrum materiálů umělých i přírodních, proto se zavádí jednoduchá definice, která říká, že kompozit se skládá ze dvou základních částí odlišujících se v makroměřítku tvarem nebo složením. Tyto části se nazývají matrice (výplně, pojiva) a výztuže. Jednotlivé části se vzájemně neovlivňují, nerozpouští ani neslučují. Existují i tříložkové kompozity, kde třetí složkou je plnivo.

Vzhledem k zaměření této práce a zadanému dílu, pro který se bude provádět návrh technologického postupu výroby, se budu zabývat výhradně laminátovými kompozitními materiály s polymerní matricí a kontinuální výztuží ze skelných, uhlíkových či aramidových vláken. Dalším typem kompozitů, kterému se budu věnovat, jsou sendvičové lamináty.

Zbylé druhy kompozitních materiálů budou zmíněny pouze okrajově.

Hlavní důvody pro používání kompozitních materiálů v letectví jsou v Tab. 1. [9]

Tab. 1: Výhody využití kompozitních materiálů v letectví [9]

Snížení hmotnosti <ul style="list-style-type: none">- snížení spotřeby paliva- zvýšení doletu- možnost většího nákladu	Zlepšení letových vlastností <ul style="list-style-type: none">- lepší manévrovatelnost- lepší aerodynamika- snížení detekce letounu radarem
Snížení výrobních nákladů <ul style="list-style-type: none">- zmenšení počtu operací montáže- zmenšení počtu dílů- snížení ceny montáže- nižší výrobní náklady	Zmenšení nákladů na údržbu <ul style="list-style-type: none">- odolnost proti únavě materiálu- delší intervaly mezi kontrolami

4.1 Problémy dílů z kompozitních materiálů

Přestože kompozity nabízí mnoho zajímavých vlastností, je důležité zmínit i negativní vlastnosti, na které je potřeba myslet při návrhu kompozitního dílu. Negativní vlastnosti časté u kompozitních materiálů jsou:

Degradace materiálu. Ta se projevuje především u kompozitů s polymerní maticí, kde je degradace zapříčiněna okolními podmínkami: dlouhodobým vystavováním UV záření, změnami teplot, kontaktem s chemickými látkami atd. Při návrhu technologického postupu je důležité zvážit povrchové krytí kompozitního dílu. [8] [10]

Náchylnost na poruchu při rázovém zatížení. Na rozdíl od ostatních leteckých materiálů jako je Dural či ocel, mají kompozity vysokou náchylnost na porušení při rázovém zatížení. To může způsobit rychle šířící se trhliny, které mohou být obtížně zjistitelné. Na rázové zatížení trpí hlavně laminátové kompozity s výjimkou kompozitů s aramidovými vlákny. Ty rázy poměrně dobře pohlcují. U sendvičových laminátů tento problém nevzniká díky jejich struktuře, která tyto rázy dobře rozloží. [8] [10]

Závislost mechanických vlastností na teplotě. Polymerní matrice, konkrétně termoplastické, mají nízkou teplotu skelného přechodu T_g , a proto je jejich použití omezené pro nízké provozní teploty. Při požadavku na dobré mechanické vlastnosti za velmi vysokých teplot je možné volit kompozity s uhlíkovou maticí. [8] [10]

Delaminace. Zásahem do struktury kompozitu při výrobě mechanických spojů vzniká riziko delaminace – odlepení jednotlivých vrstev. Tomuto problému se budu věnovat v kapitole 11. [11]

Problematika certifikace dílů z kompozitních materiálů. Kompozitní materiály se odlišují od zbylých materiálů využívaných v letectví. Z tohoto důvodu bylo potřebné zavést zcela nové předpisy. Hlavními obavami u letounů z kompozitů je nárazuvzdornost – chování letounu při nárazu, žáruvzdornost, toxicita hořícího materiálu a chování materiálu po uhození bleskem. [12]

5 Matrice

Matrice plní funkci pojiva výztuže, dává kompozitu tvar, chrání výztuž před vnějšími vlivy a zajišťuje přenos napětí na výztuž. U matric je kladen důraz na dobrou adhezi s výztuží, schopnost odolat vlivům okolního prostředí a jednoduché a levné formování. Dalším požadavkem na matrici je, aby její mezní poměrné prodloužení bylo větší než mezní poměrné prodloužení vláken výztuže. Matrice by měla být schopna držet tvar i po porušení několika vláken.

Volba matrice má největší vliv na teplotní a chemickou odolnost, pevnost v tlaku, ve smyku a v příčném tahu.

V podkapitole 5.3 jsou porovnány základní vlastnosti vybraných materiálů vhodných pro použití v konstrukci malého letounu. [9]

5.1 Polymerní matrice

Polymerní matrice se dělí na termoplastické a reaktoplastické. Vlastnosti a technologie výroby dílů z polymerního kompozitu se pro tyto dva typy výrazně liší. [9]

5.1.1 Termoplasty

Termoplasty jsou polymery, které jsou za zvýšených teplot plastické či kapalné. Ochlazením se stávají pevnými. Tato změna může probíhat opakovaně.

Termoplasty mají nižší teplotu skelného přechodu T_g než reaktoplasty. Výhodami oproti reaktoplastům je minimální absorpce vlhkosti, menší hořlavost, toxicita a emisivita kouře, mají lepší chemickou odolnost a díky opakovatelnosti tavení je možné je recyklovat. U termoplastických kompozitů je možné spojování pomocí natavení a následného spojení. Nevýhodou termoplastů je obecně nižší teplotní odolnost v porovnání s reaktoplasty, proto se v letectví využívá převážně vysokoteplotních termoplastů, které se dokážou k reaktoplastům částečně přiblížit.

Vlastnosti termoplastů závisí na struktuře, podle níž se dělí na semi-krytalické a amorfni. Struktura je z velké části ovlivněna průběhem chladnutí.

Amorfni polymery mají náhodné uspořádání řetězcových struktur. Pod T_g mají vyšší pevnost, ale i vyšší křehkost než semi-krytalické polymery. Nad T_g dochází k prudkému měknutí, které znemožňuje provozování nad touto teplotou. Výhodou oproti semi-krytalům, je malá teplotní roztažnost, která umožňuje výrobu dílů s přísnými požadavky na přesnost.

Struktura semi-krystalických polymerů má uspořádané (krystalické) i neuspořádané (amorfní) části. Obecně mají horší mechanické vlastnosti, ale oproti amorfním polymerům je možné jejich použití i při teplotách nad T_g . Po překročení T_g dochází sice k poklesu pevnosti kvůli přítomnosti amorfní struktury, nicméně krystalická struktura nadále přenáší zatížení. Krystalická struktura zajišťuje výbornou chemickou odolnost. Výsledné vlastnosti polymeru závisí na míře uspořádání polymeru.

Při volbě materiálu je důležité vzít v potaz, že termoplasty mění své vlastnosti už před dosažením T_g . Tento pokles mechanických vlastností se projevuje především u amorfních polymerů.

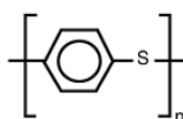
Nejčastěji se využívají v kompozitních materiálech v kombinaci se skelnými či uhlíkovými vlákny ve formě prepregů a UD pásek, které se nahřívají a následně vkládají do lisu. Další formou je granulát využívaný k injekčnímu vstřikování.

V letectví se využívají vysokoteplotní termoplasty, jako například polyfenylensulfid (PPS), polyetherimid (PEI), polyetheretherketon (PEEK) a polyetherketonketon (PEKK). [8] [9] [13] [14]

Polyfenylensulfid (PPS). Polymer se semi-krystalickou strukturou, T_g 80 °C, T_z v rozmezí 329-343 °C. Používá se pro svoji dobrou chemickou odolnost, dobré mechanické vlastnosti, nehořlavost a nízkou tepelnou roztažnost. Nevýhodou je jeho křehkost a na to navazující nízká odolnost proti rázům. Díky semi-krystalické struktuře je možné jeho použití i nad T_g . T_p se udávají do 200 °C. V závislosti na zvolené výztuži mohou být provozní teploty vyšší.

Příklad nevyztuženého materiálu používaného jako matrice je Techtron 1000 PPS od firmy Mitsubishi Chemical Advanced Materials. PPS se častěji dodává ve formě prepregů nebo UD pásek vyztužených skelnými či uhlíkovými vlákny. Příkladem této formy PPS je Toray Cetex TC1100 od firmy Toray Advanced Composites.

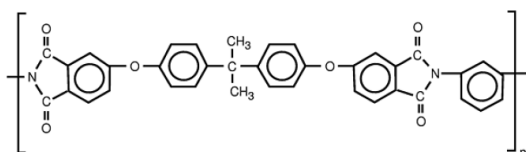
PPS je, jako matrice kompozitu, využíván například na Airbusu A340 v žebrování křídélek a kormidla, na náběžné hraně křídel a na vnitřních panelech letounu. [8] [9] [15] [16] [17]



Obr. 4: Chemická struktura PPS [8]

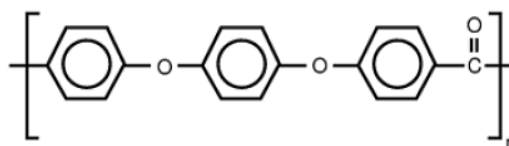
Polyetherimid (PEI). Polymer s amorfni strukturou, vysokou T_g dosahující 218 °C, která umožňuje využití v provozních teplotách okolo 170 °C, ale zároveň i vysokou T_z dosahující 360 °C. Díky amorfni struktuře má malou teplotní roztažnost a je možné dosáhnout vysoké přesnosti dílu. PEI má vysokou viskozitu, která stěžuje výrobu, a nízkou chemickou odolnost. Využívá se v interiérech letounů pro svojí dobrou ohnivzdornost a nízkou emisivitu kouře.

Příkladem na trhu je Ultem patřící společnosti SABIC. Provozní teplota Ultemu 9075 určeného pro letectví je do 200 °C. [8] [9] [18]



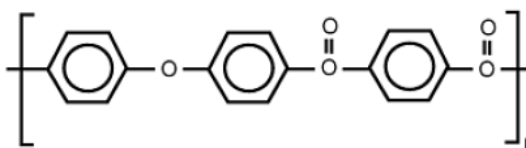
Obr. 5: Chemická struktura PEI [8]

Polyetheretherketon (PEEK). Polymer se semi-krytalickou strukturou, T_g 144 °C a teplotou zpracování dosahující 400 °C Nejznámější a nejvíce používaný polymer z řady termoplastů. Má dobré mechanické vlastnosti, je nehořlavý a odolný vůči vlivům okolních prostředí letounů. T_p se udávají do 180 °C pro nevyztužený PEEK a až 220 °C pro vyztužený. Nevýhodou je vysoká cena a malá odolnost proti UV záření. Na trhu je známý pod obchodní značkou Victrex 450G od stejnojmenné firmy. [9] [19]



Obr. 6: Chemická struktura PEEK [8]

Polyetherketonketon (PEKK). Od PEEK se liší chemickou strukturou, která při zachování dobrých mechanických vlastností zvyšuje T_g na 156 °C při nižší teplotě zpracování do 360 °C. Oproti PEEK má menší chemickou odolnost. Na trhu je známý například pod obchodní značkou Kepstan 8002 od společnosti Arkema. [9] [20]



Obr. 7: Chemická struktura PEKK [8]

Další typy termoplastů. Mezi další termoplasty patří polypropylen (PP), nylon 6 polyamid (PA6), nylon 12 (PA12) a další. [9]

5.1.2 Reaktoplasty

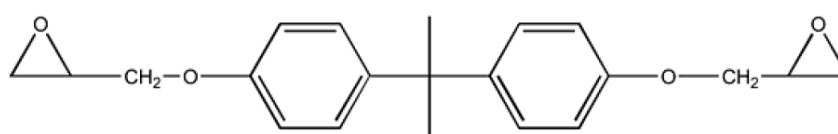
Reaktoplasty jsou polymery, u kterých se zesíťování dosahuje pomocí tepla, tlaku či působením katalyzátoru. Zesíťování – vytvrzování, je nevratné. V současnosti jsou reaktoplasty využívány častěji než termoplasty, díky jednodušší a levnější výrobě. [8] [9]

V kompozitních materiálech se jako matrice využívá několik druhů reaktoplastů. Za zmínku stojí následující druhy:

Epoxidové pryskyřice (EP). EP jsou charakteristické epoxidovými skupinami v molekule. Vyznačují se vysokou pevností, malým teplotním smrštěním, dobrou přilnavostí a smáčivostí k různým povrchům, elektrickou izolací, chemickou odolností a nízkou cenou. Oproti termoplastům je u dílů z EP obtížnější jejich spojování, obvykle je potřeba využití mechanických nebo lepených spojů. Dále jsou hořlavé a toxické a není u nich možná recyklace. Nevytvrzené jsou v kapalném stavu.

Vytvrzovací teploty se pohybují v rozmezí 5-260°C. V závislosti na zvoleném katalyzátoru a parametrech vytvrzování lze získat EP s velice odlišnými Vytvrzování lze urychlit zvýšením vytvrzovací teploty. Zvýšená teplota vytvrzování zároveň zlepšuje výsledné mechanické vlastnosti.

V současnosti nejvíce používanou epoxidovou pryskyřicí je diglycidyl ether bisphenol-A.



Obr. 8: Chemická struktura diglycidyl ether bisphenol-A [9]

Díky malému teplotnímu smrštění (max. 2 %) se využívají i pro součásti velkých rozměrů.

Příklad EP běžné pevnosti certifikované pro letectví určené pro ruční laminaci je L 285 MGS. Vysokopevnostní EP určená do prepregů je například HexPly M21. Pro vakuovou infuzi se volí EP s nízkou viskozitou, např. LH 288 od Havel Composites. [9] [21] [22]

Bismaleimidové pryskyřice (BMI). BMI mají výbornou zpracovatelnost a dobré mechanické vlastnosti i za zvýšených teplot ve vlhkém i suchém prostředí. Nejčastějším základním stavebním prvkem BMI je 4,4'-bismaleimidodifenylmetan.

Vytvrzování BMI je obdobné jako u EP. Kompozity s BMI matricí se obvykle dodávají ve formě prepregů. Lepších mechanických vlastností se dosahuje dodatečným tepelným zpracováním za vyšší teploty než vytvrzovací.

V porovnání s EP nabízí BMI lepší či srovnatelné mechanické vlastnosti při vyšších teplotách, obdobné technologie výroby součástí jako z EP za cenu vyšších výrobních nákladů než EP. Oproti EP je u BMI pryskyřic problém s hmotnostními úbytky způsobenými oxidací. Díly z BMI mají z tohoto důvodu sníženou životnost.

Příkladem BMI matrice využívané u prepregů je HexPly F650 od firmy Hexcel. [8] [9] [22]

Další typy reaktoplastů. Další typy pryskyřic, které stojí za zmínku, ale nebudou podrobně rozebrány jsou: polyimidové, polyesterové fenolické nebo kyanoesterové pryskyřice. Tyto pryskyřice mají horší mechanické vlastnosti a špatnou chemickou a tepelnou odolnost nebo jsou finančně nákladné oproti EP a BMI. [9]

5.2 Uhlíkové matrice

Uhlík má velmi vysokou teplotu tání, proto je zapotřebí vytvořit matici inkluzí uhlíku. Na to existuje hned několik způsobů. Dva základní jsou: pyrolýzou fenolové pryskyřice, kdy dochází k rozkladu pryskyřice za vzniku uhlíkové matrice, a chemickou depozicí uhlíku z plynné fáze. Tyto metody se upravují, kombinují a několikrát opakují. K vyplnění pórů se využívá karbonizace. Vzhledem k obtížnosti výroby se náklady pohybují v řádech stovek tisíc dolarů.

Výsledná uhlíková matrice se nejčastěji používá v kombinaci s uhlíkovými vlákny, takzvaný uhlík-uhlíkový laminát, a dosahuje výborných vlastností až do teplot 2500 °C, při minimálním smrštění. Vysokým obsahem grafitu se zajišťuje teplotní a elektrická vodivost.

Nevýhodou uhlíku je náchylnost na oxidaci. Tomu se předchází povrchovou úpravou materiálu. Používají se povlaky vzniklé nanesením vrstvy karbidu křemíku, depozicí vzácných kovů z plynné fáze atd.

Uhlíkové matrice se používají výhradně ve vesmírných aplikacích nebo ve vojenském průmyslu. [9]

5.3 Srovnání vlastností vybraných polymerních matric

V Tab. 2 jsou porovnány obecné charakteristiky termoplastů a reaktoplastů, které nás u matric zajímají: teplota zpracování, doba zpracování, provozní teplota, chemická odolnost a pevnost. V Tab. 3 jsou pak vypsány konkrétní hodnoty.

Tab. 2: Porovnání charakteristických vlastností polymerních materiálů [9] [23]

Typ polymeru	Teplota zpracování	Doba zpracování	Provozní teplota	Chemická odolnost	Pevnost	Teplotní roztažnost	Odolnost proti únavě
Reaktoplast (běžná EP)	<u>Nízká</u>	Vysoká	<u>Vysoká</u>	<u>Vysoká</u>	Nízká	<u>Nízká</u>	<u>Vysoká</u>
Termoplast	Vysoká	<u>Nízká</u>	Nízká	Nízká	<u>Vysoká</u>	Vysoká	Nízká

Tab. 3: Konkrétní hodnoty jednotlivých materiálů [9] [24]

	ρ [g.cm ⁻³]	T_g [°C]	T_z [°C]	T_p ** [°C]	G [GPa]	σ_{pt} [MPa]	ϵ_p [%]	α [10 ⁻⁶ .K ⁻¹]
EP	1,1-1,4	95-175	20-200	*	3-6	35-100	1-6	60
BMI	1,25	150-220	175	205	4,6	103	4,8	44
PPS	1,36	88	329-343	200	3,8	65	4	54
PEI	1,27	218	316-360	170	3,3	110	60	62
PEEK	1,26-1,32	143	382-399	180	3,6	93	50	47

*Závisí na typu EP a způsobu vytvrzení, běžné epoxidové pryskyřice mají provozní teploty okolo 70 °C, vysokoteplotní EP mohou mít T_p až k 260 °C.

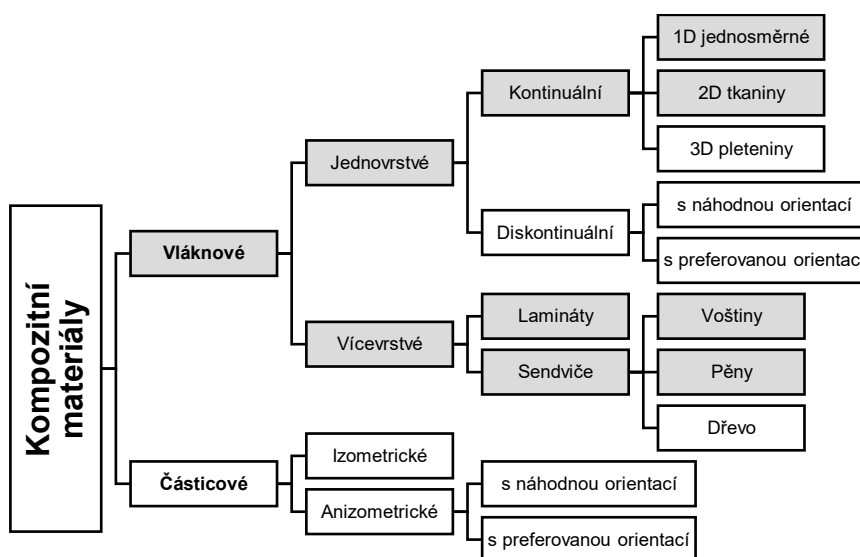
**Vycházím z doporučení pro konkrétní materiály zmíněné u jednotlivých typů polymerů.

Vzhledem ke kusové výrobě a finančním možnostem ÚLT bude pro výrobu malého sportovního letounu voli kompozity s matricí z epoxidové pryskyřice kvůli nízké pořizovací ceně, jednoduchosti zpracování a dostačujícím mechanickým a fyzikálním vlastnostem. EP je také nejčastější matricí prepregů.

6 Výztuže

Výztuže v kompozitech zajišťují přenos zatížení, pevnost a tuhost. Dalšími pozitivními vlastnostmi může být teplotní odolnost a odolnost proti creepu. Pro letecký průmysl jsou mechanické vlastnosti obvykle uváděny jako měrné, tzn. vztažené k objemové hustotě, $\frac{\sigma_{Pt}}{\rho} [10^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}]$; $\frac{E}{\rho} [10^6 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}]$. Dělí se například podle složení na skelné, uhlíkové, aramidové atd. [9]

Kompozitní materiály lze rozdělit dle geometrie výztuže podle následujícího diagramu



Obr. 9: Diagram rozdělení kompozitních materiálů podle geometrie výztuže [25]

Vzhledem k zaměření této bakalářské práce se budu zabývat výhradně zvýrazněnými typy kompozitních materiálů.

Vláknová výztuž má vysoce anizotropní vlastnosti, a proto se obvykle používají ve formě laminátů, nebo sendvičových laminátů. Lamináty se skládají z několika vrstev, tzv. lamin, které jsou vzájemně orientované pod různými úhly. Sendvičové lamináty se od běžných laminátů liší tím, že prostřední vrstva – jádro, je tvořena lehkým materiálem – pěnou, voštinou nebo balsou.

6.1 Skelná vlákna

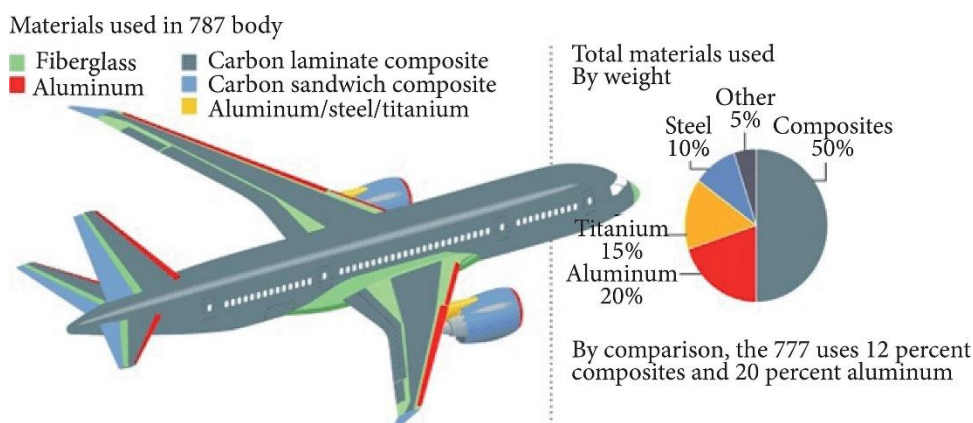
Ze zmíněných typů vláken mají nejnižší mechanické vlastnosti, ale jsou pro jednoduchou výrobu, cenu, dobrou dostupnost, inertnost a chemickou i tepelnou odolnost jsou často využívaným typem výztuže.

Vyrábí se spojením nad teplotou tání křemíku a přídavných minerálů obsahujících oxidy a následným rychlým ochlazením. Nabízí dobrou pevnost, chemickou odolnost a jsou inertní. Skelná vlákna se nejčastěji dělí dle charakteristické vlastnosti. Pro popis jednotlivých typů se používá označení pomocí písmen, viz. Tab. 4, která určují jejich charakteristickou vlastnost.

Tab. 4: Rozdělení skelných vláken [9]

	Označení	Význam označení	Charakteristická vlastnost
Obecné	E-glass	electrical	nízká elektrická vodivost
Speciální	S-glass	strength	vysoká pevnost
	C-glass	chemical	vysoká chemická odolnost
	M-glass	modulus	vysoká tuhost
	A-glass	alkali	vysoce alkalické nebo ze sodného vápna
	D-glass	dielectric	nízká dielektrická konstanta

Skelná vlákna se nejčastěji používají ve formě rovingů, tkanin, rohoží či ve formě nasekaných vláken. Polymerní kompozity se skelnými vlákny se označují GFRP. Na Obr. 10 je znázorněno použití GFRP v draku letounu Boeing 787 Dreamliner. (GFRP zvýrazněno zeleně.)



Obr. 10: Materiály použité v draku letounu Boeing 787 Dreamliner [26]

Příkladem výztuže ze skelných vláken jsou například suché skelné tkaniny Aeroglass 163, Aeroglass 280 a Aeroglass 390. Tyto tkaniny se dodávají v keprové či plátňové vazbě. Příkladem skelné prepregové tkaniny je XPREG-XC130. [9] [21]

6.2 Uhlíková vlákna

Společně se skelnými vlákny jsou to nejčastěji využívané výztuže v letectví. Vyrábí se z polyacrylonitrilu (PAN) nebo z ropné smoly (PITCH). Obě metody se částečně liší, ale společné operace jsou natahování/namotávání, stabilizace za zvýšené teploty (200-300 °C),

karbonizace, grafitizace, povrchová úprava proti oxidaci a případné namáčení v pryskyřici. Uhlík ve formě whiskerů se vyrábí odpařováním uhlovodíkových plynů.

V porovnání s Duralem mají uhlíková vlákna až sedmkrát vyšší pevnost, dvakrát vyšší tuhost a jsou 1,5krát lehčí. Jejich výborné únavové vlastnosti předčí většinu používaných kovových materiálů a v kombinaci s pryskyřicí mají výbornou korozivzdornost. Mechanické vlastnosti uhlíkových vláken se s rostoucí teplotou v neoxidujících prostředích zlepšují.

Vybrané vlastnosti různých typů uhlíkových vláken jsou zmíněny v Tab. 5.

Přes vysoké výrobní náklady lze dosáhnout nižších nákladů v průběhu životního cyklu součásti díky snížení hmotnosti, a tudíž spotřeby paliva, větší spolehlivosti a jednodušší údržbě. V letectví se používá v kombinaci s polymerní matricí ve většině částí draku. K výrobě částí letounů je nejčastěji využíváno prepregů, tj. uhlíkových vláken namočených v pryskyřici. Na Obr. 10 jsou popsány materiály použité v konstrukci draku letounu Boeing 787 Dreamliner. (Polymer vyztužený uhlíkovými vlákny – CFRP, carbon fiber reinforced plastic je zvýrazněna šedou barvou.)

Příkladem jednosměrných uhlíkových tkanin jsou tkaniny UDO dodávané tuzemskou firmou Havel Composites. Dodavatelem uhlíkových vláken je například firma Hexcel (HexTow) a Toray (T300, T700). [9] [21] [27] [22]

6.3 Aramidová vlákna

Prvně vyvinuta společností DuPont, a díky tomu známá hlavně pod obchodní značkou Kevlar. Aramidová vlákna mají nejvyšší poměr mezi pevností a váhou. Nejčastěji jsou zpracovávána ve formě přízí a rovingů, ze kterých jsou poté vyráběny tkaniny, prepregy či pásy. V letectví jsou využívána spíše ve vyztužích než v celých součástech. V letectví se projevuje jejich negativní vlastnost, že nasakují vlhkost, což zhoršuje výsledné vlastnosti. Mají dobrou odolnost proti rázovým zatížením a zachovávají si dobré vlastnosti při vyšších teplotách. V letectví se nejčastěji používá vysoce houževnatý Kevlar 29 nebo vysokomodulový Kevlar 49. Pro náročné aplikace lze použít vysokopevnostní Kevlar 149. [9] [10] [28]

6.4 Srovnání vlastností vybraných vláken

V Tab. 5 je srovnání mechanických vlastností jednotlivých typů vláken.

Tab. 5: Srovnání vlastností vybraných vláken [9]

		ρ [g.cm ⁻³]	E_1 [GPa]	E_1/ρ [10 ⁶ .m ² .s ⁻²]	σ_{pt} [MPa]	σ_{pt}/ρ [10 ⁶ .m ² .s ⁻²]	ν [-]	α [9] [10 ⁻⁶ .K ⁻¹]
Skelná	E-glass	2,54	72	28	3450	1358	0,2	6,3
	S-glass	2,48	86	35	4500	1815	0,22	0,9
Uhlíková	SM	1,8	240	133	4900	2722	-	0,5
	IM	1,78	276	155	5688	3196	-	-0,9
	HM (PAN)	1,83	430	235	4800	2623	0,25	-1,1
	HM (Pitch)	2	520	260	1900	950	0,34	-4
Aramidová	HM	1,44	112,4	78	3000	2083	0,36	-5,2

V Tab. 6: Srovnání kompozitních laminátů s běžnou EP a $v_f = 50\%$ jsou porovnány vlastnosti laminátových kompozitů s různými typy výztuže. Pro porovnání jsou uvedeny vlastnosti leteckého Duralu 7075-T6. Zmíněné lamináty mají výplň z epoxidové pryskyřice a $v_f = 50\%$.

Tab. 6: Srovnání kompozitních laminátů s běžnou EP a $v_f = 50\%$ [9]

Typ výztuže	ρ [g.cm ⁻³]	E [GPa]	$\frac{E}{\rho}$ [10 ⁶ .m ² .s ⁻²]	σ_{pt} [MPa]	$\frac{\sigma_{pt}}{\rho}$ [10 ³ .m ² .s ⁻²]	σ_{pd} [MPa]	$\frac{\sigma_{pd}}{\rho}$ [10 ³ .m ² .s ⁻²]
7075-T6	2,79	69	25	570	204	570	204
CFRP (AS4)	1,55	145	94	1482	956	1227	792
CFRP (HM)	1,63	207	127	1276	783	1020	626
Aramid	1,38	59	30	1751	880	496	249
S-glass	1,99	83	60	1310	949	290	210
E-glass	1,99	52	26	1103	554	490	246

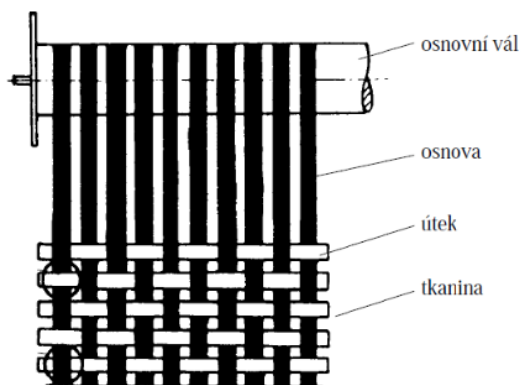
Pro nosné součásti – pásnice, stojiny apod., se volí uhlíkové lamináty. Kritická místa lze vyztužit Kevlarovými vlákny. Pro méně zatěžované součásti se volí skelná vlákna, zejména pro dobrou dostupnost a nízkou cenu.

