



Šroubový spoj kompozitního systému na bázi uhlíková výztuž – polymerní matrice

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály
Autor práce: **Bc. Tomáš Urban**
Vedoucí práce: doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering ■

Bolted joints of carbon fiber reinforced polymer composites

Diploma thesis

Study programme: N2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301T048 – Engineering Technology and Materials
Author: **Bc. Tomáš Urban**
Supervisor: doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Urban**
Osobní číslo: **S13000452**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**
Název tématu: **Šroubový spoj kompozitního systému na bázi uhlíková výztuž
- polymerní matrice**
Zadávací katedra: **Katedra materiálu**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s možnostmi využití kompozitních materiálů v automobilovém průmyslu.
2. Navrhněte materiál výztuže a odpovídající matrici pro výrobu kompozitních vzorků.
3. Navrhněte výrobu kompozitních vzorků, které budou využity pro hodnocení vybraných parametrů.
4. Navrhněte vhodný způsob hodnocení mechanických parametrů vyrobených vzorků a uvedeného spoje.
5. Připravte vzorky a proveďte experimenty.
6. Vyhodnoťte výsledky a diskutujte je.
7. Zformulujte závěry.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **40 - 50 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

[1] **MALLICK, P. K.** *Advanced materials for automotive applications: an overview.* p. 5-27, Wood Head Publishing

[2] **HULL, D. a T. W. CLYNE.** *An Introduction to Composite Materials.* Cambridge: Solid State Science Series, 1996, Second Edition.


[3] **BAREŠ, R. A.** *Kompozitní materiály.* Praha: SNTL, 1988.

[4] **AGARWAL, B. D. a L. J. BROUTMAN.** *Vláknové kompozity.* Praha: SNTL, 1987.


[5] Odborné články vztahující se k dané tématice - viz www.sciencedirect.com

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.**
Katedra materiálu
Konzultant diplomové práce: **Ing. Jarmil Vlach**
VÚTS

Datum zadání diplomové práce: **12. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2016**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




prof. Ing. Petr Louda, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 12. října 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval všem, kteří mě během celého studia na vysoké škole, a též během psaní této práce, podporovali. Můj dík patří zejména mé přítelkyni, která mi byla vždy oporou i ve chvílích neveselých, a také rodině a přátelům, kteří ve mně vždy věřili. Dále bych rád poděkoval doc. Ing. Doře Kroisové, Ph.D. za aktivní a svědomité vedení mé diplomové práce, Ing. Jarmilu Vlachovi za zasvěcení do tajů kompozitních materiálů a za pomoc při psaní této práce, Ing. Luboši Běhálkovi, Ph.D. za pomoc při testování vzorků a nakonec Ing. Pavlu Kejzlarovi, Ph.D. za pomoc při tvorbě snímků na elektronovém mikroskopu.

Tato diplomová práce byla zpracována s podporou projektu Studentské grantové činnosti - Studium a hodnocení struktur a vlastností materiálů - identifikační číslo 21123, Fakulty strojní Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu poskytované Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy v roce 2016.

Abstrakt

V předkládané diplomové práci byl zkoumán vliv šroubového spoje na vlastnosti spojovaných dílů z uhlíkového dlouhovlákného kompozitu s epoxidovou matricí. Pomocí technologie ruční kontaktní laminace s následným lisováním za pokojové teploty byly vyrobeny kompozitní vzorky s kvaziizotropní skladbou vrstev uhlíkové tkaniny (0/90/45/-45) ve třech různých tloušťkách (2, 4 a 6 vrstev). Následné tahové zkoušky byly podrobeny 3 varianty vzorků, konkrétně vzorky ve tvaru destičky s prázdnou dírou, vzorky ve tvaru destičky s plnou dírou (šroubovým spojem) a nakonec vzorky ve formě přeplátovaného šroubového spoje. Byly změřeny základní mechanické vlastnosti dle norem ASTM a vyvozeny závěry ohledně chování těchto spojů při tahovém namáhání a zhodnocení vlivu tloušťky. Součástí závěru jsou též obecná doporučení při použití šroubových spojů u kompozitů s epoxidovou matricí.

Klíčová slova

Kompozit, uhlíková vlákna, polymerní matrice, šroubový spoj, kvaziizotropní

Abstract

The aim of this thesis was to examine the influence of bolted joints on mechanical properties of carbon fiber reinforced polymer composite parts. Firstly, a set of samples was made using wet hand lay-up technology. Samples were in three different thicknesses [2, 4 and 6 layers of carbon fabric] and with quasi-isotropic composition of the layers [0/90/45/-45]. Next part was testing of these samples on tensile machine in three different configurations, sample with open hole, sample with filled hole and sample with single lap bolted joint. Basic mechanical properties were measured according to ASTM standards and then behaviour of the samples and influence of thickness was discussed. Some general recommendations for designing of polymer composite bolted joints are also present in conclusion.

Keywords

Composite, carbon fiber, polymer matrix, bolted joint, quasi-isotropic

Obsah

Seznam obrázků	11
Seznam grafů.....	14
Seznam tabulek	15
Seznam symbolů	16
1 Úvod.....	18
2 Teoretická část	19
2.1 Kompozitní materiály.....	19
2.1.1 Historie kompozitních materiálů.....	19
2.1.2 Základní definice a popis kompozitních materiálů	20
2.1.3 Rozdělení kompozitních materiálů.....	21
2.1.4 Aplikace kompozitních materiálů	27
2.2 Polymerní kompozitní materiály v automobilovém průmyslu.....	29
2.2.1 Snižování hmotnosti.....	29
2.2.2 Zvýšení bezpečnosti.....	30
2.2.3 Designové možnosti.....	33
2.2.4 Soutěž Formula Student	34
2.3 Způsoby spojování polymerních kompozitních materiálů	36
2.3.1 Mechanické spoje.....	37
2.3.2 Lepené spoje.....	38
2.3.3 Hybridní spoje.....	40
3 Experimentální část.....	41
3.1 Výběr materiálů.....	41
3.1.1 Volba tkaniny	41
3.1.2 Volba pryskyřice a tužidla	42
3.1.3 Separátory	43
3.1.4 Ostatní materiál a použité přístroje	44
3.2 Výroba kompozitních vzorků.....	44
3.2.1 Postup výroby kompozitních desek.....	47
3.3 Analýza napjatosti zkušebních vzorků.....	56
3.4 Hodnocení mechanických parametrů vyrobených vzorků	61
3.4.1 Vzorky s prázdnou dírou (A, B a C)	62
3.4.2 Vzorky se šroubovým spojem (A-S, B-S a C-S).....	68
3.4.3 Vzorky s přelátovaným šroubovým spojem (A-PS, B-PS a C-PS).....	73
3.5 Mikroskopické hodnocení vybraných vzorků	80
4 Výsledky a jejich diskuse.....	83

5	Závěr	87
6	Zdroje	89
	Seznam tištěných příloh a příloh na CD	92
	Příloha A – Výkres rozložení vzorků na desce 340 x 230 mm pro řezání	93
	Příloha B – Výkres rozložení vzorků na desce 170 x 230 mm pro řezání	94
	Příloha C – Výkres rozložení vzorků na desce 370 x 290 mm pro řezání	95
	Příloha D – Technický list uhlíkové tkaniny 160 g/m ²	96
	Příloha E – Technický list epoxidové pryskyřice LH 160	97
	Příloha F – Technický list tužidla H 287	102
	Příloha G – Technický list separačního vosku TR 104	104
	Příloha H – Technický list PVA separátoru	105

Seznam obrázků

Obrázek 1: Synergický jev [2]	20
Obrázek 2: Porovnání křivek $\sigma - \epsilon$ různých matric vůči uhlíkovému vláknu [1]	22
Obrázek 3: Využití jednotlivých materiálů matric pro světovou produkci kompozitů za rok 2014 [6].....	22
Obrázek 4: Rozdělení kompozitů podle geometrie výztuže [3]	23
Obrázek 5: Základní 3 typy nejpoužívanějších vazeb tkanin [http://www.xcomposites.com/woven.html]	24
Obrázek 6: Celosvětová poptávka po uhlíkových vláknech v jednotlivých odvětvích.....	27
Obrázek 7: Podíl kompozitů v celkové konstrukci vojenských a civilních letadel od roku 1975 po současnost [4].....	28
Obrázek 8: Výroba trupu lodi technologií vakuové infuze [www.compositesworld.com].....	28
Obrázek 9: Hnací hřídel z uhlíkového kompozitu od firmy QA1 [www.qa1.net]	30
Obrázek 10: Disky kol z uhlíkového kompozitu od firmy Carbon Revolution [www.carbonrev.com]	30
Obrázek 11: Ideální stabilní průběh deformace uhlíkového kompozitu [10].....	31
Obrázek 12: Příklad vhodného a nevhodného průběhu deformace uhlíkového kompozitu [10].....	32
Obrázek 13: Hodnoty specifické absorbované energie pro různé materiály [9]	32
Obrázek 14: Vnitřní panel zadního krytu motoru z uhlíkového kompozitu (Ford GT 2005) [9]	33
Obrázek 15: Závodní vůz týmu Technické univerzity Graz [www.racing.tugraz.at]	34
Obrázek 16: Výroba monokoku z uhlíkového kompozitu - Norwegian University of Science and Technology [www.revolve.no]	35
Obrázek 17: A-ramena z uhlíkového kompozitu - Technical university of Munich [www.tufast-racingteam.de].....	35
Obrázek 18: Rozdělení technologií pro spojování polymerních kompozitů.....	36
Obrázek 19: Delaminace, vznikající při začátku (a) a konci (b) vrtání [18]	37
Obrázek 20: Příklad delaminace vrtané díry	37
Obrázek 21: Základní typy mechanických spojů [14]	38
Obrázek 22: Základní typy lepených spojů [14]	39
Obrázek 23: Schéma hybridního spoje [14].....	40
Obrázek 24: Role uhlíkové tkaniny.....	42
Obrázek 25: Detail plátnové vazby uhlíkové tkaniny	42
Obrázek 26: Balení 1 kg epoxidové pryskyřice (vlevo) a 1 kg tužidla (vpravo)	42
Obrázek 27: Balení separačního vosku TR 104	44
Obrázek 28: Balení tekutého polyvinylalkoholu Polivaks EKO PVA.....	44

Obrázek 29: Rozměrové náčrty zkušebních vzorků.....	45
Obrázek 30: Rozměrový náčrt vzorku s přeplátovaným šroubovým spojem	46
Obrázek 31: Rozložení vzorků na deskách pro první fázi	46
Obrázek 32: Rozložení vzorků na desce pro druhou fázi.....	47
Obrázek 33: Desky z PMMA použité pro lisování kompozitu	48
Obrázek 34: Molitanový štětec pro aplikaci PVA	48
Obrázek 35: Stříhání tkaniny na požadované rozměry	48
Obrázek 36: Hotové nastříhané díly.....	48
Obrázek 37: Nanášení první vrstvy pryskyřice na spodní desku formy.....	51
Obrázek 38: Umístění první vrstvy tkaniny	51
Obrázek 39: Prosyncování první vrstvy tkaniny pryskyřicí.....	51
Obrázek 40: Umístění další vrstvy tkaniny	51
Obrázek 41: Boční pohled na sestavenou formu.....	52
Obrázek 42: Umístění formy do uzavíratelného PE sáčku pro odsátí vzduchu	52
Obrázek 43: Uzavíratelné sáčky připravené pro vložení forem	53
Obrázek 44: Forma vložená do sáčku	53
Obrázek 45: Uzavírání sáčku s formou	53
Obrázek 46: Zatížená forma po odsátí vzduchu.....	53
Obrázek 47: Rozevírání formy	54
Obrázek 48: Kompozitní deska po oddělení horního dílu formy	54
Obrázek 49: Oddělení kompozitní desky od spodního dílu formy	54
Obrázek 50: Vyrobené kompozitní desky	54
Obrázek 51: Kompozitní deska s vyznačenými řezy	55
Obrázek 52: Detail řezu	55
Obrázek 53: Broušení vzorku na pásové brusce	55
Obrázek 54: Vzorky pro přeplátovaný spoj před vrtáním.....	55
Obrázek 55: Detail vrtané díry	55
Obrázek 56: Část hotových vzorků s vrtanou dírou.....	55
Obrázek 57: Lepení příložky.....	56
Obrázek 58: Sešroubované přeplátované spoje + momentový klíč	56
Obrázek 59: Schéma analyzovaného vzorku [16].....	56
Obrázek 60: Vzorek B2 před testováním	62
Obrázek 61: Vzorek B2 po testování	62
Obrázek 62: Vzorek B2 po testování	62
Obrázek 63: Vzhled lomů vzorků A1, B1 a C3	67

Obrázek 64: Vzorek C7-S před testováním.....	68
Obrázek 65: Vzorek C7-S po testování.....	68
Obrázek 66: Vzorek C7-S po testování.....	68
Obrázek 67: Vzhled lomů vzorků A4-S, B2-S a C4-S.....	73
Obrázek 68: Detail lomů vzorků A4-S, B2-S a C4-S	73
Obrázek 69: Detail vzorku A1-S s lomem mimo šroubový spoj	73
Obrázek 70: Boční pohled na vzorek B5-PS před testováním	74
Obrázek 71: Vzorek B5-PS před testováním	74
Obrázek 72: Vzorek B5-PS po testování	74
Obrázek 73: Deformovaná oblast díry vzorku C2-PS s vyznačeným směrem působení síly při tahové zkoušce.....	79
Obrázek 74: Detail deformované díry vzorku C2-PS s vyznačeným směrem působení síly při tahové zkoušce.....	79
Obrázek 75: Uhlíková vlákna v oblasti lomu.....	80
Obrázek 76: Detail pokrytí uhlíkových vláken pryskyřicí	81
Obrázek 77: Zpřetrhaná vlákna částečně vytržená z matrice.....	81
Obrázek 78: Hladká plocha povrchu s viditelnými póry a stopami po upínacích čelistech.....	82
Obrázek 79: Detail povrchových pórů	82

Seznam grafů

Graf 1: Průběhy radiální a tečné deformace v závislosti na vzdálenosti od středu díry.....	60
Graf 2: Průběhy radiálního a tečného napětí v závislosti na vzdálenosti od středu díry.....	60
Graf 3: Průběhy podélného napětí v jednotlivých vrstvách kompozitu.....	60
Graf 4: Průběhy příčného napětí v jednotlivých vrstvách kompozitu.....	60
Graf 5: Průběhy radiální a tečné deformace v závislosti na vzdálenosti od středu díry.....	61
Graf 6: Průběhy radiálního a tečného napětí v závislosti na vzdálenosti od středu díry.....	61
Graf 7: Průběhy podélného napětí v jednotlivých vrstvách kompozitu.....	61
Graf 8: Průběhy příčného napětí v jednotlivých vrstvách kompozitu.....	61
Graf 9: Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorky A.....	63
Graf 10: Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorky A – lineární oblast.....	64
Graf 11: Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorky B.....	65
Graf 12: Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorky B – lineární oblast.....	65
Graf 13: Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorky C.....	66
Graf 14: Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorky C – lineární oblast.....	67
Graf 15: Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorky A-S.....	69
Graf 16: Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorky A-S – lineární oblast.....	69
Graf 17: Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorky B-S.....	70
Graf 18: Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorky B-S – lineární oblast.....	71
Graf 19: Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorky C-S.....	72
Graf 20: Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorky C-S – lineární oblast.....	72
Graf 21: Závislost únosnosti spoje na poměrném prodloužení pro vzorky A-PS.....	75
Graf 22: Závislost únosnosti spoje na poměrném prodloužení pro vzorky A-PS – detail počáteční oblasti.....	75
Graf 23: Stanovení únosnosti při 2% deformaci u vzorku A4-PS.....	76
Graf 24: Závislost únosnosti spoje na poměrném prodloužení pro vzorky B-PS.....	77
Graf 25: Závislost únosnosti spoje na poměrném prodloužení pro vzorky B-PS – detail počáteční oblasti.....	77
Graf 26: Závislost únosnosti spoje na poměrném prodloužení pro vzorky C-PS.....	78
Graf 27: Závislost únosnosti spoje na poměrném prodloužení pro vzorky C-PS – detail počáteční oblasti.....	79
Graf 28: Porovnání diagramů $\sigma - \epsilon$ mezi vzorky B5 a B2-S.....	85
Graf 29: Porovnání diagramů $\sigma - \epsilon$ mezi vzorky A4-PS, B4-PS a C4-PS.....	86

Seznam tabulek

Tabulka 1: Mechanické vlastnosti základních typů materiálů vláken [3]	25
Tabulka 2: Základní údaje o použité uhlíkové tkanině	41
Tabulka 3: Základní údaje o použité epoxidové pryskyřici s tužidlem.....	43
Tabulka 4: Základní údaje o použitých separátorech.....	43
Tabulka 5: Základní údaje o vyráběných a testovaných vzorcích.....	45
Tabulka 6: Hmotnosti C vláken, pryskyřice a tužidla pro desky 340x230 a 170x230 mm	50
Tabulka 7: Hmotnosti C vláken, pryskyřice a tužidla pro desky	50
Tabulka 8: Základní naměřená data pro vzorky série A	63
Tabulka 9: Základní naměřená data pro vzorky série B.....	64
Tabulka 10: Základní naměřená data pro vzorky série C.....	66
Tabulka 11: Základní naměřená data pro vzorky série A-S.....	68
Tabulka 12: Základní naměřená data pro vzorky série B-S	70
Tabulka 13: Základní naměřená data pro vzorky série C-S	71
Tabulka 14: Základní naměřená data pro vzorky série A-PS.....	74
Tabulka 15: Základní naměřená data pro vzorky série B-PS.....	76
Tabulka 16: Základní naměřená data pro vzorky série C-PS.....	78
Tabulka 17: Střední hodnoty a směrodatné odchylky základních mechanických vlastností vzorků s prázdnou dírou (A, B a C)	83
Tabulka 18: Střední hodnoty a směrodatné odchylky základních mechanických vlastností vzorků s plnou dírou (A-S, B-S a C-S).....	83
Tabulka 19: Střední hodnoty a směrodatné odchylky základních mechanických vlastností vzorků s přeplátovaným šroubovým spojem (A-PS, B-PS a C-PS).....	84

Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Název
SEA	kJ/kg	Specifická absorpce energie (Specific Energy Absorption)
W_D	kJ	Celková energie absorbovaná deformací materiálu
V_D	m^3	Objem deformovaného materiálu
ρ_D	kg/m^3	Hustota deformovaného materiálu
ρ_f, ρ_p, ρ_t	g/cm^3	Hustota vláken, pryskyřice, tužidla
ρ_m	g/cm^3	Hustota matrice
ρ_k	g/cm^3	Hustota kompozitu
v_f	-	Objemový podíl vláken
v_m	-	Objemový podíl matrice
m_f	-	Hmotnostní podíl vláken
m_m	-	Hmotnostní podíl matrice
M_C	g	Hmotnost vláken
M_M	g	Hmotnost matrice
M_P	g	Hmotnost pryskyřice
M_T	g	Hmotnost tužidla
E_f	MPa	Modul pružnosti vláken
E_m	MPa	Modul pružnosti matrice
G_f	MPa	Smykový modul pružnosti vláken
G_m	MPa	Smykový modul pružnosti matrice
σ_r, σ_t	MPa	Radiální, tečné napětí
$\varepsilon_r, \varepsilon_t$	-	Radiální, tečná relativní deformace
E	MPa	Modul pružnosti v tahu
τ_{tr}	MPa	Smykové napětí
σ	MPa	Zatěžující napětí
a	Mm	Poloměr díry

r	mm	Vzdálenost elementu od středu díry
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	MPa	Normálové složky tenzoru napětí v souřadnicovém systému o (x, y, z)
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$	MPa	Smykové složky tenzoru napětí v souřadnicovém systému o (x, y, z)
$\varepsilon_x, \varepsilon_y$	-	Relativní deformace střední roviny laminátu ve směru osy x a y
γ_{xy}	-	Relativní deformace střední roviny laminátu ve směru osy z
σ_L	MPa	Normálová složka tenzoru napětí ve směru L (ve směru vláken)
σ_T	MPa	Normálová složka tenzoru napětí ve směru T (kolmo na vlákna)
τ_{LT}	MPa	Smyková složka tenzoru napětí v rovině LT
E_L	MPa	modul pružnosti kompozitu ve směru L (směr vláken)
E_T	MPa	modul pružnosti kompozitu ve směru T (kolmo na směr vláken)
T^ε	-	Transformační matice tenzoru relativních deformací
T^σ	-	Transformační matice tenzoru napětí
θ_k	° / rad	Směr vláken k-té vrstvy kompozitu
\bar{Q}_k	MPa	Matice modifikované tuhosti k-té vrstvy kompozitu
Q	MPa	Matice tuhosti
ν	-	Poissonovo číslo
ν_{LT}, ν_{TL}	-	Poissonova čísla v rovinách LT a TL
G_{LT}	MPa	Smykový modul pružnosti v rovině LT
σ_{pp}	MPa	Pevnost do prvního porušení
σ_m	MPa	Mez pevnosti
ε_m	-	Poměrné prodloužení na mezi pevnosti
σ_u	MPa	Únosnost při 2% deformaci
σ_{um}	MPa	Maximální únosnost
ε_{um}	-	Poměrné prodloužení na maximální únosnosti
E_{ps}	MPa	Specifický modul pružnosti pro překlátovaný spoj

1 Úvod

Kompozitní materiály s polymerní matricí jsou dnes široce používaným materiálem a jejich procentuální zastoupení napříč technickými obory stále roste. Zejména v případě uhlíkových kompozitů, které vynikají vysokými mechanickými vlastnostmi a zároveň nízkou hmotností, je z pohledu snižování uhlíkové stopy stále rostoucí zájem o jejich využití v oblastech automobilového, leteckého či kosmického průmyslu. Ať už jde ale o výrobu designových dílů, nebo dílů strukturálních (tedy nosných), je vždy nutné zabývat se jejich případnou montáží do vyšších strukturálních celků. A stejně jako jsou tyto materiály specifické svojí výrobou a vlastnostmi, mají též určitá specifika v oblasti spojování.

Tato práce se zabývá obecným přehledem spojovacích technologií, jež se v případě polymerních kompozitů používají, a zároveň poskytuje obecný postup pro práci s dlouhovláknými uhlíkovými kompozity s epoxidovou matricí od volby materiálu až po samotnou výrobu tenkostěnných dílů. Dle tohoto postupu byly poté vyrobeny tenkostěnné vzorky různých tloušťek, které byly využity pro hlavní cíl práce, tedy hodnocení vlivu šroubového spoje na mechanické vlastnosti spojovaných kompozitních dílů. Součástí práce je poté i kvalitativní hodnocení struktury vyrobených vzorků s využitím rastrovací elektronové mikroskopie.

Nutno též říci, že téma této práce vzniklo částečně v souvislosti s nově vznikajícím týmem Studentské formule na Technické univerzitě v Liberci, kde se předpokládá využití uhlíkového kompozitu pro výrobu kapotáže a aerodynamických prvků. Práce tak může zároveň sloužit jako základní zdroj informací pro práci s uhlíkovými kompozity a spojování dílů z nich vyrobených.

2 Teoretická část

V první části práce je pozornost věnována obecnému úvodu do kompozitních materiálů. Následuje kapitola zabývající se jejich současnou aplikací v automobilovém průmyslu a závěr teoretické části je zaměřen na problematiku spojování kompozitů.

2.1 Kompozitní materiály

2.1.1 Historie kompozitních materiálů

Jakkoliv může znít název „kompozitní materiály“ jako něco moderního či nového, ve skutečnosti jsou to materiály, které nás obklopují již od pradávna. Sama příroda využívá princip kombinace různých materiálů velice hojně a vytváří tak struktury, které jsou výjimečné jak svými vlastnostmi, tak svou stavbou.

Tyto přírodní materiály poté využívali i první lidé a např. ze dřeva a kostí vyráběli různé nástroje denní potřeby. Zároveň tedy byli, i když nevědomky, prvními lidmi využívajícími kompozitní materiály. Dřevo je totiž jedním z nejnámějších přírodních kompozitních materiálů, jehož struktura je tvořena jednosměrnými vlákny celulózy, spojenými hemicelulózovou a ligninovou maticí. Stejně tak lidská či zvířecí kost je velmi složitou kompozitní strukturou, jež je tvořena kolagenovými vlákny a krystaly fosforečnanu vápenatého [10].

S postupem času člověk pochopil význam kombinace různých materiálů a sám se naučil tyto kompozitní struktury vytvářet. Jedním z příkladů mohou být hliněné stavební bloky vyztužené slámou, jež byly jako stavební materiál poprvé použity ve starověkém Egyptě. Dalším příkladem mohou být také mongolské luky z období 13. století, které byly důmyslně konstruovány vzhledem k jejich tahovému namáhání. Vnější strana luku namáhaná v tahu byla tvořena zvířecími šlachami, střední vrstva byla dřevěná a vrstva vnitřní, namáhaná v tlaku, byla z rohoviny. Tato kompozice spolu se specifickým tvarem umožňovala luky celkově zkrátit a tím zlepšit jejich použitelnost při jízdě na koni [2].

Je tedy zřejmé, že kompozity obklopují lidstvo již nějaký čas, a během toho času byly stále vyvíjeny. Nicméně až konec 20. a začátek 21. století představuje pro kompozity jako technický materiál obrovský rozmach, zejména díky rozvoji reaktoplastických matic a vláknových plniv, která dnes představují většinovou produkci.

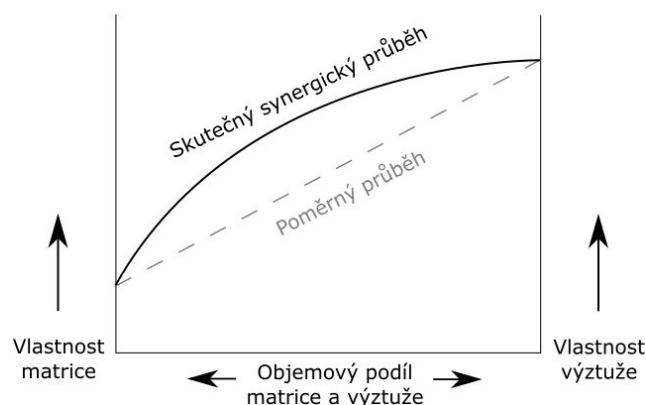
2.1.2 Základní definice a popis kompozitních materiálů

Nejběžnější a obecně uznávaná definice kompozitních materiálů je následující. Jedná se o dvou či více složkový materiál, jehož jednotlivé složky mají odlišné fyzikální a chemické vlastnosti. Tyto složky buď výsledný kompozit vyztužují, nebo slouží jako pojivo vyztuhy a tvoří tzv. matici. V případě vyztuhy jde obvykle o materiály s vysokou pevností, tuhostí a tvrdostí, kdežto matrice bývá tvořena materiálem poddajnějším. Pro jednoznačné rozlišení kompozitních a vícefázových materiálů bylo stanoveno několik podmínek, které kompozitní materiál musí splňovat [1]:

- Výsledný podíl vyztuhy v matici musí být větší než 5 %
- Vlastnosti jednotlivých složek (vyztuhy, matrice) musejí být výrazně odlišné (fyzikálně, chemicky nebo mechanicky)
- Výsledný kompozit musí být vyroben mechanickým mísením složek

Tyto podmínky poté jednoznačněji definují pojem „kompozitní materiál“ tím, že vylučují skupiny materiálů, které by jinak mezi kompozity patřit mohly. Jsou to např. pigmentem barvené plasty, či slitiny kovů obsahující tvrdé fáze, vyloučené při tepelném zpracování.

Kompozity, jako materiály s heterogenní strukturou, mají některé velice typické vlastnosti. Patří sem např. synergický jev či izotropie a anizotropie vlastností. Synergický jev způsobuje, že výsledné vlastnosti kompozitu mohou přesahovat vlastnosti poměrné (dané prostým součtem vlastností jednotlivých složek – viz Obrázek 1). Tento efekt je velmi žádaný, a obecně je snaha o dosažení co nejvyšší synergie mezi jednotlivými složkami.



Obrázek 1: Synergický jev [2]

Oproti běžným materiálům, u kterých předpokládáme izotropní vlastnosti, se kompozity vyznačují výraznou směrovostí vlastností, jež je poměrně značně závislá na technologii zpracování a na charakteru jednotlivých složek. S tímto jevem je nutné počítat zejména při

konstrukčním návrhu dané součásti a brát v úvahu předpokládané směry zatížení. Mechanické vlastnosti např. u vláknových kompozitů kolmo na směr vláken mohou být totiž až o několik řádů nižší, než ve směru vláken. Pro popis kompozitu s hlediska symetrie vlastností bylo stanoveno několik základních pojmů [2]:

- Izotropní materiál – vlastnosti jsou ve všech směrech stejné.
- Kvaziizotropní materiál – vlastnosti jsou stejné ve směru tří navzájem kolmých základních os. Symetrie vlastností je dána třemi rovinami, jež jsou tvořeny těmito základními osami.
- Ortotropní materiál – vlastnosti jsou také symetrické podle tří vzájemně kolmých rovin, ale jejich hodnota se v jednotlivých směrech liší. Příkladem může být dřevo.
- Příčně izotropní materiál – má vlastnosti opět symetrické podle tří rovin, ale v jedné z těchto rovin se chová jako materiál izotropní. Do této skupiny patří jednosměrné dlouhovlákné kompozity (rovina izotropních vlastností je kolmá na směr vláken).
- Anizotropní materiál – vlastnosti v jednotlivých směrech jsou zcela odlišné.

2.1.3 Rozdělení kompozitních materiálů

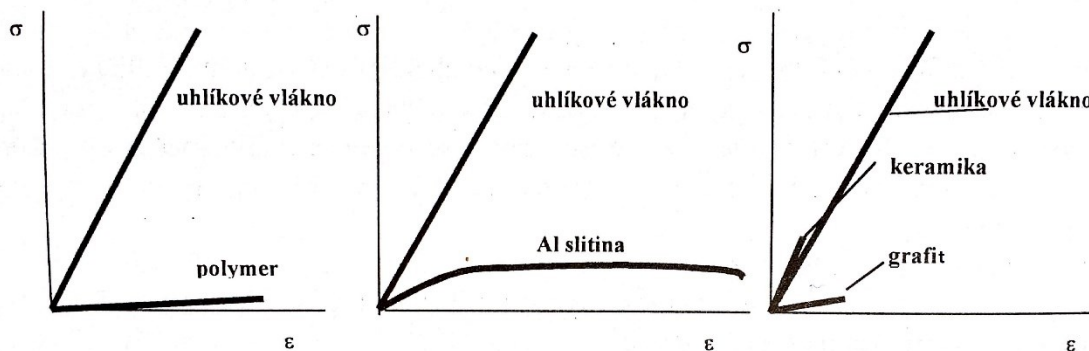
Z výše zmíněné definice je tedy patrné, že se kompozitní materiál skládá ze dvou hlavních složek. Tyto složky se od sebe výrazně liší a v základě se rozdělují na matici a výztuž (disperzi). Podrobnější rozdělení kompozitů poté může být provedeno buď podle typu matrice, nebo podle tvaru výztuže.

Rozdělení podle typu matrice

Hlavní funkcí matrice je propojení výztuže do jednoho celku a následně k přenosu vnějšího zatížení na samotnou výztuž. Další funkcí může být také ochrana výztuže před vnějšími vlivy. Nejčastěji používané rozdělení matic je poté dle použitého materiálu:

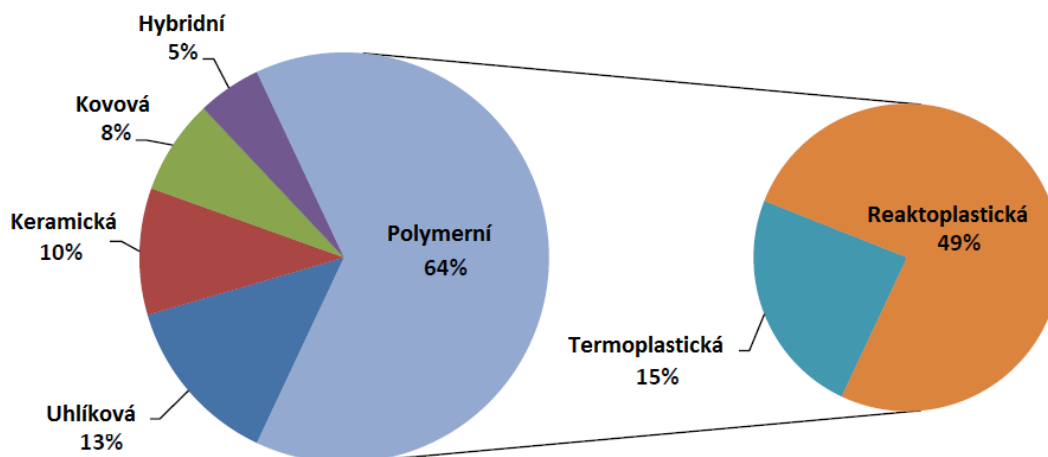
- Kompozity s polymerní maticí (PMC – Polymer matrix composites)
- Kompozity s kovovou maticí (MMC – Metal matrix composites)
- Kompozity s keramickou maticí (CMC – Ceramic matrix composites)

Obecně platí, že by matrice měla být oproti výztuži výrazně poddajnější. Je to z toho důvodu, aby si pojící funkci matrice udržela i v případě, kdy se výztuž poruší. Jinými slovy, poměrné prodloužení při přetržení by mělo být u matrice vyšší nežli u výztuže. V takovém případě mluvíme o polymerních případně kovových maticích [1].



Obrázek 2: Porovnání křivek $\sigma - \epsilon$ různých matic vůči uhlíkovému vláknu [1]

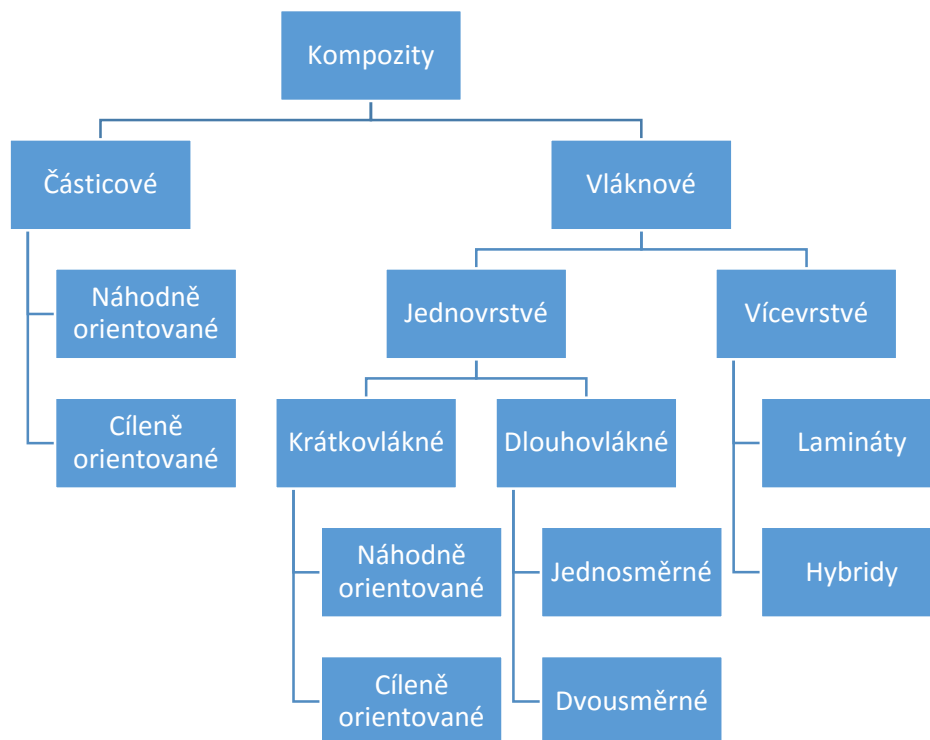
Opačný případ nastává u matic keramických případně grafitových. Tyto materiály mají poměrně vysokou pevnost, ale zároveň jsou křehké, což znamená, že při zatížení se matrice porušuje dříve než výztuž. Zde je ovšem přítomnost výztuže klíčová, neboť pomáhá držet keramickou matrici pohromadě a ve výsledku má pak keramický kompozit lepší mechanické vlastnosti, než samotná keramika.



Obrázek 3: Využití jednotlivých materiálů matic pro světovou produkci kompozitů za rok 2014 [6]

Rozdělení podle tvaru výztuže

Jelikož je vyztužující složka nespojitá, je možné ji charakterizovat podle geometrického tvaru, který zaujímá. Z nejobecnějšího pohledu lze tedy výztuže rozdělit na částicové, nebo vláknové. Tvar hraje významnou roli při výrobě kompozitu, kdy dochází k interakci výztuže s matricí a zároveň také předurčuje anizotropii vlastností výsledného kompozitu.



Obrázek 4: Rozdělení kompozitů podle geometrie výztuže [3]

A. Částicové výztuže

Částicové výztuže jsou nejčastěji ve formě částic, destiček nebo jehliček, které mohou být buď náhodně, nebo cíleně orientované v požadovaném směru. Obecně částicové výztuže zvyšují mechanické vlastnosti, mají však různý účinek u různých materiálů matrice. U polymerních matric dochází ke zvýšení modulu pružnosti v tahu a tvarové stálosti za tepla a ke snížení velikosti výrobního a povýrobního smrštění. Nejpoužívanějšími materiály částic jsou například mastek, kaolin, vápenec, kovové prášky nebo skleněné kuličky [1].

V případě kovových matric hraje poměrně důležitou roli velikost částic. Použitím velmi malých tvrdých částic (do 0,1 mm) získáváme tzv. disperzně zpevněné kovy (např. hliník). Zde tyto částice velmi účinně brzdí pohyb dislokací dislokace a dochází tak k výraznému zvýšení pevnosti, tvrdosti a meze kluzu. Příkladem používaných materiálů částic může být karbid křemíku (SiC), oxid hlinitý (Al_2O_3) nebo oxid zirkoničitý (ZrO_2). Při použití částic větších rozměrů (více než 0,5 mm) již mluvíme o částicových kompozitech s kovovou matricí. U křehkých keramických matric se nejčastěji používají buď jehlicovité nebo destičkovité částice (kovové nebo keramické). Obecně je ale daleko vhodnější použití vláken [1].

B. Vláknové výztuže

Vlákna jako vyztužující prvky hrají v oblasti kompozitů podstatně důležitější roli nežli částice. Oproti jiným formám totiž vždy vykazují vyšší pevnost (v podélném směru), bez ohledu na použitý materiál. Je to dáno především malým průřezem vláken, což pomáhá zabránit vzniku velkých nedokonalostí ve struktuře materiálu. V případě polymerních vláken poté hraje hlavní roli orientace molekulární struktury. Díky těmto vlastnostem patří vláknové kompozity mezi nejdůležitější skupinu kompozitů [3].

Rozdělení vláknových kompozitů může být provedeno z několika hledisek. Podle délky vláken rozlišujeme kompozity krátkovlákné a dlouhovlákné. Krátkovlákný kompozit lze definovat jako kompozit, jehož vlastnosti jsou délkou vláken výrazně ovlivňovány. U dlouhovlákných kompozitů působí zátěž většinou přímo na vlákna a jejich délka již není klíčovým parametrem [3].

Dlouhá kontinuální vlákna lze také orientovat v různých směrech a získat tak vícesměrové (multiaxiální), resp. vícevrstvé kompozity (lamináty). Toho lze poměrně efektivně a elegantně dosáhnout použitím tkanin, kdy v jedné vrstvě laminátu získáme mechanické vlastnosti vláken ve dvou směrech (0° a 90°). Různým natočením jednotlivých vrstev tkanin poté můžeme zvyšovat stupeň izotropie výsledného kompozitu, nebo vytvořit co nejvhodnější strukturu přímo na míru dle působícího zatížení [3]. Příklady používaných typů vazeb různých tkanin jsou znázorněny na Obrázku 4.



Obrázek 5: Základní 3 typy nejpoužívanějších vazeb tkanin
[<http://www.xcomposites.com/woven.html>]

Orientace krátkých vláken je problematická a obecně se předpokládá jejich nahodilé rozložení. Může být však značně ovlivněna technologií výroby. Příkladem může být vstřikování, kdy mají krátká vlákna tendenci orientovat se podle směru toku taveniny. Při nahodilé orientaci však můžeme krátkovlákné kompozity považovat jako izotropní.

Druhým kritériem, podle kterého můžeme vláknová plniva rozdělovat, je materiál. Jelikož se jedná o výztuž, u které jsou požadované dobré mechanické vlastnosti, jsou používány takové materiály, jež toto splňují již v základní formě. Nejpoužívanějšími vlákny z materiálového hlediska jsou [1]:

- Skleněná vlákna
- Uhlíková vlákna
- Polymerní vlákna
- Kovová vlákna
- Keramická vlákna

Vlastnosti vláken z těchto materiálů se vzájemně velmi liší, což poté souvisí s jejich následnou aplikací. V Tabulce 1 jsou uvedeny konkrétní příklady nejpoužívanějších materiálů spolu s jejich základními mechanickými vlastnostmi.

Materiál vláken	Modul pružnosti E [GPa]	Pevnost v tahu σ_{pt} [MPa]	Hustota ρ [kg/m ³]
Sklo typu E	75	2 000	2 500
Sklo typu S	85	5 000	2 500
Uhlík (vysokopevnostní)	240	2 500	1 900
Uhlík (vysokomodulový)	390	2 100	1 900
Kevlar 49 (aramid)	120	2 750	1 500
Ocel	210	2 500	7 800
Berylium	315	1 300	1 800
Wolfram	350	2 500	19 000
Bor	450	2 400	2 400

Tabulka 1: Mechanické vlastnosti základních typů materiálů vláken [3]

Skleněná vlákna

Skleněná vlákna patří mezi nejpoužívanější typ vláken pro kompozity. Jejich největší výhodou je nízká cena a velmi dobrá chemická odolnost. Mají také poměrně vysokou pevnost v tahu, nicméně nevýhodou je jejich křehkost. Pro účely vyztužení kompozitů se vyrábí dva hlavní typy skleněných vláken. E-sklo, původně vyvinuté pro elektrické účely, je levnější typ s nižšími mechanickými vlastnostmi. Druhým typem je S-sklo, které má lepší mechanické vlastnosti a je používáno pro pokročilejší kompozity [7].

Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna vynikají svojí pevností a tuhostí. Mají 3 až 10 krát vyšší tuhost než vlákna skleněná a jsou vyráběna ve dvou základních typech. Prvním typem jsou vysokopevnostní vlákna, jež mají vysokou pevnost v tahu, ale nižší modul pružnosti. Druhým typem jsou vysokomodulová vlákna, která mají vysoký modul pružnosti, ale nižší pevnost v tahu. Uhlíková vlákna jsou často používána pro výrobu pokročilých vysokopevnostních kompozitů, jež se používají zejména v kosmickém, leteckém či automobilovém průmyslu. Jejich nevýhodou je však vysoká cena [7].

Polymerní vlákna

Nejnámějšími a nejpoužívanějšími polymerními vlákny jsou vlákna aramidová, též známá pod označením Kevlar[®]. Tato vlákna mají vynikající mechanické vlastnosti, a zároveň mají velmi malou hustotu. Jsou také velmi odolná proti rázu, proto se často používají např. jako součást systému balistické ochrany. Vyrábějí se ve dvou základních variantách jako nízkotuhostní Kevlar[®] 29 a vysokotuhostní Kevlar[®] 49. Nevýhodou těchto vláken je malá pevnost v tlaku, vysoká navlhavost a také jejich obtížné dělení [7].

Borová vlákna

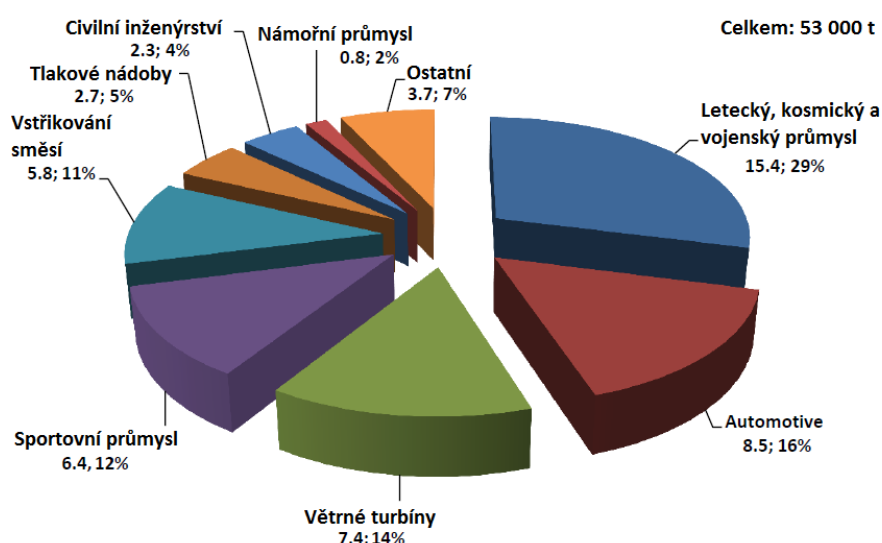
Borová vlákna mají vysokou tuhost a vynikající tahové vlastnosti. Jejich značnou nevýhodou je však špatná ohebnost, což znemožňuje jejich použití pro tvarové díly. Jejich nejčastější použití je v kombinaci s epoxidovou pryskyřicí v opravárenství hliníkových trupů letadel [7].

Keramická vlákna

Keramická vlákna mají vysokou teplotní odolnost a stabilitu, vysokou tuhost a malou tepelnou roztažnost. Z toho důvodu se používají v kompozitních dílech s kovovou nebo keramickou maticí, pro aplikaci ve vysokých teplotách jako např. lopatky spalovacích turbín. Nejpoužívanější materiály pro keramická vlákna jsou křemen (SiO_2), korund (Al_2O_3) nebo karbid křemíku (SiC) [2], [7].

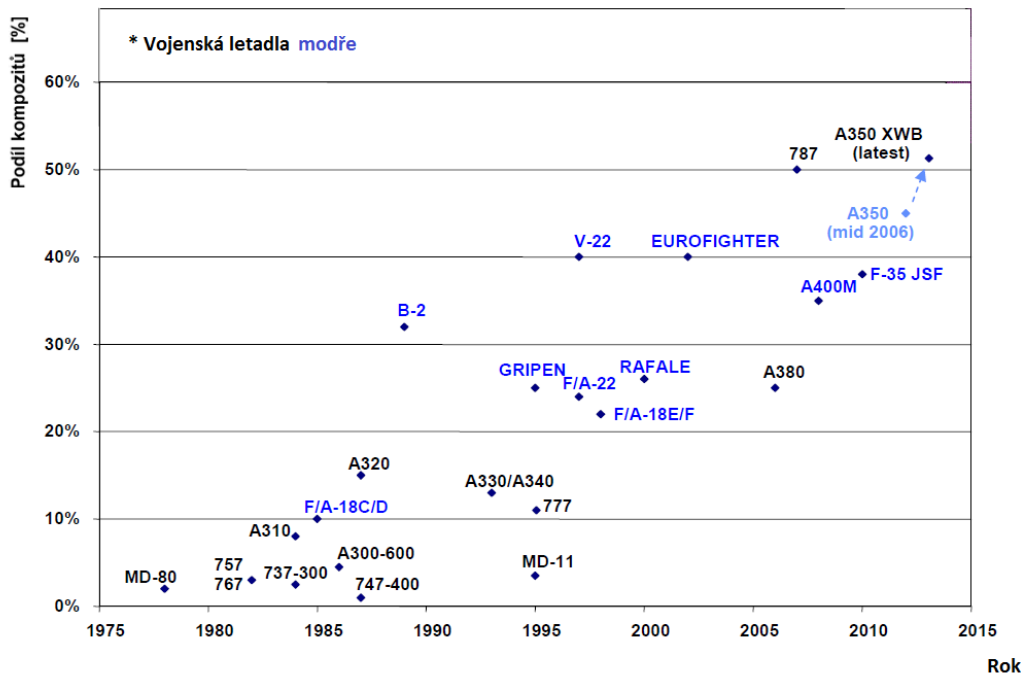
2.1.4 Aplikace kompozitních materiálů

Kompozitní materiály dnes nabízejí široké spektrum vlastností a jejich rozsah použití je velice široký. Jak již bylo zmíněno, jejich nespornou výhodou jsou výjimečné mechanické vlastnosti, které lze navíc cíleně ovlivňovat a v podstatě tak vyrobit „materiál na míru“. U většiny kompozitů je také dosahováno výrazného snížení hmotnosti se zachováním mechanických vlastností v porovnání s konvenčním materiálem např. ocelí. V případě pokročilých kompozitů je nevýhodou často vyšší cena a také složitější technologie výroby. Proto jsou tyto materiály aplikovány spíše v oblastech, kde je jejich potenciál využit naplno, případně tam, kde výsledná cena nehraje až tak důležitou roli. Takovými oblastmi jsou převážně letecký a kosmický průmysl, vojenský průmysl, námořní průmysl, automobilový průmysl a také sportovní průmysl.



Obrázek 6: Celosvětová poptávka po uhlíkových vláknech v jednotlivých odvětvích (1. číslo = množství v kilotunách, 2. číslo = procento z celkové poptávky) [6]

První pokusy o náhradu konvenčních materiálů kompozity byly velice drahé a také velmi rizikové. Proto byl prvním „hráčem“ na tomto poli průmysl vojenský, který není rozpočtem ani případnými riziky tolik omezen. Civilní sféra byla vždy o něco pozadu. Kromě financí to bylo způsobeno i omezeními, kdy byl pro civilní oblast omezen vývoj kompozitních dílů pouze pro nestrukturální díly. Nicméně cena ropy, narůstající znečištění atmosféry a zvyšující se podíl letecké dopravy způsobily, že se kompozity, jež umožňují snížení celkové hmotnosti dopravních prostředků a tím i jejich spotřebu paliva, začaly více uplatňovat i ve sféře civilní. Dnes zaujímají kompozity v konstrukci vojenských i civilních letadel až 50% podíl z celku a tendence je stále rostoucí [4].



Obrázek 7: Podíl kompozitů v celkové konstrukci vojenských a civilních letadel od roku 1975 po současnost [4]

V námořním průmyslu našly široké uplatnění zejména dlouhovláknové kompozity s polymerní maticí. Zde je využíváno jejich dobré odolnosti proti agresivnímu prostředí mořské vody. Ve velké míře tak nahrazují materiály jako dřevo a ocel, jež tomuto prostředí snadno podléhají. Zároveň přinášejí hmotnostní úsporu, která je v případě velkých lodních trupů nemalá. Nejčastěji se pro trupy lodí používá kombinace dlouhých skleněných vláken (textilií) a reaktoplastické matrice (epoxidové pryskyřice). Uhlíková vlákna se používají jen výjimečně, jelikož jejich vysoká cena by výrobu tak velkých ploch značně prodražila [5].



Obrázek 8: Výroba trupu lodi technologií vakuové infuze [www.compositesworld.com]

Mezi další odvětví patří například sportovní vybavení. I zde kompozity, zejména ty vláknové, nahrazují materiály jako dřevo či hliník, kvůli nižší hmotnosti a vyšší odolnosti. Nejvíce jsou používána skelná či uhlíková vlákna v kombinaci s polymerní matricí. Často je využíváno anizotropních vlastností dlouhovlákných kompozitů pro získání požadovaných vlastností tam, kde je potřeba. Vyrábějí se takto například rámy kol, lyže, snowboardy, tenisové rakety, atd.

Aplikaci kompozitních materiálů v automobilovém průmyslu je věnována zvláštní pozornost, a je podrobněji rozebrána v následující samostatné kapitole.

2.2 Polymerní kompozitní materiály v automobilovém průmyslu

Automotive je poměrně významným průmyslem, kde má využití kompozitních materiálů výrazně rostoucí trend. Pokročilé vysokopevnostní kompozity jsou stále dominantou spíše drahých sportovních aut a motorsportu, nicméně běžné kompozity typu plněných plastů jsou dnes standartní součástí konstrukce nových aut. Stejně jako u jiných aplikací i zde je využíváno některých hlavních výhod kompozitů pro [8]:

- Snížení spotřeby paliva vlivem snížení celkové hmotnosti vozidla
- Zvýšení bezpečnosti díky vyšší odolnosti proti nárazu
- Rozšíření designových možností
- Umožnění výroby komplexnějších dílů a tím snížení množství spojů

2.2.1 Snižování hmotnosti

Kompozitní materiály jsou nedílnou součástí konstrukce automobilů již více než 40 let. Zpočátku byly využívány spíše experimentálně, avšak posledních letech, kdy je kladen stále větší důraz na šetrnost k životnímu prostředí a snižování emisí CO₂, nacházejí kompozity jako konstrukční materiál stále širší uplatnění. Nahrazení původního konvenčního materiálu kompozitem totiž přináší výraznou úsporu hmotnosti jednotlivých dílů a ve výsledku celého automobilu to vede ke snížení spotřeby paliva. A spotřeba paliva jde ruku v ruce s množstvím emisí CO₂ [8].

Dnes je v automobilech používáno mnoho různých typů kompozitů, avšak z materiálového hlediska jsou nejpoužívanější kompozity s polymerní matricí. Ty je možné rozdělit na kompozity běžné a kompozity pokročilé = vysokopevnostní. Běžné polymerní kompozity hrají významnou roli zejména v oblasti interiérových a exteriérových designových dílů a v podstatě se jedná o plastové díly, plněné částicovým či krátkovlákným plnivem. U těchto kompozitů se jako plnivo nejčastěji používá sklo a to buď ve formě kuliček, nebo krátkých vláken. Sklo je

poměrně levný materiál a malý rozměr plniva umožňuje použití stávající technologie vstřikování, což obojí přispívá k nízkým nákladům na vyráběný díl. Zároveň plnivo zlepšuje mechanické vlastnosti vstřikovaného dílu, což následně umožňuje např. snížení tloušťky stěny.

Jdeme-li s úsporou hmotnosti ještě dál, je třeba nahrazovat i díly strukturní. Zde jsou však striktní požadavky na pevnost a tuhost, které tyto díly musí splňovat. Uplatnění tak nacházejí dlouhovlákné kompozity, jejichž kompozice je nejčastěji složena z vysokopevnostních skleněných, aramidových či uhlíkových vláken a reaktoplastické matrice (epoxidové či polyesterové pryskyřice). Výroba takových dílů je podstatně složitější, neboť samotné výrobě musí předcházet prototypový vývoj včetně počítačových simulací, výpočtů a testování, které zajistí, že daným kompozitním dílem lze nahradit díl původní. Následná výroba takového dílu je poté často prováděna ručně a vyžaduje značnou zručnost a zkušenost pracovníka. V motorsportu se takto vyrábí či nahrazuje široká škála dílů od aerodynamických prvků a kapotáže, až po hnací hřídele (Obrázek 9) nebo disky kol (Obrázek 10).