7 Tkaní vláken

V praxi se většinou využívá vláken ve formě tkaniny. Tkanina ulehčuje proces výroby a zajišťuje správnou orientaci vláken, díky které se dosahuje požadovaných vlastností v daných směrech. Tkaniny se vyrábí z přízí či rovingů. Tkaniny se dělí dle orientace vláken na jednosměrné (UD), biaxiální a multiaxiální. Dále lze tkaniny rozdělit dle typu vazeb mezi vláknky na plátnové, keprové nebo atlasové.

Významným parametrem u tkanin je gramáž, tj. plošná hustota (FAW [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$]), která ovlivňuje hmotnost a tloušťku laminy. Hodnoty gramáže se pohybují od 15 do 600 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$. Dále se u uhlíkových vláken udává množství vláken v jedné přízi (označení 1K, 3K, 6K, 12K atd.). 12K například znamená, že v jedné přízi se nachází 12 tis. uhlíkových vláken. S rostoucím počtem vláken v přízi klesá jemnost, poddajnost a prosycovatelnost, ale zvyšuje se pevnost a tuhost a klesá cena materiálu. S rostoucím počtem vláken v přízi se zpravidla zvyšuje plošná hustota tkaniny. Výjimkou je tkanina s roztaženými přízemi, tzv. *Spread Tow*.

V následující podkapitole budou popsány jednotlivé typy tkanin. Pro lepší pochopitelnost je dobré objasnit následující pojmy týkající se tkanin. (viz. Obr. 11). Osnova, anglicky warp, je soustava paralelně natažených nití (přízí) určující délku tkaniny. Mezi osnovu je vkládán útek, anglicky weft, což je soustava paralelně natažených nití (přízí) kolmých na osnovu, které jsou plétány mezi osnovu. Kombinací osnovy a útku vzniká tkanina. [9]



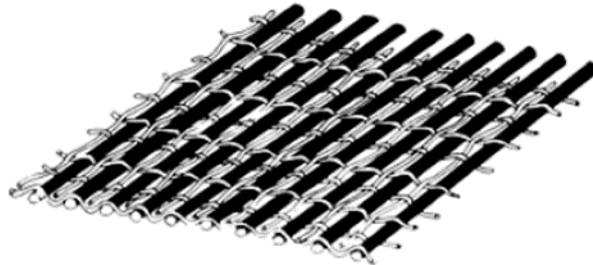
Obr. 11: Objasnění pojmů týkajících se tkanin [29]

7.1 Rozdělení tkanin dle typu vazeb

V této podkapitole budou zmíněny základní typy vazeb tkanin, které se nejčastěji používají. Pro každý typ vazby bude zmíněn způsob propletení vláken, vlastnosti a využití. Pokud se vlákna v útku a osnově liší, nazývají se tyto tkaniny hybridními.

7.1.1 Jednosměrná vazba (UD)

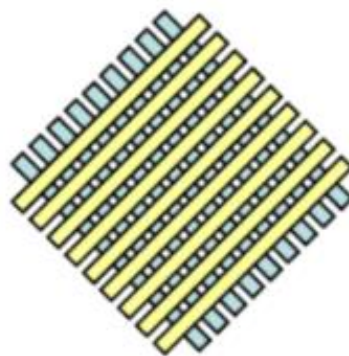
Vlákna přenášející zatížení jsou vkládána pouze do osnovy a nejsou nijak vzájemně proplétána. V útku bývají spojeny jemnými vlákny, které plní pouze spojovací funkci a nepřenáší zatížení. Tento typ tkaniny se využívá ve speciálních aplikacích, kde je požadována pevnost pouze v jednom směru, nebo v UD páskách pro strojní kladení. [9]



Obr. 12: Jednosměrná (UD) tkanina [9]

7.1.2 Biaxiální vazba

Tento typ tkaniny se skládá ze dvou vrstev jednosměrné tkaniny vzájemně orientované pod úhlem $\pm 45^\circ$. Díky vzájemné orientaci vláken vykazují tkaniny s tímto typem vazby kvazi-izotropní vlastnosti. [9]



Obr. 13: Biaxiální tkanina [30]

7.1.3 Multiaxiální vazba

Předešlé dva typy vazeb přenáší pouze rovinná zatížení. Pokud je vyžadován přenos zatížení ve všech třech hlavních osách je potřeba zvolit multiaxiální tkaninu. Tento typ tkaniny se skládá z jednosměrných či biaxiálních tkanin, které jsou paralelně propletené. [9]

U zmíněných vazeb (s výjimkou multiaxiální vazby) nedocházelo k vzájemnému křížení přízí. Následující vazby se od předchozích liší propletením přízí v útku a osnově.

7.1.4 Plátňová vazba

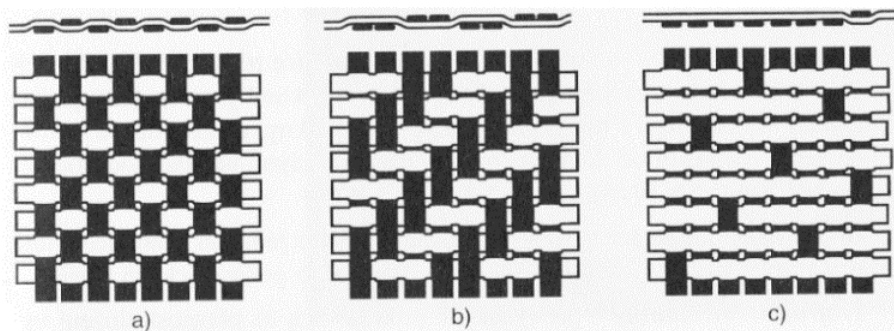
Tato vazba zajišťuje nejvíce vazných bodů, což zajišťuje dobré výsledné mechanické vlastnosti za cenu nízké flexibility, což stěžuje výrobu dílů s komplikovanou geometrií. Má dobrou rozměrovou stálost a malé otřepty při řezání. Využívá se u rovinných aplikací. V materiálových listech se lze setkat s označením: PW, plain weave, plátno apod. (Obr. 14 (a)) [9]

7.1.5 Keprová vazba

Kepr nezajišťuje takové vlastnosti jako plátňová vazba, ale umožňuje výrobu součástí s komplikovanou geometrií (záhyby apod.), díky menší míře propletení. V materiálových listech se označuje: 2x2 kepr, 4x4 twill apod. Číslem se označuje způsob propletení. Na Obr. 14 je příklad kepru 2x2. (Obr. 14 (b)) [9]

7.1.6 Atlasová vazba

Vazba s nejmenší mírou propletení. U této vazby nedochází k takovému vychýlení vláken, což umožňuje vyrobít součásti s hladkým povrchem, avšak kvůli malé míře propletení má také nejmenší stabilitu vláken. V letectví se využívá tkanin s touto vazbou například v oblasti centroplánu. V materiálových listech se lze setkat s označením: 5HS (5 harness satin neboli pětivazný atlas), 8HS apod. (Obr. 14 (c)) [9]



Obr. 14: Plátňová (a), keprová 2x2 (b) a atlasová (c) vazba [31]

Pro zatěžované plošné díly se volí nejčastěji plátňová, jednosměrná či biaxiální tkanina s vyšší gramáží 200-400 g.m⁻². Jednosměrná tkanina se volí pro díly zatěžované pouze v jednom směru. Zbylé dvě tkaniny se volí pro díly zatěžované ve více směrech. Pro díly s komplexní geometrií se volí keprové tkaniny a pro zajištění hladkého povrchu se volí tkanina atlasová s nízkou gramáží 40-80 g.m⁻².

7.2 Orientace vláken

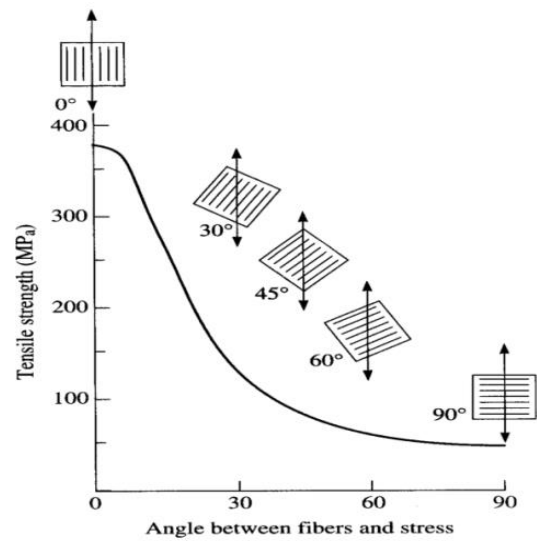
Základním stavebním prvkem laminátu jsou jednotlivé vrstvy, tzv. laminy.

Kvůli anizotropii vláken výztuží se jednotlivé laminy kladou pod různými úhly orientace vůči zatížení. Tím se dosahuje kvazi-izotropních vlastností.

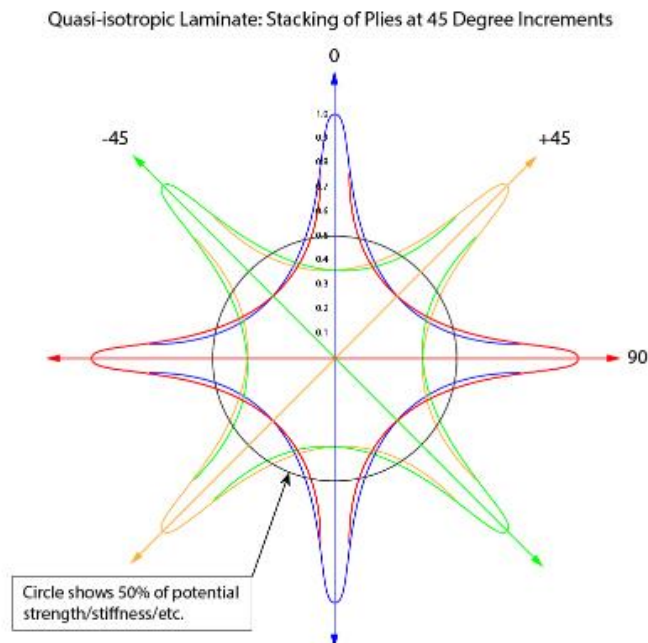
Nejčastěji se volí úhly 0° , $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$. Pokles meze pevnosti v závislosti na orientaci vláken vůči zatížení je v Graf 2.

V Graf 3 je znázorněn relativní pokles mechanických vlastností kvazi-izotropního laminátu v závislosti na orientaci laminátu vůči zatížení. Je patrné, že výsledné vlastnosti, kterých lze u laminátu dosáhnout, se přibližně rovnají střední hodnotě mechanických vlastností v ose laminy.

Graf 2: Pokles meze pevnosti podle orientace vláken [62]



Graf 3: Mech. vlastnosti kvazi-izotropního laminátu podle orientace zatěžování [32]



Lamináty by se měli skládat z lamin tak aby byly balancované a symetrické, tj. se symetrickým rozdělením hmotnosti a orientace vláken vůči střední rovině laminátu. Zamezí se tak kroucení laminátu při vytvrzení.

Pro potřeby této BP postačí pro popis mechanických vlastností laminátů směšovací pravidlo.

Při dimenzování je nutné znát také teoretickou tloušťku laminy t_l . Ta se určí z následujícího vztahu: [9]

$$t_l = \frac{FAW}{\rho_f \cdot v_f} \cdot 10^{-3} \quad (6.1)$$

7.3 Směšovací pravidlo

Za následujících předpokladů:

- Lamina se skládá z jednosměrně orientovaných kontinuálních vláken.
- Prodloužení laminy se rovná prodloužení matrice a výztuže.
- Platí Hookův zákon.
- Pro objemové podíly matrice a výztuže platí $v_f + v_m = 1$.

platí tyto vztahy:

$$E = E_f v_f + (1 - v_f) E_m \quad (6.2)$$

$$G = \frac{1}{\frac{v_f}{G_f} + \frac{1 - v_f}{G_m}} \quad (6.3)$$

$$\sigma_{pt} = \sigma_{fpt} v_f + (1 - v_f) \sigma_{mpt} \quad (6.4)$$

$$v = v_f v_f + (1 - v_f) v_m \quad (6.5)$$

$$\rho = \rho_f v_f + (1 - v_f) \rho_m \quad (6.6)$$

7.4 Prepregy

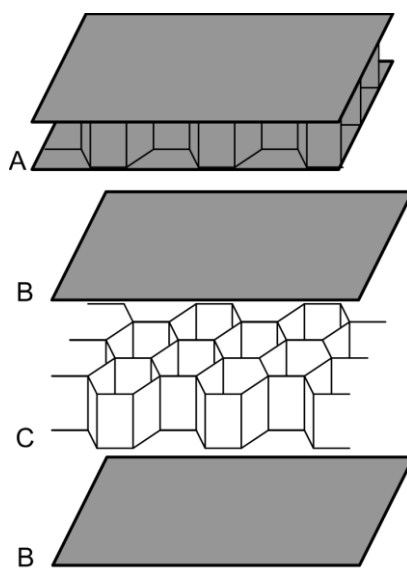
Pro zajištění přesných vlastností, vyššího v_f a lepší manipulovatelnosti je využíváno prepregů. Prepregy jsou tkaniny předimpregnované pryskyřicí, které jsou určeny k přímému pokládání do formy. Nevýhodou je náročné skladování, protože se musí spotřebovat v omezeném časovém úseku (okolo jednoho roku) a musí se uchovávat při teplotách okolo -20 °C. U prepregů se vyžaduje lisování pro odstranění přebytečné pryskyřice a vytvrzují se za zvýšené teploty. Lisování může být u dílů s komplexní geometrií omezující. [9]

8 Sendvičové lamináty

V předchozích kapitolách byly popsány běžné laminátové kompozity, které se používají, pokud se vyžaduje vysoká pevnost. Dalším speciálním druhem kompozitu je sendvičový laminát, který se využívá na místech, kde je požadována nízká hmotnost a zvýšená tuhost.

Tento typ kompozitu se skládá z jádra, z obou stran překrytého vnějším potahem. Potah je obvykle tvořen běžným laminátem. Jádro je tvořeno voštinou, pěnou nebo balsou. Vnější potahy jsou nejčastěji tvořeny polymerními kompozity vyztuženými skelnými či uhlíkovými vlákny, případně kovovými (nejčastěji duralovými) pláty.

Oproti běžným laminátovým kompozitům dosahuje sendvič až trojnásobné tuhosti, poloviční hmotnosti a dobrých izolačních vlastností. Jádro sendviče má nízkou objemovou hustotu, dává výslednému kompozitu tvar a slouží k přenosu smykového napětí. Vnější potah je sám o sobě velice slabý a flexibilní. Spojením s jádrem vzniká pevná a tuhá struktura s nízkou hmotností. V kompozitu slouží vnější potahy k přenosu ohybových napětí. [9] [33]



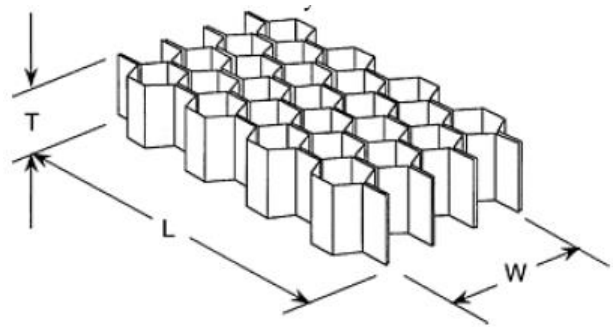
Obr. 15: Části sendvič. laminátu: A – sendvičový panel, B – potahy, C – jádro [34]

8.1 Voštiny

Tento typ jádra, nejčastěji vyráběný s hexagonální strukturou se také nazývá honeycomb. Voštiny se nejčastěji vyrábí z polymerů (PEI, PP, PU), skelných či aramidových vláken, nebo kraftového papíru. Pro vysokoteplotní aplikace se využívá voštin z hliníkových slitin, uhlíkových vláken nebo keramiky.

Voštiny se nejčastěji vyrábí lepením a následnou expanzí. Kovové voštiny se vyrábí pájením a keramické a termoplastické voštiny se vyrábí vytlačováním.

Hexagonální struktura zajišťuje svým tvarem výborný přenos zatížení a stabilitu jádra. Existuje mnoho modifikací, jako například vyztužené či přeexpandované hexagonální jádro, dále existují struktury Flex-Core a Tube-Core, které jsou pod ochranou známkou společnosti Hexcel Corporation.



Obr. 16: Hexagonální struktura voštiny s vyznačenými hlavními směry zatížení [9]

Voštiny jsou anizotropní. Nejvyšší pevnost mají ve směru T (napříč tloušťkou voštiny). Smyková pevnost je nejvyšší ve směru L (podél lepených spojů). Ve směru W (napříč lepenými spoji) je smyková pevnost nižší.

Voštiny nejsou příliš vhodné pro infuzní technologie výroby, protože je potřeba zajistit, aby pryskyřice nezatékala do voštiny.

V letectví se nejvíce používá aramidová voština Nomex od společnosti DuPont. [9] [35]

8.2 Pěny

Na rozdíl od voštiny se pěny vyznačují izotropními vlastnostmi. Pěny mají velice nízkou objemovou hustotu ($0,032-0,288 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$). Oproti voštinám mají pěny nižší tepelnou odolnost, odolnost proti rázům a horší únavové vlastnosti, ale jsou levnější. Nízkopevnostní levné pěny se vyrábí z polystyrenu (PS). Běžně používané pěny se střední pevností se vyrábí z polyuretanu (PU) nebo polyvinylchloridu (PVC) – AIREX C70, 3A Composites Core Materials. Mezi vysokopevnostní se řadí polymethakrylimidová (PMI) pěna Rohacell, Evonik Industries. Pěna Rohacell má oproti pěně AIREX vyšší teplotu formování – Rohacell 180-200 °C, AIREX okolo 100 °C. [9] [21] [36]



Obr. 17: Sendvičový laminát s jádrem z PS pěny [37]

8.3 Balsa

Balsa je dřevo získané z balzovníku jihoamerického. Jeho objemová hustota je až dvakrát nižší než u běžného dřeva, avšak je vyšší než u ostatních typů jader. Nejčastěji se využívá při stavbě leteckých modelů. [9]

8.4 Srovnání jader sendvičových laminátů

V Tab. 7 jsou obecně srovnány jednotlivé typy jader sendvičových laminátů. V Tab. 8 jsou uvedeny konkrétní hodnoty pro vybrané materiály.

Tab. 7: Srovnání jader sendvičových laminátů [9]

	Voština	Pěna	Balsa
ρ [g.cm ⁻³]	0,029-0,200	0,032-0,288	0,096-0,288
Odolnost proti vlhkosti	Výborná	Výborná	Normální
Chemická odolnost	Výborná	Dobrá	Dobrá
Žáruvzdornost	Výborná	Dobrá	Špatná
Teplotní odolnost [°C]	do 177 (lepená)	do 80	do 95
Pevnost a tuhost	Výborná	Normální	Výborná
Odolnost proti rázům	Výborná	Normální	Dobrá
Únavové vlastnosti	Výborné	Špatné	Dobré
Cena	Nízká (kraft. papír), Velmi vysoká (uhlík)	Velmi nízká (PU), Vysoká (PMI)	Normální

Tab. 8: Srovnání charakteristických vlastností jader

		Nomex [35]	Rohacell A [36]	Baltek SB [38]
ρ	[g.cm ⁻³]	0,029-0,2	0,032-0,075	0,109-0,285
E	[GPa]	0,03-0,14	36-92	1,7-6,6
σ_{pt}	[MPa]	0,6-4(L)/0,3-2,7(W)	1-2,8	9-18,3
σ_{pd}	[MPa]	0,8-26,6	0,4-1,5	5,5-22
G	[GPa]	-	13-29	0,13-0,362
τ_p	[MPa]	-	0,4-1,3	1,8-5,2

Sendvičové lamináty se používají na dílech, kde se požaduje vysoká. Použití sendvičových materiálů je omezené pouze na plošné díly. Využívají se tak zejména na křídla, trup a ocasní plochy. V kombinaci s prepregy se nejčastěji využívá Nomexová voština. Pro díly vyráběné infuzními metodami se využívají pěnová jádra. Na nosné součásti se využívají PMI pěny (Rohacell). Pokud pěnové jádro plní pouze tvarovou funkci nebo při malých zatíženích se volí PU a PS pěny.

9 Výroba forem a modelů

Výrobě samotných dílů předchází výroba modelů a forem. Model slouží zejména jako pozitivní forma pro výrobu negativních laminátových forem.

Modely se vyrábí ze dřeva, umělého dřeva, překližky, modelářské hlíny, pěny či tmelu. Po dosažení požadovaných rozměrů se obvykle modely povrchově upravují pomocí laku, topcoatu nebo gelcoatu.

Formy se dělí na otevřené (jednodílné) a uzavřené (dvojdílné). Dále se dělí podle tvaru na formy negativní a pozitivní. Pozitivními formami mohou být pěnová jádra, která jsou součástí dílu.

Pro výrobu forem se materiály volí dle sériovosti a podmínek výroby. Pro kusovou výrobu, kde nedochází k vytvrzení za zvýšených teplot, se volí formy ze dřeva nebo pěny. Pokud se díl vytvrzuje za zvýšené teploty, volí se obvykle formy z uhlíkového/skelného laminátu či kovu. K výrobě lisovacích forem a pro metodu RTM se využívá kovových forem.

Formy ze dřeva se nejčastěji vyrábějí z MDF desek, které se lepí a následně obrábějí na CNC frézce. Kontaktní povrch dřevěné formy se obvykle lakuje.

Laminátové formy se vyrábějí nanášením na model. Obvykle se volí stejný typ výztuže jako výztuž dílu. K zajištění hladkého povrchu formy se na svrchní vrstvu formy používá jemné tkaniny, gelcoatu či laku.

Kovové formy se vyrábějí například odléváním a následným obráběním. Kvůli cenám těchto výrobních postupů jsou velice nákladné a používají se zejména pro vysokotlaké infuzní a lisovací technologie. Kovové formy je vhodné využívat pro sériovou výrobu. Hladkého povrchu formy se docílí leštěním. [9]

10 Technologie výroby dílů z kompozitních materiálů

V této kapitole budou popsány jednotlivé technologické postupy výroby dílů z kompozitních materiálů. Vzhledem k zaměření této práce budou rozebrány především postupy vhodné k výrobě dílů malého sportovního letounu v podmínkách Ústavu letadlové techniky ČVUT.

Při volbě technologického procesu výroby je nutné zohlednit požadovanou kvalitu finálního výrobku, velikost a komplikovanost tvarů výrobku, náklady na výrobu a její obtížnost. Zvolená metoda určuje dosažitelný poměr výztuže k matici. Platí, že čím větší je objemový podíl výztuže v kompozitu, tím lepších mechanických vlastností se dosahuje.

Technologické postupy se rozdělují do čtyř kategorií: [9] [39]

- Kladení do otevřené formy a na to navazující vakuové lisování či lisování v autoklávu
- Kladení do uzavřené formy
- Kontinuální výroba
- Lisování za tepla a tlaku

10.1 Kladení do otevřené formy

Kladení do otevřené formy patří mezi levnější způsoby výroby kompozitních dílů. V otevřené formě se vyrábí kompozity s kontinuálními i sekanými vlákny, běžné i sendvičové lamináty.

Při výrobě sendvičových laminátů je do formy nejprve vložen vnější potah tvořený laminátem, na který je poté nalepeno jádro, které se následně překryje druhým potahem. Obvykle následuje vakuové lisování pro zajištění adheze mezi jádrem a potahy. Při lisování je potřeba věnovat zvýšenou pozornost možné deformaci jádra na okrajích dílů. Lisování sendvičů se obvykle provádí za nižších tlaků.

Při kladení do otevřené formy lze zajistit hladký povrch pouze z jedné strany.

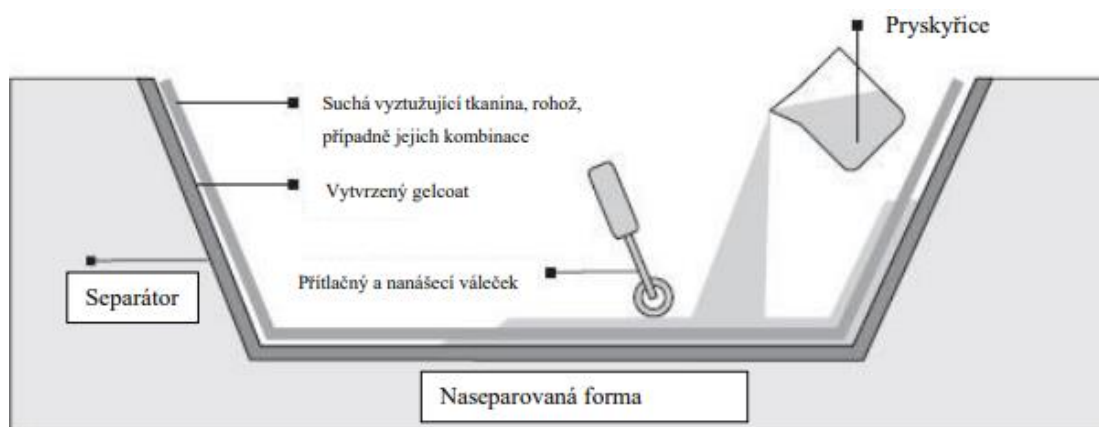
Existuje několik způsobů kladení:

Ruční. Nejlevnější technologický postup výroby laminátů určený pro kusovou výrobu. Spočívá v ručním pokládání jednotlivých vrstev tkaniny do formy a následném prosycování katalyzovanou pryskyřicí. Jednotlivé vrstvy se následně válečkují či stírají pro odstranění přebytečné pryskyřice a bublin.

Výsledné vlastnosti se odvíjí od zkušeností pracovníka a většinou nelze zajistit vysoký poměr výztuže ku matici (okolo 30 %), dobrou opakovatelnost ani spolehlivost.

Dalším způsobem je kladení prepregů do formy. To zajistí vyšší objemový podíl výztuže (40-50 %), zlepši manipulaci a částečně vyřeší předchozí problémy.

Při této metodě dochází ke kontaktu pracovníka s látkami a toxickými výpary, a je proto nezbytné zajistit dobré odvětrávání a ochranu.



Obr. 18: Schéma ručního kladení [39]

Sprejování. U této metody se nanáší jednotlivé vrstvy pomocí speciální stříkací pistole. Touto metodou se vyrábí kompozity s nasekanými vlákny. Do stříkací pistole jsou přiváděny předem nasekané rovingy, které jsou v pistoli prosycovány pryskyřicí a následně tlakem nanášeny na formu. Opět dochází ke kontaktu pracovníka s toxickými látkami a výpary jako u ručního kladení.

Strojní. U této metody se nejčastěji jednotlivé vrstvy do formy kladou ve formě UD pásek. Tato metoda je oproti předchozím dvěma velice nákladná a je určena pro sériovou výrobu. Kladení je prováděno automaticky strojem a lze tak zajistit vyšší objemové podíly výztuže, vyšší homogenitu dílu a zároveň je omezen kontakt pracovníka s toxickými látkami a výpary.

Vyšších mechanických vlastností výrobku lze dosáhnout vakuovým lisováním či lisováním v autoklávu. Při použití prepregů obvykle následuje vytvrzení a lisování v autoklávu za zvýšeného tlaku a teploty. [9] [39] [40]

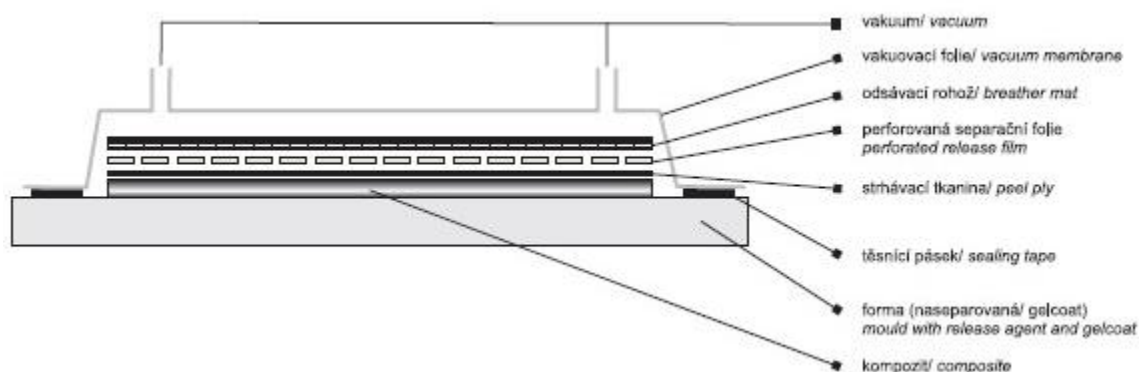
10.1.1 Vakuové lisování

Tento technologický postup slouží k zvýšení objemového podílu výztuže, díky čemuž je možné získat lepší mechanické vlastnosti výsledného laminátu, při relativně nízké výrobní ceně.

Součástí ve formě je pokryta strhávací textilií, separační fólií a sací textilií. Strhávací textilie zajistí po odtržení povrch, který lze přímo využít pro další úpravy nebo lepení, separační fólie

slouží k lepšímu oddělení finálního produktu a sací textilie odsává přebytečnou pryskyřici. Vše je pokryto vakuovou fólií a utěsněno. Poté je odsáván vzduch a dochází tak k lisování atmosférickým tlakem, což zajišťuje vyšší obsah výztuže v kompozitu.

Problémy vznikají v místech pevných záhybů apod., kde dochází k nedostatečnému stlačení. Vzduch z těchto míst neunikne a vlivem podtlaku vznikají bubliny. Ty zvětší svůj objem a narušují strukturu kompozitu. [39] [40] [41]



Obr. 19: Schéma vakuového lisování [39]

10.1.2 Vytvrzení v peci

Laminát ve formě či vakuové fólii je možné následně tepelně zpracovávat a vytvrzovat v peci. To zajistí lepší vlastnosti matrice kompozitu – vyšší teplotní odolnost, pevnost atd. [39]

10.1.3 Lisování v autoklávu

Některé pryskyřice a prepregy je nutné vytvrzovat za zvýšeného tlaku a teploty. Tento proces se nejčastěji provádí v autoklávu, což je pec, ve které probíhá zároveň vakuové lisování (lisování za zvýšeného tlaku) a vytvrzování za zvýšené teploty. Forma, která je vyskládána nejčastěji prepregy a pokryta příkrývací fólií, je vložena do autoklávu. Podle požadavků na vytvrzení se nastaví cyklus ohřívání a tlakování, který může trvat i několik hodin. V autoklávu se vyrábí vysoce kvalitní vysokopevnostní kompozitní díly s podílem výztuže až 70 %.