Obrázek 9: Hnací hřídel z uhlíkového kompozitu od firmy QAL [www.qal.net]



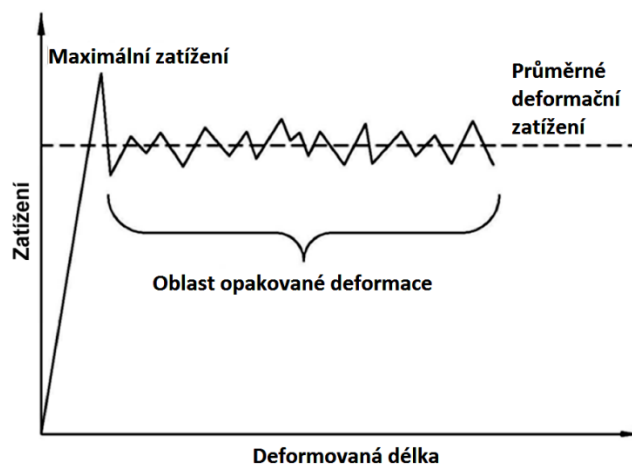
Obrázek 10: Disky kol z uhlíkového kompozitu od firmy Carbon Revolution [www.carbonrev.com]

2.2.2 Zvýšení bezpečnosti

Kromě nízké hmotnosti jsou polymerní kompozity výjimečné i svojí pevností, tuhostí a schopností pohlcovat energii. Díky tomu mohou splňovat přísné bezpečnostní standardy kolizní ochrany, jež zahrnují [9]:

- Zaručení dostatečného minimálního prostoru pro přežití cestujících
- Zajištění polohy cestujících v tomto prostoru
- Snížení velikosti přetížení při nárazu jež působí na cestující na co nejnižší úroveň
- Zajištění celkové integrity karoserie, bezpečnostního rámu
- Minimalizace nebezpečí, vznikajících po nárazu (porušení materiálu, ostré úlomky, atd.)

Klíčovou vlastností je tedy schopnost materiálu pohlcovat energii. Aby nastalo pohlcení energie materiálem, musí dojít k jeho deformaci. V případě deformačních prvků automobilu je tedy nezbytné při nárazu zajistit jejich řízenou deformaci, ovšem s tím, že nesmí dojít k penetraci částí deformovaného dílu dále do prostoru posádky. Pro příklad, legislativa pro automobily v USA udává, že posádka automobilu, jedoucí rychlostí 35 mph (56 km/h), nesmí být při nárazu s pevným nehybným objektem ohrožena přetížením větším než 20g [11].



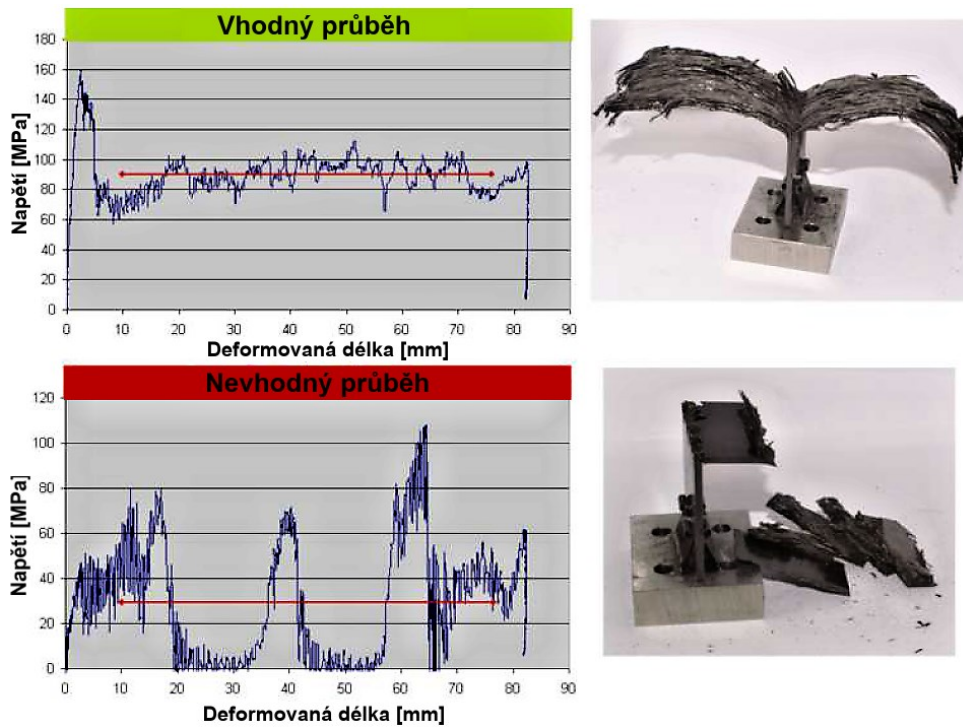
Obrázek 11: Ideální stabilní průběh deformace uhlíkového kompozitu [10]

Aby bylo možné stanovit a porovnávat schopnosti materiálů pohlcovat energii, byla stanovena tzv. specifická absorpce energie (SEA – Specific Energy Absorption), tedy veličina, která vyjadřuje množství absorbované energie na jednotku hmotnosti [9].

$$SEA = \frac{W_D}{V_D \cdot \rho_D} \quad (1)$$

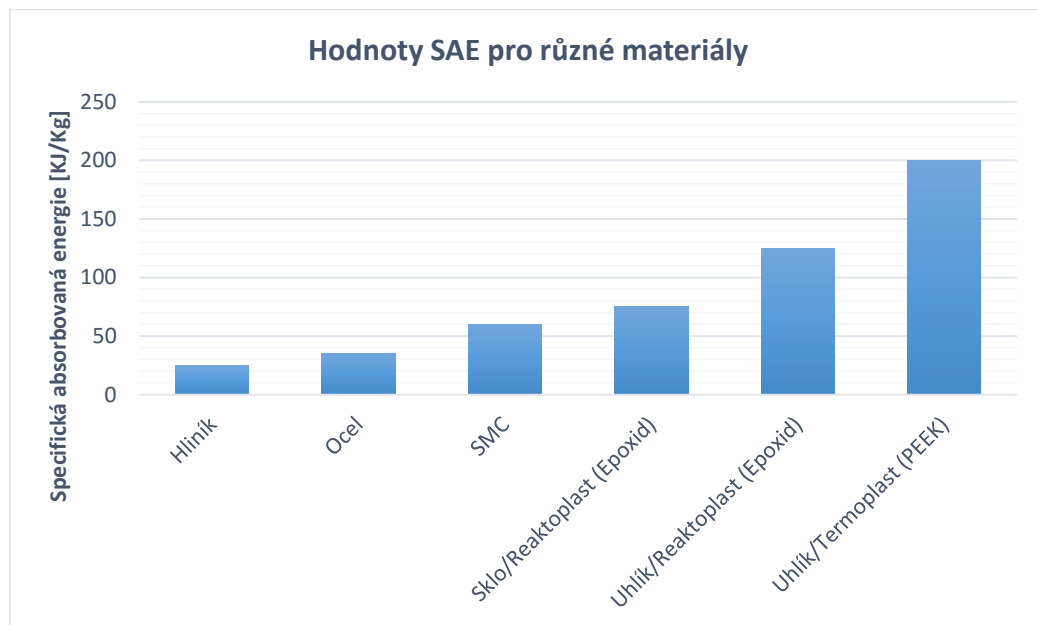
Kde W_D je celková absorbovaná energie, V_D je objem zdeformované části materiálu a ρ_D je hustota deformovaného materiálu.

Během samotné deformace probíhá mnoho mechanismů a dějů, které je velice obtížné simulovat a předvídat, což platí dvojnásob pro kompozitní materiály s anizotropními vlastnostmi. Nicméně cílem je, aby se průběh deformace na rázovém zatížení co nejvíce přibližoval stabilní křivce na Obrázku 11. Příklady reálných křivek s vhodným i nevhodným průběhem lze poté vidět na Obrázku 12.



Obrázek 12: Příklad vhodného a nevhodného průběhu deformace uhlíkového kompozitu [10]

Běžné hodnoty specifické absorbované energie pro uhlíkové kompozity jsou od 125 do 200 kJ/kg, což je cca 5x více než má ocel. Použití pokročilých kompozitů pro strukturní a bezpečnostní prvky má tedy význam nejen z pohledu snižování hmotnosti, ale i z pohledu zlepšení bezpečnosti. Hodnoty specifické absorbované energie pro vybrané materiály znázorňuje Obrázek 13 (SMC je zkratka pro Sheet Mould Compound, neboli směs polotuhé pryskyřice a krátkých vláken ve formě desek, které se dodatečně vytvrzují při lisování za tepla).



Obrázek 13: Hodnoty specifické absorbované energie pro různé materiály [9]

2.2.3 Designové možnosti

Automobily konstruované tradiční cestou sestávají z velkého počtu jednotlivých součástí, které jsou poté spojovány do složitějších podsestav a sestav pomocí různých spojovacích technik jako např. svařování, lepení, mechanické spojování, atd. Je to způsob, který je vyzkoušen, a který funguje, nicméně má několik nevýhod [8]:

- Jakýkoliv spoj dvou materiálů reprezentuje slabé místo a tím oslabení celé sestavy.
- Většina spojů (zejména mechanické spoje) je realizována za použití přídavného materiálu, který představuje hmotnost (a náklady) navíc a v celkové konstrukci automobilu může mít nemalý vliv.

Pokud tedy bylo v předchozích kapitolách pojednáno o snižování hmotnosti a zvyšování integrity celkové konstrukce, je tradiční způsob konstruování kontraproduktivní. Kompozitní díly, a zejména ty s polymerní matricí, je však možné vyrábět zcela odlišnými technologiemi, které umožňují výrobu velkých a tvarově složitých celků jako jednoho kusu. To může mít za následek zjednodušení procesu, snížení výrobních časů a také úsporu nákladů na spojovací materiál a technologii. Příkladem může být vnitřní panel zadního krytu motoru Fordu GT z roku 2005 (Obrázek 14), kde došlo k nahrazení 4 dílů jedním celkem z uhlíkového kompozitu [9].



Obrázek 14: Vnitřní panel zadního krytu motoru z uhlíkového kompozitu (Ford GT 2005) [9]

Možnost dosažení téměř jakéhokoliv tvaru kompozitního dílu je také často využívána v designu aerodynamiky. To opět velice souvisí se snižováním spotřeby automobilu, neboť správně navržený aerodynamický tvar kapotáže snižuje koeficient aerodynamického odporu a tím i výslednou spotřebu. Kompozitní kapotáže jsou však prozatím doménou spíše supersportovních a závodních automobilů, kde ke slovu přicházejí i jiné aerodynamické prvky jako např. přítlačná křídla, difuzory, apod., kde tvar hraje významnou roli.

2.2.4 Soutěž Formula Student

Jelikož téma této diplomové práce vzniklo částečně na popud nově vznikajícího týmu studentské formule na Technické univerzitě v Liberci, bude této studentské soutěži věnována samostatná kapitola.

Formula Student je mezinárodní soutěž studentských týmů technických univerzit, jejichž cílem je konstrukce funkčního vozu formulového typu (viz Obrázek 15). Počátky této soutěže sahají do roku 1978, kdy se v USA uskutečnil první závod s názvem SAE Mini Indy s účastí 11 univerzitních týmů. Soutěž se pod názvem Formula SAE dále rozšiřovala po Spojených Státech a poté i do dalších zemí světa včetně Evropy, kde je od roku 1998 známa jako Formula Student [12].



Obrázek 15: Závodní vůz týmu Technické univerzity Graz [www.racing.tugraz.at]

Soutěž je v podstatě možné si představit jako fiktivní výběrové řízení pro vývoj sportovního vozu formulového typu. Cílovým zákazníkem je amatérský víkendový závodník a produkční plán je 1 000 vozů ročně. Jednotlivé týmy poté v průběhu roku vyvíjejí svůj vůz dle zadaných požadavků a pravidel a své výsledky prezentují jedním vyrobeným prototypem. S tímto vozem se následně účastní jednotlivých závodů, kde je vůz testován v mnoha disciplínách, a to jak statických, tak dynamických. Rozdělení disciplín je následující [12, 13]:

A. Statické disciplíny

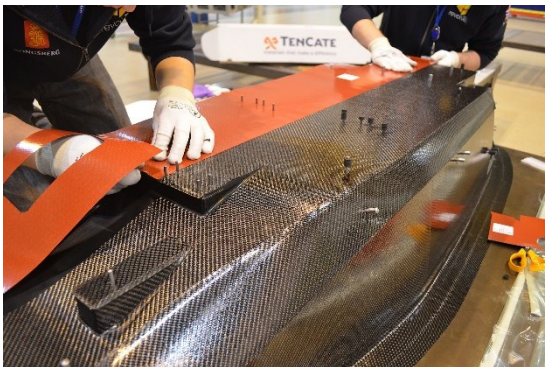
- **Konstrukční návrh** (*Engineering design report*) – Předložení konstrukční zprávy a přesvědčení poroty o přednostech svého vozu.
- **Plán nákladů** (*Cost and manufacture report*) – Předložení zprávy o nákladech na výrobu a o výrobě vozidla, diskuse s porotou.
- **Business plán** (*Business plan*) – Předložení a obhajoba business plánu, obsahujícího plán na sériovou výrobu vozu.

B. Technická přejímka (podmínka pro vstup do části dynamických disciplín)

- **Zkouška techniky a bezpečnostních prvků** (*Technical and safety scrutineering*) – Kontrola, zda vůz splňuje všechna požadovaná pravidla (zejména ta bezpečnostní).
- **Náklonová zkouška** (*Tilt test*) – Při naklonění vozidla o 60° vůči vozovce nesmí dojít k jeho překlopení nebo k úniku jakékoliv kapaliny.
- **Zkouška brzd a hluku** (*Brake and noise test*) – Testování funkčnosti brzd a hlučnosti vozu (nesmí překročit hodnotu 100 dBC v klidu, resp. 110 dBC za jízdy).

C. Dynamické disciplíny

- **Akcelerace** (*Acceleration*) – Sprint na 75 m dlouhém rovném úseku, testující akceleraci vozu.
- **Skid pad** – Test manévrovatelnosti při jízdě na dráze ve tvaru osmičky.
- **Autokros** (*Autocross*) – Jízda po cca 1 km dlouhé dráze obsahující zatáčky i rovné úseky.
- **Vytrvalostní závod** (Endurance) **s hodnocením spotřeby paliva** (*Fuel economy*) – Hlavní disciplína. Vytrvalostní jízda na 22 km, testující vozidlo ve všech aspektech (akcelerace, rychlost, dynamika, manévrovatelnost, schopnosti řidiče, spotřeba paliva, atd.).



Obrázek 16: Výroba monokoku z uhlíkového kompozitu - Norwegian University of Science and Technology [www.revolve.no]



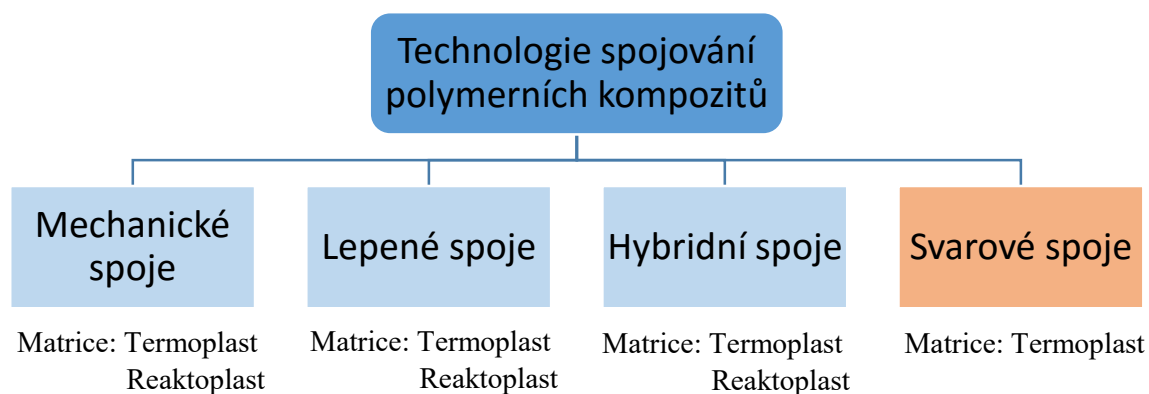
Obrázek 17: A-ramena z uhlíkového kompozitu - Technical university of Munich [www.tufast-racingteam.de]

Stejně jako u skutečné formule F1 je i u formule studentské kladen důraz na aerodynamiku kapotáže a ostatních aerodynamických prvků. Je tedy nezbytné, aby se část týmu problematikou návrhu a výroby kapotáže zabývala, neboť samotná její výroba ze skelného nebo uhlíkového kompozitu vyžaduje již nějakou znalost a zkušenost. Jedním z cílů této práce je tedy určitý

náhled do problematiky výroby tenkostěnných kompozitních dílů a vytvoření obecného přehledu pro technologii ručního kladení. Následné testování šroubového spoje kompozitních dílů, jež je součástí experimentální části práce, může být pro tým studentské formule též prospěšný, neboť vyrobenou kapotáž, podlahu/difuzor případně přitlačná křídla je nezbytné ke konstrukci vozidla nějak upevnit. A to často nejlépe rozebiratelným způsobem.

2.3 Způsoby spojování polymerních kompozitních materiálů

I když polymerní kompozity umožňují výrobu tvarově velice složitých dílů, a tím snižovat celkový počet součástí, spojům se nakonec stejně vyhnout nelze. A je poměrně důležité se jim věnovat, neboť náklady na spojování dílů mohou představovat až 50% nákladů celkových. Následující obrázek ukazuje základní technologie, jež se pro spojování polymerních kompozitů používají.



Obrázek 18: Rozdělení technologií pro spojování polymerních kompozitů

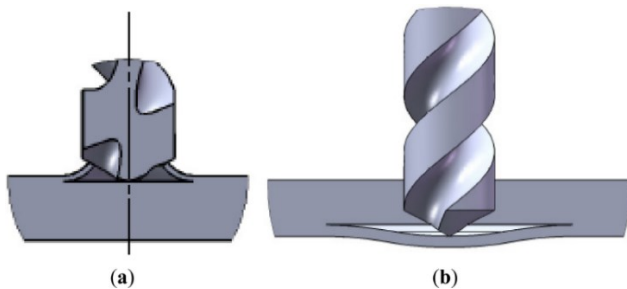
Obecně nemá typ matrice vliv na volbu použité technologie spojování. Výjimkou je však svařování, kde to, jestli je matrice termoplastická nebo reaktoplastická rozhoduje. Jak je známo, jedním z hlavních rozdílů mezi termoplasty a reaktoplasty je jejich reakce na zvýšenou teplotu. Termoplasty lze opakovaně tavit, aniž by docházelo k výrazné degradaci jejich struktury, kdežto reaktoplasty, vlivem jejich hustě zesíťované struktury při vyšších teplotách rovnou degradují. Proto lze svařovat pouze kompozity s termoplastickou maticí. To je však případ spíše běžných plněných plastů, jež představují spojení termoplastu a částicových či krátkovlákných plniv. Pro pokročilé dlouhovlákné kompozity je až na výjimky (např. PEEK), používáno téměř vždy reaktoplastické matrice, a jelikož se tato práce zabývá spíše problematikou těchto pokročilých kompozitů, budou následující kapitoly věnovány prvním třem spojovacím technologiím.

2.3.1 Mechanické spoje

Typickým znakem mechanických spojů je použití přídavných spojovacích součástí, jako jsou šrouby, matice, podložky, nýty, apod. Zvláštním případem může být pak přímá integrace tvarového spoje do designu součásti. Obecně je to však jedna ze základních spojovacích technologií, která se díky svým výhodám poměrně široce používá pro spojování kompozitních dílů v kosmonautice, letectví, automotive a stavebnictví. Mezi tyto výhody patří []:

- Jednoduchá konstrukce a rychlá produkce
- Možnost použití rozebiratelného spoje
- Jednoduchá oprava a případná inspekce
- Dobrá teplotní odolnost a odolnost vnějším vlivům (s výjimkou oxidace)
- Nízké požadavky na kvalitu a úpravu povrchu spojovaných dílů

Na druhé straně však samozřejmě existuje také řada nevýhod. Jednou z těch hlavních je zvýšení celkové hmotnosti o hmotnost spojovacích dílů, což je např. u ocelových šroubů a matic poměrně výrazné. Navíc je to krok proti filozofii cíleného snižování hmotnosti dílů. Další důležitou nevýhodou průchozích mechanických spojů je nutnost přítomnosti otvorů ve spojovaných dílech. Nejenže je poměrně obtížné do vrstvených laminátů kvůli snadné delaminaci vyvrtat kvalitní hladký otvor (viz Obrázek 19 a 20), ale již samotná přítomnost díry výrazně oslabuje strukturu kompozitu vlivem koncentrace napětí. Pro zlepšení kvality vrtané díry je vhodné ze spodní strany díl podepřít (pro omezení delaminace poslední vrstvy) a použít velice pomalý posuv [18].

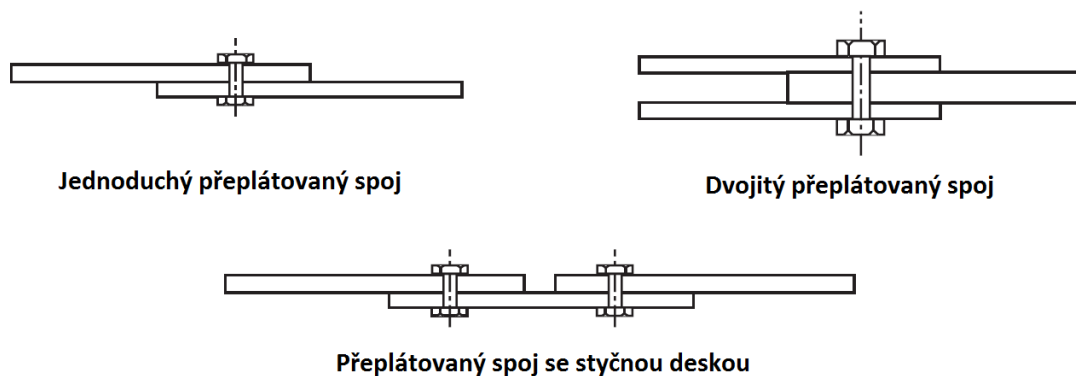


Obrázek 19: Delaminace, vznikající při začátku (a) a konci (b) vrtání [18]



Obrázek 20: Příklad delaminace vrtané díry

Jsou-li díry kvalitně vyvrtány, je nutné vybrat typ spoje. V praxi jsou nejčastěji používány typy spojů, jež jsou zobrazené na Obrázku 20, z nichž nejpoužívanějším spojem je spoj přeplátovaný jednoduchý. Ze všech tří vyobrazených spojů má sice vlivem excentricity spojovaných dílů nejhorší pevnostní vlastnosti, je ovšem velice jednoduchý a levný.



Obrázek 21: Základní typy mechanických spojů [14]

Kromě již zmíněných faktorů jako je kvalita díry a typ spoje existuje mnoho dalších, jež mají na vlastnosti spoje výrazný vliv. Všechny tyto faktory je možné shrnout do těchto tří oblastí [14]:

- Materiálové parametry
 - Typ a forma vláken, orientace vláken, typ matrice, skladba jednotlivých vrstev a objemový podíl vláken v kompozitu.
- Designové parametry
 - Typ spoje, tloušťka laminátu, geometrie spojovaného dílu (šířka, průměr díry, vzdálenost díry od okraje, atd.), směr zatížení a typ zatížení.
- Parametry spojovacího materiálu
 - Typ, rozměry a materiál spojovacích dílů, předpětí / utahovací moment, rozměry podložek a velikost vůle mezi dírou a šroubem / nýtem.

2.3.2 Lepené spoje

Lepené spoje mají, stejně jako spoje mechanické, poměrně dlouhou historii, a patří tak mezi nejpoužívanější spojovací technologie. Oproti mechanickým spojům jsou však založeny zejména na principech fyzikálních a chemických, nikoliv mechanických, čímž přináší řadu odlišných výhod i nevýhod. Hlavní výhody lepení polymerních kompozitů jsou:

- Nízká hmotnost lepeného spoje
- Nízké náklady na zhotovení spoje
- Zachování celistvosti spojovaných dílů

Hlavní nevýhodou je poté zejména nižší pevnost lepených spojů, jelikož lepidla jsou téměř vždy na bázi polymerů, nerozebíratelnost spoje, delší doba vytvrzování lepidel, vyšší nároky na přípravu povrchu a také nižší tepelná odolnost.

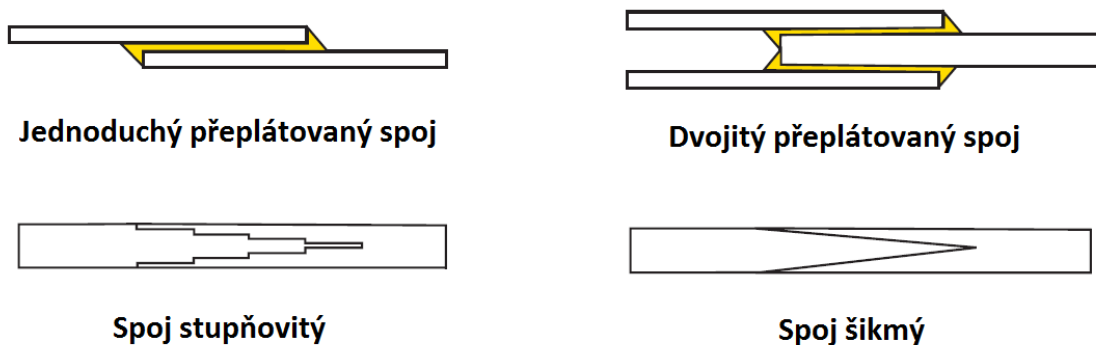
Samotná konstrukce lepeného spoje se skládá ze spojovaných dílů, a lepidla, jež je nanášeno v místě spoje. Vznik a následné vlastnosti lepeného spoje jsou poté závislé na dvou základních jevech:

- **Adheze** neboli přilnavost lepidla k povrchu spojovaných součástí.
- **Koheze** neboli vnitřní soudržnost lepidla, charakterizovaná přitažlivými silami mezi molekulami lepidla.

Pro zajištění dobré adheze lepidla k polymerním kompozitům je nutná předúprava povrchu, jež je závislá na materiálu spojovaných dílů i lepidla. Nejčastěji se provádí očištění povrchu hadříkem s rozpouštědlem pro odstranění mastnoty a hrubých nečistot, a poté jemné obroušení, jež zajistí větší kontaktní povrch. Dobrá koheze je poté otázkou použitého materiálu lepidla. Pro lepení polymerních kompozitů se nejčastěji používají tyto tři:

- Epoxidy
- Akryláty
- Polyuretany

Kromě adhezních a kohezních jevů je také poměrně důležitý tvar spojovaných částí vzhledem ke směru zatěžování. Obecně platí, že nejvyšší únosnost má lepený spoj při smykovém namáhání. Z toho důvodu je nezbytné zajistit takový tvar spojovaných částí, aby vždy docházelo převážně k tomuto typu namáhání. Na následujícím obrázku jsou znázorněny nejpoužívanější varianty lepených spojů.

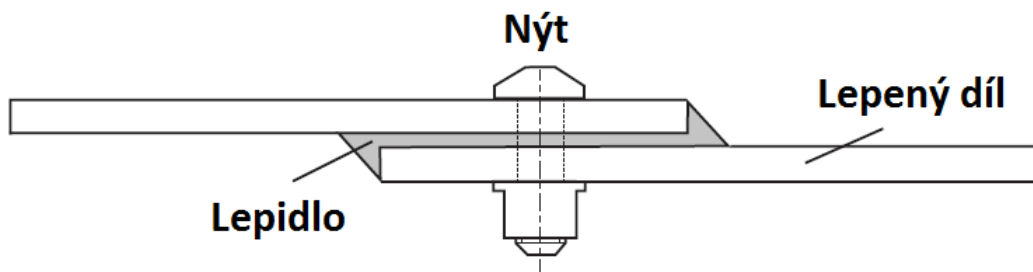


Obrázek 22: Základní typy lepených spojů [14]

V praxi je nejpoužívanějším typem jednoduchý překlávaný spoj, méně často dvojitý. Jsou to stejně jako u mechanických spojů velmi jednoduché spoje, jež sice nijak nevynikají svojí pevností, ovšem umožňují lepit i poměrně tenké materiály a pro většinu aplikací postačují. Pro spoje s vyšší požadovanou pevností a pro silnější materiály jsou častěji používány spoje stupňovité a šikmé, jejichž vyšší pevnost je dána vyšší styčnou plochou. Tyto tvarové úpravy jsou však obtížnější na výrobu a často vyžadují speciální vybavení [14].

2.3.3 Hybridní spoje

Kombinací obou předchozích technologií spojování je dále možné získat tzv. hybridní spoje. Tento druh spojů není v praxi příliš běžný, nicméně určité výhody může přinést. U samotného lepeného spoje při malých styčných plochách poměrně lehce hrozí oddělení či odloupenutí spojovaných součástí. Přítomností mechanického spoje však dojde k podržení styčných ploch a zamezení odlupu. To je často uplatňováno např. u rázově namáhaných spojů, kde je hybridní spoj schopen lépe absorbovat energii nárazu. Další zajímavou aplikací mohou být lepené spoje v konstrukci automobilu. Pokud je součástí lepeného spoje i spoj mechanický, není třeba čekat na vytvrzení lepidla a lepený díl může pokračovat ve výrobním procesu. Mechanický spoj lepený spoj podrží a vytvrzení probíhá během další technologické operace. Tím je možné zkrátit výrobní čas, což je v dnešní době jeden z klíčových parametrů provozů [14].



Obrázek 23: Schéma hybridního spoje [14]

3 Experimentální část

Hlavním cílem experimentální části práce bylo testování vlivu šroubového spoje na pevnost uhlíkového vrstveného laminátu. První fází byla samotná výroba kompozitních vzorků o různém počtu vrstev metodou ruční kontaktní laminace s vytvrzením za mírného podtlaku a s přídatným zatížením. Výstupem byly desky, z nichž byly poté vyříznuty vzorky daných rozměrů. V druhé fázi byly vzorky testovány v několika variantách (bez šroubového spoje a se šroubovým spojem) tahovou zkouškou dle norem ASTM. Výsledky mechanických zkoušek jsou doplněny fotografickou dokumentací struktury kompozitu z rastrovacího elektronového mikroskopu.

3.1 Výběr materiálů

Volba použitých materiálů byla směřována do oblasti běžně dostupných uhlíkových tkanin a pryskyřic. Cílem tedy nebylo vyrobení kompozitu s co nejvyššími mechanickými vlastnostmi bez ohledu na cenu, ale naopak zjistit, jak kvalitní kompozit lze vyrobit s použitím běžně dostupných, levnějších materiálů a běžné výrobní technologie. Tím se nabízí i jistá analogie k projektu studentské formule, kde samozřejmě cena a dostupné prostředky hrají významnou roli.

3.1.1 Volba tkaniny

Jako výztuha kompozitu byla zvolena uhlíková tkanina v plátňové vazbě o plošné hmotnosti 160g / m². Jedná se o levnou, běžně používanou tkaninu, jejíž technický list je součástí přílohy této práce.

Název produktu	Označení produktu	Typ vazby	Šířka role	Cena za m ² bez DPH (16. 4. 2016)	Výrobce	Dodavatel
Uhlíková tkanina	160g / m ² , 3K	Plátňová	100 cm	392 Kč	Kordárna Plus a. s.	Havel Composites CZ, s. r. o.

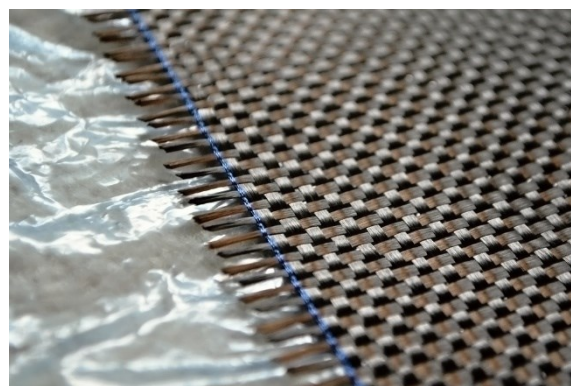
Tabulka 2: Základní údaje o použité uhlíkové tkanině [<http://www.havel-composites.com/>]

Poznámka k označení produktu:

- 160 g / m² Údaj o plošné hmotnosti tkaniny
- 3K Třída uhlíkové tkaniny. Číslo udává množství jednotlivých vláken v jednom svazku, ze kterých je poté tkanina upletena. Zde tedy 3K = 3 000 vláken.



Obrázek 24: Role uhlíkové tkaniny



Obrázek 25: Detail plátnové vazby uhlíkové tkaniny

3.1.2 Volba pryskyřice a tužidla

Pro polymerní matici byla zvolena epoxidová pryskyřice s označením LH 160, jež přímo vyrábí firma Havel Composites CZ, s. r. o (s certifikací Germanische L'loyd). Jedná se o alternativu epoxidové pryskyřice MGS L 160 od amerického výrobce Hexion, Inc. Tato pryskyřice se vyznačuje velmi nízkou viskozitou, což výrazně usnadňuje dobré prosycení tkaniny. Lze ji též vytvrzovat již při pokojové teplotě, což byl další faktor volby této pryskyřice. Čas, po který lze s pryskyřicí pracovat (označovaný jako „pot life“, neboli doba zpracovatelnosti v kelímku) se liší v závislosti na použitém tužidle od 25 min do 5 hod.



Obrázek 26: Balení 1 kg epoxidové pryskyřice (vlevo) a 1 kg tužidla (vpravo)

Pro zahájení procesu vytvrzování je nutné do pryskyřice přidat tužidlo v daném míchacím poměru. Zde bylo zvoleno tužidlo H 287 opět vyráběné firmou Havel Composites CZ, s. r. o. I zde se jedná o alternativu tužidla MGS 287 od amerického výrobce Hexion, Inc. Toto tužidlo zajišťuje velmi dlouhou dobu zpracovatelnosti v kelímku, konkrétně 4 až 5 hod, což je žádoucí u výroby rozměrných dílů, jako je např. kapotáž studentské formule. Zároveň umožňuje v kombinaci s pryskyřicí LH 160 vytvrzení při pokojové teplotě, které trvá cca 24 hod.

Název produktu	Označení produktu	Doba zpracovatelnosti	Míchací poměr (pryskyřice : tužidlo)	Cena za 1 kg bez DPH (16. 4. 2016)	Výrobce a dodavatel
Epoxidová pryskyřice	LH 160	4 až 5 hod	100 : 40	219 Kč	Havel Composites CZ, s. r. o.
Tužidlo	H 287			667 Kč	Havel Composites CZ, s. r. o.

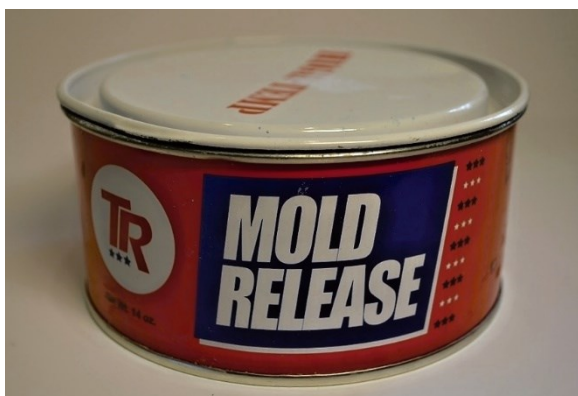
Tabulka 3: Základní údaje o použité epoxidové pryskyřici s tužidlem [<http://www.havel-composites.com/>]

3.1.3 Separátory

Samotné lisování a vytvrzování kompozitních desek probíhalo mezi dvěma deskami z PMMA. Tyto desky bylo nutné separovat, aby nedošlo k jejich trvalému slepení a aby bylo možné vytvrzenou kompozitní desku snadno vyjmout. K separaci byla použita kombinace separačního vosku TR 104 a kapalného roztoku PVA (polyvinylalkoholu). Tato kombinace je jednou z nejspolehlivějších metod separace a v závislosti na kvalitě povrchu formy zajišťuje vysoký lesk a kvalitu povrchu kompozitního dílu.

Název produktu	Označení produktu	Cena za balení bez DPH (16. 4. 2016)	Výrobce	Dodavatel
Separací vosk	TR 104	396 Kč / 425 g	T. R. Industries, Inc. (USA)	Havel Composites CZ, s. r. o.
Polyvinylalkohol	Polivaks EKO PVA	149 Kč / 1 l	Poliya, Inc. (TUR)	Havel Composites CZ, s. r. o.