Tato technologie je velice náročná jak finančně, tak časově. Velikost dílů je navíc omezena velikostí autoklávu. [9] [39]



Obr. 20: Příklad obřího autoklávu pro výrobu křídel letounu Boeing 777X [42]

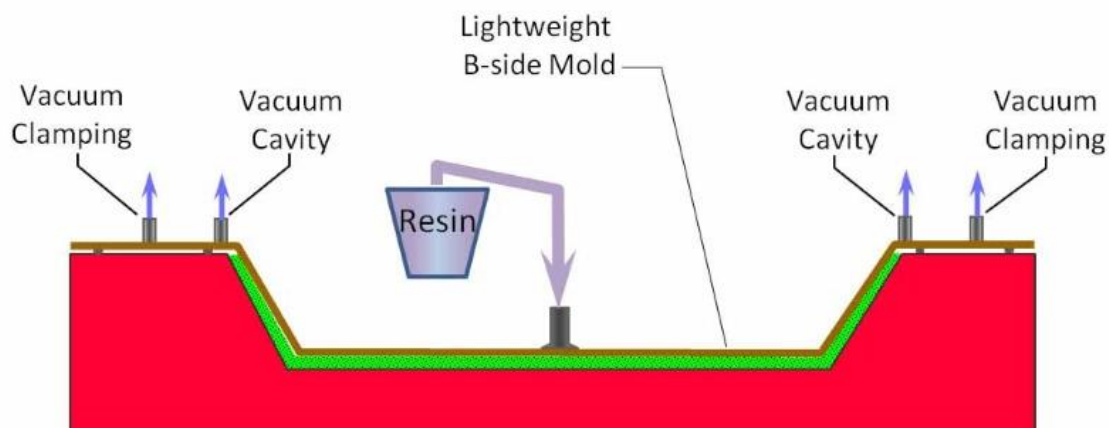
10.2 Klazení do uzavřené formy

Výhodou klazení do uzavřené formy je oboustranný hladký povrch, vysoká homogenita tloušťky, prosycení a mechanických vlastností napříč dílem. Zároveň lze zajistit vyšších objemových podílů výztuže bez použití vakuového lisování či nákladného lisování v autoklávu. Uzavřené formy jsou oproti otevřeným formám dražší. [39]

10.2.1 Vakuová infuze (Light-RTM)

Forma je tvořena dvěma částmi, mezi které je vložena suchá tkanina. Spodní část formy je zpravidla pevná, zatímco horní část bývá tvořena pouze pružnou fólií (plachetkou), nebo laminátovou skořepinou. Forma je následně utěsněna a je do ní ze zásobníku přiváděna pryskyřice. Prostup pryskyřice skrz tkaninu je zajištěn odsáváním vzduchu na okrajích formy, čímž je zajištěn podtlak ve formě oproti atmosférickému tlaku pryskyřice. Vakuovou infuzí lze zajistit obsah výztuže 40 – 50 % a hladký povrch na obou stranách dílu.

U této metody je nutný správný odhad prostupu pryskyřice, a proto této metodě mnohdy předchází simulace. Výhodná je pro díly velkých rozměrů, v letectví například trupy a plochy křídel. U této metody vzniká problém při pokládání suché tkaniny, která neudrží dobře tvar a musí se do formy lepit. [9] [39]

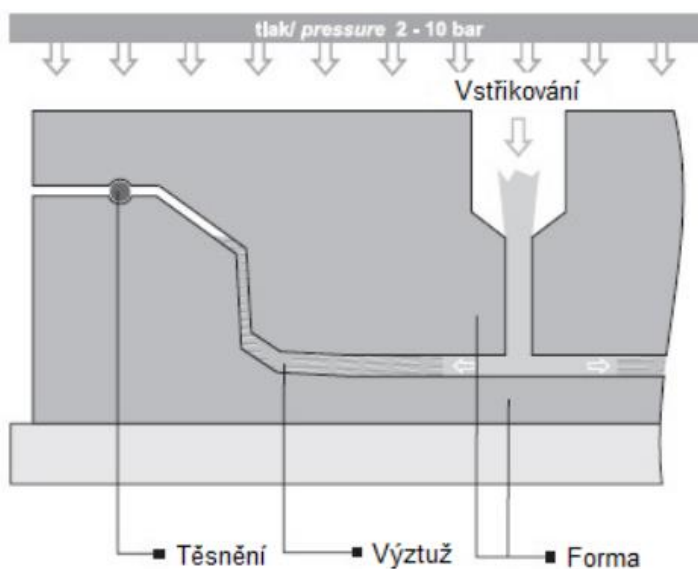


Obr. 21: Schéma vakuové infuze [43]

10.2.2 Vysokotlaké vstřikování (RTM)

Tato metoda spadá do kategorie uzavřených forem. Do formy složené ze dvou pevných částí pokrytých separační fólií je opět vložena suchá tkanina, tak aby byl umožněn průstup pojiva. Do formy je poté pod tlakem (2-10 barů) přiváděna pryskyřice, dokud nedojde k průstupu celou formou. Touto metodou je možné zajistit dobrou kvalitu výsledného produktu s obsahem výztuže až 70 % a nízkou porozitou.

RTM má uplatnění v sériové výrobě kvůli vysokým počátečním nákladům na pořízení forem a vstřikovacích zařízení. Výhodou pro sériovou výrobu jsou krátké výrobní časy. [9] [39] [44]



Obr. 22: Schéma metody RTM [39]

10.3 Kontinuální výroba

Metody kontinuální výroby se uplatňují pro výrobu normalizovaných profilů. Při výrobě součástí malého sportovního letounu by se jednalo spíše o nákup takto vyrobených profilů pro použití například v nosnících křídel, vzhledem k vysokým pořizovacím nákladům na výrobní linku.

10.3.1 Pultruze (tažení)

Kontinuální metoda pro výrobu profilů. Tažením lze získat velmi vysoký obsah výztuže – až 80%. Výztuž nejprve prochází lázní s katalyzovanou pryskyřicí, následně se prosycená vlákna ždímají, aby se zajistil vysoký obsah výztuže. Prosycená výztuž se pak formuje do požadovaných tvarů profilů. [39]

10.3.2 Ostatní kontinuální metody výroby

Dalšími metodami kontinuální výroby je navíjení, odstředivé lití atd. Jelikož pro výrobu malého sportovního letounu nejsou zajímavé, nebudou podrobněji popsány.

10.4 Lisování za tepla a tlaku

Metoda výroby určená pro velkosériovou výrobu, kvůli komplikovanosti a vysokým pořizovacím nákladům lisů a forem. Nejčastěji jsou to leštěné vyhřívané kovové formy. Existuje několik typů lisování podle výchozího materiálu, který vstupuje do lisu.

SMC (Sheet Moulding Compound). Vstupním materiálem jsou prepregy s výztuží z rohože. Ty jsou vkládány do lisu a vytvrzovány zvýšenou teplotou. Touto metodou se mimo jiné vyrábí kompozity s termoplastickou maticí, kde vstupním materiálem je nahřátý prepreg.

DMC (Dough Moulding Compound). Výchozím materiálem této metody je lisovací těsto.

BMC (Bulk Moulding Compound). Výchozím materiálem je lisovací směs – premix. [39]

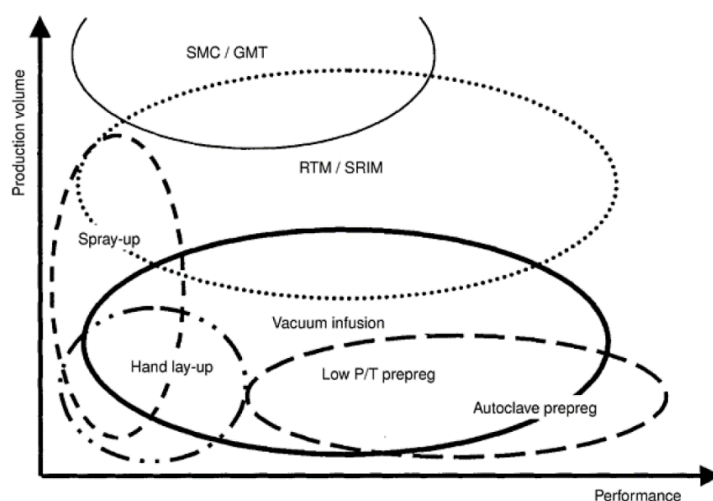
10.5 Výroba kompozitů s termoplastickou maticí

Jak již bylo zmíněno, kompozity s termoplastickou maticí se dodávají nejčastěji ve formě prepregů. Ty jsou za pokojových teplot v tuhém stavu, a proto je nutné je před formováním zahřát na formovací teplotu. Zahřáté prepregy jsou vloženy do formy a lisovány do požadovaných tvarů. Ochlazením se vrací do tuhého stavu a zachovávají si vylisovaný tvar. Další způsob výroby je injektáží do formy. V tomto případě je termoplast ve formě pelet, které se před injektáží roztaví. [9]

10.6 Srovnání technologických výrobních procesů

V Tab. 9 budou shrnuty dosažitelné parametry, výhody a nevýhody a finanční náklady jednotlivých technologických postupů výroby. Tučně jsou zvýrazněny metody, které by se mohli potenciálně využít pro výrobu malého sportovního letounu v podmínkách ÚLT. U těchto metod budou zmíněny možné konstrukční celky letounu, pro které by se daná metoda dala využít. V Graf 4 jsou znázorněny jednotlivé metody dle výkonnosti výrobku a produktivity.

Graf 4: Technologie výroby dle požadavků na výkonost kompozitu a produktivity [9]



Tab. 9: Srovnání technologických postupů [9]

Metoda výroby	Dosažitelné parametry	Výhody/Nevýhody	Použití (v malém sport. letounu)	Orientační cena
Ruční kladení	~30 % (suchá tkanina) 40-60 %* (prepregy)	Nízká cena, díly velkých rozměrů. Nízká pevnost, nespolehlivost výroby, pomalá výroba, pouze kusová výroba, špatná opakovatelnost, nehomogenita dílu, kontakt pracovníka s toxickými látkami.	prepreg – potahy, nosné součásti (pásnice, stojiny, výztuže, žebrování), křídla, trup, ocasní plochy, kormidla atd.; suchá tkanina – nestrukturní součásti (krytky, interiér atd.)	Nízká
Sprejování	20 – 30 %	Jednoduchá výroba, nízká cena. Pouze pro kompozity s nasekanými vlákny, toxicita, nehomogenita dílu.	Kusová výroba, malé i velké díly díly s nižšími požadavky na pevnost.	Nízká
Strojní kladení	~ 50 %*	Přesná automatická výroba, zajištění přesné orientace vláken, úspora materiálu. Vysoké náklady na stroje.	Sériová výroba, rozměrné díly, komerční letouny.	Vysoká

Vakuové lisování, vytvrzení v peci	50-60 % vyšší teplotní odolnost	Zlepšení mechanických vlastností, zlepšení adheze jednotlivých vrstev. Prodloužení výrobních časů.	Kusová i malosériová výroba, Středně zatěžované díly s důrazem na nízkou hmotnost, Potahy křídel, trupu, ocasních ploch atd.;	Nízká - Střední
Lisování v autoklávu	>60 %* vyšší teplotní odolnost	Výborné mechanické vlastnosti, dobrá tepelná odolnost, přesné vytvrzovací podmínky. Omezení velikosti dílů podle autoklávu, pořizovací cena autoklávu, dlouhé výrobní časy.	Kusová i sériová výroba, vysoce zatěžované díly, vysokopevnostní materiály, nosné součásti – nosníky, pásnice, stojiny, žebrování, výztuhy, součásti podvozku atd.	Vysoká
Vakuová infuze (Light-RTM)	40-50 %	Bez zvyšování teploty, neomezené rozměry dílů, vysoká kvalita. Potřeba simulace prostupu pryskyřice tkaninou, dlouhotrvající výrobní proces.	Kusová i malosériová výroba, díly velkých rozměrů – monokok trupu, potahy křídel apod.	Střední
Vysokotlaké vstřikování (RTM)	60-70 %	Vysoká kvalita, krátké výrobní časy, přesná výroba. Složité formy.	Sériová výroba, díly menších rozměrů, komplexní díly – ovládací prvky, vedení táhel, závěsy apod.	Vysoká pořizovací, nízká výrobní
Pultruze	70-80 %	Kontinuální výroba, vysoká kvalita, vysoká přesnost, krátké výrobní časy. Omezené tvary profilů.	Normalizované profily – nosníky, výztuhy atd.	Vysoká pořizovací, nízká výrobní

* závisí na použitém prepregu/UD pásce

Pro výrobu konstrukčních celků jsou potenciálně vhodné následující metody: Ruční kladení prepregů lisováním a vytvrzením za zvýšené teploty, vakuová infuze (Light-RTM) a vysokotlaké vstřikování (RTM). Některé normalizované profily by mohly být kupované jako tažené profily.

11 Spojování kompozitních dílů

Přestože použití kompozitních materiálů umožňuje výrobu velkých jednodílných součástí, čímž se lze vyhnout mnoha problémům vzniklých při spojování dílů, potřeba spojovat součásti z kompozitů setrvává a představuje značné problémy. Obecně spolehlivost dílů z kompozitních materiálů nezávisí v takové míře na vlastnostech kompozitu, nýbrž na vlastnostech spojů mezi díly. Existují dva základní typy spojování kompozitních dílů – mechanické a lepené spoje. [9] [11]

11.1 Mechanické spoje

Mechanickými spoji se rozumí spoje využívající spojovacích součástí – šroubů, matic, nýtů, insertů apod. Používají se pro jednoduchost a možnou rozebíratelnost. Výjimkou z hlediska rozebíratelnosti jsou nýtové spoje.

Zároveň zvyšují výslednou hmotnost, zhoršují hladkost povrchu, vnášejí do součásti vruby, které narušují jednotnost materiálu, způsobují koncentrace napětí a při výrobě děr vzniká riziko delaminace materiálu. (viz. Obr. 23)



Obr. 23: Delaminace na výstupu díry způsobená vrtáním [61]

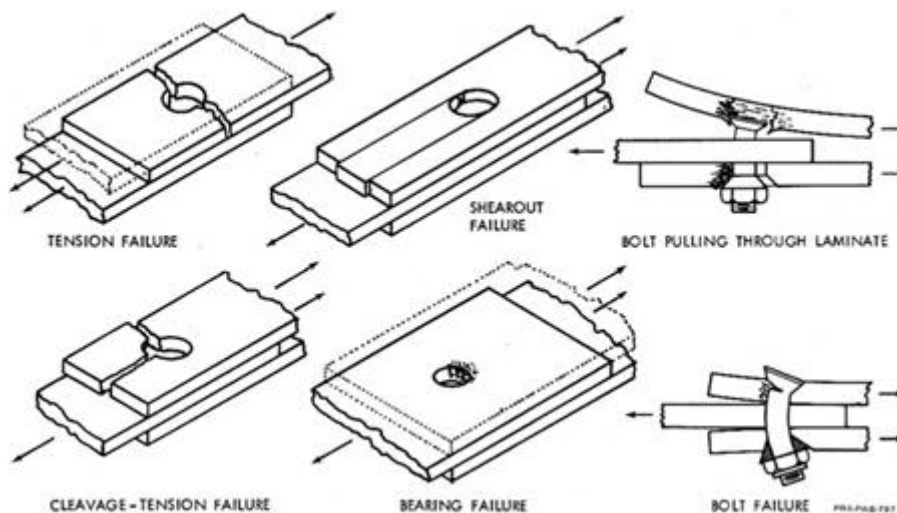
U mechanických spojů je jedna část zatížení přenášena šroubem/nýtem a druhá třením desek v důsledku předpětí spoje. Přítlačná síla se časem zmenšuje vlivem opotřebení, uvolnění a otláčení, což může způsobit zvětšení přenášeného

zatížení šroubem/nýtem a být příčinou jeho porušení. U šroubových spojů lze tento problém kompenzovat dotažením šroubového spojení, to však není možné provést pro nýty. Další namáhání je způsobeno ohybem, což je zapříčiněno špatnou volbou spojení. Ohyb vzniká u spojení, kde dochází k nesouososti namáhajících sil. Ohyb má velký vliv na únavu spojení.

U mechanických spojů je maximální dosažitelná pevnost v porovnání s pevností samotného laminátu nízká. V praxi lze dosáhnout okolo 40 % pevnosti kompozitu, a to pouze pro správně navržené a provedené spojení. V praxi je častější použití mechanických spojů pomocí insertů, ty se vlepují do součásti při výrobě a šroubové spojení je přenášeno pomocí nich. Tímto způsobem bývají u letounů řešeny například závěsy. [11]

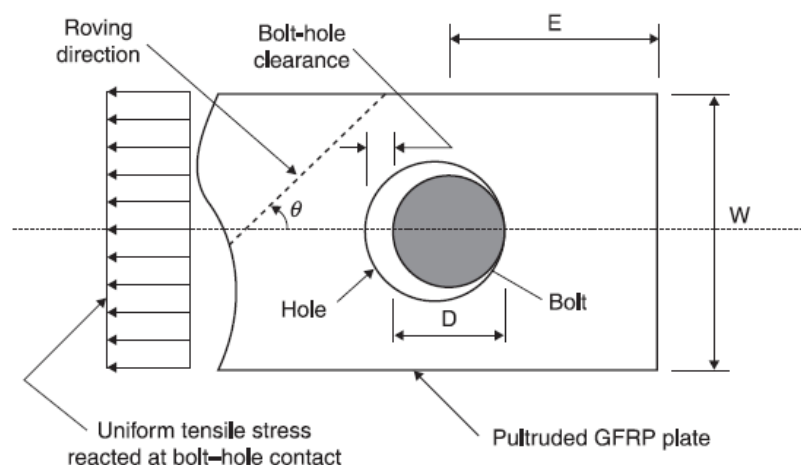
11.1.1 Statické poruchy mechanických spojů

Existuje několik typů poruch způsobených statickým zatížením. Na Obr. 24 jsou vidět některé z nich.



Obr. 24: Poruchy mechanických spojů [8]

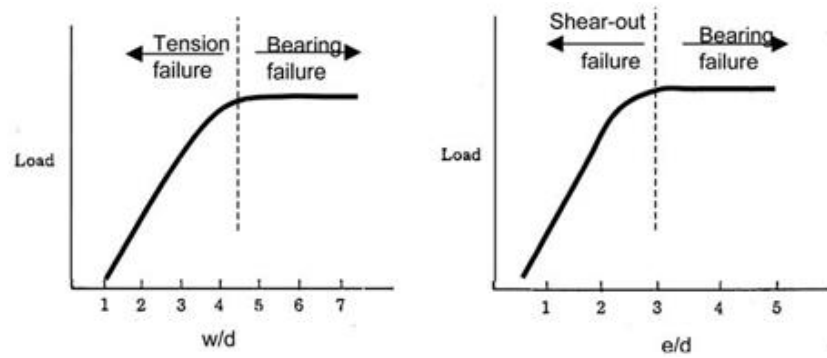
Způsob statického porušení závisí na několika faktorech. Nejdůležitějšími faktory je poměr mezi vzdáleností díry od okraje a jejího průměru E/D a poměr mezi efektivní šířkou a průměrem díry W/D .



Obr. 25: Definice geometrie šroubového spoje [11]

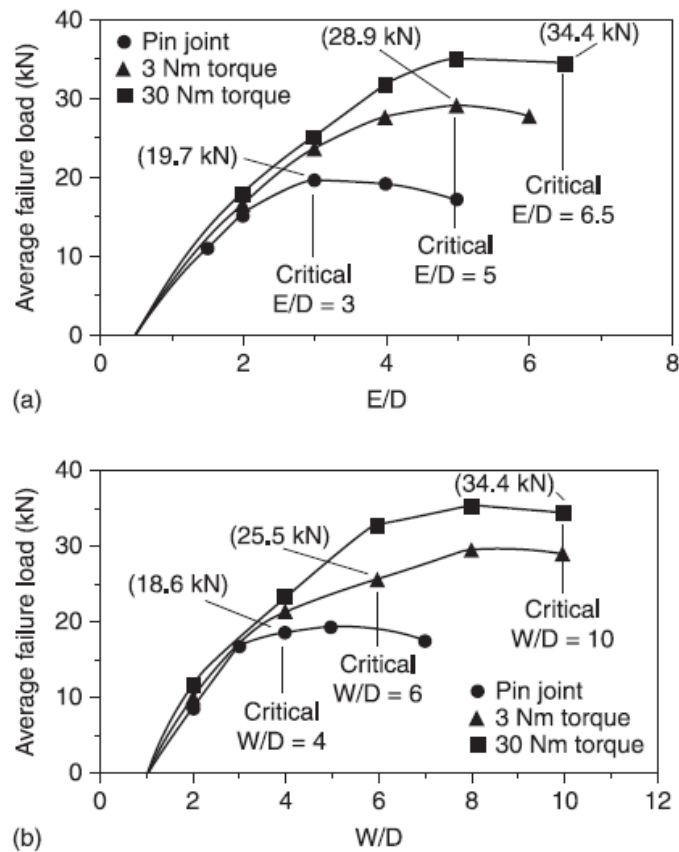
V Graf 5 je vidět typ porušení v závislosti na E/D a W/D . Z těchto grafů vyplývá, že pro vyšší poměry rozměrů desky vůči průměru díry dochází ke ztrátě únosnosti spoje. Při nižších poměrech bude docházet k přetržení spojovaného materiálu.

Graf 5: Závislost napětí na E/D a W/D se zvýrazněním typu porušení [11]



V Graf 6 je vidět závislost kritického zatížení na poměrech E/D (a) a W/D (b), zároveň jsou porovnány tři spoje lišící se podle míry utažení. Je vidět, že s rostoucím utahovacím momentem roste maximální přípustné zatížení spoje. Křivky odpovídají spojení dvou GFRP plátů o tloušťce 6,4 mm vyrobených pultruzí s rovingy ve směru zatěžování. ($\theta = 0^\circ$)

Graf 6: Závislost kritického zatížení na E/D (a) a W/D (b) [11]



Z předešlých grafů je zřejmé, že výsledná pevnost spoje závisí na jeho umístění a míře předpětí. [9] [11]

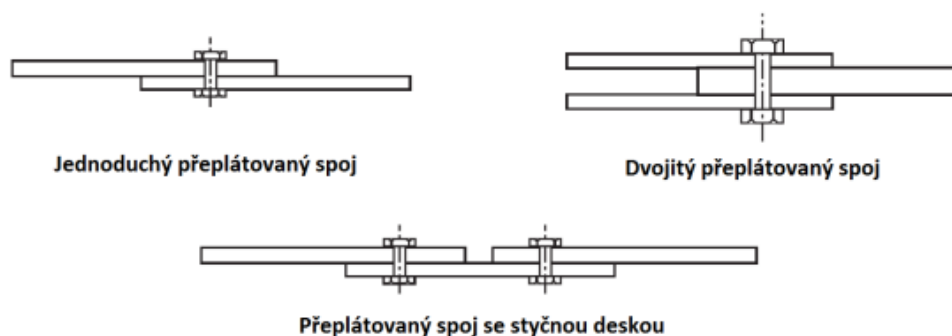
11.1.2 Únavové poruchy mechanického spoje

U kompozitů se porušení vlivem únavy nejčastěji projevuje delaminací, tj. oddělením jednotlivých vrstev. Faktory ovlivňující únavu kompozitů jsou způsob skládání vrstev, zbytková napětí vzniklá smršťováním vrstev, degradace a stárnutí materiálu. V místech mechanických spojů se volí kvazi-izotropní lamináty, tj. s různou orientací jednotlivých vrstev.

U kompozitů se častěji projeví delaminace u děr volných (nezatížených předpětím) než u děr zatížených. Proto je obvyklou příčinou únavové delaminace uvolnění šroubového spojení způsobené snížením přenosu napětí pomocí tření. Uvolněný šroub pak způsobuje opotřebení vnitřního povrchu díry, jež může způsobit lom či oddělení vrstev a následnou delaminaci. Vůle ve šroubových spojeních jsou z tohoto důvodu nežádoucí. Vliv na únavu spojů má také volba spojení, která ovlivňuje míru zatěžování ohybem, které může být příčinou porušení struktury díry a počátku delaminace. [9] [11]

11.1.3 Typy mechanických spojů

Rozlišují se tři základní typy mechanických spojů: jednoduchý přeplátovaný spoj, dvojitý přeplátovaný spoj, přeplátovaný spoj se styčnou deskou.



Obr. 26: Typy mechanických spojů [45]

Přestože u jednoduchého přeplátovaného spoje vzniká namáhání ohybem, je to nejčastěji používaný typ spoje pro svoji jednoduchost a úspornost. [45]

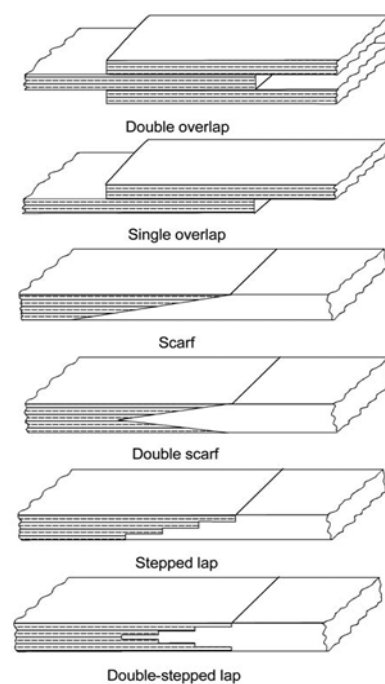
11.2 Lepené spoje

Lepené spoje mají daleko větší účinnost než spoje mechanické, mají menší hmotnost a zachovávají celistvost dílů. Nevýhodou je nerozebíratelnost, problematická kontrola, náročná příprava povrchů k zajištění dobré adheze a náchylnost na vlivy okolního prostředí. Je náročné zajistit spolehlivost těchto spojení, což sťažuje certifikaci takto spojovaných dílů. Lepené spoje se využívají pro tenké díly kvůli průběhům napětí v těchto spojích – vysvětleno v další podkapitole. Často používanými lepidly ke spojování polymerních kompozitů jsou epoxidy, akryláty a polyuretany. Lepidla jsou buď jednosložková, kde vytvrzovací katalyzátor je součástí směsi a vytvrzení probíhá za zvýšené teploty či kontaktem se vzduchem, nebo dvousložková, kde k vytvrzení dojde smícháním lepidla s katalyzátorem těsně před nanesením. Používají se buď ve formě pasty nebo tenkého filmu. [8] [9] [11]

11.2.1 Typy lepených spojů

Existuje několik typů lepených spojů, mezi nejpoužívanější patří jednoduchý přeplátovaný spoj (single overlap), který sice nenabízí nijak zvýšenou pevnost, ale umožňuje lepení tenkých dílů a je používán pro svoji jednoduchost. Méně používaný je spoj dvojitý přeplátovaný (double overlap). (viz. Obr. 27)

Při lepení dílů o větší tloušťce či při větším zatížení je využíváno spojů odstupňovaných (stepped lap) nebo šikmých (scarf). (viz. Obr. 27) [8] [9] [11]



Obr. 27: Typy lepených spojů [8]

11.2.2 Faktory ovlivňující výsledné vlastnosti lepeného spoje

Vznik a výsledné vlastnosti jsou ovlivněny dvěma základními jevy: adhezí a kohezí.

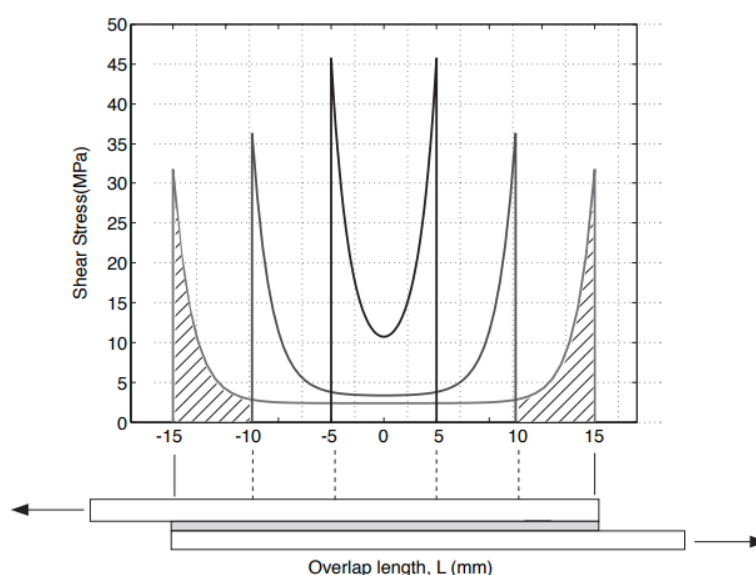
Adheze popisuje přilnavost lepidla k povrchu spojovaných kompozitů, která je ovlivněna jak vlastnostmi lepidla, tak očištěním a opracováním povrchu dílu. [9] [11]

Koheze popisuje soudržnost lepidla a závisí na mezimolekulárních silách v lepidle. Závisí na chemické struktuře lepidla, způsobu tuhnutí/vytvrzení a okolním prostředí. [9] [11]

Lepidla musí být volena podle podmínek, ve kterých se bude spoj nacházet. Při volbě lepidla je potřeba přihlídnout k jejich odolnosti za zvýšených teplot, chemické stabilitě a odolnosti vůči vlhkosti, UV záření atd. [9] [11]

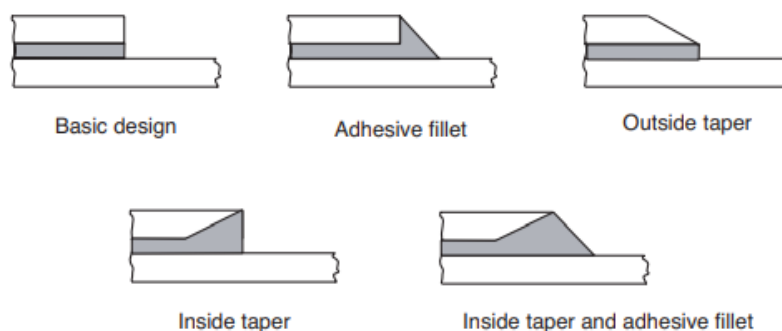
Mezi geometrické vlivy ovlivňující výsledné vlastnosti patří délka spoje a typ zakončení spoje.