Tabulka 4: Základní údaje o použitých separátorech [<http://www.havel-composites.com/>]



Obrázek 27: Balení separačního vosku TR 104



Obrázek 28: Balení tekutého polyvinylalkoholu Polivaks EKO PVA

3.1.4 Ostatní materiál a použité přístroje

Mezi ostatní potřebný materiál patří zejména již zmíněné lisovací desky z PMMA, válečky pro nanášení tekuté pryskyřice (zde byly použity velurové s krátkým chlupem, které lze čistit v acetonu), aceton, kovový váleček pro zlepšení prosycení tkanin pryskyřicí, uzavíratelné PE pytle a gumové hadičky pro vytvoření podtlakového prostředí, závaží o celkové hmotnosti 30 kg a smirkový papír pro konečné úpravy vzorků.

Pro přesné vážení byla použita digitální váha Mettler PM460, pro vytvoření podtlaku ve formě vakuová pumpa VacSy a pro obrobení vzorků přímočará pila s jemným pilovým plátkem, ruční pásová bruska a ruční vrtačka.

3.2 Výroba kompozitních vzorků

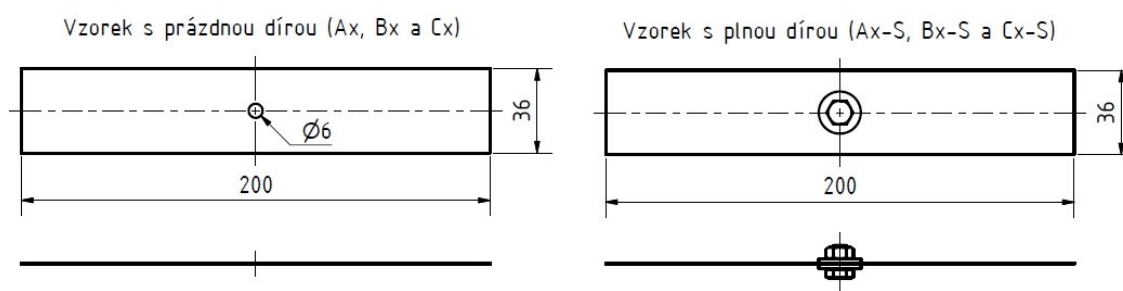
Cílem bylo testování tenkostěnných vzorků s kvaziizotropní strukturou, jejichž základní tvar vychází z již zmíněných ASTM norem. Jako kvaziizotropní struktura je uváděna skladba s označením 0/90/45/-45, což v praxi při použití tkaniny znamená použití minimálně 2 vrstev (0/90 + 45/-45). Z tohoto důvodu byly pro výrobu a testování zvoleny 3 různé tloušťky, složené z 2, 4 a 6 vrstev tkaniny, s pravidelně se střídajícími směry 0/90 a 45/-45. Pro přehlednost jsou vzorky 2 - vrstvé označeny písmenem **A**, 4 - vrstvé písmenem **B** a 6 - vrstvé písmenem **C**.

	Označení vzorků	Rozměry vzorku [mm]	Použitá norma
Vzorky s prázdnou dírou	Ax, Bx, Cx	200 x 36 t = 0,5 až 1,4 Ø díry d = 6	ASTM D3039 ASTM D5766
Vzorky s plnou dírou (se šroubovým spojem)	Ax-S, Bx-S, Cx-S	200 x 36 t = 0,5 až 1,4 Ø díry d = 6	ASTM D3039 ASTM D6742
Vzorky s přeplátovaným šroubovým spojem	Ax-PS, Bx-PS, Cx-PS	135 x 36 (2x) t = 0,5 až 1,4 Ø díry d = 6	ASTM D3039 ASTM D5961

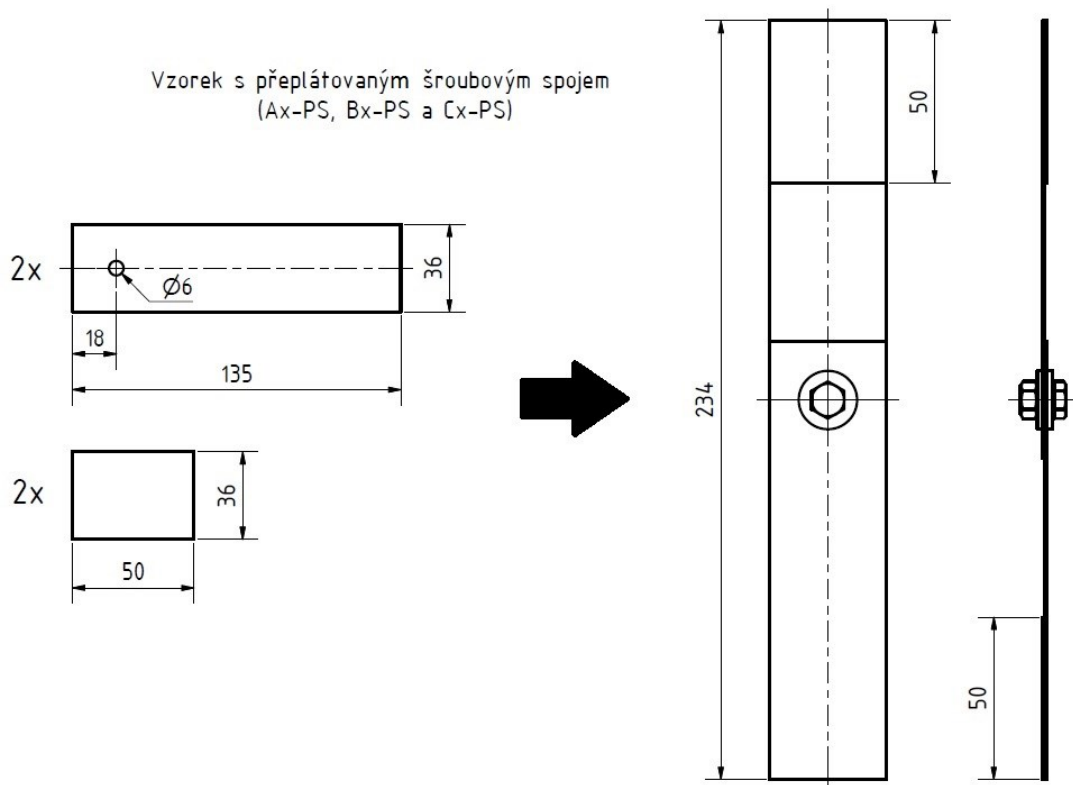
*písmeno „x“ u označení vzorků reprezentuje číslo vzorku v rozmezí 1 až 6

Tabulka 5: Základní údaje o vyráběných a testovaných vzorcích

Destičkovitý tvar vzorků, jejichž rozměrové náčrtky jsou zobrazeny na obrázcích 28 a 29, vedl k rozhodnutí, že nejprve budou vyrobeny velké desky, ze kterých budou poté jednotlivé vzorky vyříznuty. V první fázi byly vyrobeny desky pro vzorky s prázdnou a plnou dírou. Pro každou tloušťku vždy jedna deska o rozměru 340 x 230 mm (8 vzorků) a jedna o rozměru 170 x 230 mm (4 vzorky). Tak bylo získáno celkem 12 vzorků pro každou ze tří testovaných tlouštěk (A, B a C), tedy 6 vzorků pro zkoušku s prázdnou dírou a 6 s plnou dírou.

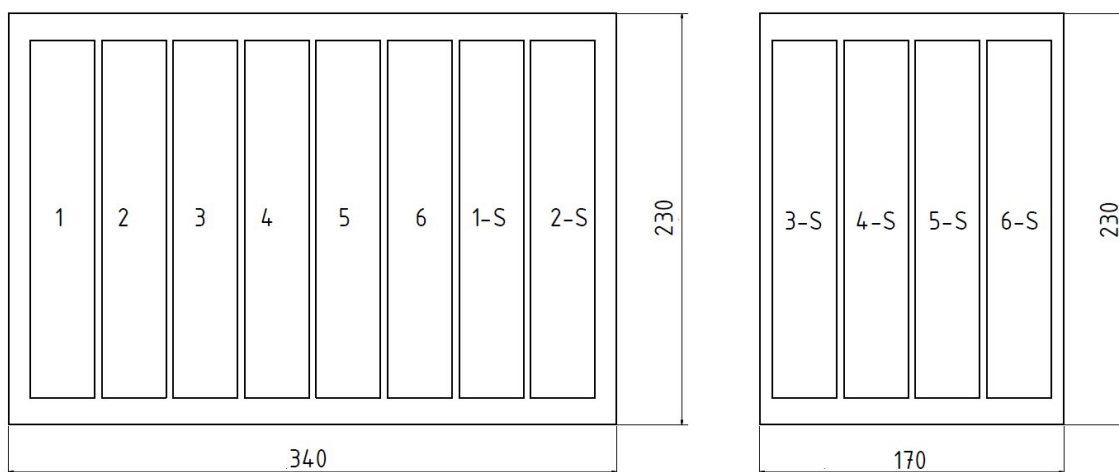


Obrázek 29: Rozměrové náčrtky zkušebních vzorků

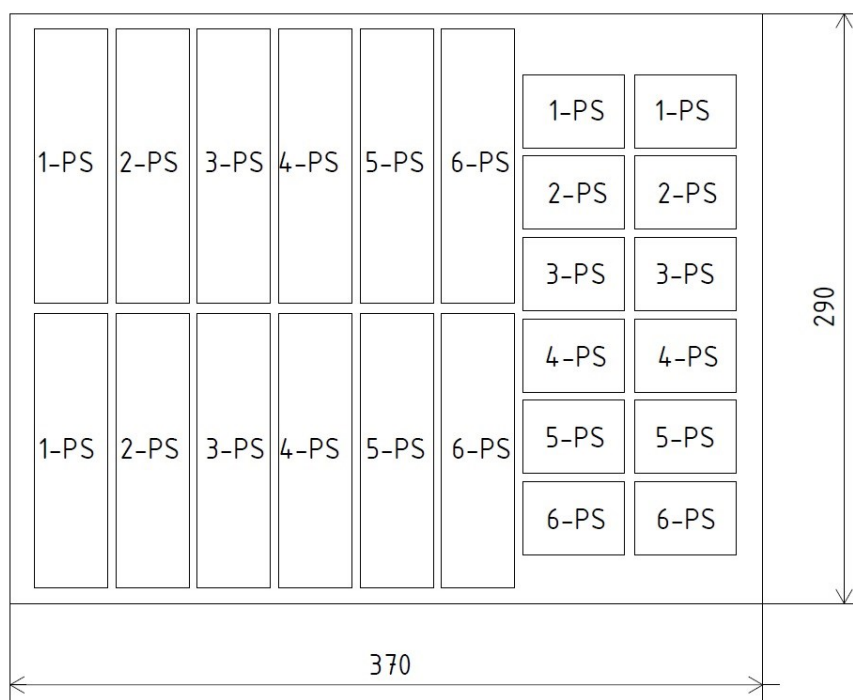


Obrázek 30: Rozměrový náčrt vzorku s přeplátovaným šroubovým spojem

V druhé fázi byly vyráběny desky pro vzorky s přeplátovaným spojem. Postup obdobný, avšak pro každou tloušťku postačila výroba pouze jedné desky, s rozměrem 370 x 290 mm. Pro lepší názornost je na obrázcích 30 a 31 zobrazeno rozložení vyřezávaných vzorků na jednotlivých deskách.



Obrázek 31: Rozložení vzorků na deskách pro první fázi



Obrázek 32: Rozložení vzorků na desce pro druhou fázi

Pro požadovaný počet vzorků celkem bylo tedy potřeba pro každou ze tří tloušťek vyrobit 1x desku 340 x 230 mm, 1x desku 170 x 230 mm a 1x desku 370 x 290 mm. Výrobní postup těchto desek je popsán v následující kapitole.

3.2.1 Postup výroby kompozitních desek

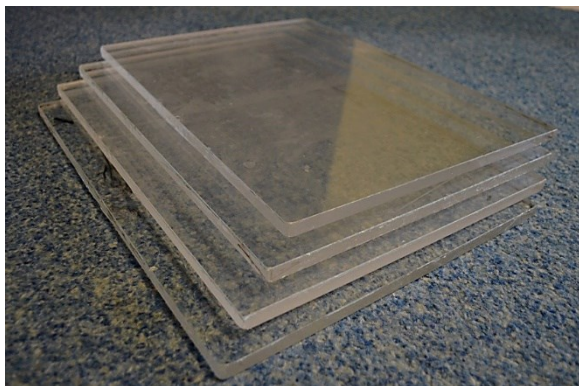
Pro výrobu desek byla zvolena technologie ruční kontaktní laminace, tedy postupné ruční skládání vrstev uhlíkové tkaniny a její současné prosycování tekutou pryskyřicí pomocí válečku. Vytvrzení kompozitu poté probíhalo při pokojové teplotě mezi dvěma PMMA deskami, které byly zatíženy závažím o hmotnosti 30 kg. Obě desky s vytvrzovaným kompozitem byly navíc uzavřeny v uzavíratelném PE sáčku, ve kterém byl následně vytvořen mírný podtlak (cca 60 kPa). Ten lehce zvýšil lisovací tlak a zároveň pomohl odstranit vzduchové bublinky z vytvrzovaného kompozitu.

Celý postup výroby je tedy možné rozdělit do následujících etap:

Separace formy (PMMA desek)

Na čistý povrch desek byla nejdříve nanесena a následně rozleštěna tenká vrstva vosku TR 104. V případě nové formy je doporučeno toto minimálně 5x opakovat, u opakované separace již pouze dle potřeby, ale ideálně 1x po každém vyjmutém výrobku. Rozleštěnou voskovou vrstvu

je také vždy nutné nechat alespoň 5 až 10 min vyzrát. Poté následuje aplikace tekutého PVA, nejlépe pomocí molitanového štětce. Po rozetření po povrchu desky PVA do 20 min zasychá (při 23 °C) a vytváří vrstvu podobnou velmi tenké fólii. Výhodou PVA je jeho rozpustnost ve vodě, tudíž následné čištění formy a výrobku spočívá pouze v oplachu vodou. Vrstva PVA je pro separaci finální a dále lze pokračovat již samotnou laminací.



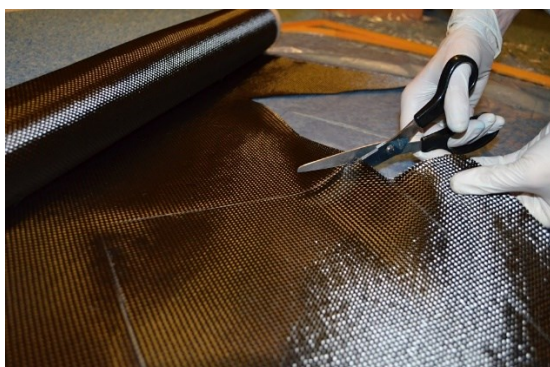
Obrázek 33: Desky z PMMA použité pro lisování kompozitu



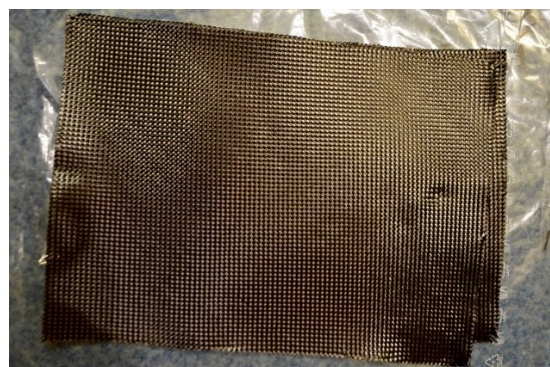
Obrázek 34: Molitanový štětec pro aplikaci PVA

Příprava tkaniny

Pro laminaci bylo nejdříve nutné mít připravené jednotlivé vrstvy tkaniny, nastříhané na rozměr výsledné desky. Tkaninu lze stříhat běžnými nůžkami, případně lze použít nůž s rotační čepelí, s kterým je práce rychlejší. Vrstvy se směry vláken 0/90 lze z role stříhat téměř bez odpadu, nicméně u vrstev se směry 45/-45 vzniká při stříhání vlivem natočení poměrně velké množství nevyužitelných odstřížků. Před stříháním je někdy též dobré místo stříhu přelepit úzkým pruhem papírové lepicí pásky. Po odstřížení páska fixuje vlákna v místě stříhu a nedochází tak k nechtěnému vytahování pramenů ze struktury textilie.



Obrázek 35: Stříhání tkaniny na požadované rozměry



Obrázek 36: Hotové nastříhané díly

Příprava pryskyřice

Příprava pryskyřice zahrnuje především její smíchání s tužidlem v přesně daném poměru. V případě pryskyřice LH 160 a tužidla H 287 je tento poměr (hmotnostní) 100:40. Pro stanovení množství potřebné pryskyřice bylo vycházeno z literatury [3, 17], která pro technologii ruční kontaktní laminace tkaniny s asistencí vakua udává předpokládaný objemový podíl vláken 40%. Jelikož hustota uhlíkových vláken, pryskyřice a tužidla je dle technických listů (viz přílohy D, E a F) známa, a stejně tak i hmotnost použitých vláken pro konkrétní desku, lze objemový podíl přepočítat na hmotnostní podíl. Přepočet je následující:

$$\text{Hustota vláken: } \rho_v = 1,76 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Hustota pryskyřice: } \rho_p = 1,15 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Hustota tužidla: } \rho_t = 0,95 \text{ g/cm}^3$$

Hustota matrice, tedy směsi pryskyřice a tužidla (přepočet dle mísičního poměru 100:40):

$$\frac{100}{140} = 0,71 \quad \frac{40}{140} = 0,29$$

$$\rho_m = 0,71 \cdot \rho_p + 0,29 \cdot \rho_t = 0,71 \cdot 1,15 + 0,29 \cdot 0,95 = 1,09 \text{ g/cm}^3 \quad (2)$$

$$\text{Předpokládaný objemový podíl vláken: } v_v = 0,4$$

$$\text{Předpokládaný objemový podíl matrice: } v_m = 1 - v_v = 1 - 0,4 = 0,6$$

Hustota výsledného kompozitu dle vztahu z [3]:

$$\rho_k = \rho_v \cdot v_v + \rho_m \cdot v_m = 1,76 \cdot 0,4 + 1,09 \cdot 0,6 = 1,36 \text{ g/cm}^3 \quad (3)$$

A nakonec přepočet na předpokládané hmotnostní podíly vláken a matrice:

$$m_v = \left(\frac{\rho_v}{\rho_k}\right) \cdot v_v = \left(\frac{1,76}{1,36}\right) \cdot 0,4 = 0,52 \quad (4)$$

$$m_m = \left(\frac{\rho_m}{\rho_k}\right) \cdot v_m = \left(\frac{1,09}{1,36}\right) \cdot 0,6 = 0,48 \quad (5)$$

Pro předpokládaný objemový podíl matrice 40% tedy po přepočtu vychází podíl hmotnostní 48%. Teoreticky lze tedy uvažovat, že hmotnost potřebné pryskyřice s tužidlem je přibližně rovna hmotnosti použité tkaniny, kterou lze spočítat z plochy nástřihů (při známé plošné hustotě

tkaniny) nebo jednoduše zjistit vážením. Prakticky je ovšem vhodné tuto hodnotu o něco navýšit, čímž se zajistí dostatečné prosycení tkaniny s tím, že přebytečná pryskyřice bude lisováním vytlačena. Pro výrobu desek bylo tedy zvoleno množství použité pryskyřice s tužidlem kolem 60%. V následujících tabulkách jsou vypsány konkrétní hmotnosti pro jednotlivé desky a tloušťky. M_C označuje hmotnost uhlíkových vláken a M_M hmotnost matrice, která je dále ještě rozdělena na hmotnost pryskyřice M_P a hmotnost tužidla M_T .

	Rozměry desky (š x v) [mm]					
Tloušťka	340 x 230		170 x 230			
	M_C [g]	M_M [g]	M_C [g]	M_M [g]		
A (2 vrstvy)	25	28		13	14	
		$M_P = 20$	$M_T = 8$		$M_P = 10$	$M_T = 4$
B (4 vrstvy)	50	55		25	28	
		$M_P = 39$	$M_T = 16$		$M_P = 20$	$M_T = 8$
C (6 vrstev)	75	83		38	41	
		$M_P = 59$	$M_T = 24$		$M_P = 29$	$M_T = 12$

Tabulka 6: Hmotnosti C vláken, pryskyřice a tužidla pro desky 340x230 a 170x230 mm

	Rozměry desky (š x v) [mm]		
Tloušťka	370 x 290		
	M_C [g]	M_M [g]	
A (2 vrstvy)	34	38	
		$M_P = 27$	$M_T = 11$
B (4 vrstvy)	69	76	
		$M_P = 54$	$M_T = 22$
C (6 vrstev)	103	113	
		$M_P = 80$	$M_T = 33$

Tabulka 7: Hmotnosti C vláken, pryskyřice a tužidla pro desky 370 x 290 mm

Jsou-li stanovené hmotnosti pryskyřice a tužidla, následuje jejich přesné odměření a smíchání. Tužidlo bývá často od pryskyřice barevně odlišeno (v tomto případě modře), což výrazně usnadňuje určování míry vzájemného promísení. Míchání provádíme, dokud pryskyřice a tužidlo nemají jednotnou barvu (zde cca 5 min). Po důkladném promíchání je vhodné nechat směs cca 5 až 10 min odstát pro uvolnění vzduchových bublin vzniklých při míchání. Poté je již pryskyřice připravena pro následnou laminaci.

Laminace

Laminace spočívá v postupném vrstvení nástrihů z uhlíkové tkaniny, které jsou střídavě prosycovány pryskyřicí. Nejdříve byla natřena pryskyřicí spodní deska formy a následně byla přiložena první vrstva tkaniny. U všech desek byla první vrstva tkaniny vždy se směrem vláken 0/90 a poté střídavě 45/-45 a 0/90. Pryskyřice byla nanášena velurovým válečkem vždy ve směru vláken a s mírným tlakem. Před umístěním další vrstvy tkaniny je dobré několik minut počkat, aby z pryskyřice unikly vzduchové bublinky, případně lze použít kovový drážkovaný váleček pro lepší prosycení. Na poslední vrstvu tkaniny s pryskyřicí byla poté umístěna horní deska formy a celá sestava byla vložena do uzavíratelného PE sáčku, ve kterém proběhlo vytvrzování.



Obrázek 37: Nanášení první vrstvy pryskyřice na spodní desku formy



Obrázek 38: Umístění první vrstvy tkaniny



Obrázek 39: Prosycování první vrstvy tkaniny pryskyřicí



Obrázek 40: Umístění další vrstvy tkaniny



Obrázek 41: Boční pohled na sestavenou formu



Obrázek 42: Umístění formy do uzavíratelného PE sáčku pro odsátí vzduchu

Vytvrzování

Proces vytvrzování může obecně probíhat za velmi odlišných podmínek, které jsou většinou určovány použitým typem pryskyřice a hlavně naším požadavkem na vlastnosti a kvalitu povrchu výsledného kompozitního dílu. Pro pokročilé vysokopevnostní kompozity je většinou podmínkou vytvrzování za vyšších teplot a pod tlakem, ideálně s asistencí vakua (např. v autoklávu). Vyšší tlak má za následek lepší propojení všech složek kompozitu spolu s odstraněním vzduchových bublin a přebytečné pryskyřice. Tím se zvýší výsledný podíl vláken v kompozitu a též jeho výsledné mechanické vlastnosti. Vyšší teplota naopak urychluje proces vytvrzení a zároveň též zvyšuje teplotu skelného přechodu vytvrzené pryskyřice, což znamená vyšší tepelnou odolnost. Oba tyto parametry jdou však ruku v ruce a předurčují výsledné vlastnosti vyrobeného dílu.

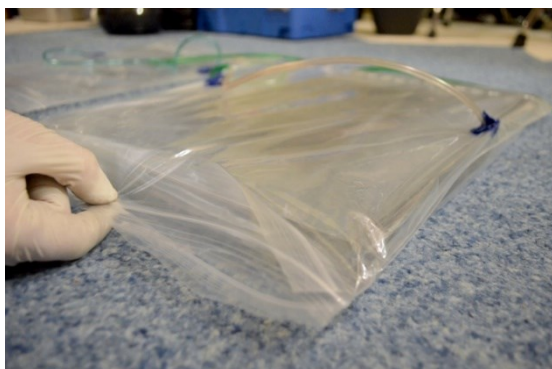
V případě této diplomové práce byly vyráběné desky vytvrzovány za pokojové teploty pod zatížením a s asistencí mírného podtlaku (cca 60 kPa). Sestavená forma, připravená pro vytvrzení, byla vložena do uzavíratelného PE sáčku, který byl pečlivě uzavřen pro zajištění vzduchotěsnosti. Pro odsátí vzduchu byly do sáčku umístěny dva vývody, jež byly umístěny přímo do mezery mezi deskami formy. Tím došlo k odsátí vzduchu přímo z prostoru mezi deskami a nehrozilo přísátí vývodu k rovné ploše a tím jeho nefunkčnosti. Jedním z problémů tohoto řešení bylo ovšem zajištění dostatečné vzduchotěsnosti celé soustavy. Zejména v místě vývodů ze sáčku bylo obtížné zajistit dokonalou těsnost a případné snížení podtlaku bylo řešeno dodatečným odsátím po určité době. Poté byla forma navíc zatížena závažím o celkové hmotnosti 30 kg a následovalo samotné vytvrzování. Pro účely této práce byly k dispozici celkem 4 PMMA desky, což umožňovalo výrobu 2 kompozitních desek zároveň.



Obrázek 43: Uzavíratelné sáčky připravené pro vložení forem



Obrázek 44: Forma vložená do sáčku



Obrázek 45: Uzavírání sáčku s formou

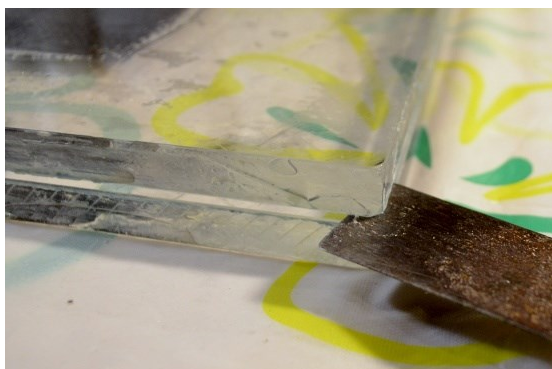


Obrázek 46: Zatížená forma po odsátí vzduchu

Vyjmutí výrobku z formy

Doba vytvrzování pryskyřice závisí jak na použité kombinaci pryskyřice + tvrdidlo, tak na teplotě. Pro zde použitou pryskyřici LH 160 s tvrdidlem H 287 je doporučená doba vytvrzování při pokojové teplotě 24 hod. Je možné ještě dodatečně pryskyřici vystavit teplotě 50 až 80 °C po dobu 15 hod pro mírné zvýšení mechanických vlastností. Tato dodatečná temperace však nebyla provedena, neboť není nezbytně nutná.

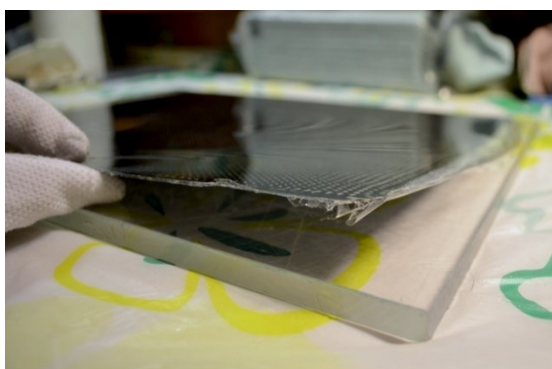
Po uplynutí 24 hod byla forma vyjmuta ze sáčku a pomocí úzkého předmětu opatrně rozevřena. S vyjmutím hotové desky nebyl díky dobré separaci formy žádný problém a výsledkem byl velice kvalitní lesklý povrch s tenkou vrstvou PVA fólie. Tu lze poté jednoduše odstranit oplachem ve vodě, nebo ji ponechat jako ochrannou vrstvu pro následné opracování a odstranit ji později.



Obrázek 47: Rozevírání formy



Obrázek 48: Kompozitní deska po oddělení horního dílu formy



Obrázek 49: Oddělení kompozitní desky od spodního dílu formy



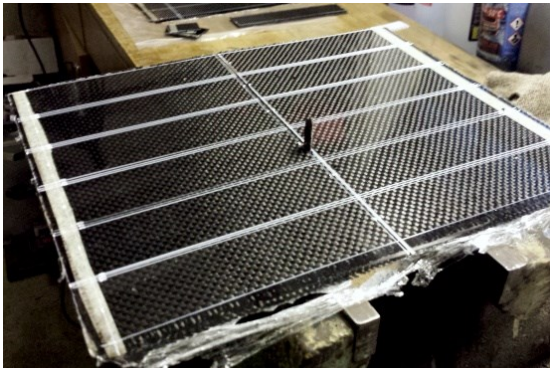
Obrázek 50: Vyrobené kompozitní desky

Vyříznutí zkušebních vzorků z vyrobených desek

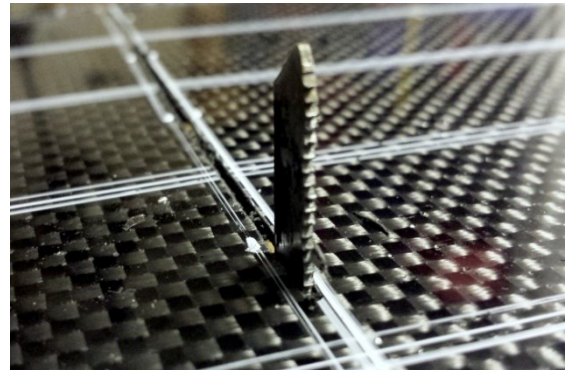
Řezání uhlíkového kompozitu není nijak zvlášť problematický proces a lze v podstatě použít většinu běžně dostupných nástrojů (v závislosti na tloušťce materiálu) od nůžek přes přímočarou pilu, kotoučovou pilu nebo úhlovou brusku, až po speciální technologie jako například vodní paprsek. Při použití nástrojů s břity (pilové listy, kotouče) je vhodné použít co nejjemnější ozubení, aby nedocházelo k příliš intenzivnímu vytrhávání vláken z kompozitu. Obecně je ale vhodné používat spíše abrazivní metody řezání neboť u běžných břitových nástrojů dochází vlivem abrazivních vlastností uhlíkových vláken k velmi rychlému opotřebení a otupení. Nejvyšší kvality řezu lze pak dosáhnout použitím vodního paprsku, což už ale nepatří mezi běžně dostupné metody.

Vyříznutí vzorků pro diplomovou práci bylo provedeno pomocí přímočaré pily dle výkresů uvedených v přílohách A, B a C. Bílým fixem byly výkresy překresleny na jednotlivé desky, což posloužilo jako vodítko řezu. Nařezané vzorky byly následně pomocí pásové brusky a brusného papíru obroušeny na přesný rozměr a připraveny pro vrtání děr.

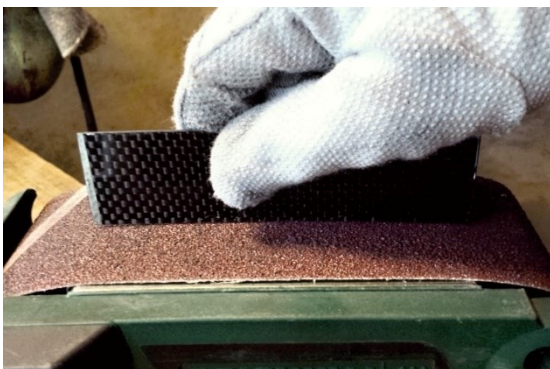
Při vrtání dlouhovlákných kompozitů často dochází k problémům s delaminací povrchových vrstev (bylo zmíněno v teoretické části práce). K omezení vzniku tohoto jevu je tedy dobré použít pod vrtaný díl podkladový materiál (např. dřevo) a zvolit velice pomalý posuv. Při vrtání děr o průměru 6 mm do zkušebních vzorků byla použita běžná ruční vrtačka, umístěná ve stojanu s pákovým svislým posuvem. To umožnilo velmi dobrou kontrolu nad přesností a nad rychlostí posuvu.



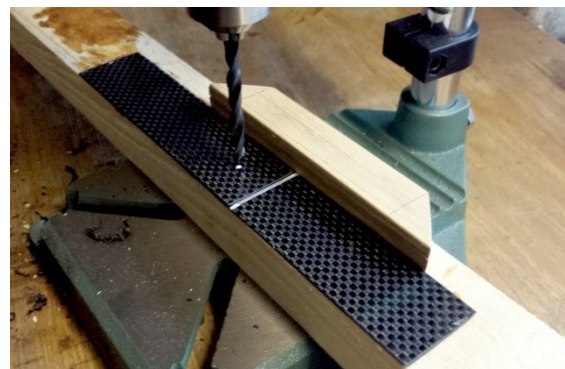
Obrázek 51: Kompozitní deska s vyznačenými řezy



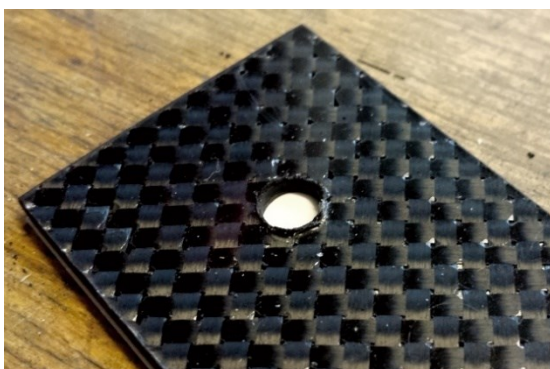
Obrázek 52: Detail řezu



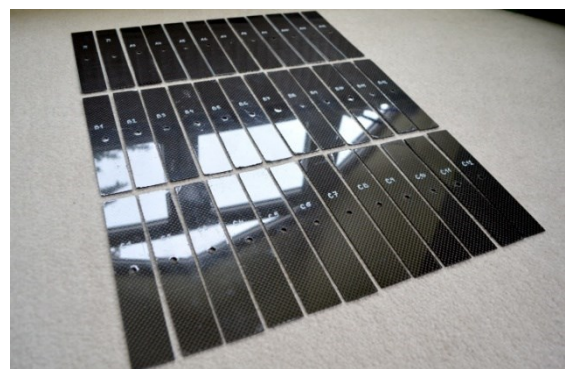
Obrázek 53: Broušení vzorku na pásové brusce



Obrázek 54: Vzorky pro přeplátovaný spoj před vrtáním



Obrázek 55: Detail vrtané díry

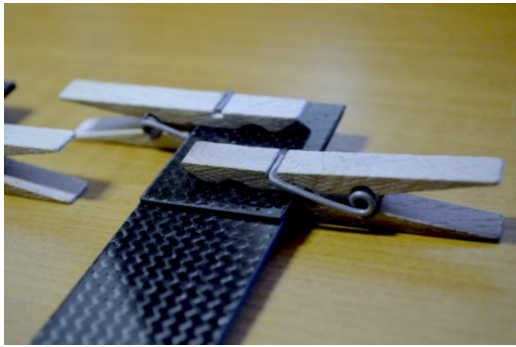


Obrázek 56: Část hotových vzorků s vrtanou dírou

Příprava vzorků pro testování

Vzorky testované bez šroubového spoje byly po předchozí operaci již připravené pro tahovou zkoušku. U ostatních vzorků byl přidán navíc šroubový spoj, sestávající ze šroubu se šestihlannou hlavou M6 x 10 (A2-70, DIN 933), matice M6 (A2-70, DIN 934) a dvou podložek pro šrouby M6 (A2, DIN 9021). Šroubový spoj byl utážen momentovým klíčem na hodnotu 3 Nm.

V případě přeplátovaných spojů bylo ještě nutné ke vzorkům přilepit tzv. příložky o rozměru 50 x 36 mm. Příložky jsou ze stejného materiálu a mají stejnou tloušťku jako testované vzorky, a pro jejich lepení byla použita stejná pryskyřice s tužidlem, jako při výrobě kompozitu. Jejich funkcí je zamezit vzniku ohybového momentu při tahové namáhání, který může být způsoben nesouosostí přeplátovaného spoje.