Délka spoje. Vzhledem k tomu, že u jednoduchého přeplátovaného spoje není působení sil kolineární, dochází ve spoji ke smykovému namáhání. To má v lepeném spoji specifický průběh viditelný na Obr. 28, kde maximální smykové napětí je v okrajích spoje. To může být příčinou odlupování spoje. Se zvětšující délkou spoje se maximální smykové napětí snižuje, jak je patrné z Obr. 28, tudíž se snižuje i potřebná únosnost lepidla. [9] [11]



Obr. 28: Rozdílné průběhy napětí v závislosti na délce spoje [11]

Typy zakončení spoje. Dalším způsobem, jak snížit maximální napětí na koncích spoje je jejich úprava. Úpravy se provádí dodatečným nanášením lepidla v krajích (adhesive fillet), úpravou geometrie konců dílů (outside/inside taper), eventuálně kombinací obojího. (viz. Obr. 29) [45]



Obr. 29: Modifikace zakončení lepených spojů pro příznivější průběh napětí [11]

11.2.3 Poruchy způsobené únavou lepeného spoje

Předpovídání poruch lepených spojů představuje i v dnešní době velký problém. Na trhu existuje mnoho druhů lepidel s velmi rozdílnými vlastnostmi a je problematické popsat jejich chování při působení vnějších vlivů. [11]

Faktory ovlivňující únavové vlastnosti jsou: orientace povrchových vláken kompozitu a teplotní vlivy.

Orientace vláken kompozitu. Orientace vláken má největší vliv na způsob šíření a místo vzniku trhlin. Bylo vyzorováno, že pokud je orientace vláken na povrchu ve směru největšího zatížení, budou se trhliny šířit výhradně lepidlem. Při úhlu natočení vlákna vzhledem k průběhu zatížení o 45° bylo vyzorováno jak šíření trhlin v lepidle, tak prostupování do kompozitu a vznik delaminace. [11]

Teplotní vlivy. V závislosti na teplotě bylo vyzorováno, že za běžných pokojových teplot a zvýšených teplot do 100 °C se trhliny šíří pouze v lepidle, zatímco za snížených teplot (-50 °C) docházelo k šíření trhlin do kompozitu a praskání matrice. [11]

11.3 Srovnání mechanických a lepených spojů u kompozitních materiálů

V následující tabulce jsou shrnuty výhody a nevýhody mechanických a lepených spojů.

Tab. 10: Porovnání mechanických a lepených spojů [11]

Mechanické spoje	
Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> - rozebíratelnost - neomezená tloušťka spojovaných dílů - jednoduchá výroba - jednoduché přizpůsobení spoje požadavkům - jednoduchá kontrola - málo ovlivnitelné okolním prostředím - nenáchylné k odlupování - nevznikají nechtěná zbytková napětí 	<ul style="list-style-type: none"> - koncentrace napětí na vrubu - náchylné k únavovým trhlinám - náchylné na delaminaci - vyšší hmotnost - malá pevnostní účinnost - narušení struktury kompozitů - nízká únosnost kompozitů
Lepené spoje	
Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> - malé koncentrace napětí - tuhé spojení - dobré únavové vlastnosti - nízká hmotnost - nenarušení struktury kompozitu - těsnicí funkce - hladké spojení 	<ul style="list-style-type: none"> - omezená tloušťka lepených dílů - obtížná detekce vad - náchylné na vnější vlivy - náchylné na odlupování - nerozebíratelné - nákladná příprava - potenciálně zdravotně závadné

Pro konstrukci draku letounu a pro součásti, u kterých je kladen důraz na nízký aerodynamický odpor a nepožaduje se rozebíratelnost se obvykle volí lepené spoje. U lepených spojů se však obtížně zajišťuje dostatečné zatečení lepidla a výsledná kvalita spoje, a není proto vhodné lepení velkých ploch. Při návrhu lepeného spoje by bylo vhodné vyrobit experimentální vzorky a určit přesné postupy lepení.

Mechanické spoje se využívají, pokud se požaduje rozebíratelnost. Mechanické spoje se řeší pomocí insertů z Duralu nebo překližky a do kompozitu se vlepují při výrobě dílu. Toto řešení se bude zavádět například u závěsů a osových přírub kol.

12 Příklady použití kompozitních materiálů

V této kapitole bude zmíněno několik příkladů použití kompozitních materiálů v malých sportovních letounech.

TL-2000 StingSport. Letoun vyráběný českou firmou TL Ultralight. Tento letoun využívá kompozitních materiálů z uhlíkových prepregů od společnosti Hexcel. Potahy křídel a trupu jsou ze sendvičového kompozitu s pěnovou výplní Divinycell pokrytou uhlíkovým laminátem. Vnější vrstvy se s pěnou spojují pomocí epoxidové pryskyřice od společnosti MGS. Trup se vyrábí ze dvou forem. Potahy trupu i křídel jsou vytvrzovány za zvýšené teploty v peci. Na potahy nebylo využito gelcoatu pouze běžné barvy, která ušetřila 22,7 kg. Nosníky křídel jsou vyráběny z uhlíkového laminátu. Na stojiny se využívá prepregové uhlíkové tkaniny $\pm 45^\circ$ a na pásnice je použita UD páska, oboje od firmy Hexcel. [46]

UFM-13 Lambada a UFM-10 Samba. Další české letouny od výrobce Urban Air. Vyrábí se převážně z GRFP s epoxidovou pryskyřicí kladením do otevřené formy a vytvrzováním v peci. Potahy křídel jsou ze sendvičového kompozitu a pásnice z uhlíkové UD pásky. Trup letounu se vyrábí jako monokok. [46]

Virus a Sinus. Letouny od slovinské společnosti Pipistrel mají trup ze skelných prepregů s epoxidovou pryskyřicí a výztuhami v kritických místech z aramidových a uhlíkových vláken. Prepregy jsou vyráběny společností P-D Interglas. Potahy křídel jsou ze sendvičového kompozitu s pěnovým jádrem pokrytým skelným laminátem. Pásnice jsou opět vyrobeny z uhlíkových UD pásek vytvrzovaných v autoklávu. [46]

Rally 105. Italský letoun vyráběný S.G. Aviation využívá pro konstrukci trupu triaxiální uhlíkovou tkaninu. Potahy křídel jsou ze sendviče s pěnovým jádrem krytým triaxiální skelnou prepregovou tkaninou. Potahy křídel jsou vakuově lisovány a vytvrzovány v peci. Pásnice se s potahem křídla spojuje lepením. [46]

Ion Aircraft. Letoun od americké společnosti Gaea Capital Management. Trup se tak skládá ze dvou polovin vyrobených pomocí uhlíkových UD pásek vytvrzovaných v autoklávu. Nezátěžované součásti letounu se vyrábí ze skelných laminátů s epoxidovou pryskyřicí. V okolí motoru bylo využito matric z kyanoesterů a BMI kvůli vyššímu teplotnímu zatěžování. [46]

13 Návrh technologie výroby podvozkové nohy

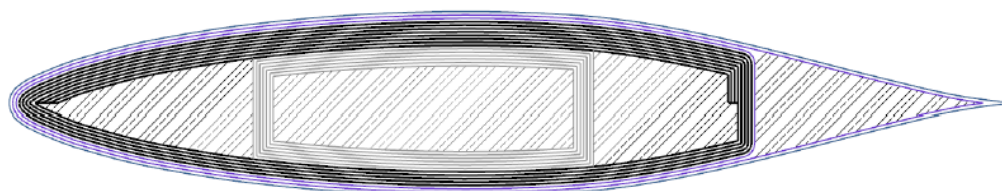
Při zjišťování hmotnostní úspory, následném výběru a návrhu postupu výroby bude uvažována struktura a počet vrstev lamin v jednotlivých součástech z návrhu konstrukce. Pokud se zvolená metoda a použité materiály budou lišit od návrhu konstrukce, bude potřeba dimenzování podvozkové nohy přepracovat.

Na základě dimenzování a následné optimalizace pomocí MKP v návrhu konstrukce byly pro jednotlivé konstrukční řezy zvoleny počty vrstev lamin pro jednotlivé součásti dle Tab. 11.

Tab. 11: Počty vrstev laminátu v jednotlivých konstrukčních řezech [1]

Řez	x [mm]	Horní potah		Dolní potah		Stojiny		
		potah (sklo)	pásnice (uhlík)	potah (sklo)	pásnice (uhlík)	přední (sklo)	střední (sklo)	zadní (sklo)
1 - 2	-25 - 25	3	7	3	6	12	-	12
2 - 3	25 - 50	3	7	3	6	12	-	12
3 - 4	50 - 73	3	9	3	10	12	-	12
4 - 5	73 - 100	3	9	3	10	12	-	12
5 - 6	100 - 200	3	10	3	8	12	-	12
6 - 7	200 - 300	3	11	3	8	12	-	12
7 - 8	300 - 400	3	12	3	8	12	-	12
8 - 9	400 - 500	3	12	3	8	15	-	15
9 - 10	500 - 600	3	12	3	8	20	-	20
10 - 11	600 - 700	3	12	3	8	25	-	25
11 - 12	700 - 800	3	12	3	8	30	-	30
12 - 13	800 - 908	3	15	3	8	35	35	35
13 - 14	908 - 960	3	22	3	14	40	40	40
14 - 15	960 - 1020	3	25	3	17	40	40	40
15 - 16	1020 - 1080	3	25	3	22	35	35	35
16 - 17	1080 - 1140	3	25	3	22	35	35	35
17 - 18	1140 - 1180	3	25	3	22	35	35	35
18 - 22	1180 - 1360	3	20	3	10	35	35	35

Průřez součásti pro konstrukční řezy 1-12 je znázorněn na Obr. 30. Stojiny se nachází v 20 a 60 % hloubky profilu. Pro konstrukční řezy 12-22 přibude třetí stojina ve 40 % hloubky profilu. [1]



Obr. 30: Průřez podvozkové nohy [1]

13.1 Porovnání technologií výroby

V této kapitole budou porovnány tyto technologie výroby: ruční kladení prepregů z návrhu konstrukce, upravená metoda ručního kladení prepregů, vakuová infuze a RTM. Ze zmíněných technologií bude vybrána vhodná metoda pro výrobu podvozkové nohy na základě těchto kritérií: hmotnostní úspora, odhadované náklady, dosažitelná kvalita výrobku a obtížnost výrobního postupu. Při porovnání hmotnosti a ceny budou uvažovány pouze základní materiály – tkaniny, pryskyřice, jádra. Z hlediska výrobních nákladů budou jednotlivé metody srovnány pouze relativně, jelikož tyto náklady závisí na mnoha faktorech a je obtížné je určit.

U jednotlivých metod bude stručně popsán postup výroby forem, postup výroby dílu, zvolené materiály, jejich parametry a cena. Pro určení hmotnostní úspory bude proveden přepočít teoretické tloušťky vrstev pomocí vztahu (6.1), na základě čehož budou změněny rozměry 3D modelu. Pomocí směšovacího pravidla bude určena hustota laminátů. Přiřazením odpovídajících objemových hustot jednotlivým částem podvozkové nohy bude CAD programu SIEMENS NX určena hmotnost. Hmotnost bude ovlivněna jednak volbou alternativních materiálů s rozdílnou gramáží a objemovou hustotou, ale také rozdílným objemovým podílem výztuže, jehož lze porovnávanými metodami dosáhnout. S rostoucím v_f se předpokládá pokles hmotnosti.

Vzhledem k omezené dostupnosti materiálůvých listů a cen materiálů budou uvažovány ceny prepregů od prodejce Easy Composites a ceny většiny tkanin a pryskyřic od Havel Composites. Vzhledem k omezenému sortimentu těchto prodejců budou navíc uvažovány materiály z katalogu firmy Hexcel. Uvedená cena za prepregy od firmy Hexcel odpovídá obdobným prepregům, pro které byla cena nalezena.

Pro jednotlivé metody výroby budou zvoleny materiály stejného typu a s podobnými vlastnostmi jako z návrhu konstrukce.

13.1.1 Technologie výroby zvolená v DP Ing. Richarda Širokého

V DP Ing. Širokého byla zvolena výroba pomocí ručního kladení prepregů vytvrzovaných v peci. Některé části výrobního postupu (výroba jader a forem) nebyly popsány.

Postup výroby forem a přípravků. Pěnová jádra by se vyráběla řezáním odporovým drátem, broušením a lepením.

Negativní formy by se vyráběly ruční laminací suché tkaniny na kopytech. Kopyta by byla vyhotovena pro každou negativní formu zvlášť a vyráběla by se obráběním lepených MDF desek na 5 osé CNC frézce.

Postup výroby dílu. Na jádra stojin by se namotávaly vrstvy skelného prepregu. Následně by se přidala pásnicová jádra a namotaly by se pásnice z uhlíkové UD tkaniny. K pásnicím by se přidala jádra odtokových hran a namotaly by se skelné tkaniny tvořící potahy. Podvozková noha by se umístila do negativních forem a proběhlo by vytvrzení v peci. Do vytvrzeného dílu by se nakonec vyvrtaly díry pro uložení kolových os. Na povrch dílu by byl aplikován gelcoat.

Zvolené materiály. Pro jednotlivé části byly zvoleny laminátové kompozity s matricí z epoxidové pryskyřice L 285 MGS s tužidlem H 286 MGS. Ta však není určena do prepregů, jelikož se vytvrzuje pomocí tvrdidla za teplot 20 až 40 °C. Tato metoda je zmíněna pouze pro porovnání se zbylými metodami a pryskyřice bude změněna až v následující metodě. Jako výztuže byly zvoleny skelné tkaniny Aeroglass 80 (80 g.m⁻²) na potahy, Aeroglass 163 (163 g.m⁻²) na potahy a stojiny a uhlíková UD tkanina HS (200 g.m⁻²) na pásnice.

Materiály jader a negativních forem nebyly určeny. Pro následující odhady bude použita PU pěna AIREX C70.55 a pro negativní formy bude zvolena uhlíková tkanina Black Stuff Carbon 3k od Easy Composites. Na formy bude použita vysokoteplotní epoxidová pryskyřice EL160 od Easy Composites. Kopyta pro výrobu negativních forem by se vyrobila z MDF desek. V Tab. 12 jsou zmíněny relevantní parametry pro odhad ceny a hmotnosti. [1] [21] [47]

Tab. 12: Použité materiály při metodě kladení prepregů z DP [21] [47]

	FAW [g.m ⁻²]	ρ [g.cm ⁻³]	t_l [mm]	cena [Kč.m ⁻²]
L 285/Aeroglass 80 ±45°	80	1,85	0,094	1 200*
L 285/Aeroglass 163 ±45°	163	1,85	0,14	1080*
L 285/Carbon HS	200	1,49	0,25	1200*
Black Stuff 3k	200	1,8	0,35	396
EL160	-	1,15	-	696 ([Kč.kg ⁻¹])
AIREX C70.55	-	0,06	15	368
MDF deska	-	-	38	898

*součet ceny pryskyřice a tkanin by neodpovídal skutečné ceně za prepreg, uvedené ceny jsou za prepregové tkaniny (XPREG) s obdobnými vlastnostmi

Zhodnocení metody. Tato metoda by oproti infuzním metodám umožnila lepší manipulaci s tkaninami. Oproti následující metodě by se odstranila potřeba lepených spojů.

Bez vytvrzování za zvýšeného tlaku by nebylo možné odstranit přebytečnou pryskyřici a objemový podíl výztuže by byl pod 50 %. V návrhu konstrukce bylo uvažováno 45 %, v praxi by to mohlo být více pro UD uhlíkový prepreg a méně pro skelný prepreg. Při určení hmotnosti bude uvažováno zmíněných 45 % z návrhu konstrukce.

Dále bude problematické zajistit oboustranně hladký povrch a bude vznikat riziko zhroucení tkaniny na pásnicích a stojinách, což by výrazně snížilo výslednou pevnost dílu.

Hmotnost dílu. Hmotnost podvozkové nohy vyrobené touto metodou vyšla 6 496 g. Pro porovnání vyšla v návrhu konstrukce hmotnost 6 107 g. Tato nepřesnost je nejspíš způsobena zjednodušením počtu konstrukčních řezů, a tudíž rozdílnými počty vrstev v různých částech dílu.

Orientační cena. V Tab. 13 jsou shrnuty materiálové náklady na formy, přípravky a samotný díl.

Tab. 13: Cena materiálů metody kladení prepregů z DP

	V [m ³]	t_l [mm]	Plocha [m ²]	Cena [Kč]
Kopyto spodní	0,1536	38	4,041	3 027
Kopyto horní	0,1214	38	3,195	2 393
Forma spodní	0,0111	0,35	31,809	15 116 + 5 282 (EP)
Forma horní	0,0111	0,35	31,809	15 116 + 5 282 (EP)
Jádra	0,0034	15	0,228	70
Potahy	0,0002	0,14	1,324	1 510
Pásnice	0,0027	0,25	10,702	12 842
Stojiny	0,0012	0,25	4,628	4 998
				65 635

Z hlediska výrobních nákladů na vytvrzování za zvýšené teploty, výrobu forem, obrábění kopyt a nákladů na spotřební zboží (vakuové folie, lepidla, laky apod.) jsou metody využívající prepregů dražší než infuzní technologie s výjimkou metody RTM, která má výrazně vyšší náklady na výrobu kovových forem. Při započítání těchto nákladů cena kusového dílu může vzrůst až dvojnásobně.

13.1.2 Upravená technologie výroby ručním kladením prepregů

V této kapitole bude upravena předchozí metoda volbou prepregových materiálů a změnou postupu výroby tak, aby bylo možné provést lisování v autoklávu, čímž se docílí vyššího v_f . Pro UD uhlíkovou tkaninu bude uvažován v_f 60 %. U skelných tkanin je v_f menší, a bude proto uvažováno 50 %. Počet vrstev z Tab. 11 se oproti předchozí metodě nebude měnit.

Postup výroby forem. Formy i jádra by se vyráběly stejně jako v předchozí metodě. V této metodě by se vyráběla pouze jádra stojin.

Postup výroby dílu. Potahy s pásnicemi a stojiny by se v tomto postupu vyráběly zvlášť. Potahy s pásnicemi by se vyrobily v otevřených negativních formách. Na povrchovou vrstvu potahů by se použil gelcoat. Na ten by se pokládaly potahy a poté pásnice. Následně by se jednotlivé součásti překryly strhávací tkaninou, separační fólií, sací rohoží a vakuovou fólií a provedlo by se lisování v autoklávu.

Stojiny by se vyrobily omotáním jader skelnými prepregy, Stojiny by se připravily k lisování v autoklávu obdobně jako potahy s tím rozdílem, že by se součást vložila do vakuového pytle.

Vytvrzené součásti by se vyjmuly z forem a vakuových fólií a společně s překližkovými inserty by se slepili dohromady dvousložkovým epoxidovým lepidlem. Do vytvrzeného dílu by se nakonec vyvrtaly díry pro uložení kolových os.

Zvolené materiály. Na vnitřní vrstvy potahů, odtokových hran a na stojiny byl zvolen skelný prepreg HexPly M21/HexForce 1064 (80 g.m⁻²). Na vnější vrstvu potahů by byl použit skelný prepreg HexPly M21/HexForce 1610 (157 g.m⁻²). Pro výrobu pásnic by se použil uhlíkový UD prepreg XPREG XC130–12UD Carbon. K výrobě jader, kopyt a negativních forem by se využily stejné materiály jako v předchozí metodě. V Tab. 14 jsou zmíněny parametry pro následný odhad ceny a hmotnosti. [22] [47]

Tab. 14: Použité materiály při upravené metodě kladení prepregů [22] [21] [47]

	FAW [g.m ⁻²]	ρ [g.cm ⁻³]	t_l [mm]	cena [Kč.m ⁻²]
M21/1610	80	1,87	0,08	1200
M21/1064	157	1,87	0,12	1088
XPREG XC130–12UD	210	1,56	0,19	1278
Black Stuff 3k	200	1,8	0,35	396
EL160	-	1,15	-	696 [Kč.kg ⁻¹]
AIREX C70.55	-	0,06	15	368
MDF deska	-	-	38	898

Zhodnocení metody. Oproti přechozí metodě má tato metoda výhodu oboustranně hladkého povrchu, menšího počtu jader, vyšších v_f až 60 % díky lisování v autoklávu, a tudíž lepších mechanických vlastností výrobku. Nevýhodou oproti předchozí metodě je potřeba lepených spojů a oproti infuzním metodám již zmíněné riziko zhroucení tkaniny při lisování a nestálost rozměrů při vytvrzení. V této metodě je použit menší počet jader, což by urychlilo výrobu a mírně snížilo výrobní náklady.

Hmotnost dílu. Hmotnost podvozkové nohy vyrobené touto metodou vyšla 5 842 g. Hmotnost se ušetřila díky menší tloušťce jednotlivých vrstev a absenci pěnových jader odtokových hran a pásnic.

Orientační cena. Cena materiálu vyšla obdobně jako u předchozí metody.

Tab. 15: Cena materiálů upravené metody kladení prepregů

	V [m ³]	t_l [mm]	Plocha [m ²]	Cena [Kč]
Model spodní	0,1536	38	4,041	3 027
Model horní	0,1214	38	3,195	2 393
Forma spodní	0,0111	0,35	31,809	15 116 + 5 282 (EP)
Forma horní	0,0111	0,35	31,809	15 116 + 5 282 (EP)
Jádra*	0,0046	15	0,305	93
Potahy	0,0001	0,12	1,067	1 206
Pásnice	0,0022	0,2	11,139	14 235
Stojiny	0,0011	0,2	5,276	5 741
				67 491

Náklady na výrobu by byly vyšší než u předchozí metody kvůli lisování v autoklávu.

13.1.3 Vakuová infuze (Light-RTM)

Pro zajištění oboustranně hladkého povrchu nebude svrchní část formy v této metodě zhotovena jako obvykle z plachetky, ale z kompozitní formy ze skelného laminátu. Počet vrstev z Tab. 11 ani struktura se oproti metodě z návrhu konstrukce nebudou měnit.

Postup výroby forem. Spodní pevná forma by se vyráběla obráběním lepených MDF desek na 5 osé CNC frézce. Povrch pevné formy by se lakoval pro zajištění těsnosti a hladkého povrchu. Obdobně by se vyrábělo i kopyto pro výrobu kompozitní formy. Ta by se vyráběla ruční laminací skelné tkaniny na kopytu. Na utěsnění povrchu kompozitní formy by byl použit formovací gelcoat. Do kompozitní formy by se museli zakomponovat otvory pro přívod pryskyřice a pro odsávání vzduchu, drážky pro těsnění a díry pro šrouby. Formy se navrhují

na základě zjištěné prostupnosti pryskyřice pomocí experimentu či simulace. Jádra by se vyráběla obdobně jako u předešlých metod. Do hotových jader by se odporovým drátem vyrobily drážky pro zajištění toku pryskyřice. Pro zajištění pozice tkanin by se musela vyrábět jádra pro všechny dutiny podvozkové nohy.

Postup výroby dílu. Na jádra stojin by se nejprve nakladly vrstvy tkaniny tvořící stojiny. Mezi jednotlivé vrstvy by se nanášelo lepidlo ve spreji. Do spodní pevné formy by se nanesl separátor a poté gelcoat. Poté by se kladly vrstvy horního potahu s přesahem. Na horní potah by se vložily jádra odtokových hran, o které by se opřely vrstvy horní pásnice. Mimo formu by se omotáváním tkaniny na jádro vyrobily stojiny, které by se poté vložily do spodní formy společně s jádry pásnic a inserty. Dalšími vrstvami uhlíkových tkanin by se vytvořila spodní pásnice a poté by se z přesahu skelných tkanin horního potahu vytvořil spodní potah. Na spodní potah by se opět nanesl gelcoat. Do pevné formy by se připravilo těsnění a vtoková a odvzdušňovací soustava. Připravené formy by se sešroubovaly a provedla by se kontrola těsnosti. Díl by se následně prosytil pryskyřicí, která by se nechala vytvrdit. Po vytvrzení by se provedly dokončovací operace jako je řezání přesahující pryskyřice a vrtání děr pro uložení kolových os.

Zvolené materiály. Výroba vakuovou infuzí probíhá za okolních teplot při zanedbatelných tlacích, a proto je možné formy a jádra vyrábět z levnějších materiálů. Spodní pevná forma a kopyto by se vyrobily z MDF desek a kompozitní forma by se vyrobila ze skelné tkaniny Interglas 92125 (280 g.m⁻²) a Interglas 90070 (81 g.m⁻²) pro povrchové vrstvy. Výplň by byla pryskyřice LH 160 s tužidlem H 146 od firmy Havel Composites.

V této metodě by se použily stejné výztuže dílu jako v návrhu konstrukce: Aeroglass 80, Aeroglass 163 a uhlíková UD tkanina UDO 200 g.m⁻². Skelné tkaniny na rozdíl od těch z návrhu konstrukce by byly s keprovou vazbou, neboť tato vazba má vyšší poddajnost než plátňové tkaniny.

Pro vakuovou infuzi je nutné volit vhodné pryskyřice s nízkou viskozitou a dlouhým časem gelace a dobou zpracování. Na základě těchto požadavků by byla použita epoxidová pryskyřice LH 288 s tužidlem H 282.

Pro výrobu jader je potřeba volit pěnu, kterou lze řezat odporovým drátem. Použila by se PS pěna XPS od Easy Composites. [21] [47]

Tab. 16: Použité materiály při metodě vakuové infuze [21] [47]

	FAW [g.m ⁻²]	ρ [g.cm ⁻³]	t_l [mm]	cena [Kč.m ⁻²]
Aeroglass 80 ±45°	80	2,56	0,06	105
Aeroglass 163 ±45°	163	2,56	0,13	125
UDO 200	200	1,8	0,22	679
LH288/H 146		1,11	-	847 [Kč.kg ⁻¹]
XPS pěna	-	0,003	100	1 436
MDF deska	-	-	38	898
Interglas 90070	81	2,56	0,1	152
Interglas 92125	280	2,56	0,35	210
LH160/H 146	-	1,13	-	925 [Kč.kg ⁻¹]

Zhodnocení metody. Na rozdíl od metody z návrhu konstrukce lze pomocí vakuové infuze docílit hladkého povrchu na obou stranách dílu při srovnatelném v_f 50 %. Oproti předchozí metodě by tímto způsobem byla vyrobena celá podvozková noha v jednom kuse a odstranila by se potřeba lepení. Zároveň lze dosáhnout vyšší kvality a homogenity materiálu.

Největším problémem u vakuové infuze je zajištění úplného prosycení. Návrhu forem a výrobního postupu pro takto rozměrný díl musí často předcházet vypracování simulací či experimentálních vzorků pro určení prostupnosti pryskyřice tkaninou. U vakuové infuze je požadována dokonale utěsněná forma, neboť jakákoliv netěsnost může vnést do dílu vzduchové bubliny, které mohou výrobek zničit. Oproti prepregům je také nevýhodou obtížnější zacházení se suchými tkaninami.

Hmotnost dílu. Hmotnost podvozkové nohy vyrobené vakuovou infuzí je 5 854 g. V této metodě bylo dosaženo srovnatelné hmotnosti jako u upravené metody kladení prepregů.

Orientační cena. Díky nižším požadavkům na materiál forem a využití suché tkaniny jsou materiálové náklady výrazně nižší než u technologií využívajících prepregů. Materiálové náklady jsou uvedeny v Tab. 17.

Tab. 17: Cena materiálů metody vakuové infuze

	V [m ³]	t_l [mm]	Plocha [m ²]	Cena [Kč]
Model	0,2363	38	6,218	5 661
Pevná forma	0,2301	38	6,056	5 438
Skořepinová forma	0,0057	0,3	19,083	9 512
Jádra*	0,0053	10	0,530	60
Potahy	0,0001	0,1	1,037	215
Pásnice	0,0020	0,18	10,913	8 737
Stojiny	0,0009	0,1	9,175	1 609
				31 233

Výrobní náklady budou také nižší než u metod využívajících prepregů, jelikož se bude vyrábět pouze jedna kompozitní forma a nebude probíhat vytvrzování za vysokých teplot.

13.1.4 RTM

Třetí variantou je vysokotlaké vstřikování. Složení a struktura dílu bude opět odpovídat Tab. 11.

Postup výroby forem. Formy by se vyrobily odlitím z hliníku, obrobením kontaktních ploch na CNC frézce a následným leštěním. Jádra by se vyrobila stejně jako u předchozích metod. V této metodě by nebylo potřebné vyrábět na jádrech drážkování jako v předchozí metodě. Svrchní forma by však musela mít kanálky pro přívod pryskyřice. Na okrajích dílů by se vyrobily odtokové kanálky se zabudovanými senzory pro zajištění kompletního prosycení dílu, neboť do uzavřené formy není v průběhu výrobního procesu vidět.

Postup výroby dílu. Do spodní části formy by se předpřipravily suché tkaniny a jádra jako u předchozí metody. Forma by se následně uzavřela svrchní částí a utěsnila. Připravenými kanálky by se přiváděla nízkoviskózní pryskyřice. Pryskyřice by se nechala vytvrdit a poté by se díl vyjmul z formy. Nakonec by bylo potřeba obráběním odstranit pryskyřici, která přetekla do odtokových kanálků a vyvrtat díry pro kolové osy.

Zvolené materiály. Pro tuto metodu jsou vhodné identické materiály jako u vakuové infuze. Na formu by bylo využito hliníkové slitiny. Parametry použitých materiálů jsou v Tab. 16.

Zhodnocení metody. Oproti kladení prepregů má stejné výhody jako vakuová infuze při zajištění v_f až 70 % a vyšší kvality výrobku. Oproti vakuové infuzi má menší požadavky na těsnost formy, jelikož při vzniku netěsnosti dochází pouze k přetečení pryskyřice

a do dílu nevniká nežádoucí vzduch. Také prosycení je dokonalejší, není potřeba složitých odhadů ani simulací a celkový výrobní čas je kratší než u vakuové infuze.

Krátké výrobní časy nemají však pro kusovou výrobu příliš zásadní význam. Oproti Light-RTM tato metoda vyžaduje výrobu uzavřených tlakových kovových forem, které jsou vysoce nákladné a obvykle se vyplatí pouze na sériovou výrobu nebo pouze pro malé díly. Pomocí RTM lze zajistit vysokou kvalitu kompozitních dílů.

Hmotnost dílu. Teoretická hmotnost při v_f 70 % vyšla 4 664 g.

Orientační cena. Při použití duralových forem by výrobní cena forem několikanásobně převyšovala náklady na materiály pro výrobu dílu. Náklady na materiál pro výrobu dílu by byly obdobné jako u vakuové infuze. Náklady na výrobu duralových forem by se však pohybovaly v řádech statisíců korun.

13.2 Volba technologie výroby

Metodou RTM lze sice zajistit nejnižší hmotnost a nejvyšší kvalitu výrobku, avšak výroba forem je velice obtížná a nákladná a pro kusovou výrobu se nevyplatí. RTM by se případně mohlo zvážit pro výrobu menších a komplexních dílů.

Ve firmách zabývajících se výrobou podvozkových nohou se nejčastěji využívá ručního kladení prepregů s následným vytvrzením v autoklávu. Využívají se uhlíkové prepregy a namísto pěnových jader se volí výroba pomocí vakuových pytlů, které vyplňují prostor dutin v podvozkové noze. V návrhu konstrukce byla zvolena nedělená podvozková noha a využití vakuových pytlů tak není možné. Pokud by byla výroba podvozkové nohy provedena firmou, byla by zvolena metoda kladení prepregů. Výroba prepregů vyžaduje značné zkušenosti a v podmínkách ÚLT by tak mohlo být obtížné dosáhnout dostatečné kvality výrobku.

Vakuovou infuzí lze dosáhnout hmotnosti srovnatelné s výrobou pomocí prepregů. Oproti původně zvolené technologii výroby se ušetří přibližně 600 g z celkové hmotnosti nohy a tato metoda je levnější a je možné pomocí ní vyrobít nohu z jednoho dílu, který bude mít oproti prepregům lepší kvalitu povrchu. Tato metoda bude časově náročnější, což by však pro kusovou výrobu nemělo hrát velkou roli.

Z těchto důvodů volím pro výrobu podvozkové nohy vakuovou infuzi.

Pro zvolenou technologii bude dále proveden podrobný návrh forem, přípravků a postupu výroby.

14 Návrh forem a přípravků pro výrobu podvozkové nohy

Před samotným návrhem forem je nutné zjistit prostupnost pryskyřice, díky které se určí poloha vtokových a odvzdušňovacích otvorů. Tu lze zjistit pomocí simulací nebo na experimentálním vzorku. Dále budou navrženy vzorky pro experimentální zjištění prostupnosti pryskyřice. Pro zvýšení prostupnosti se využívá několik metod, které budou zmíněny v následující podkapitole.

14.1 Metody zvýšení prostupnosti pryskyřice

Prostupnost pryskyřice bude u tohoto dílu snížena zejména pěnovými jádry. Zvolená pěna má uzavřené buňky, skrz které pryskyřice neprostupuje.

Existuje několik metod, pomocí kterých lze zvýšit prostupnost pryskyřice. Pro vakuovou infuzi se vždy volí pryskyřice s nízkou viskozitou. Prostupnost tkaninou se zajišťuje vynechanými přízemi, které vytváří kanálky pro tečení pryskyřice. Jedná se o speciální tkaniny a jejich pořizovací cena je vyšší než u běžných tkanin. Pro pěnová jádra lze použít drážkovanou, či děrovanou pěnu. Tento typ pěny má obvykle drážkování na povrchu a jelikož se pěnová jádra budou řezat a tvarovat, bylo by obtížné zajistit umístění drážek na povrchu jader. U této metody by bylo možné částečné odtažení kompozitní formy, což by vytvořilo prostor pro tečení pryskyřice. Po prosycení by se forma dotáhla, čímž by se vytlačila přebytečná pryskyřice. Vznikalo by však riziko, že pryskyřice bude protékat kolem tkaniny, kde má minimální odpor, a střed podvozkové nohy by zůstal neprosycený. Dále se využívá systému hadiček a infuzních mřížek, ty jsou však vhodné pouze pro jednostranně hladký díl, neboť po odtržení zanechají hrubý povrch. [9]

Pro tento případ bylo zvoleno drážkování a děrování na pěnových jádrech ve finálním tvaru. Aby bylo možné drážky a díry vytvořit, je potřeba zvolit pěnu, kterou je možné řezat odporovým drátem.

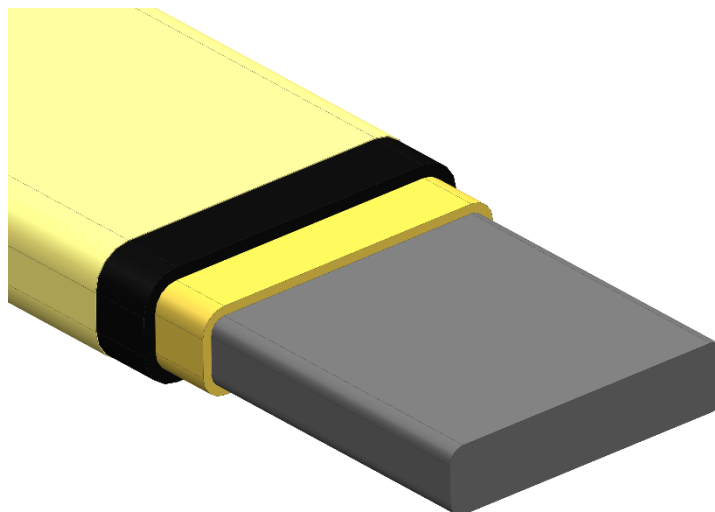
14.2 Návrh vzorků pro zjištění prostupnosti pryskyřice

Pro určení rychlosti toku pryskyřice bude vyhotoveno několik vzorků, které se budou v experimentu prosycovat.

Vzorky budou vyrobeny v obdobné skladbě jako je skladba podvozkové nohy. Průřez vzorku bude stejný jako u podvozkové nohy v místě závěsů. Vzorky budou mít délku 500 mm. Na pěnové jádro se namotá 20 vrstev skelné tkaniny Aeroglass 163 simulující stojiny, poté

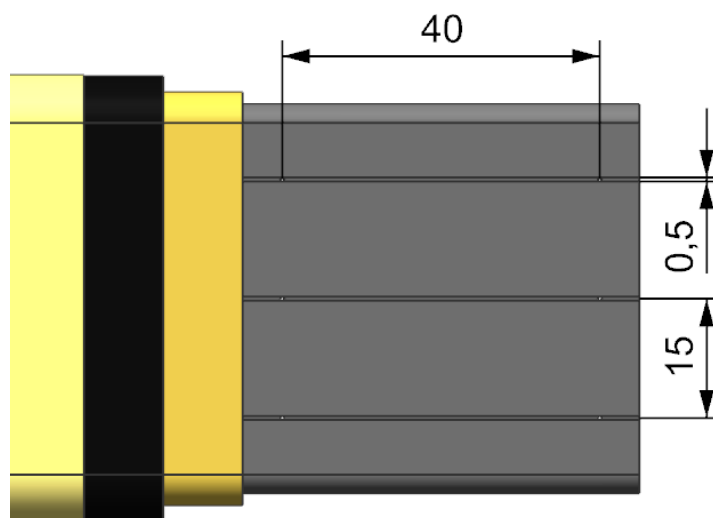
se namotá 15 vrstev jednosměrné uhlíkové tkaniny UDO, které se poté pokryjí vrstvou tkaniny Aeroglass 163 představující potah. Vzorek se umístí na desku a překryje plachetkou, která bude utěsněna páskou. Na jedné straně se umístí hadička pro přívod pryskyřice a na druhé straně hadička pro odsávání vzduchu.

Měření se provede na třech vzorcích. První vzorek bude mít pěnové jádro bez drážkování. Žlutou barvou je zvýrazněna skelná tkanina, černou uhlíková tkanina a šedou pěnové jádro. (Obr. 31)



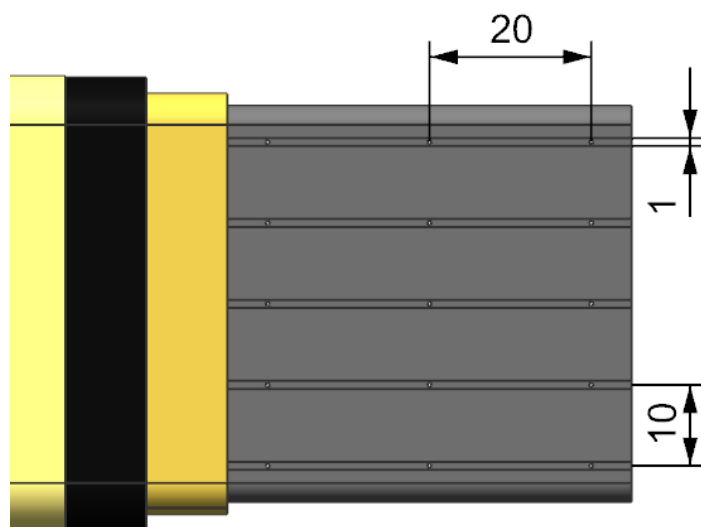
Obr. 31: Model prvního vzorku

Druhý vzorek bude mít drážkování o rozměru 0,5 mm s rozestupem 15 mm. Drážkování bude provedeno po délce dílu na obou stranách. Každých 40 mm bude v drážce provrtána díra zajišťující vstup pryskyřice napříč tloušťkou jádra. (Obr. 32)



Obr. 32: Model druhého vzorku

Třetí vzorek bude mít drážky o šířce 1 mm, rozestup bude 10 mm a díry budou vrtány každých 20 mm. (Obr. 33)



Obr. 33: Model třetího vzorku

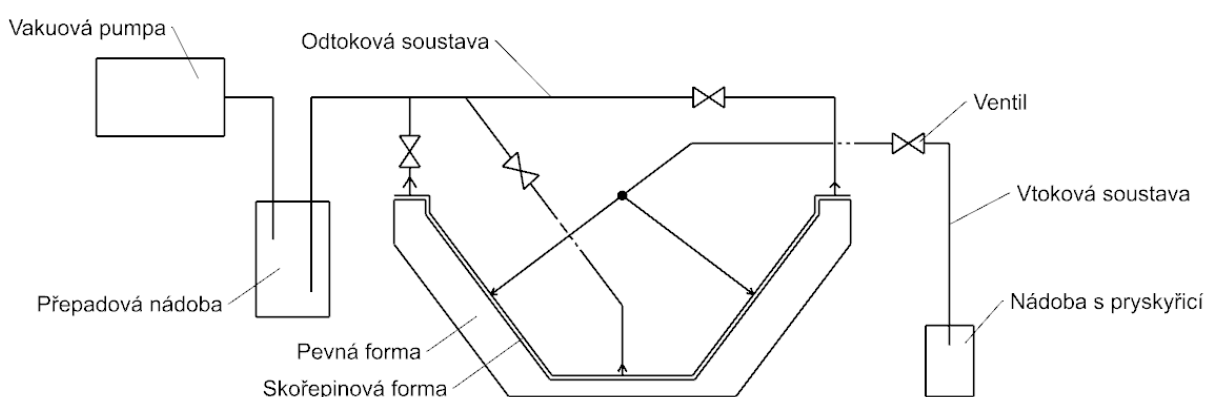
Při experimentu se bude měřit jakou vzdálenost pryskyřice ve vzorku za určitý čas prostoupí. Zároveň se bude pozorovat pokles rychlosti prostupu, který by indikoval limit vzdálenosti, kterou je pryskyřice v dílu schopna prostoupit.

Na základě zjištěné prostupnosti pryskyřice a doby zpracovatelnosti zvolené pryskyřice se určí vzdálenosti mezi vtokovými a odvzdušňovacími otvory a jejich počet.

V této práci jsou vzorky pouze navrženy a nebude proveden experiment. V následující kapitole bude proveden návrh vtokové a odvzdušňovací soustavy. Maximální vzdálenost mezi vtokovým a odvzdušňovacím otvorem bude přibližně 800 mm a doba zpracovatelnosti zvolené pryskyřice je 150 minut. Limitní prostupnost pryskyřice tak vychází $5,3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Důležité je zhodnotit i převýšení mezi odvzdušňovacím otvorem na konci formy a přívodem pryskyřice. Vzdálenost mezi těmito otvory je přibližně 600 mm, prostupnost pro díl ve vodorovné formě tak vychází $4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Tato hodnota by se měla brát vzhledem k převýšení s určitou rezervou. Pokud by v experimentu byla zjištěna nižší prostupnost nebo pokud by na konci vzorku docházelo ke zpomalení prostupu, bylo by potřeba zkrátit vzdálenost mezi otvory přidáním dalších vtokových či odvzdušňovacích otvorů. Případně by se mohly vytvořit další vzorky s hustší sítí drážek nebo širšími drážkami. Příliš široké drážky by však mohly ovlivnit výsledný tvar dílu.

14.3 Vtoková a odvzdušňovací soustava

Pro výrobu podvozkové nohy byla zvolena vtoková a odvzdušňovací soustavy dle schématu na Obr. 34. Pryskyřice se bude přivádět přibližně v polovině výšky formy na obou stranách. Odvzdušňovací otvory budou na obou koncích a uprostřed formy. Všechny otvory budou umístěny v těsné blízkosti dílu tak, aby se zamezilo ovlivnění výsledného povrchu a zároveň se co nejvíce zkrátily vzdálenosti mezi otvory. Mezi vtokovým otvorem a odvzdušňovacím otvorem na konci nohy bude vzdálenost 600 mm a mezi spodním otvorem a vtokovou soustavou 800 mm. Pod vtokové otvory budou umístěny přesahující tkaniny potahů, což zajistí lepší prosycení dílu.



Obr. 34: Schéma formovací soustavy

14.4 Pevná forma

Spodní pevná forma bude vyrobena z lepených MDF desek. Použijí se MDF desky o rozměrech 38x2800x2070 od firmy Dřevo Trust. Desky budou nařezány a následně lepeny pomocí běžného disperzního lepidla na dřevo Ponal Standard D2. Lepení se bude provádět jednostranně v množství cca 200 g.m⁻².

Slepené desky se budou obrábět na 5 osé CNC frézce. Do připravených děr se vlepí kovové inserty s dírou se závitem M10.

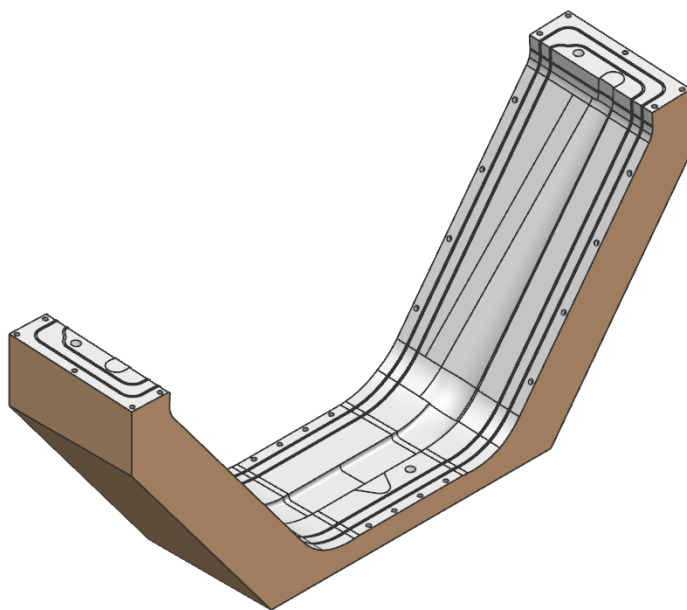
Vyrobená forma se nejprve obrousí pro zajištění hladkého povrchu a následně se bude lakovat. Pro lakování byl zvolen dvousložkový polyesterový lak ICRO ZSFOB937-A pro dobrou brousitelnost a opravitelnost. Lak se na formu nanese ve 4 vrstvách v množství 250 g.m⁻². Tento lak se nejprve dle potřeby zředí pomocí ředidla ICRO DILS00AC (0-10% hm.), smíchá s urychlovačem CZAL0002 (2 % hm.) a poté se přidá tužidlo ICRO CZCT002 (2 % hm.). Lak je potřeba nechat zaschnout minimálně 24 hod.

3D model formy byl vytvořen odečtením geometrie modelu podvozkové nohy od podstavy.

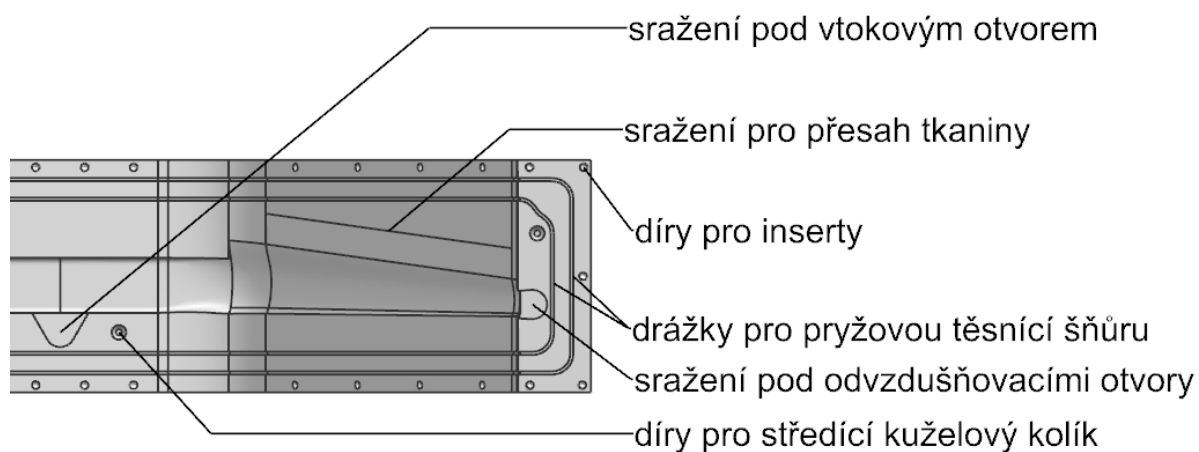
Na modelu formy byly provedeny tyto úpravy:

- Ostré hrany na koncích podvozkové nohy byly zaobleny pro snadnější pokládání tkaniny a lepší prostupnost pryskyřice.
- Pevná forma byla opatřena přírubou širokou 150 až 200 mm pro umístění přesahů tkaniny, těsnění, šroubových spojů atd.
- Po obvodu příruby byly přidány dvě drážky pro umístění pryžové těsnicí šňůry NBR s kruhovým průřezem $\varnothing 5$ mm. Vzdálenost drážek od okraje je 30 až 40 mm. Vzdálenost mezi drážkami je 40 mm. Rozměry drážky byly zvoleny dle katalogu firmy Rubena. [48]
- Do formy byly přidány díry $\varnothing 16$ H9 pro vlepění ocelových insertů se závitem M10. Inserty jsou válcové s průměrem a délkou 16 mm. Na jedné straně jsou sraženy pod úhlem 15° pro lehčí montování. Polohy děr v průmětu do půdorysu jsou znázorněny na Obr. 37. Vzdálenost děr od okraje formy je 15 mm. Na kompozitní formě by bylo obtížné vyrábět osazení pro opření šroubů, a proto budou všechny díry kolmé na povrch formy.
- V místě odvzdušňovacích otvorů bylo přidáno vyhloubení 0,5 mm pro zajištění lepšího toku pryskyřice.
- Na straně odtokových hran bylo přidáno sražení pro umístění přesahující tkaniny a zajištění lepšího toku pryskyřice.
- Byly přidány tři kuželové díry pro vystředění kompozitní formy.

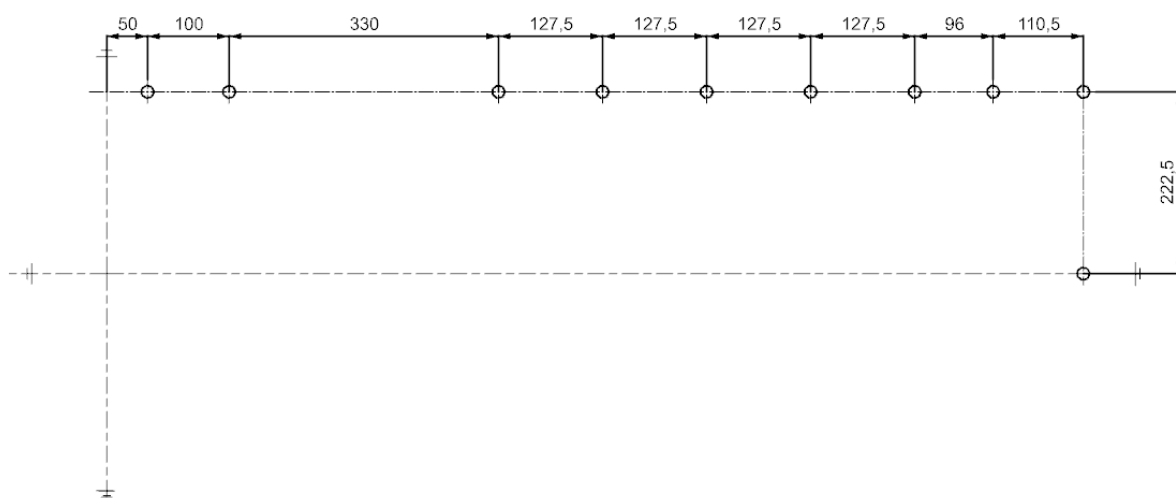
Na Obr. 35 je 3D model formy v izometrickém pohledu. Na Obr. 36 je popis jednotlivých prvků, které byly přidány na pevnou formu. Pevná forma je symetrická.



Obr. 35: Pevná forma v izometrickém a horním pohledu



Obr. 36: Popis jednotlivých prvků formy



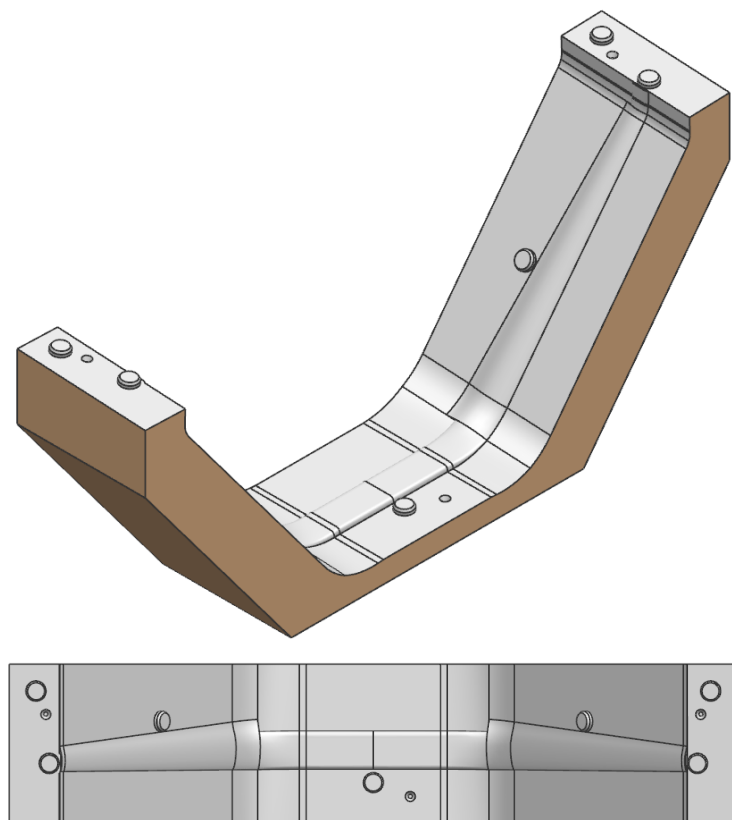
Obr. 37: Schéma polohy děr pro inserty v průmětu do půdorysu

14.5 Kompozitní forma

Kompozitní forma se pro nízkou cenu a na základě doporučení katalogu Havel Composites vyrobí ze skelných tkanin Interglas 90070 (81 g.m⁻²) a Interglas 92125 (280 g.m⁻²). Pro vysokou tuhost a možnost vytvrzení při pokojové teplotě byla výplň zvolena pryskyřice LH160 s tužidlem H 146 od Havel Composites. Pro zajištění hladkého a těsného povrchu bude použit gelcoat. U formovacího gelcoatu je důležitá možnost opravy a broušení, proto byl zvolen formovací gelcoat RenGel SW 56 s tvrdidlem HY 5159 (200g.m⁻² pro vrstvu o tloušťce 0,2 mm) a dobou zpracovatelnosti 25-30 min.

Výrobě kompozitní formy předchází výroba kopyta (master modelu). Kopyto se vyrobí ze stejných materiálů obdobně jako pevná forma. 3D model byl vytvořen spojením geometrie podvozkové nohy a podstavy a byly na něm provedeny následující úpravy:

- Byly přidány výstupky ve tvaru konektorů v místě otvorů. Tyto výstupky v kompozitní formě vytvoří prostor pro umístění konektorů.
- Na stejném místě jako u pevné formy byly umístěny kuželové díry, do kterých se vloží kuželové kolíky pro vzájemné vystředění forem. Kolíky budou přilepeny ke kompozitní formě pryskyřicí.



Obr. 38: Kopyto pro výrobu kompozitní formy v izometrickém a horním pohledu

Na kopytu se ručním kladením vyrobí kompozitní forma. Povrch kopyta se natře separátorem FREKOTE 700-NC. Separátor se bude natírat pomocí bezvláknového hadříku. Při natírání by se neměly přetírat oblasti, na kterých se již separátor nachází, aby bylo umožněno odpaření. Kopyto bude natřeno čtyřmi vrstvami separátoru. Mezi jednotlivými nátěry je potřeba nechat separátor 5-10 minut odpařovat. Po nanesení poslední vrstvy se nechá separátor zaschnout za pokojové teploty po dobu 15 až 20 minut.

Do nádoby se smíchá RenGel SW 56 s tužidlem HY 5159 v hmotnostním poměru 100:10. Při míchání je potřeba dodržet základních pravidel, která budou v následujícím postupu platit pro všechny dvousložkové pryskyřice, gelcoaty, lepidla apod.:

- Při míchání je potřeba zajistit co nejmenší množství vmíchaného vzduchu. Toho se docílí pomalým mícháním v čisté nádobě pomocí čistého nástroje.
- Pro zajištění kvality se do formy nesmí dostat nedostatečně homogenní směs. Pro zajištění dokonalé homogenity se provede důkladné promíchání a následně se směs přelije do další čisté nádoby. Zbytky směsi, které ulpěly v nádobě, se nebudou vyškrabovat, neboť by se na okrajích nádoby mohla vyskytovat nehomogenní směs.

Přípravená směs gelcoatu se nanese pomocí tuhého štětce na kopyto ve třech vrstvách o tloušťce 0,2 mm v celkovém množství 900 g.m^{-2} . Vrstvy se nanášejí v 40 minutových intervalech. Ke kompletnímu vytvrzení gelcoatu dojde po 12 hodinách.

Do kopyta se vloží hliníkové kolíky o délce 15 cm. Velký průměr kolíku je 30 mm a vrcholový úhel je 30° .

Obdobně jako gelcoat se připraví směs pryskyřice LH160 a tužidla H146 v hmotnostním poměru 100:30. Směs pryskyřice se nesmí míchat v příliš velkém množství kvůli uvolněnému teplu při exotermické reakci s tužidlem.

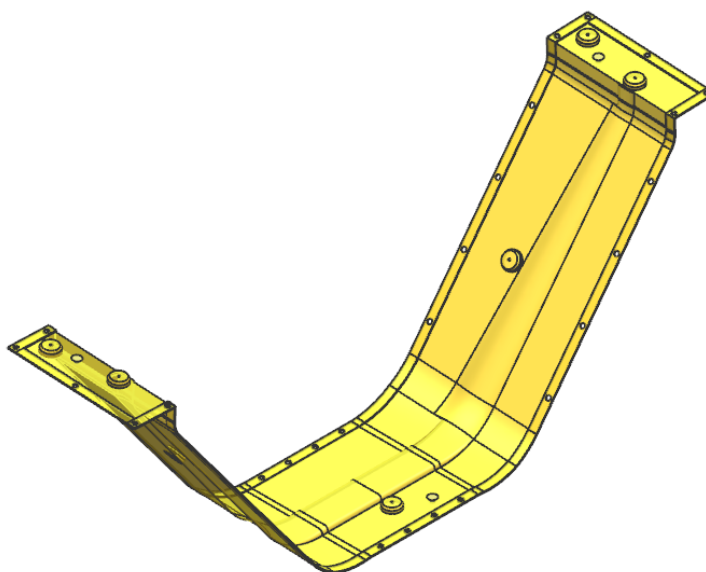
Následuje pokládání tkanin. První vrstva tkaniny se nanese na částečně zgelovaný gelcoat. Na kolíky se nanese větší množství pryskyřice pro přilepení. Tkaniny se budou prosycovat pryskyřicí pomocí válečku. Do záhybů se tkaniny vtěsňají pomocí špachtle. Pryskyřice LH160 se vytvrzuje za pokojových teplot.

Pořadí vrstev v kompozitní formě je následující.

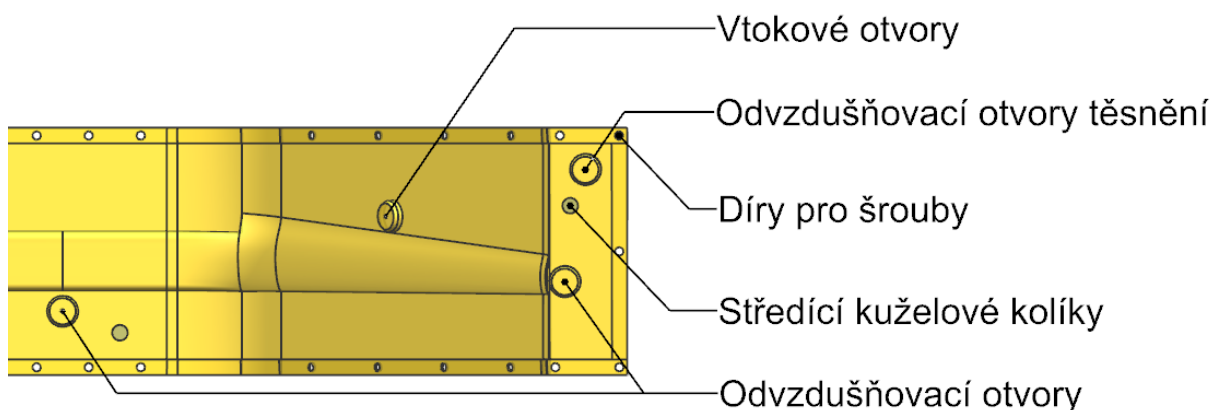
- 3 povrchové vrstvy ze skelné tkaniny Interglas 90070 (81 g.m^{-2})
- 15 vrstev tkaniny Interglas 92125 (280 g.m^{-2})
- 10 vrstev nastříhaných pásek 30 mm z tkaniny Interglas 92125 po obvodu formy

Jednotlivé tkaniny se budou orientovat tak, aby byla zajištěna co největší symetrie laminátu, pro zamezení zkroucení. Tkaniny budou orientovány pod úhly $\pm 45^\circ$.

Vytvrzená kompozitní forma se odlepí z modelu a provedou se dokončovací operace – řezání hran, vrtání děr pro šrouby a pro hadičky, kontrola povrchu apod. V případě nedostatků na povrchu je možné gelcoat RenGel SW65 brousit, či leštit. Polohy děr pro šrouby odpovídají schématu pro pevnou formu na Obr. 37. Díry mají průměr 12 H14. Díry pro přívod hadiček mají průměr 9 mm. Na kompozitní formě nebylo možné vytvořit osazení pro dosednutí šroubu, proto jsou všechny díry vrtány kolmo k povrchu formy.



Obr. 39: Kompozitní forma



Obr. 40: Popis jednotlivých prvků formy

15 Postup výroby podvozkové nohy

V této kapitole bude podrobně popsán postup výroby podvozkové nohy pomocí zvolené technologie. Nejprve budou popsány použité materiály na výrobek, přípravky a spotřební materiály. Následně bude popsán postup výroby, jež bude pro přehlednost rozdělen do těchto kroků: příprava forem, příprava jader a insertů, příprava tkanin, kladení tkanin do formy, příprava infuze, infuze a vytvrzení, dokončovací operace.

15.1 Materiály, přípravky a spotřební materiály

V Tab. 18 jsou sepsány všechny použité materiály na výrobu dílu, přípravky a spotřební materiály. Uveden bude charakteristický parametr (gramáž, objem, spotřeba na m² apod.), prodejce, použití ve výrobě, cena a případně odkaz na technický list. Jednotlivé položky jsou uvedeny v pořadí využití.

Tab. 18: Seznam použitých materiálů

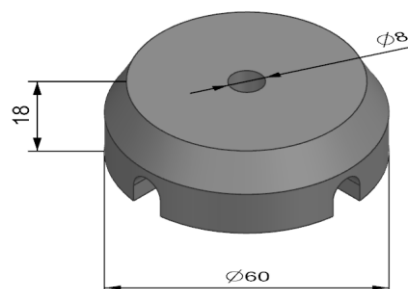
	Charakteristický parametr	Prodejce	Použití	Cena [Kč]	TL
MDF Deska	38x2800x2700	Dřevo Trust	Pevná forma, kopyto	5663/ks	-
Ponal Standard D2	200 g.m ⁻² /vrstva; 90 min.	Dřevo Trust	Pevná forma, kopyto	180/kg	Příloha 1
ICRO ZSFOB937-A/ DILS00AC/ CZAL0002/ CZCT002	250 g.m ⁻² /4 vrstvy; 24 hod.	ICRO	Pevná forma, kopyto	*	Příloha 2
Interglas 90070	81 g.m ⁻² ; kepr	Havel Composites	Kompozitní forma	152/m ²	Příloha 3
Interglas 92125	81 g.m ⁻² ; kepr	Havel Composites	Kompozitní forma	210/m ²	Příloha 4
LH160/H146	geltime 3-4 hod.	Havel Composites	Kompozitní forma	501/kg 424/kg	Příloha 5 Příloha 6
RenGel SW 56/HY 5159	200 g.m ⁻² /0,2mm; 25-30 min.	Havel Composites	Kompozitní forma	1088/kg 1491/kg	Příloha 7
FREKOTE 700-NC	4 vrstvy; 15-20 min.	Havel Composites	Pevná forma, kopyto, kompozitní forma	1491/l	Příloha 8
Břízová překližka	6x1525x1525	Dřevo Trust	Inserty dílu	1125/ks	-
Konektor hadiček	Ø6 mm silikon	Easy Composites	Kompozitní forma	110/ks	-
IA609	-	HF Servis	Těsnění	129/10g	-

Těsnící šňůra 5 NBR 70 Rubena	Ø5mm	Adoz	Pevná forma	22,4/m	-
Ravatherm XPS	100x1200x1200 mm	Easy Composites	Jádra	2488/ks	Příloha 9
Aeroglass 80	80 g.m ⁻² ; kepr	Havel Composites	Potahy	105	*
Aeroglass 163	163 g.m ⁻² ; kepr	Havel Composites	Potahy, stojiny	125	Příloha 10
UDO 200	200 g.m ⁻² ; UD	Havel Composites	Pásnice	679	*
Vorgelat T35	400 g.m ⁻² /0,4 mm; 20-30 min.;	Havel Composites	Povrch dílu	1123/kg	Příloha 11
HAVEL Filler G	doba zprac. 5 min.; brousitelný 30 min.	Havel Composites	Zacelení mezer	560/kg	-
Šroub ISO 4017-M10x25	40ks	Briol	Stažení forem	2,2/ks	-
Vakuovací hadička	D8xd6	Havel Composites	Vtoková a odvzdušňovací soustava	47/m	-
ST150 butylová páska	12x3 mm; délka 15 m	Easy Composites	Utěsnění hadiček	188/ks	-
Svorkové ventily	-	Havel Composites	Uzavírání hadiček	1013/ks	-
LH288/H146	doba zprac. 150 min.	Havel Composites	Výplň dílu	469/kg 424/kg	Příloha 12 Příloha 6
HAVEL Filler SP	doba zprac. 5 min; brousitelný 20 min	Havel Composites	Jemné opravy	547/kg	-

*cena nebo technický list není veřejně dostupný

15.2 Příprava forem

Do předpřipravených výstupků kompozitní formy se vloží silikonové konektory hadiček s kanálky pro rozvod pryskyřice. Silikonové konektory se při použití s EP musí po několika použitích vyměnit. Na Obr. 41 je 3D model silikonového konektoru hadiček. Dané rozměry jsou maximální přípustné pro umístění do kompozitní formy.



Obr. 41: 3D model konektoru s maximálními přípustnými rozměry

Pevná i kompozitní forma se natře separátorem FREKOTE 700-NC. Postup je obdobný jako při výrobě kopyta. (viz. kapitola 14.5).

Do pevné formy se vloží pryžové těsnící šňůry NBR 70 o kruhovém průřezu $\text{Ø}5$ mm od firmy Rubena. Konce těsnících šňůr se slepí pomocí lepidla určeného na pryže. Je možné použít například kyanoakrylové lepidlo IA609 určené na O-kroužky.

15.3 Příprava jader a insertů

Jádra se budou řezat pomocí odporového drátu, brousit a lepit běžným lepidlem do požadovaného tvaru. PS pěnu je také možné tvarovat za zvýšené teploty. Pro zajištění správného tvaru se bude využívat šablon odpovídajících různým konstrukčním řežům podvozkové nohy. Na základě zjištěného toku pryskyřice se do hotových jader vytvoří pomocí odporového drátu a nahřátého hrotu/pájky drážky a díry pro vedení pryskyřice. Z důvodu potřeby řezání odporovým drátem byla zvolena PS pěna Ravatherm XPS.

Dále se vyrobí dva inserty z břízové překližky řezáním, či obráběním. Na Obr. 42 jsou znázorněny pěnová jádra zelenou barvou a překližkové inserty žlutou barvou.



Obr. 42: 3D model pěnových jader a překližkových insertů

15.4 Příprava suchých tkanin

Jednotlivé tkaniny se naměří a přibližně nastříhají. Tkaniny do potahů se nastříhají s dostatečným přesahem, ale menším než 120 mm. Tkaniny obou potahů budou z jednoho kusu, tj. na náběžné hraně budou spojeny. Tkaniny pásnic a stojin budou bez přesahů. Pro výrobu podvozkové nohy bude potřeba následující počet vrstev jednotlivých tkanin.

- 1 vrstva skelné tkaniny Aeroglass 80,
- 2 vrstvy na potah a 40 vrstev na stojiny tkaniny Aeroglass 163,
- 25 vrstev tkaniny UDO 200.

15.5 Kladení tkanin do formy

Vzhledem k nespojitosti přechodu mezi počtem vrstev v jednotlivých konstrukčních řezech je potřeba tyto přechody vyřešit postupným ubíráním či přidáváním vrstev. Mezi konstrukčními řezy s rozdílným počtem vrstev tkaniny se u pásnic provede odstupňování každých 10 mm délky dílu. V konstrukčních řezech nesmí být z hlediska bezpečnosti méně vrstev, než je požadováno. Příkladem je přechod na konstrukčním řezu 13 pro horní pásnici. Zde je potřeba přejít z počtu 22 vrstev na 15. Do vzdálenosti 908 mm se tak nanese

22 vrstev a poté mezi vzdáleností 908 a 838 mm se bude postupně ubírat každých 10 mm jedna vrstva.

U přechodu v konstrukčním řezu 12 bude vznikat problém na konci střední stojiny. Pro zachování spojitosti by bylo možné například provést postupné přeplátování tkanin se současným ubíráním vrstev na povrchu stojiny.

Do připravené pevné i kompozitní formy se nejprve nanese gelcoat. Na základě doporučení katalogu firmy Havel Composites a pro snadnou opravitelnost a leštitelnost byl zvolen polyesterový gelcoat Vorgelat T35 MGS (doba zpracování 20-30 min.) s tvrdidlem SF 2. Před výrobou dílu by bylo vhodné vyzkoušet na malém vzorku spojení tohoto gelcoatu s pryskyřicí LH288.

Gelcoat se smíchá s tvrdidlem SF2 v hmotnostním poměru 100:10. Podle potřeby je možné přidat ředidlo SF. To by se však mělo přidávat v co nejmenším množství a nemělo by přesáhnout 10 % hm.

Do forem se stříkáací pistolí nanese 5 vrstev gelcoatu o tloušťce 0,1 mm v množství 100 g.m⁻². Před kladením tkaniny je potřeba nechat gelcoat vytvrdit 24 hodin při pokojové teplotě.

Mezi jednotlivé vrstvy tkaniny se bude klást lepidlo ve spreji pro lepší formovatelnost. Na vytvrzený gelcoat se kladou vrstvy tkaniny a jádra v následujícím pořadí:

- 1) Do formy umístí svrchní vrstva potahů z tkaniny Aeroglass 80. Tato vrstva se umístí s přesahem do 60 mm. V místě náběžné hrany se nechá zbytek tkaniny tvořící dolní potah přesahovat.
- 2) Obdobně jako svrchní vrstva potahů se umístí zbylé dvě vrstvy potahů z tkaniny Aeroglass 163 v orientaci $\pm 45^\circ$.
- 3) Na potah se vlepí jádra odtokových hran.
- 4) Na potahy se bez přesahů navrství UD uhlíková tkanina tvořící horní pásnici. Pásnice bude vlepna do jedné poloviny výšky jader odtokových hran. Vlákná UD tkaniny musí být orientovány po délce dílu.
- 5) Mimo formu se připraví stojiny. Na jádra stojin se nejprve v konstrukčních řezech 12-22 namotá zvlášť polovina vrstev skelné tkaniny Aeroglass 163. Konce tkaniny se budou pravidelně umísťovat do horní a spodní části jádra. Přerušeni by nikdy nemělo být ve svislé části stojiny. Na konci střední stojiny se nechají tkaniny odstupňované pro zajištění přeplátování.

- 6) Jádra stojin se slepí dohromady a následně se omotají zbylými vrstvami uhlíkové tkaniny. V konstrukčním řezu 12 se provede přechod pomocí přeplátování vnitřních vrstev laminátu a s postupným ubíráním svrchních vrstev. Pokud by v konstrukčním bodě 12 vznikl ostrý přechod mezi jádry či mezera, je možné využít na vyplnění mezery dvousložkový tmel vyztužený skelným vláknem HAVEL Filler G. Tento tmel se míchá s dodávaným tužidlem v poměru 100:2 a je možné ho nanášet v silné vrstvě.
- 7) Do formy se umístí hotové stojiny z bodu 6) společně s pásnicovými jádry a inserty.
- 8) Obdobně jako v bodě 4) se vytvoří spodní pásnice.
- 9) Nakonec se přesahující dvě vrstvy tkaniny Aeroglass 163 a jedna vrstva Aeroglass 80, které byly umístěny v bodě 1) přetáhnou a přilepí přes spodní pásnici a odtoková jádra a vytvoří se tak spodní potah. Oba konce tkaniny budou uloženy s přesahem do 60 mm.

15.6 Příprava infuze

Kompozitní forma se na pevnou formu vystředí pomocí středících kolíků a přitáhne se pomocí šroubů ISO4017-M10x2. Šrouby se budou utahovat křížem, aby nedošlo ke zkroucení a následné netěsnosti formy.

Připravenými otvory se do konektorů zasunou vakuovací hadičky 8x6mm. Utěsnění hadiček bude provedeno pomocí butylové pásky ST150.

Odsávací a vtoková soustava se zapojí dle schéma na Obr. 34. Na hadičky se použijí svorkové ventily pro uzavírání přívodu pryskyřice a odvodu vzduchu.

Před zahájením výroby je nutné provést zkoušku těsnosti. Z prostoru formy se odsaje vzduch a provede se vizuální a akustická kontrola netěsností. Následně se uzavřou vstupní i výstupní ventily a forma se nechá 15 minut v klidu. Po opětovném otevření výstupního ventilu by se neměl výrazně zvýšit tlak. Pokud tlak vzroste, je nutné opětovně zkontrolovat těsnost formy a opakovat zkoušku těsnosti.

15.7 Infuze a vytvrzení

Pro velice nízkou viskozitu a dlouhý čas zpracování byla zvolena epoxidová pryskyřice LH 288 s tvrdidlem H 146. Pryskyřice se smíchá v nádobě s tvrdidlem v hmotnostním poměru 100:28. Při míchání je potřeba dodržet stejné zásady jako u míchání gelcoatu. (viz. kapitola 14.5)

Ke dnu nádoby s pryskyřicí se umístí a upevní hadička vtokové soustavy.

Jakmile se z formy odsaje vzduch je možné otevřít ventil vtokové soustavy. Infuze se provádí tak dlouho, dokud v odvodušňovacích hadičkách nezačne proudit pouze čirá pryskyřice bez bublin. V průběhu infuze je nutné kontrolovat těsnost formovací soustavy a dostatek pryskyřice v nádobě.

Po dosažení kompletního prosycení dílu se nejprve uzavřou vtokové ventily a po několika vteřinách se uzavřou i odtokové ventily.

Pryskyřici LH 288 s tvrdidlem H 146 lze vytvrzovat za pokojových teplot po dobu 24 hodin.

15.8 Dokončovací operace

Vytvrzený díl se vyjme z formy. Odřízne se přesahující tkanina a pryskyřice, která přetekla u otvorů vtokové a odvodušňovací soustavy.

Provede se kontrola kvality povrchu. V případě nedostatků je možné gelcoat Vorgelat T35 opravit přestříkáním.

Pomocí speciálního vrtáku určeného pro vrtání laminátů se vyvrtají díry Ø6,1 pro uložení kolových os dle návrhu konstrukce.

Konce podvozkové nohy se zatmelí pomocí tmelu HAVEL Filler G. (viz. 15.5) Vytvrzený tmel je možné přestříkat gelcoatem Vorgelat T35.

Případné nerovnosti vzniklé při odřezávání či vrtání lze zacelit pomocí jemného tmelu HAVEL Filler SP. Míchá se obdobně jako předchozí tmel v poměru 100:2.

16 Závěr

V první části této bakalářské práce byla provedena rešerše kompozitních materiálů, technologií výroby, spojování kompozitních dílů a rozbor návrhu konstrukce přistávacího zařízení. Cílem rešerše bylo získat přehled o vhodných materiálech a technologiích výroby pro výrobu konstrukčních celků malého sportovního letounu.

V praktické části byla popsána struktura, technologie výroby a materiály podvozkové nohy zvolené v DP Ing. Richarda Širokého. Následně byly vybrány další tři potenciálně vhodné metody pro výrobu podvozkové nohy: upravená metoda kladení prepregů, vakuová infuze (Light-RTM) a vysokotlaké vstřikování (RTM). Tyto metody byly porovnány na základě hmotnostních úspor, odhadovaných nákladů, dosažitelné kvality výrobku a obtížnosti výroby. Pro výrobu podvozkové nohy byla zvolena metoda vakuové infuze.

Nejprve byla navržena zkouška pro zjištění rychlosti toku pryskyřice dílem. Pro tuto zkoušku byly navrženy vzorky s odlišnou hustotou drážkování a děrování pěny pro případné zvýšení prostupnosti. Následně bylo navrženo rozložení vtokové a odvzdušňovací soustavy a byly zmíněny limitní hodnoty rychlosti toku pro úplné prosycení dílu pryskyřicí. Pro zvolenou technologii byl proveden návrh forem, přípravků (kopyta, vtokové a odtokové soustavy) a postupu výroby.

Dalším krokem, který by měl předcházet samotné výrobě podvozkové nohy je provedení materiálových zkoušek na vzorcích a následné dimenzování dílu s novými vstupními parametry. Dále by bylo vhodné podle navržené zkoušky v kapitole 14.2 zjistit prostupnost pryskyřice a případně zavést potřebná opatření a úpravy vtokové a odvzdušňovací soustavy pro zajištění úplného prosycení dílu. Tok pryskyřice by také bylo možné simulovat pomocí vhodného softwaru.

17 Použité zdroje

- [1] ŠIROKÝ, Richard. *Návrh přistávacího zařízení rychlostního letounu*. Praha, 2022. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Jiří Brabec, Ph.D.
- [2] VALENTA, Bc. Jakub. *Koncepční návrh rychlostního letounu*. Praha, 2019. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Jiří Brabec, Ph.D.
- [3] Sporting Code: Section 2. In: *FAI: Fédération Aéronautique Internationale* [online]. Lausanne: FAI, 2023 [cit. 2022-11-5]. Dostupné z: https://www.fai.org/sites/default/files/documents/sc_section_2_2018v2.pdf
- [4] Aircraft Wood and Structural Repair. In: *Aeronautics-Guide* [online]. -: Aeronautics-Guide, 2023 [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: <https://www.aircraftsystemstech.com/2018/09/history-of-wooden-aircraft.html>
- [5] Aluminum Alloy. In: *AEON Materials* [online]. Bellport: AEON Materials corp., 2018 [cit. 2023-04-6]. Dostupné z: <https://www.aeonmaterials.com/aluminum>
- [6] KAUFMAN, Brett a Clyde BRIANT. *Metallurgical Design and Industry: Prehistory to the Space Age*. 1. ed. Cham: Springer International Publishing, 2018. ISBN 978-3-319-93754-0.
- [7] JOSHI, Amit. *The New Generation Aerospace Alloys*. Bombay, 2007. Studie. Indian Institute of Technology.
- [8] BAKER, Alan, Stuart DUTTON a Donald KELLY. *Composite Materials for Aircraft Structures*. 2nd ed. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004. ISBN 1-56347-540-5.
- [9] MIRACLE, Daniel a Steven DONALDSON. *ASM Handbook: Volume 21 Composites*. 1st ed. Russell Township: ASM International, 2001. ISBN 0-87170-703-9.
- [10] BIELAWSKI, Radosław. Composite Materials in Military Aviation and Selected Problems with Implementation. *Review of the Air Force Academy*. Warsaw: War Studies University, 2017, 2017(33). Dostupné z: doi:10.19062/1842-9238.2017.15.1.2
- [11] CAMANHO, Pedro P. *Composite joints and connections*. 1. vyd. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2011. ISBN 978-1-84569-990-1.
- [12] ZHUGUO, Zhang, Zhang YINGCHUN a Ou XUPO. Study on Key Certification Issues of Composite Airframe Structures for Commercial Transport Airplane. *Procedia Engineering*. Elsevier, 2011, 2011(17), 247-257. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2011.10.026
- [13] OLSON, Eric. Thermoplastic composites for aerospace applications. In: *GlobalSpec* [online]. Albany: GlobalSpec, 2023 [cit. 2023-04-2]. Dostupné z: <https://insights.globalspec.com/article/12596/thermoplastic-composites-for-aerospace-applications>
- [14] Glass Transition Temperature of Polymers. In: *Protolabs* [online]. Maple Plain: Proto Labs, Inc., c1999-2023 [cit. 2023-04-6]. Dostupné z: <https://www.protolabs.com/resources/design-tips/glass-transition-temperature-of-polymers/>
- [15] *Techtron 1000 PPS: Technical Data sheet* [online]. Rev. 16.3.2023. Lenzburg: Mitsubishi Chemical Advanced Materials, 2023 [cit. 2023-4-12]. Dostupné z: https://www.mcam.com/mam/37195/AEP-Techtron@%201000%20PPS_en_US.pdf
- [16] *Toray Cetex TC1100 PPS: Technical Data Sheet* [online]. Rev. 21.1.2021. Tokyo: Toray Industries, 2023 [cit. 2023-4-6]. Dostupné z: https://www.toraytac.com/media/221a4fcf-6a4d-49f3-837f-9d85c3c34f74/smphpw/TAC/Documents/Data_sheets/Thermoplastic/UD%20tapes,%20prepregs%20and%20laminates/Toray-Cetex-TC1100_PPS_PDS.pdf

- [17] Polyphenylene Sulfide (PPS): A Comprehensive Guide on High Heat Plastic. In: *Omnexus* [online]. Paris: SpecialChem, 2023 [cit. 2023-04-6]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyphenylene-sulfide-pps-plastic-guide>
- [18] *Ultem Resin: Technical Data Sheet* [online]. Rev. 11.2.2022. c2023: SABIC, 2022 [cit. 2023-4-6]. Dostupné z: <https://www.sabic.com/en/products/specialties/ultem-resin-family-of-high-heat-solutions/ultem-resin>
- [19] *Victrax 450G PEEK: Technical Data Sheet* [online]. Rev. 11.2019. Lancastershire: Victrex, 2023 [cit. 2023-4-6]. Dostupné z: <https://www.victrex.com/en/products/polymers/peek-polymers/450g>
- [20] *Arkema Kepstan 8002 PEKK: Technical Data Sheet* [online]. Rev. 4.2.2021. Frankfurt am Main: Campus Plastics, 2023 [cit. 2023-4-12]. Dostupné z: <https://www.campusplastics.com/material/pdf/138585/Kepstan8002?sLg=en>
- [21] *Havel Composites: Produktový katalog* [online]. 2021. Svědlice: Havel Composites, c2018-2023 [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/HAVEL%20katalog%202021%281%29.pdf>
- [22] *HexPly: Products* [online]. Stamford: Hexcel Corporation, 2023 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://www.hexcel.com/Products/>
- [23] Polymer Matrix Composites. In: U.S. CONGRESS, OFFICE OF TECHNOLOGY ASSESSMENT. *Advanced Materials by Design*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1988, s. 73-98. ISBN #PB88-243548.
- [24] ZWEBEN, Carl, Myer KUTZ, ed. *Mechanical Engineers' Handbook*. 4th ed. New Jersey: Wiley, 2015. ISBN 978-1-118-11899-3.
- [25] VNOUČEK, Milan. *Kompozitní materiály*. Plzeň. Dostupné také z: https://www.opi.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf. Prezentace. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce 2023-04-15.
- [26] *Analyse de la tenue en fatigue de structures composites sandwich*. Nantes, 2017. Disertační práce. University of Nantes. Vedoucí práce Pascal Casari.
- [27] *TORAYCA T700G: Technical Data Sheet* [online]. Rev. 5. Tokyo: Toray Industries, 2018 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.toraycma.com/wp-content/uploads/T700G-Technical-Data-Sheet-1.pdf.pdf>
- [28] *Kevlar Aramid Fiber: Technical Data Sheet* [online]. 11.3.2019. Wilmington: DuPont, 2023 [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://www.dupont.com/news/kevlar-properties.html>
- [29] Textilní pojmy. In: *TUL elearning* [online]. Liberec: Technická univerzita Liberec [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: https://elearning.tul.cz/pluginfile.php/332210/mod_glossary/entry/57215/Pojmy_vazny_bod_os_nova_utek.png
- [30] ZENKERT, Dan a Malin ÅKERMO. Material Selection for a Curved C-Spar Based on Cost Optimization. *Journal of Aircraft*. 2011, 48(3), 797-804. ISSN 0021-8669. Dostupné z: doi:10.2514/1.C000188
- [31] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [32] CHRIS. Basic Numbers and Calculations for Composites. In: *Explore Composites!* [online]. 2023 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://explorecomposites.com/articles/design-for-composites/basic-numbers-and-calculations-for-composites/>
- [33] PETERS, S. T. *Handbook of Composites*. 2nd ed. New York: Springer, 2013. ISBN 978-1-4615-6389-1.
- [34] HERBERT, George William. Diagram of a composite sandwich panel. In: *Wikipedia Commons* [online]. Wikipedia, 2023 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b2/CompositeSandwich.png>

- [35] *Nomex Honeycomb - aeronautic: Technical Data Sheet* [online]. Rev. 9.2017. Bologna: CEL Components, 2023 [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: https://www.cel.eu/img_ins/files/nomex_aero_Rev1_uk.pdf
- [36] *Rohacell A: Technical Data Sheet* [online]. Vyd. 4-2021. Darmstadt: Evonik Operations GmbH, 2021 [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: <https://products.evonik.com/assets/34/00/243400.pdf>
- [37] WETZIG, Elke. Sandwichplatte mit Polystyrol. In: *Wikipedia Commons* [online]. [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8383454>
- [38] *Baltek SB: Technical Data Sheet* [online]. Rev. 02.2016. Sins: Airex AG, 2023 [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: <http://sicomin.com/datasheets/product-pdf1006.pdf>
- [39] Havel Composites: Technologie výroby kompozitů. In: *Havel Composites* [online]. Svěsedly: Havel Composites, c2018-2023 [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/Technologie%20výroby%20kompozitů.pdf>
- [40] HOA, Suong V. *Principles of the manufacturing of composite materials*. 1. vyd. Lancaster: DEStech, 2009. ISBN 978-1-932078-26-8.
- [41] SEDLÁČEK, Radek, Marek ŠČERBA a Zdeněk PADOVEC. Lisování. In: *Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů* [online]. Krnov: Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů, 2023 [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/press-moulding/>
- [42] BRASHEAR, Stephen. Boeing Works To Build 777X Airliner. In: *Getty Images* [online]. Everett: Getty Images, 2023 [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://www.gettyimages.com/detail/news-photo/worker-walks-past-a-giant-autoclave-which-provides-news-photo/695306296?adppopup=true>
- [43] POPOV, Miroslav. Light-RTM. In: *Plastic* [online]. Plastic, 2017 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: http://www.plastic.cz/galerie/technologie/lehke_rtm_01.jpg
- [44] SEDLÁČEK, Radek, Ščerba MAREK a Padovec ZDENĚK. Injektážní a infuzní technologie. In: *Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů* [online]. Krnov: Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů, 2023 [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/injektazni-infuzni-technologie/>
- [45] KELLY, Gordon. *Joining of Carbon Fibre Reinforced Plastics*. 1st ed. Stockholm: Farkost och flyg, 2004. ISBN 91-7283-824-8.
- [46] FAY, Tom. Composites in Light-Sport Aircraft. In: *Composite World* [online]. Cincinnati: Gardner Business Media, 2023 [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/composites-in-light-sport-aircraft>
- [47] Easy Composites. In: *Easy Composites katalog* [online]. Stoke-on-Trent: Easy Composites Ltd., 2022 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://www.easycomposites.eu>
- [48] *Těsnící prvky: Firemní katalog* [online]. Rubena [cit. 2023-5-17]. Dostupné z: <https://www.rubena.eu/underwood/download/files/te-snici-prvky-final.pdf>
- [49] *Ponal Standard: Technický list* [online]. 05/2021. Henkel, 2021 [cit. 2023-5-17]. Dostupné z: <https://www.ponal.cz/ponal-standard/>
- [50] *ICRO ZSFO0335-A: Technický list* [online]. Rev. 2. Malý Beranov: HOOLWORKS, 2018 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <http://icro.cz/upload/soubory/tl/zsfo0335-a.pdf>
- [51] *Interglas 90070: Technical Data Sheet* [online]. Rev. B. Erbach: Porcher Industries Germany, 2015 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: http://www.ezentrumbilder.de/rg/pdf/td_en_style%2090070.pdf
- [52] *Interglas 92125: Technical Data Sheet* [online]. B. Erbach: Porcher Industries Germany, 2016 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: http://www.ezentrumbilder.de/rg/pdf/td_en_style%2092125.pdf
- [53] *LH 160: Technický list* [online]. Svěsedly: Havel Composites [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://havel-composites.com/uploads/files/products/154/050206e5f796ebadf1631d0f0cadea0f31632e45.pdf>

- [54] *Tvrdidlo H 146: Technický list* [online]. Ver. 1. Svěsedlice: Havel Composites, 2007 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://havel-composites.com/uploads/files/products/2606/55a9d05a4de4c052283759f16953f4105fb2d4f5.pdf>
- [55] *RenGel SW 56 + Ren HY5159: Technický list* [online]. Wien: Huntsman Advanced Materials, 2002 [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://skolil.cz/images/stories/SW56HY2404HY5159.pdf>
- [56] *FREKOTE 700-NC: Technický list* [online]. 10.2003. Loctite HENKEL, 2003 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://havel-composites.com/uploads/files/products/521/e39d485ce59905aacafcd19cff484b025ede6f26.pdf>
- [57] *Ravatherm XPS H LB: Technical Data Sheet* [online]. Ravago [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://media.easycomposites.eu/datasheets/Ravatherm-XPS-H-LB-TDS-1019-Formerly-Styrofoam-LBH.pdf>
- [58] *Aeroglass 163: Technický list* [online]. Svěsedlice: Havel Composites [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://havel-composites.com/uploads/files/products/2533/55250b3cf782f431ff84e26f84f440243ec38d7d.doc>
- [59] *Vorgelat T35 MGS: Technical Data Sheet* [online]. MGS [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.swiss-composite.ch/pdf/t-up-vorgelat-T35-e.pdf>
- [60] *LH 288: Technický list* [online]. 2021. Svěsedlice: Havel Composites, 2021 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://havel-composites.com/uploads/files/products/3179/7c8f828e2297df95a94206225d836fec62b535fe.pdf>
- [61] SEDLÁČEK, Ing. Jan. Problémy při obrábění kompozitních materiálů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2023, 2007(4) [cit. 2023-04-15]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/problemy-pri-obrabeni-kompozitnich-materialu>
- [62] BAGHERPOUR, Salar. Fibre Reinforced Polyester Composites. In: *Polyester*. InTech, 2012, s. 135-166. ISBN 978-953-51-0770-5. Dostupné z: doi:10.5772/48697

18 Přílohy

Příloha 1: Technický list Ponal Standard [49]



TECHNICKÝ LIST

05/2021

PONAL STANDARD Klíh pro lepení dřeva

VLASTNOSTI

- vysoká pevnost lepení
- výtečně vhodný pro montážní, spárové a plošné lepení
- žádné zbarvení dřeva (také u dřeva obsahujícího tanin)
- po zaschnutí transparentní
- odolnost spoje dle EN 204 D2
- vhodné na lepení tvrdého řeziva

ÚČEL POUŽITÍ

Montážní lepení (kolík, drážka a pero, čep a dlab), lepení spár (masivní dřevo, náklížek), lepení ploch, vrstvené desky z lisovaných hmot, lisované dřevovláknité desky apod.

PŘÍPRAVA MATERIÁLU

Lepené plochy je nutno připravit tak, aby lícovaly a byly čisté. Speciální dřeva, jako např. týkové dřevo, eventuálně omyjte rozpouštědly (aceton), které jsou běžně v prodeji. Vlhkost dřeva by měla být kolem 8 až 12 %. Vyšší vlhkost dřeva prodlužuje dobu tuhnutí.

KONEČNÁ PEVNOST LEPEŇ SPÁRY

Je všeobecně vyšší než konečná pevnost dřeva. Lepená spára odolává tepelnému zatížení přibližně +70 °C, krátkodobě dokonce +120 °C, takže lze provést předýchování.

PRACOVNÍ POSTUP

Klíh Ponal Standard jednostranně naneste štětcem, plastovou stěrkou na lepidlo, ručním válečkem na lepidlo nebo strojem k nanášení lepidla. U tvrdého dřeva je účelné provést oboustranný nános. Lepidlo nedávejte do styku s pracovními nástroji s obsahem železa (nebezpečí zbarvení).

LISOVACÍ TLAK

Nejméně 0,15 N/mm² (1,5 kp/cm²), u tvrdého dřeva a vrstvených desek z lisované hmoty 0,2 - 0,5 N/mm² (2-5 kp/cm²).

LISOVACÍ ČASY

V závislosti na teplotě, druhu a vlhkosti dřeva a tloušťce nánosu lepidla. Za normálních podmínek mají minimální lisovací doby následující hodnoty:

Při lepení dřeva	60 min. při +20 °C
Při lepení vrstvených desek z lisovaných hmot	90 min. při +20 °C 30 min. při +50 °C

ZMĚNA ZABARVENÍ DŘEVA

Hodnota pH je u klišu Ponal Standard kolem 6,5. Ani u dřeva s obsahem tanínu nedochází k zbarvení, pokud nebyly při nanášení lepidla použity nástroje obsahující železo.



Zabarvení dřeva lze eventuálně odstranit pomocí 2–3procentního vodnatého roztoku kyseliny oxalurové.

ČISTĚNÍ

Vytvrzené lepidlo se dá z pokožky odstranit již jen mechanicky. Pokožka se poté musí promastit. Pracovní nástroje ihned po použití vyčistěte studenou vodou. Škráloupy lepidla nebo zaschnuté zbytky lepidla nechejte nabobtnat namočením ve vodě po dobu několika dní a odstraňte.

OCHRANNÁ OPATŘENÍ

Nejsou potřebná.

SLOŽENÍ

Bílý klíč ze syntetické pryskyřice na bázi PVAc

BALENÍ

Plastová láhev 750 g/ balená jednotka 6 ks
Kbelík 5 kg/ balená jednotka 1 ks

TECHNICKÉ ÚDAJE

Hodnota pH	Cca 6,5
Měrná hmotnost (specifická hmotnost)	Cca 1,1 g/cm ³
Spotřeba podle savosti podkladu	Cca 150 až 200 g/m ²
Pevnost lepení	Lepená spára je odolná proti krátkodobému působení vody a splňuje podmínky dle EN 204, skupina namáhání D1 a D2 D1 = 7 dní uložení v normálním klimatu, pevnost spoje za sucha nejméně 10 N/mm ² D2 = 7 dní uložení v norm. klimatu, 3 hod. uložení ve studené vodě, 7 dní normální klima, pevnost spoje při opětovém schnutí nejméně 7 N/mm ²
Teplota zpracování	+5 až + 30 °C, optimálně +20 až + 25 °C
Doba zpracování	12 měsíců od data výroby

Poznámka:

Lisovací časy se nevztahují jen na potřebnou teplotu místnosti, nýbrž především na teplotu lepeného materiálu a lepidla samotného. Při vyšších teplotách se časy úměrně zkracují.

UPOZORNĚNÍ:

Tyto informace vycházejí z naší současné úrovně poznatků. Ačkoli jsou tyto informace podány v dobré víře, společnost neručí za žádné konkrétní vlastnosti. Je odpovědností uživatele, aby se sám přesvědčil, že za daných okolností není potřeba zajistit dodatečné informace, učinit dodatečná opatření či ověřit uvedené informace.

DISTRIBUTOR:

HENKEL ČR spol. s r.o.,
Boudníkova 2514/5, 180 00 Praha 8
Tel.: 220 101 101
www.ponal.cz



ZSFO0335--A
BÍLÝ POLYESTEROVÝ ZÁKLADNÍ LAK

Bílý polyesterový základní lak s vysokou plnivostí, výbornou elasticitou, skvělá kryvost, vynikající broušení jak automatické tak manuální.

OBLASTI POUŽITÍ

Použitelný pro:	nábytek	vnitřní dveře	kuchyňská dvířka		
Aplikační metoda:	nádobková pistole	směšovací zařízení			

ZÁKLADNÍ ÚDAJE

Plnivost:	Excelentní	Brousitelnost:	Excelentní
Rychlost schnutí:	Standardní	Přelakovatelnost:	Excelentní

PŘÍPRAVA SMĚSI

	Kód	Váhově v %	Objemově v %	Poznámka
Doporučené tužidlo:	CZCT0002	2		
Alternativní tužidla:	CZCT0001	2		prodlouží životnost směsi
Urychlovač:	CZAL0002	2		
Doporučené ředidlo:	DILS00AC	0 - 10		
Alternativní ředidla:				

CHEMICKO - FYZIKÁLNÍ CHARAKTERISTIKA		APLIKAČNÍ CHARAKTERISTIKA		SCHNUTÍ	
Specifická hmotnost (kg/l)	1,42	Počet nánosů	2 - 4	Proti prachu (min)	60
Obsah sušiny (%)	96	Nanášené množství (g/m ²)	150 - 250	Na dotyk (min)	120
Viskozita (DIN 4) při 20°C		Interval mezi vrstvami	0,5 - 1		
Životnost směsi při 20°C (h)	0,5	Vydatnost (m ² /kg, lt směsi)	2	Brousitelné (h)	24
				Stohovatelné (h)	24

Doplňkové informace:	- PES základní bílý lak nejprve zředíme, promícháme, následně opatrně přidáme urychlovač, znovu opatrně, ale důkladně promícháme a nakonec přidáme tužidlo a opět důkladně promícháme. NIKDY NEMÍCHAT DOHROMADY TUŽIDLO A URYCHLOVAČ, HROZÍ NEBEZPEČÍ PRUDKÉ REAKCE !!!!!
Dodávané balení:	- 5 kg, 25 kg, nestandardní balení

Typ vrchního laku pro následné lakování:	PUR				
---	-----	--	--	--	--

Důležité upozornění:	Naše technické listy jsou sestaveny na základě průměrných výsledků našich testů. Technické tipy jsou uvedeny v dobré víře, ale bez záruky. Ve skutečnosti jsou podmínky aplikace, tužení a ředění, nanášené množství, příprava a kvalita podkladu nedílnou součástí konečného výsledku a mimo naši kontrolu. Uživatel je povinen před započítím jakékoliv aplikace vyhotovit zkušební vzorek. Z naší strany zaručujeme kontinuitu chemicko-fyzikálních vlastností. Varování: je na zodpovědnosti uživatele zabezpečit, že aplikace je prováděna v dostatečně větraném prostředí a jsou dodržovány veškeré hygienické normy a bezpečnostní předpisy platné na daném území.
-----------------------------	--

Číslo revize	2	Datum revize	19/6/2018	Datum tisku	19/6/2018
--------------	---	--------------	-----------	-------------	-----------

HOOLWORKS s.r.o.	Prodejní sklad: Malý Beranov 6, 586 03 Malý Beranov, +420 606 452 991, info@icro.cz, www.icro.cz
------------------	--



**GLASS FILAMENT FABRICS for PLASTICS REINFORCEMENT
PRODUCT SPECIFICATION**

			Specification	
Style Number	01610	Old ITG desc.	90070 MIL-Y-1140H	
US Style	1610		AMS / MIL-C-9084	
WLB No.	8.4505.60		DIN 65066	
British Standard			BS 3396	
Finish/Designatio FK144				
		Unit	Tolerance	Specification
Weave pattern		Plain		DIN ISO 9354
Area weight	g / m ²	80,0	± 5%	DIN EN 12127
Yarn	tex			DIN EN 12654
warp yarn		EC9-34 tex		
weft yarn		EC9-34 tex		
Fibre count	1 / cm			DIN EN 1049
warp ends		12,0	± 5%	
weft picks		11,5	± 5%	
Temperature resistance 1)				
Continuous load	°C	260		
Short time resistance	°C	600		
Moisture content	%	< 0,2		DIN EN 3616
Finish content	%	0,08 - 0,28		DIN ISO 1887 DIN EN 60
Thickness (approx. dry)	mm	0,10	± 5%	DIN ISO 4603/E
in laminate (43% Vol.)	mm	0,07	± 5%	

All statements herein are expressions of opinion which we believe to be accurate and reliable, but are presented without guarantee or responsibility on our part. Statements concerning possible use of our products are not intended as recommendations for their use in the infringement of any patent. No patent warranty of any kind, express or implied, is made or intended.
Porcher Industries Germany GmbH, Benzstraße 14, D-89155 Erbach, Telefon +49 (0)7305 / 955-485, Fax +49 (0)7305 / 955-524

GLASS FILAMENT FABRICS for PLASTICS REINFORCEMENT
PRODUCT SPECIFICATION

	Unit	Standard	P-D ITG	Tolerance	Specification
Style Number		01610		/ FK144	
Tensile Strength					ASTM D 4029
warp	N/cm			>	
weft	N/cm			>	
Tensile strength					DIN EN 2747
warp	MPa	335	520	>	
weft	MPa	320		>	
Young's-Modulus					
warp	GPa	19		>	
weft	GPa	18		>	
Compression strength					DIN 53454
warp	MPa	375		>	DIN 65380
weft	MPa	360		>	DIN prEN 2580
Compression-Modulus					
warp	GPa			>	
weft	GPa			>	
Interlaminar shear strength					DIN EN 2377
warp	MPa	50		>	
weft	MPa	45		>	
Flexural strength					DIN EN 2746
warp	MPa	495		>	
weft	MPa	460		>	
Flexural-Modulus					
warp	GPa	24		>	
weft	GPa	24		>	

All statements herein are expressions of opinion which we believe to be accurate and reliable, but are presented without guarantee or responsibility on our part. Statements concerning possible use of our products are not intended as recommendations for their use in the infringement of any patent. No patent warranty of any kind, express or implied, is made or intended.
Porcher Industries Germany GmbH, Benzstraße 14, D-89155 Erbach, Telefon +49 (0)7305 / 955-485, Fax +49 (0)7305 / 955-524



GLASS FILAMENT FABRICS for PLASTICS REINFORCEMENT
PRODUCT SPECIFICATION

	Unit	Standard	P-D ITG	Tolerance	Specification
Style Number		92125		/ FK144	
Tensile Strength					ASTM D 4029
warp	N/cm	610		>	
weft	N/cm	570		>	
Tensile strength					DIN EN 2747
warp	MPa	335		>	
weft	MPa	320		>	
Young's-Modulus					
warp	GPa	19		>	
weft	GPa	18		>	
Compression strength					DIN 53454
warp	MPa	355		>	DIN 65380
weft	MPa	340		>	DIN prEN 2580
Compression-Modulus					
warp	GPa			>	
weft	GPa			>	
Interlaminar shear strength					DIN EN 2377
warp	MPa	50		>	
weft	MPa	45		>	
Flexural strength					DIN EN 2746
warp	MPa	495		>	
weft	MPa	460		>	
Flexural-Modulus					
warp	GPa	24		>	
weft	GPa	24		>	

All statements herein are expressions of opinion which we believe to be accurate and reliable, but are presented without guarantee or responsibility on our part. Statements concerning possible use of our products are not intended as recommendations for their use in the infringement of any patent. No patent warranty of any kind, express or implied, is made or intended.
 Porcher Industries Germany GmbH, Benzstraße 14, D-89155 Erbach, Telefon +49 (0)7305 / 955-485, Fax +49 (0)7305 / 955-524

GLASS FILAMENT FABRICS for PLASTICS REINFORCEMENT
PRODUCT SPECIFICATION

			Specification	
Style Number	92125	Old ITG desc.	92125	MIL-Y-1140H
US Style				AMS / MIL-C-9084
WLB No.	8.4551.60			DIN 65066
British Standard				BS 3396
<hr/>				
Finish/Designatio	FK144			
<hr/>				
		Unit		Tolerance Specification
Weave pattern			2 x 2 twill	DIN ISO 9354
Area weight		g / m ²	280,0	± 5% DIN EN 12127
Yarn		tex		DIN EN 12654
warp yarn			EC9-68x3 t0 tex	
weft yarn			EC9-204 tex	
Fibre count		1 / cm		DIN EN 1049
warp ends			7,0	± 5%
weft picks			6,5	± 5%
<hr/>				
Temperature resistance 1)				
Continuous load		°C	260	
Short time resistance		°C	600	
<hr/>				
Moisture content		%	< 0,2	DIN EN 3616
Finish content		%	0,08 - 0,28	DIN ISO 1887
				DIN EN 60
<hr/>				
Thickness (approx. dry)		mm	0,35	± 5% DIN ISO 4603/E
in laminate (43% Vol.)		mm	0,25	± 5%

All statements herein are expressions of opinion which we believe to be accurate and reliable, but are presented without guarantee or responsibility on our part. Statements concerning possible use of our products are not intended as recommendations for their use in the infringement of any patent. No patent warranty of any kind, express or implied, is made or intended.
Porcher Industries Germany GmbH, Benzstraße 14, D-89155 Erbach, Telefon +49 (0)7305 / 955-485, Fax +49 (0)7305 / 955-524

LAMINAČNÍ PRYSKYŘICE LH 160 TUŽIDLA 135 - 136, 285 – 287, 500 – 502 H 146, H147

Návod k použití, technické listy

Charakteristika	
Schválení:	---
Použití:	Stavba lodí Sportovní nářadí Letecké modely Formy a nástroje Lepidla Odlitky
Teplotní odolnost výrobku bez výrazných změn jejich parametrů:	- 60 °C - > + 50-60 °C (s H 300 do 80°C)
Zpracování:	Při teplotách mezi 10 °C a 50 °C Všechny běžné metody zpracování
Zvláštní vlastnosti:	Dobré mechanické vlastnosti Doba zpracovatelnosti /tzv. pot life/ od přibližně 15 min. do asi 5 hodin

Systémy laminačních pryskyřic pro vytvrzování při pokojové teplotě

Pro vytvrzování při pokojové teplotě od 10 - 30 °C jsou k dispozici speciální kombinace laminačních pryskyřic. Tyto systémy byly upraveny takovým způsobem, že při pokojové teplotě zcela vytvrdí a mohou být zpracovávány a používány bez následného tepelného dotvrzení.

Tepelné odolnosti 40 - 60 °C lze dosáhnout vytvrzováním při pokojové teplotě /tzv. pravidlo palce: vytvrzovací teplota + 30 °C = maximální tepelná odolnost/. Tepelná odolnost některých systémů /tužidla 135 – 136 H 146 a H 300/ může být zvýšena na přibližně 80 °C postupným temperováním.

Mimo systémy popsané níže lze použít po vytvrzování při pokojové teplotě i další kombinace pryskyřice/tužidlo, které nemusejí splňovat zvláštní požadavky (letecký test apod.).

Příklady vhodné kombinace:

Laminační pryskyřice LH 160

Standardní pryskyřice nízké viskozity na bázi bisphenolu A. Viskozita: 700 - 900 mPas/25 °C. Při normálních skladovacích teplotách nedochází ke zkrystalizování.

Tužidla 135 - 136

Série tužidel s rozličnými dobami zpracování (od přibližně 25 minut do asi 5 hodin) **pro zpracování při teplotách nad 18 °C.**

Tužidla 285 – 287

Dobré vytvrzení je zajištěno od teplot +10°C. doba zpracovatelnosti je od cca 50 minut do asi 2 hodin. Při vytvrzení mezi 50 - 60°C po 3 hodiny, systém vyhovuje požadavkům pro motorová letadla. (tj. -60 - +80°C.)

Tužidla 500 - 502

Jsou určena speciálně pro použití při nižších teplotách. Dobrého vytvrzení tohoto systému je dosaženo při teplotách od + 10 °C. Tepelná odolnost je nižší než u tužidel 135 - 136.

Použití

Jedná se o systémy laminačních pryskyřic s nízkou viskozitou neobsahující rozpouštědla či plniva určená pro zpracování a vytvrzování při pokojové teplotě. Vhodná pro výrobu dílů vyztužených skleněnými, uhlíkovými a aramidovými vlákny, jejichž rysy jsou vysoká statická a dynamická pevnost.

Doba zpracovatelnosti v kelímku (tzv. pot life) se různí od přibližně 25 min do 5 hodin. Dokonce i při nepříznivých vytvrzovacích podmínkách, jako je nízká teplota či vysoká relativní vlhkost lze dosáhnout nelepivých povrchů s vysokým leskem. Viskozity směsí s laminační pryskyřicí LH 160 jsou velmi nízké, což je výhodné pro zpracování při nízkých teplotách nebo zvláštních metodách zpracování, např. vstřikování apod.

Díky svým výborným přilnavým vlastnostem se tyto systémy rovněž dají použít jako adheziva pro dřevo, kov, sklo, beton a četné druhy plastů. Plniva (např. kovový prášek, prach, bavlněné vločky apod.) mohou být přimíchána pro dosažení speciálních vlastností systému.

Kvůli průtažnosti 4 - 7 %, což je výhodné při použití jako laminační pryskyřice, je pevnost ve střihu a odolnost proti odlupu o něco nižší než u našich speciálních adhezivních pryskyřic.

		Laminační pryskyřice LH 160
Hustota	g/cm ³ / 25 °C	1,13 - 1,17
Viskozita	mPas / 25 °C	700 – 900
Epoxid.hmot.ekvivalent	g/mol	166 – 182
Epoxidový index	mol/1000 g	0,55 - 0,60
Barva	Gardner	max 3

Tužidlo 135 – 136**Tužidlo 285 - 287****Tužidlo 500 - 502****Tužidlo H 146, 147****Specifikace**

		Tužidlo 135	Tužidlo 136	Tužidlo 500
Hustota	g/cm ³ / 25 °C	0,98 - 1,07	0,94 - 0,98	1,00-1,06
Viskozita	mPas / 25 °C	50 - 150	20 - 100	200-350
Aminové číslo	mg KOH / g	450 - 500	450 - 500	350-400
Barva	Gardner	max 4 (*)	max 4 (*)	max 5 (*)

		Tužidlo 285	Tužidlo 286	Tužidlo 287
Hustota	g/cm³ / 25 °C	0,94 - 0,97	0,94 - 0,97	0,93 - 0,96
Viskozita	mPas / 25 °C	50 - 100	60 - 100	80 - 100
Aminové číslo	mg KOH / g	480 - 550	450 - 500	450 - 500
Barva	Gardner	max 3 (*)	max 3 (*)	max 3 (*)

(*) Vztahuje se pouze k transparentnímu tužidlu - tužidla mají transparentní modrou barvu

		Tužidlo 501	Tužidlo 502
Hustota	g/cm³ / 25 °C	0,98 - 1,05	0,98 - 1,05
Viskozita	mPas / 25 °C	100 - 250	30 - 100
Aminové číslo	mg KOH / g	470 - 550	400 - 500
Barva	Gardner	max 4	max 4

		Tužidlo H 147	Tužidlo H 146
Hustota	g/cm³ / 25 °C		0,96-0,99
Viskozita	mPas / 25 °C	600	10-20
Aminové číslo	mg KOH / g	-	-
Barva	Gardner		Max 2(*)

Podrobnosti pro zpracování

	Pryskyřice LH 160	Tužidlo 135 – 136, 500	Tužidlo 501 – 502
Průměrná hodnota epoxidu	0,56	-	-
Průměrný ekvivalent aminu	-	62	72
Skladování	> 12 měsíců v originálním obalu		
Teplota při zpracování	10 - 50 °C		
Vytvrzování	Vytvrzování při pokojové teplotě nebo vytvrzování ve formě při vysokých teplotách.		
Temperování	Není nezbytné - možno při 50 °C - > 150 °C		
	Tužidlo 285 - 287	Tužidlo H 147	Tužidlo H 146
Průměrná hodnota epoxidu	-	-	-
Průměrný ekvivalent aminu	64	-	53
Skladování	> 12 měsíců v originálním obalu		
Teplota při zpracování	10 - 50 °C		
Vytvrzování	Vytvrzování při pokojové teplotě, nebo vytvrzování ve formě při vysokých teplotách.		

Temperování

Není nezbytné - možno při 50 °C - > 150 °C

Skladování

Pryskyřice a tužidla mohou být skladovány po dobu nejméně 12 měsíců v pečlivě utěsněných kontejnerech. Při teplotách pod + 15 °C mohou pryskyřice a tužidla zkrystalizovat. Krystalizace je patrná jako zamlžení či změna tekuté podoby obsahu kontejneru na pevnou. Před zpracováním se musí krystalizace zahřátím odstranit. Pomalu zahřejte až do přibližně 50 - 60 °C ve vodní lázni nebo peci a mícháním či potřásáním uvedete obsah kontejneru do původního stavu bez jakékoli vady na kvalitě. Zpracovávejte pouze výrobky zcela jednotné barvy. Před zahřátím lehce kontejner otevřete, aby došlo k vyrovnání tlaku. Během zahřívání buďte opatrní. Nezahřívejte nad otevřeným ohněm! Při míchání používejte bezpečnostní pomůcky (rukavice, brýle, respirátor).

Míchací poměry

	Pryskyřice LH 160 : Tužidlo 135 – 136
Složky váhově	100 : 35 (+/-2)
Složky objemově	100 : 40 (+/-2)

	Pryskyřice LH 160 : Tužidlo 285 – 287
Složky váhově	100 : 40 (+/-2)
Složky objemově	100 : 50 (+/-2)

	Pryskyřice LH 160 : Tužidlo 500 – 502
Složky váhově	100 : 40 (+/-2)
Složky objemově	100 : 50 (+/-2)

	Pryskyřice LH 160 : Tužidlo H 147
Složky váhově	100 : 25 (+/-2)
Složky objemově	---

	Pryskyřice LH 160 : Tužidlo H 146
Složky váhově	100 : 30 (+/-2)
Složky objemově	---

Specifikované poměry míchání musí být co nejpřesněji dodrženy. Přidání více či méně tužidla nebude mít vliv na rychlejší či pomalejší reakci - pouze nedostatečné vytvrzení, které nelze žádným způsobem opravit.

Směs pryskyřice a tužidla je nutno velice pečlivě promíchat. Míchejte, dokud nebude směs zcela jednotné barvy. Zvláštní péči věnujte stěnám a dnu nádoby, v níž směs mícháte.

Optimální teplota při zpracování je mezi 20 - 25 °C. Vyšší teplota zpracování je možná, ale zkrátí dobu zpracovatelnosti. Nárůst teploty o 10 °C zkrátí dobu zpracovatelnosti na polovinu. Voda (například velmi vysoká vlhkost či voda obsažená v plnivech) způsobí zrychlení reakce pryskyřice a tužidla. Různé teploty a vlhkosti během zpracování nemají významný efekt na pevnost vytvrzeného výrobku.

Nemixujte velká množství zvláště, pokud se používá vysoce reaktivních systémů. Teplo uvolněné z míchací nádoby je velmi malé, takže obsah se velmi rychle zahřeje díky reakčnímu teplu (exotermická reakce pryskyřice - tužidlo).

Gel time- nános 1 mm při různých teplotách

	Tužidlo 135	Tužidlo 136	Tužidlo 500
20 - 25 °C	přibl. 4 - 5 hod.	přibl. 6 - 7 hod.	přibl. 45-60 min
40 - 45 °C	přibl. 50 min.	přibl. 1 - 2 hod.	přibl. 20-30 min

	Tužidlo 501	Tužidlo 502	Tužidlo H 146
20 - 25 °C	přibl. 2 - 3 hodiny	přibl. 4 - 5 hodin	Přibl. 3-4 hodiny
40 - 45 °C	přibl. 40 - 50 min.	přibl. 60 - 80 min.	Přibl. 2 hodiny

	Tužidlo 285	Tužidlo 286	Tužidlo 287	Tužidlo H 147
20 - 25 °C	přibl. 2 - 3 hod.	přibl. 3 - 4 hod.	přibl. 5 - 6 hod.	přibl. 70min
40 - 45 °C	přibl. 45 - 60min.	přibl. 60 - 90 min.	přibl. 80 - 120min	---

UV stabilita-

S tužidly 285-287 a H 146 vykazuje systém zvýšenou UV stabilitu. Modré zbarvení tužidel je dáno příměsí, která pomáhá absorbovat část UV záření, které by jinak poškozovalo kompozit. Pro dosažení nejvyšší odolnosti vůči UV záření je vhodné výrobek temperovat na 50°C po dobu minimálně 3 hodiny. Pro ještě vyšší ochranu doporučujeme výrobek opatřit gelcoatem, nebo akrylátovým či polyuretanovým lakem.

TECHNICKÝ LIST

Datum vydání: 4. 12. 2007
Datum revize: 4. 12. 2007

stránka 1/3
Verze 1.0

Tvrdidlo H 146

Popis

Tvrdidlo H 146 je extrémně nízkoviskózní, modifikovaná směs cyklických polyaminů s podílem aromatického alkoholu.

Použití

Tvrdidlo H 146 je tvrdidlo, zaručující vynikající mechanické vlastnosti laminátů, jejich vysokou flexibilitu a dobrou teplotní odolnost. Používá se k vytvrzování epoxidových pryskyřic, především pro aplikace, kde je potřeba pomalejšího tužidla s delší dobou zpracovatelnosti, s možností dotvrzování za tepla (stačí cca 50°C). Je vhodné pro opravy a výrobu lodí, letadel, leteckých a jiných modelů, sportovních pomůcek a rozličných nástrojů. Obzvláště vhodné je pro laminaci několika vrstev najednou, kde u tohoto typu tvrdidla nehrozí tzv. „hoření směsi“.

V kombinaci s laminační pryskyřicí LH 160, LH 260 se systém vyznačuje vysokými statickými a dynamickými vlastnostmi. Je velmi vhodné zvláště pro výrobu s použitím skelných, uhlíkových a kevlarových vláken.

Po tepelném vytvrzení při 50 – 60 °C systém splňuje standard pro větroně, motorové větroně, ale i motorová letadla (prac. teplota – 60 °C až + 80 °C).

Rozmezí doby zpracovatelnosti (tzv. pot life) je přibližně 2hodiny při 23°C. Získáte vysoce se lesknoucí a nelepivé povrchy. Nízká viskozita směsi zaručuje rychlé a dokonalé prosycení vláken.

Za účelem získání zvláštních vlastností je rovněž možné přidat ke směsi pryskyřice/tužidlo nejrůznější plniva, Např. aerosil, mikrobalyony, křemičitý, popřípadě kovový prášek apod. Za pokojové teploty má vytvrzování směsi pozvolný a mírný průběh, vyznačující se nízkým exotermem.

Pozor: Nejlepší vlastnosti získá systém po tepelném vytvrzení při teplotách nad 50 °C, proto doporučujeme používat při laminování s tímto tvrdidlem následného temperování nejméně po dobu tří hodin. Při práci je nutno dodržovat příslušné bezpečnostní pokyny pro manipulaci s epoxidovými pryskyřicemi a tužidly, a naše instrukce pro bezpečné zpracování.

Vlastnosti

Tvrdidlo H 146 je kapalina charakteristického aminového (čpavkovitého) zápachu, hustoty 0,96 – 0,99 g/cm³ při 23°C. Je to hořlavá kapalina III. Třídy nebezpečnosti. Po vytvrzení s vhodnou pryskyřicí při 50 - 60°C získá výsledný epoxid mimořádně dobré fyzikální a chemické vlastnosti a je schopen trvalého zatížení v rozmezí teplot –60 až +80°C Doba zpracovatelnosti je 120 minut.

Balení

Tvrdidlo H 146 jsme schopni dodat v obalech od 0,1 l až do 200 litrů.

Skladování

Tvrdidlo H 146 se skladuje v dobře uzavřených obalech na suchém a chladném místě při teplotě do +25°C. Záruční doba je 6 měsíců od data expedice.

Nárůst teploty

Optimální teplota při zpracování je v rozmezí mezi 20 a 25 °C. Vyšší teploty zpracování jsou možné, ale zkracují dobu zpracovatelnosti. Nárůst teploty o 10°C zkrátí dobu zpracovatelnosti cca na polovinu. Voda (například velmi vysoká vlhkost nebo voda obsažená v plnivech) může způsobit urychlení reakce pryskyřice / tužidlo. Rozdílné teploty a vlhkosti během zpracování nemají žádný efekt na vlastnosti vytvrzeného výrobku. Nejlepších vlastností výrobku se dosáhne, pokud následuje temperování ještě před úplným vytvrzením směsi.

Při pokojové teplotě je možné míchat i větší množství směsi. Při zpracování směsi nad 30 °C může dojít ke konci doby zpracovatelnosti k nárůstu teploty nad 200 °C, což může způsobit urychlení pozvolného vytvrzování směsi na dobu pouhých několika minut. (Je myšleno vytvrzení po konci doby zpracovatelnosti.)

Technické parametry

	Jednotka	Tvrdidlo H 146
Hustota (při 25°C)	g/cm ³	0,96 - 0,99
Viskozita (při 25 °C)	mPas/s	10 - 20
Vodíkový ekvivalent	g/mol	53
Barva	Gardner	max 3 (*)

(*) Vztahuje se pouze k základnímu, nebarvenému tužidlu.

Doba zpracovatelnosti

Empiricky zjištěná doba zpracovatelnosti 100g/25°C je v intervalu 50- 60°C

Gel time

- nános do vrstvy 1 mm při různých teplotách

	System LH 160, LH 260 + H 146
Při 25 °C	cca 2 – 4 hod.
Při 50 °C	cca 1,5 hod.

Míchací poměry

	Pryskyřice LH 160, LH 260 + Tvrdidlo H 146
Složky váhově	100 : 30
Složky objemově	100 : 32

Míchací poměry musí být co nejpřesněji dodrženy. Přidání více či méně tvrdidla nebude mít efekt na rychlejší či pomalejší reakci, způsobí pouze nedostatečné vytvrzení směsi, které nelze žádným způsobem napravit.

Směs pryskyřice a tvrdidla je nutno velice pečlivě promíchat. Míchejte, dokud nebude směs zcela jednotné barvy. Zvláštní péči věnujte stěnám a dnu nádoby, v níž směs mícháte.

Tooling Systems

Araldit®-epoxidový tixotropní nátěrový systém

RenGel® SW 56 **100 hmotnostních dílů**
Ren HY 2404 **13 hmotnostních dílů**
 nebo
Ren HY5159 **10 hmotnostních dílů**

Leštitelný povrchový systém s dobrou teplotní odolností

- Specifické vlastnosti**
- teplotně odolný systém
 - leštitelný
 - vynikající chemická odolnost

- Použití**
- vypěňovací formy, formy pro vakuové tváření
 - formy a přípravky pro keramický průmysl
 - formy pro zpracování polyesterů
 - formy na ruční laminaci

Technické parametry

Vlastnost	RenGel SW56	Ren HY 2404	Ren HY 5159
Vzhled	-karamelová (var. černá) pasta	-čirá žlutá tekutina	-čirá žlutá tekutina
Viskozita při 25°C	tixotropní	3500 – 5500	150 – 250
Hustota	1.5 /cm3	1.0-1.05 g/cm3	0.98 g/cm3

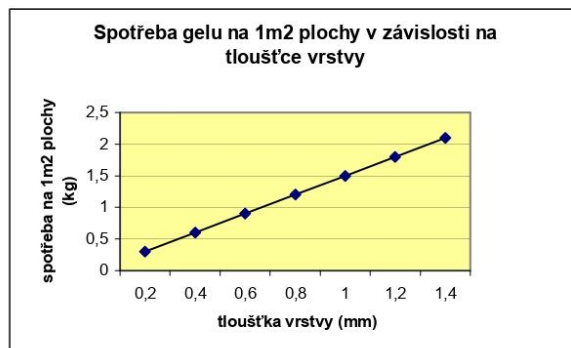
Směšovací poměry

Směšovací poměr pryskyřice/tvrdidlo	-hmotnostní díly		-objemové díly	
RenGel SW 56	100	100	100	100
Ren HY 2404	13	-	20	-
Ren HY 5159	-	10	-	15

Zpracování

Pryskyřice a tvrdidlo je nutno řádně promíchat tak, aby do směsi bylo vmícháno minimální množství vzduchových bublin. Pryskyřici je nutno nanést alespoň ve dvou vrstvách po 40-45 min pomocí tvrdého štětce nebo špachtle. Před následnou laminací je nutno na částečně zgelovaný povrch nanést vhodnou spojovací vrstvu.

Spotřeba systému



Vlastnosti při zpracování

Směs pryskyřice / tvrdidlo při 25°C	Jednotka	SW 56 + HY 2404	SW 56 + HY 5159
Vzhled		karamel	karamel
Doba zpracovatelnosti při 25°C (250 g směsi)	min	10-15	25-30
Vyformování po	hod	12	12

Vlastnosti po vytvrzení

Vytvrzení: s tvrdidlem HY 2404: 14 hod. postupně na 80°C
s tvrdidlem HY 5159: 14 hod. postupně na 100°C

Vlastnost	Norma	Jednotka	SW 56 + HY 2404	SW 56 + HY 5159
Hustota		g/cm ³	1.5	1.5
Tvrdość Shore D	ISO 868	Shore D	90	90
Tvarová stálost (DSC)	ISO 75	°C	100	120

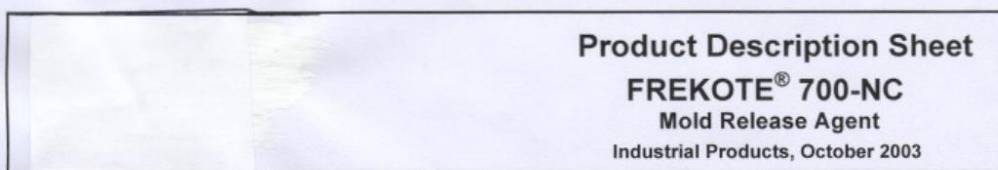
Skladování

Skladování by mělo být na suchém místě v originálních obalech při teplotě mezi 6–28°C, materiály by neměly být vystavovány nízkým teplotám. V případě krystalizace je možno zahřát Araldit na teplotu 50°C. Před upotřebením nutno nechat vychladnout na pokojovou teplotu.

Bezpečnostní opatření

Pozor!

Produkty firmy Huntsman Advanced Materials (dříve Ciba) lze zpracovávat bez jakékoli nebezpečí, jestliže jsou dodržovány obvyklé postupy při práci s chemikáliemi. Nevytvrzené materiály nedávejte do blízkosti potravin. Z důvodu zabránění nežádoucí alergické reakce organismu se doporučuje použít gumové nebo plastické rukavice stejně jako ochranné brýle. Po každé práci je nutno umýt si ruce teplou vodou. Nedoporučuje se používat ředidla. Po umytí ruce otřete do papírových (ne textilních) ubrousků na jedno použití. Pracovní prostor musí být dobře odvětrán, pracovní místo odsáváno. Přesný popis bezpečnostních opatření najdete v příručce „hygiena práce a způsoby zpracování produktů“ firmy Huntsman Advanced Materials GmbH (publ. Č. 24 264/d) stejně jako v bezpečnostních listech jednotlivých produktů.



Description

Loctite® Frekote® 700-NC offers excellent release properties for the most demanding applications and is a great all-purpose release agent. Frekote 700-NC releases epoxies, polyester resins, thermoplastics, rubber compounds and most other molded polymers.

Features

No chlorinated solvents
High gloss and high slip
No contaminating transfer
Versatile - releases most polymers
No mold build-up
Room temperature cure

Properties

Appearance	Clear liquid
Odor	Hydrocarbon
Solvents Aliphatic	Hydrocarbon, Dibutyl Ether
Specific Gravity	0.760 +/- .010
Special Cautions	Moisture sensitive, keep container tightly closed when not in use.
Shelf Life	1 year from date of manufacture
Application Temp	13°C - 135°C (55°F -275°F)
Cured Thermal Stability	400°C (750°F)

Mold Preparation

The mold surface must be clean and free of any release agent or other contaminants for Frekote 700-NC to be completely effective. Remove any contaminants with Frekote PMC or other suitable cleaning solvents. Light industrial abrasives can be used to remove heavy resin build up.

New Molds: Full curing of new molds is advisable to ensure the best bonding of the Frekote to the mold surface. New fiberglass and epoxy molds should be cured per manufacturer's instructions before starting production.

Note: For porous, green or repaired molds, a Frekote Sealer should be used - technical data is available. Consult with your Frekote Representative for assistance.

Application *Consult MSDS prior to use*

Frekote 700-NC can be applied to mold surfaces at room temperature up to 135°C (275°F) by spraying, brushing or wiping with a clean lint-free, cloth. When spraying, ensure a dry air source is used or use an airless spray system. If gel coats are used, a wipe-on-wipe-off method of application is recommended in order to achieve a high gloss finish. If possible, warm the mold prior to applying Frekote 700-NC to approximately 50°C (120°F) to drive off any moisture entrapped on the mold surface.

1. Only a thin wet film is required. Wipe or spray on a smooth, thin, continuous, wet film. Avoid wiping or spraying over the same area that was just coated until the solvent has evaporated. If spraying, hold nozzle 8-10 inches (20-30 cm.) from mold surface. It is suggested that small areas be coated working progressively from one side of the mold to the other.
2. Initially, apply a minimum of two coats, allowing up to 5 - 10 minutes after each application for complete solvent evaporation. The film should be dry and not feel tacky.
3. Once the final coat is applied, the coating should be cured at room temperature for 15-20 minutes
4. Aerosols may sometimes leave a matte surface finish. To enhance gloss, use a cotton cloth to gently buff up dry film, if required.
5. Performance is enhanced by re-coating once, after the first few initial pulls. Maximum releases will be obtained as the mold surface becomes conditioned to Frekote 700-NC.
6. When any release difficulty is experienced, the area in question can be "touched-up" by re-coating the entire mold surface or just those areas where release difficulty is occurring. For temperatures up to 135°C (275°F), use Frekote 700-NC allowing the film to thoroughly dry before continuing molding operation. If application temperatures exceed 135°C (275°F), Frekote 800-NC is recommended.

Note: Touch-up coats applied at regular intervals before the base film breaks down will extend the number of releases obtainable and reduce possible resin attack/build-up.

Precaution: Users of closed mold systems (i.e. rotomolding) must be certain that solvent evaporation is complete and that all solvent vapors have been ventilated from the mold cavity prior to closing the mold. An oil-free compressed air source can be used to assist in evaporation of solvents and ventilation of the mold cavity.

Flammability/ Storage

Frekote 700-NC contains flammable solvents. The product should always be used in well-ventilated areas. Store in a cool, dry place. Keep container tightly closed when not in use.

Note

The data contained herein are furnished for information only and are believed to be reliable. We cannot assume responsibility for the results obtained by others over whose methods we have no control. It is the user's responsibility to determine suitability for the user's purpose of any production methods mentioned herein and to adopt such precautions as may be advisable for the protection of property and of persons against any hazards that may be involved in the

Frekote® 700-NC October 2003

handling and use thereof. In light of the foregoing, **Loctite Corporation specifically disclaims all warranties expressed or implied, including warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, arising from sale or use of Loctite Corporation's products. Loctite Corporation specifically disclaims any liability for consequential or incidental damages of any kind, including lost profits.** The discussion herein of various processes or compositions is not to be interpreted as representation that they are free from domination of patents owned by others or as a license under any Loctite Corporation patents that may cover such processes or compositions. We recommend that each prospective user test his proposed application before repetitive use, using this data as a guide. This product may be covered by one or more United States or foreign patents or patent applications.

RAVATHERM™ XPS H LB



Technical data sheet

Properties	Value	Unit	Standard	CE Code		
Density (typical value)	33	kg/m ³	EN 1602			
Thermal Conductivity Declared	0.033	W/m.K	EN 13164	λ _b		
Compressive stress or compressive strength @ 10% deformation	300	kPa	EN 826	CS(10Y)		
Tensile Strength ⁽¹⁾	600	kPa	EN 1607	TR		
Shear Strength	250	kPa	EN12090	SS		
Moduli (typical values)	E-Modulus ⁽¹⁾	12	<30 mm	MPa	EN 826	
		15	30 <= 80 mm	MPa	EN 826	
		20	> 80 mm	MPa	EN 826	
	Tensile Modulus ⁽¹⁾	24	> 50 mm	MPa	EN 1607	
	Shear Modulus G	8 ⁽²⁾		MPa	EN 12090	
Water vapour diffusion resistance factor μ (tabulated value)	150	-	EN 12086	MU		
Long term water absorption by total immersion	1.5	%	EN 12087	WL(T)		
Dimensional stability under specified temperature (70°C) and humidity conditions (90%rh)	< 5	%	EN 1604	DS(70,90)		
Coefficient of linear thermal expansion (typical value)	0.07	mm/(m.K)	-	-		
Fire Performance	E	Euroclass	EN 13501-1			
Temperature limits	-50/+75	°C	-			
Tolerances	Thickness	-0.5/+0.5	mm	EN 823	T	
	Width	-0/+3	<700.0 mm	mm		EN 822
	Width	-0/+5	>700.0 mm	mm		EN 822
	Length	-0/+10	mm	EN 822		
Dimensions	Thickness	50 - 118	mm	EN 823		
	Width	700 - 1220	mm	EN 822		
	Length	2500 - 3000	mm	EN 822		
Edge Profile	Butt Edge					
Surface finish	Planed					

DESIGNATION CODE: XPS-EN 13164-T3-CS(10Y)300-DS(70,90)-WL(T)1.5-TR600-SS250

1) Measured in thickness direction

2) Typical value for Shear Modulus, may vary with the inplane direction.

1 N/mm² = 10⁶ kPa = 1MPa

Material shall be stored inside in original packaging, away from direct sun light or heat sources

Note: The information and data contained in this technical data sheet do not represent exact sales specifications. The features of the products mentioned may vary. The information contained in this document has been provided in good faith, however it does not imply any liability, guarantee or assurance of product performance. It is the purchaser's responsibility to determine whether these products are suitable for the application desired and to ensure that the site of work and method of application conform with current legislation. No license is hereby granted for the use of patents or other industrial or intellectual property rights. If products are purchased, we advise following the most up-to-date suggestions and recommendations.

www.ravagobuildingsolutions.co.uk





Technický list
Skelná tkanina 163 g/m²
AEROGLOSS
plátno

Váha na jednotku plochy		160 +/- 10 g/m ²
Vazba		Kepr 2/2
Kraje		stříhané
Hustota cm	osnova	12,0+/- -1
Hustota cm	útek	12,0+/- 1
Použitá lubrikace		Epoxidová kompatibilní
Pevnost v tahu N/50*200 mm	osnova	≥ 1100
	útek	≥ 1100
Šíře cm		100 +/- 1cm
Délka tkaniny / 1 role		100 +/- 2 cm
Doporučená skladovatelnost	teplota	Do 25 ° C
	vlhkost	Do 68 %
Nábal	papírová dutinka	vnitřní průměr 76 mm
Balení		polyethylenová fólie

Havel Composites CZ , s.r.o., Svědlice 67, Práslavice, 783 54
Tel.: 585 129 010, Fax 585 129 040,
www.havel-composites.cz, info@havel-compositec.cz

UP Gelcoat MGS® T 30 / T35

Hardener MGS® SF 10 / Thinner SF

	page	Content
Characteristics	1	
Application	2	
Mixing ratios	4	
Application as a topcoat	5	
Application as a gelcoat	6	
Care directions	6	

Application	gelcoat (fine-layer resin, gelcoat, undercoat, etc.) and topcoat (cover, final coat etc.) for polyester and especially for many epoxide laminating resins T 35: specially developed for the aircraft industry	
Operational temperature		
Processing	pot life:	app. 30-45 min (without thinner)
	gel time:	app. 100-150 min
	ability to take:	non-tacky after app. 2-4 hours
		curing time app. 5-6 hours
		completely cured after 2-3 days at room te.
	optimal processing temperature: 20-25 °C (70-77 °F)	
Features	T 30:	highly light- and weatherresistant surface extremely scratch-resistant grinding of the surface is difficult
	T 35:	product with excellent elongation good working properties
Special modifications	T 30:	transparent and white
	T 35:	white
Storage	below +10 °C (below +50 °F)	ca. 6 months
	10 up to 20 °C (50-68 °F)	3 - 4 months

Characteristics

UP Gelcoat MGS® T 30 / T35

Gelcoats based on unsaturated polyester resins. Curing mechanism: Cobalt/peroxide. These gelcoats are absolutely free of paraffin and they cure with a satin finish and completely non-tacky surface.

Application

UP Gelcoat T 30 is employed where a particularly resistant surface is desired. Surfaces are highly light- and weatherresistant and extremely scratch-resistant for this type of product. The standard colours for UP Gelcoat T 30 are white and transparent. Commercially available colouring pastes (UP colouring pastes) are best suited for tinting. Because of the high scratch resistance the grinding of the surfaces is difficult.

UP Gelcoat T 35 has been specially developed for the aircraft industry. It features excellent elongation and good working properties. The covering property of T 35 is lower than of T 30. UP Gelcoat T 35 is only available in white.

Suitable as a pregel (fine-layer resin, gelcoat, undercoat, etc.) or topcoat (cover, final coat) for polyester and especially for many epoxide laminating resins. Observe processing instructions! Our gelcoats are only conditionally suitable for applications where the gelcoats are exposed to weathering over long time or to water on a permanent basis. See care directions for polyester gelcoats page 6-7.

Commercially available polyester colour pastes (UP colour pastes) can be used to tint our pregels.

Scope of delivery

Resin component: UP Gelcoat T 30, T 35
 Hardener (peroxide): Hardeners SF 10, SF 2
 Thinner: Thinner SF

Processing

Gelcoats are preferably applied by means of spraying (air spray gun nozzle 2-3 mm, pressure 3-5 bar; airless: nozzle and pressure are to be selected depending on the object). Gelcoats can also be applied by brushing, rolling or blade coating. Due to the thixotropic properties of the gelcoat, wet film layers with a thickness of approx. 0.5 mm can be applied to vertical surfaces.

The optimal processing temperature lies in the range from 20-25 °C (68-77 °F). Lower temperatures increase viscosity (difficult processing), higher temperatures shorten pot life (at 30 °C/86 °F, the pot life will be halved). If several layers must be sprayed, this has to be done "wet-in-wet". Drying time between spray operations should be approx. 5-10 min. An "elephant skin" may form if the lower layer starts gelling, which means that the gelling layer will be dissolved by the styrene contained in the new layer. The lower layer will swell up and will be destroyed beyond repair.

UP Gelcoat MGS® T 30 / T35

Pot life:	approx. 30-45 min. (100 g at 20 °C/ 68 °F without thinner)
Gel time:	approx. 100-150 min. (depending on temperature and layer thickness)
Non-tacky:	after approx. 2-4 hours
Curing time:	approx. 5-6 hours; completely cured after 2-3 days at room temperature

Storage

UP Gelcoats T 30 and T 35 are supplied preaccelerated. The gelcoats, hardeners and thinners can be stored at temperatures:

of below +10 °C (50 °F): for approx. 6 months

of +10 up to 20 °C (50-68°F): for 3 - 4 months.

These gelcoats are also available stabilized for the tropics (not preaccelerated), in which case storage life at 20-30 °C (68-86 °F) is extended to approx. 6 months. Add cobalt accelerator and stir thoroughly before using tropic stabilized gelcoats.

UP Gelcoat MGS® T 30 / T35

Mixtures for standard applications (brushing, spraying)

Mixing ratios

	UP-Gelcoat T 30 / T35 : Hardener SF 10 : Thinner SF
Parts by weight	100 : 10 : up to 10 Always use as little thinner as possible!

Due to the thixotropic properties of the gelcoat, wet film layers with a thickness of approx. 0.5 mm can be applied. If necessary, the application must be done in several operations. The layer of one operation may not be thicker than 0.1 mm. Drying time before application of the next layer should be approx. 5-10 min because the additional solvents must disappear from the wet layer before gelling starts.

Mixtures for thicker layers (e. g. filling in a gap)

	UP Gelcoat T 30 / T35 : Hardener SF 2 : Thinner SF
Parts by weight	100 : 1,5-2 : up to 5 Do not use thinner at all, if possible!

Additives

Adding accelerator (cobalt, e.g., COB 1) is generally possible to increase reactivity. Processing time can be extended with the usual retarders (e.g., TC 501, hydroquinone, etc.).

Additives must always be thoroughly mixed into the gelcoat before adding hardener. Important: Adding accelerators, retarders or other thinners may cause discoloration and decrease resistance. Adequate testing is mandatory!

Use commercially available polyester colour pastes for colouring. Normally, add approx. 5-15 % of pigment paste, depending on the desired tint or covering. (Observe pigment paste manufacturer's instructions.) Thoroughly mix the pigment paste into the gelcoat before adding hardener. Transparent UP Gelcoat T 30 is best suited for colouring, especially if dark colors are desired.

**Never mix accelerators and peroxide hardeners directly!
Explosion hazard!**

UP Gelcoat MGS® T 30 / T35

Our Gelcoats T 30 and T 35 are suitable for polyester- and epoxy laminates. Various surfaces can be covered with these gelcoats.

If applied on epoxy resin, the epoxy resin must be well cured. Otherwise there is a danger that free amino groups are present, which may delay or prevent curing. A clean, roughly sanded surface is necessary to achieve good bonding.

To prevent colour shades during painting, use sandpaper grain 240 or less. The same gelcoat batch should always be used for finishing to prevent colour mismatches.

If the gelcoat is put on completely cured (heat-treated) gelcoat, a different colour shade is visible after precuring. This disappears after complete curing of the new layer (2 - 4 days at room temperature, 1-2 h at 50 °C/ 122 °F).

To repair small areas, the following procedure can be used: Add 10 % Thinner SF to the gelcoat, mix thoroughly with 10 % Hardener SF 10. Add an additional 10-30 % of acetone or ethylacetate (solvents must have pure quality). Spray this mixture with an 0.5 - 0.8 mm nozzle.

Important: The additional solvents must disappear from the wet layer before gelling starts. Therefore only thin layers (max 50-60 µm) can be laid up in one operation. Drying time before application of the next layer should be approx. 5-10 min. All layers has to be applied "wet in wet". Adding 10-30 % of solvent will increase the potlife to approx. 45-60 min.

Wet sanding with sandpaper grain 1.000 or preferably 2.000 is required before polishing. Good polishing agents are polishing waxes (p. e. Menzerna, Karlsruhe) applied with buffer wheels (p.e. Kreeb, Kirchheim/Teck).

Application as a topcoat

UP Gelcoat MGS® T 30 / T35

If polyester gelcoats are to be combined with epoxy laminating resins, then tests must be made for adhesion and compatibility. Unsuitable combinations can destroy the gelcoat (discolouring, brittling, cracks and bubbles).

Application as a gelcoat

Apply the gelcoat to the prepared mould surface in the usual manner.

The mold temperature must be at least 20 °C / 68 °F.

The gelcoat must be well gelled before epoxy resin is laid on.

This is visible because the surface becomes uniformly matt. The finger should not get coloured when drawing it across the layer. If the epoxy resin is applied too soon, it is likely that components of the amine hardener will delay or halt complete curing. Since the gelcoats are paraffin-free, the adhesion to epoxy resin is satisfactory even after several days of curing time. Thus, the epoxy resin laminate can be applied either after gelling or after curing overnight or over the weekend.

Gelcoat surfaces on gliders require frequently maintenance with paint care products or paint polishes, to provide **UV protection**. Unprotected gelcoat surfaces will show already after a few years stronger yellowing or cracking.

Care directions

Water, which can be mixed with normal quantities of commonly used rinsing agents, is suitable for cleaning. Use benzine-based tar removers (from car care sets) to remove insects, finger prints, adhered dust and lubricants. However, these agents should not be worked into the surfaces with cloths, cotton, etc., for an extended period of time because this may cause swelling and subsequent "collapse". Products containing silicone may cause problems during repair. We therefore recommend using silicone-free products.

Strong solvents and thinners should also be avoided because they may cause extreme swelling and subsequent "collapse". In particular, these agents include thinners containing esters and/or ketones, acetone, ethyl acetate and paint thinners of any kind. Chlorinated hydrocarbons must be avoided since they will destroy the UP coating within a short period of time and cause it to peel off (these agents include dichloromethane, trichloroethene, chloroform, carbon tetrachloride, trichloroethane, perchloroethylene, etc.).

Alcohols, such as denatured alcohol or isopropyl alcohol, may be used for cleaning purposes if applied with care, much like benzines and other aliphatic hydrocarbons. However, as stated above, they should be applied without much rubbing or extended exposure.

UP Gelcoat MGS® T 30 / T35

Do not treat (wash) gliders with solvents to eliminate aerodynamically unfavorable raindrop beads. Such solvents will completely remove all protective layers and expose the surface to the influence of the sun, UV radiation and other environmental factors. This will eventually result in the destruction of the polyester gelcoat.

Commercial plastic furniture polishes (e. g., Pronto) which form coats to prevent electrostatic charges due to atmospheric and other types of friction should be restricted to plexiglass surfaces. UP gelcoats and EP laminates charge up considerably less, and the resulting film combines with polishes to form a sticky gunk which can only be removed with solvents.

For larger repairs, the complete surface of the part should be wet sanded. Use exclusively fine-grade sandpaper. Rough-grade sandpaper causes deep grooves which can cause strain cracks. Wet-sand with water-sandpaper grain 1.000 or preferably 2.000 before polishing. When polishing with buffer wheels and polishing wax, avoid local overheating since excessive heat will cause the polyester gelcoat to detach from the epoxy laminate.



HAVEL COMPOSITES CZ s.r.o.
Svéslavice 67
783 54 Práslavice
tel.: +420 585 129 011
info@havel-composites.com
www.havel-composites.com
IČ: 25907379
DIČ: CZ25907379

TECHNICKÝ LIST

EPOXIDOVÁ PRYSKYŘICE LH 288

Epoxidová pryskyřice LH 288 se vyznačuje extrémně nízkou viskozitou. Při vytvrzování aminy nebo polyaminy nabízí snadnou aplikaci, výborné mechanické vlastnosti, dobrou chemickou odolnost, výborné teplotní vlastnosti atd.

Jedná se o pryskyřici nízké viskozity na bázi bisphenolu A. Viskozita: 500-900 mPas/25 °C. Při normálních skladovacích teplotách nedochází ke zkrystalizování. Předností směsi pryskyřice a doporučeného tužidla je jeho čírost.

Zvláštní vlastnosti: Pryskyřice je i při teplotě 0 - 10°C čirá, nedochází k zakalení tak, jako u některých epoxidových pryskyřic. Pryskyřice s tužidlem vytvoří před laminací nízkoviskozní systém, který umožňuje dobré smáčení a prosycení tkaniny za současného vytlačení bublin z laminovaného systému, čímž se dosáhne zlepšení mechanických vlastností.

Doba zpracovatelnosti /tzv. pot life/ od přibližně 15 min. do asi 5 hodin podle použitého tužidla

Zpracování: Při teplotách mezi 10 °C až 50 °C, všechny běžné metody zpracování

Schválení: není

Použití: Stavba lodí, sportovní nářadí, letecké modely, formy a nástroje, autodíly, odlitky aj.

Pro vytvrzování při pokojové teplotě od 10 - 30 °C lze uplatnit různé kombinace laminační pryskyřice a tužidel. Tyto systémy byly upraveny takovým způsobem, že při pokojové teplotě zcela vytvrdnou. (kombinace LH 288 s tužidly H 505, H 508, H 508 A)

Teplotní odolnost:

výrobku bez výrazných změn jejich parametrů:

> + 50-110 °C podle zvoleného tužidla a procesu tepelného dotvrzení.

Teplelné odolnosti 40 - 60 °C lze dosáhnout vytvrzováním při pokojové teplotě: vytvrzovací teplota + 30 °C = maximální tepelná odolnost.

Tepelná odolnost těchto systémů může být zvýšena na přibližně 110 °C postupným temperováním při teplotách 25°C po 12 hodin+50°C po 12hodin+80°C po 6 hodin.

U tužidla H 512: 25°C po 12 hod+50°C po 12hod+80°C po 6 hod+110°C po 3hod.

Změna teploty během vytvrzování je ±2°C/min

Jiný vytvrzovací režim může být konzultován.

Použití

System laminační pryskyřice a tužidla pro výrobu s použitím skelných, uhlíkových a kevlarových vláken. Vyznačuje se výbornými statickými a dynamickými vlastnostmi. Lze také dobarvovat pigmentem má rozdílné doby zpracovatelnosti (v závislosti na použitém tužidle).

Doporučená tužidla

Tužidlo	teplotní odolnost st.C	zpracovatelnost v min	poměr LH 288 k tužidlu
H 505	80	30	100 : 26
H 508 A	80	60	100 : 13
H 511	80	90	100 : 18
H 146	80	150	100 : 28
H 512	110	210	100 : 23
H 508	80	60	100 : 27

Vlastnosti pryskyřice

Skupenství	kapalina
Epoxidový hmotnostní ekvivalent (g/mol)	180 - 196
Barva (Gardner)	max. 3
Epoxidový index mol/1000 g	0,51 - 0,56
Bod vznícení (°C)	nad 150
Viskozita (mPa.s při 25°C)	500 - 900
Hustota (g/cm ³)	1,12- 1,16

Vlastnosti po vytvrzení

Vytvrzení: 24 h při 23 °C + 12 h při 80 °C	G R C Skelné vlákno	C R C Uhlík. vlákno	S R C Kevlar.vlákno
Pevnost v ohybu N/mm2	505	710	335
Pevnost v tahu N/nm2	460	510	400
Pevnost v tlaku N/nm2	410	460	140
Pevnost ve střihu N/nm2	42	47	28
Modulus pružnosti N/nm2	19	39	15
GRC vzorky: 16 vrstev skelné tkaniny, 2/2kepr, 280 g/m2, 4 mm silné CRC vzorky: 8 vrstev uhlíkové tkaniny, plátno, 200 g/m2, 2 mm silné SRC vzorky: 15 vrstev kevlarové tkaniny, satén, 173 g/m2, 4 mm silné Obsah vláken ve vzorcích během výroby/testování: 40 - 45 vol% Data propočítaná na obsah vláken 43 vol%			

Skladování

Pryskyřice mohou být skladovány po dobu nejméně 12 měsíců v pečlivě utěsněných kontejnerech. Při teplotách od 0 °C do 20°C pryskyřice nekrytalizuje.