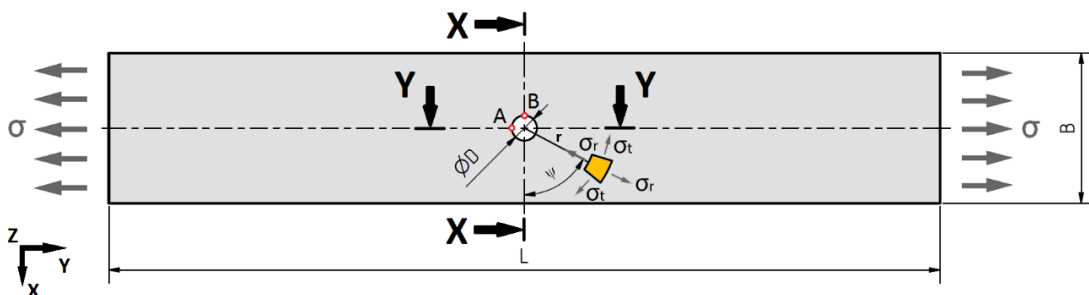
Obrázek 57: Lepení příložky



Obrázek 58: Sešroubované přeplátované spoje + momentový klíč

3.3 Analýza napjatosti zkušebních vzorků

Pro lepší porozumění jevům, které probíhají v tahem zatěžovaném laminátu, byla část experimentální kapitoly věnována též analýze napjatosti. Pozornost byla konkrétně zaměřena na analýzu napjatosti v okolí kruhové díry pro jednotlivé vrstvy tenkostěnného kompozitu. Samotný postup výpočtu je založen na poznacích z odborné literatury [16] a výsledné hodnoty a diagramy byly spočítány za pomoci softwaru wxMaxima.



Obrázek 59: Schéma analyzovaného vzorku [16]

Pro následující úvahy je předpokládáno, že sledovaný kompozit má izotropní, resp. kvaziizotropní vlastnosti. V takovém případě je poté možné vycházet z tzv. Kirschovy úlohy, jež se zabývá napětími a deformacemi vznikajícími v okolí kruhové díry. Tato úloha sestává z následujících rovnic [16]:

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{2} \cdot \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma}{2} \cdot \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4} - 4\frac{a^2}{r^2}\right) \cdot \cos(2\theta) \quad (6)$$

$$\sigma_t = \frac{\sigma}{2} \cdot \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma}{2} \cdot \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cdot \cos(2\theta) \quad (7)$$

$$\tau_{tr} = \frac{\sigma}{2} \cdot \left(1 - 3\frac{a^4}{r^4} + 2\frac{a^2}{r^2}\right) \cdot \sin(2\theta) \quad (8)$$

Kde σ_r je radiální napětí, σ_t je tečné napětí, τ_{tr} je smykové napětí, σ je zatěžující napětí, a je poloměr díry a r je vzdálenost elementu od středu díry (viz obrázek 59). Dosadíme-li okrajové podmínky pro řezy X a Y, tedy $\theta_X = 0$, $\theta_Y = \frac{\pi}{2}$ a $r = a$, zjistíme, že radiální a smykové napětí je v těchto řezech rovno 0 a že maximální napjatost vzniká v bodech A a B [16].

$$\begin{aligned} \sigma_r(a, 0) &= 0 & \sigma_r(a, \pi/2) &= 0 \\ \tau_{tr}(a, 0) &= 0 & \tau_{tr}(a, \pi/2) &= 0 \end{aligned}$$

$$\sigma_{tA} = \sigma_t\left(a, \frac{\pi}{2}\right) = \sigma_t\left(a, -\frac{\pi}{2}\right) = \sigma_y = -\sigma \quad (9)$$

$$\sigma_{tB} = \sigma_t(a, 0) = \sigma_t(a, \pi) = \sigma_y = 3 \cdot \sigma \quad (10)$$

Na základě tohoto zjištění bude pozornost dále soustředěna na zmíněné body A a B. Následující postup poté spočívá ve vyjádření jednotlivých složek napětí a deformace pro tyto body [16].

$$\text{Pro bod A:} \quad \begin{bmatrix} \sigma_{xA} \\ \sigma_{yA} \\ \tau_{xyA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{tA} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \varepsilon_{xA} \\ \varepsilon_{yA} \\ \gamma_{xyA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{tA} \\ \varepsilon_{rA} \\ \gamma_{rtA} \end{bmatrix}$$

$$\text{Pro bod B:} \quad \begin{bmatrix} \sigma_{xB} \\ \sigma_{yB} \\ \tau_{xyB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sigma_{tB} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \varepsilon_{xB} \\ \varepsilon_{yB} \\ \gamma_{xyB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{tB} \\ \varepsilon_{rB} \\ \gamma_{rtB} \end{bmatrix}$$

Poté následuje dosazení do obecného vztahu, který analyzuje napjatost jednotlivých vrstev vícevrstvého kompozitu, a který lze nalézt v odborné literatuře [16].

$$\text{Obecný tvar:} \quad \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{bmatrix}_k = [T^\varepsilon(-\theta_k)]^T \cdot [\bar{Q}]_k \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\text{Pro bod A:} \quad \begin{bmatrix} \sigma_{L,A} \\ \sigma_{T,A} \\ \tau_{LT,A} \end{bmatrix}_k = [T^\varepsilon(-\theta_k)]^T \cdot [\bar{Q}]_k \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{xA} \\ \varepsilon_{yA} \\ \gamma_{xyA} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\text{Pro bod B:} \quad \begin{bmatrix} \sigma_{L,B} \\ \sigma_{T,B} \\ \tau_{LT,B} \end{bmatrix}_k = [T^\varepsilon(-\theta_k)]^T \cdot [\bar{Q}]_k \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{xB} \\ \varepsilon_{yB} \\ \gamma_{xyB} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Kde σ_L je normálová složka tenzoru napětí ve směru L (ve směru vláken), σ_T je normálová složka tenzoru napětí ve směru T (kolmo na vlákna), τ_{LT} je smyková složka tenzoru napětí v rovině LT, T^ε je transformační matice tenzoru relativních deformací, θ_k je směr vláken k-té vrstvy kompozitu, \bar{Q}_k je matice modifikované tuhosti k-té vrstvy kompozitu, ε_x je relativní deformace střední roviny laminátu ve směru osy x, ε_y je relativní deformace střední roviny laminátu ve směru osy y a γ_{xy} je relativní deformace střední roviny laminátu ve směru osy z [16].

Nyní je třeba definovat neznámé veličiny v předchozím vztahu. Hodnota γ_{xy} , neboli deformace ve směru z je rovna 0. Hodnoty ε_x a ε_y spočítáme ze soustavy rovnic, jež vycházejí z Hookova zákona [16]:

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_r + \nu \cdot \varepsilon_t) \quad (14)$$

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_t + \nu \cdot \varepsilon_r) \quad (15)$$

Matice modifikované tuhosti \bar{Q}_k je definována následujícím vztahem [16]:

$$[\bar{Q}] = [T^\sigma]^{-1} \cdot [Q] \cdot [T^\varepsilon] \quad (16)$$

$$\text{Kde} \quad [T^\sigma] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\text{a} \quad [T^\varepsilon] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -\sin \theta \cos \theta \\ -2 \sin \theta \cos \theta & 2 \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (18)$$

Q je matice tuhosti ve tvaru $\begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{61} & Q_{62} & Q_{66} \end{bmatrix}$, jejíž složky se vypočítají následovně [16]:

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_L}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}} & Q_{22} &= \frac{E_T}{E_L} \cdot Q_{11} & Q_{12} &= \nu_{LT} \cdot Q_{22} \\ Q_{21} &= Q_{12} & Q_{66} &= G_{LT} \\ Q_{16} &= Q_{61} = Q_{26} = Q_{62} = 0 \end{aligned}$$

E_L a E_T jsou moduly pružnosti kompozitu ve směru L (ve směru vláken) a T (kolmo na vlákna), jež vycházejí z modulu vláken E_f a modulu matrice E_m dle jejich objemových podílů ν_f a ν_m [16].

$$E_L = \nu_f \cdot E_f + \nu_m \cdot E_m \quad (19)$$

$$E_T = \frac{E_f \cdot E_m}{\nu_f \cdot E_m + \nu_m \cdot E_f} \quad (20)$$

Stejně tak Poissonovy konstanty ν_{LT} a ν_{TL} vycházejí z hodnot E_f , E_m , ν_f a ν_m [16].

$$\nu_{LT} = \nu_f \cdot \nu_f + \nu_m \cdot \nu_m \quad (21)$$

$$\nu_{TL} = \nu_{LT} \cdot \frac{E_T}{E_L} \quad (22)$$

Nakonec výpočet smykového modulu pružnosti G_{LT} je analogií k výpočtu E_T , ovšem s použitím smykových modulů vláken a matrice G_f a G_m [16].

$$G_{LT} = \frac{G_f \cdot G_m}{\nu_f \cdot G_m + \nu_m \cdot G_f} \quad (23)$$

V tuto chvíli máme k dispozici veškeré potřebné vztahy pro analýzu napjatosti. Celý výpočet vede k poměrně složitým maticovým operacím, proto bylo využito softwaru wxMaxima pro naprogramování výpočetního postupu, jehož výstupem jsou diagramy, znázorňující napjatost v jednotlivých vrstvách kompozitu. Zdrojový kód programu je ve formě přílohy součástí přiloženého CD. Následující diagramy ukazují průběh napětí a deformace v řezech X-X a Y-Y v závislosti na vzdálenosti od středu díry r . Zobrazeny jsou i průběhy v jednotlivých vrstvách kompozitu.

Vstupní data jsou:

$$E_f = 260\,000 \text{ MPa} \quad E_m = 3\,450 \text{ MPa}$$

$$\nu_f = 0,4 \quad \nu_m = 0,6 \quad (\text{objemový podíl})$$

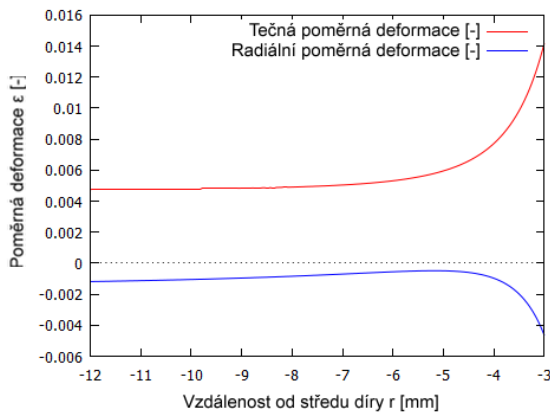
$$\nu_f = 0,33 \quad \nu_m = 0,3 \quad (\text{Poissonova konstanta})$$

$$a = 3 \text{ mm} \quad (\text{poloměr díry})$$

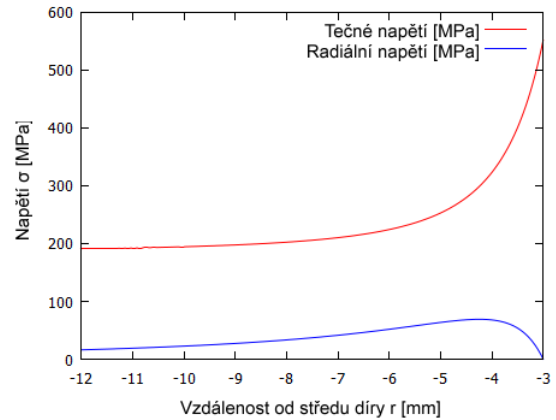
$$\sigma = 184 \text{ MPa} \quad (\text{stř. hod. napětí do prvního porušení, naměřená pro vzorky A})$$

Skladba odpovídá sérii vzorků s označením A, tedy 2 vrstvy tkaniny (0/90,45/-45) s celkovou tloušťkou $h = 0,5 \text{ mm}$. Hodnoty E_f , E_m , ν_f a ν_m byly získány z odborné literatury [17].

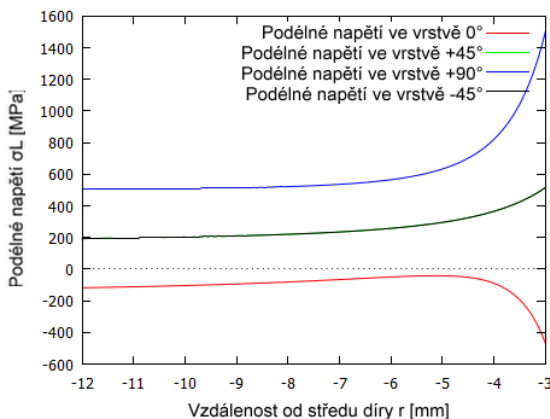
Řez X-X



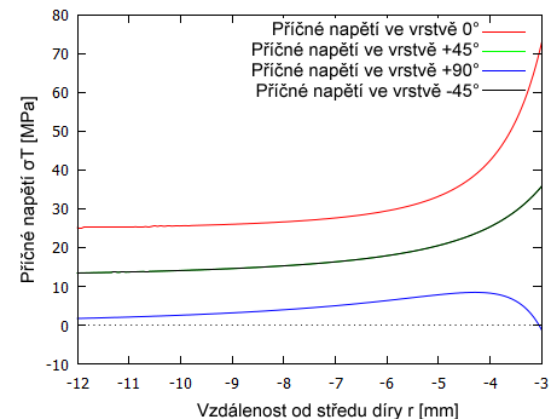
Graf 1: Průběhy radiální a tečné deformace v závislosti na vzdálenosti od středu díry



Graf 2: Průběhy radiálního a tečného napětí v závislosti na vzdálenosti od středu díry

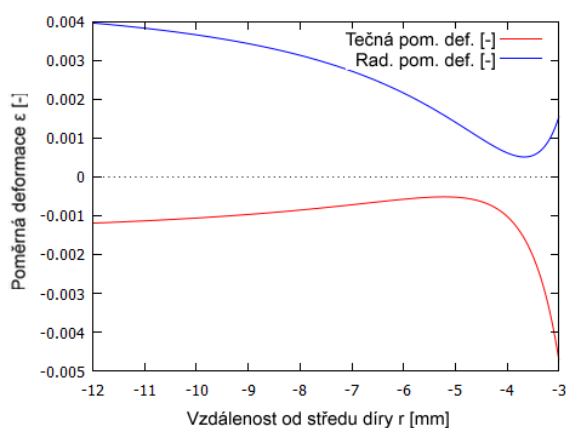


Graf 3: Průběhy podélného napětí v jednotlivých vrstvách kompozitu

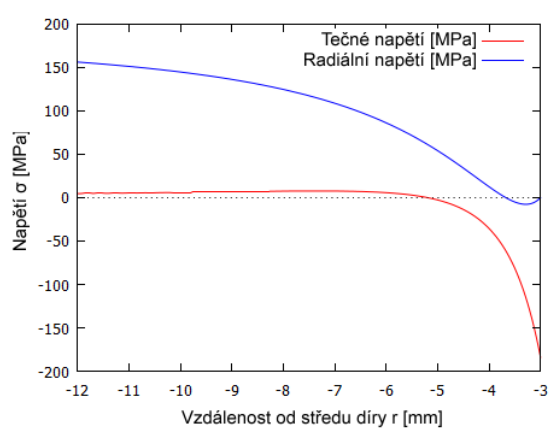


Graf 4: Průběhy příčného napětí v jednotlivých vrstvách kompozitu

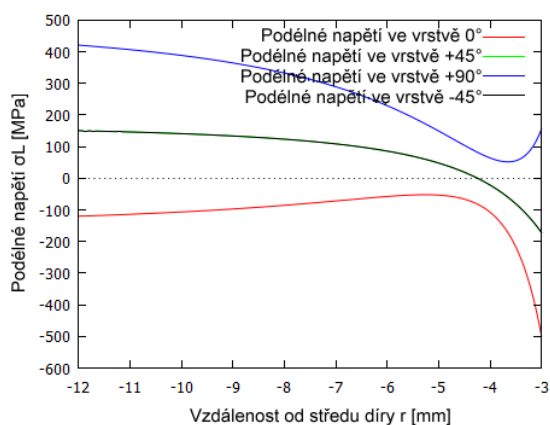
Řez Y-Y



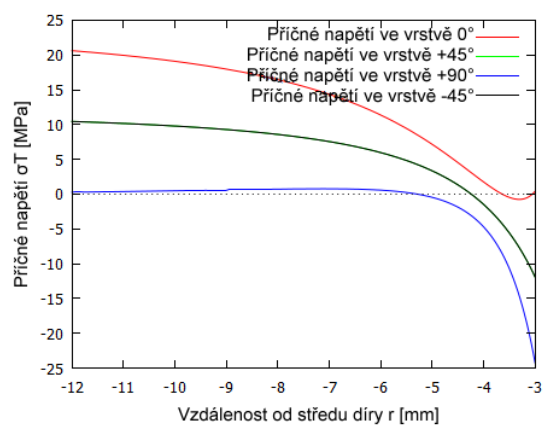
Graf 5: Průběhy radiální a tečné deformace v závislosti na vzdálenosti od středu díry



Graf 6: Průběhy radiálního a tečného napětí v závislosti na vzdálenosti od středu díry



Graf 7: Průběhy podélného napětí v jednotlivých vrstvách kompozitu



Graf 8: Průběhy příčného napětí v jednotlivých vrstvách kompozitu

Výše uvedené diagramy znázorňují průběhy napětí a poměrných deformací v řezech X-X a Y-Y v závislosti na vzdálenosti od středu díry. Jak je vidět, diagramy potvrzují skutečnost, že největší napjatost vzniká přímo v místě okraje díry, tedy v bodech A a B.

3.4 Hodnocení mechanických parametrů vyrobených vzorků

Veškeré vyrobené vzorky byly podrobeny tahové zkoušce až do destrukce a to v souladu s ASTM normami, jež jsou pro úplnost uvedeny níže:

ASTM D3039/D3039M-08 – Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials [19]

ASTM D5766/D5766M-11 – Standard Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates [20]

ASTM D6742/D6742M-07 – Standard Practice for Filled-Hole Tension and Compression Testing of Polymer Matrix Composite Laminates [21]

ASTM D5961/D5961M-10 – Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates [22]

Testování probíhalo na trhacím stroji TiraTest 2300 v laboratoři Katedry strojírenské technologie. Následující kapitoly jsou rozděleny podle jednotlivých typů zkoušených vzorků.

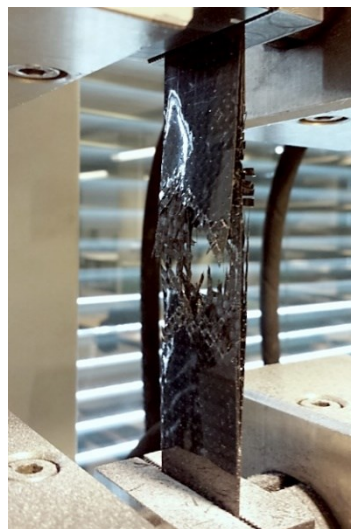
3.4.1 Vzorky s prázdnou dírou (A, B a C)

Metodika, rozměry vzorků a hodnocení výsledků bylo provedeno dle norem *ASTM D3039/D3039M-08* a *ASTM D5766/D5766M-11*. Pro geometrii vzorků norma stanovuje klíčové rozměry ve formě poměrů, například pro poměr mezi šířkou vzorku a průměrem díry w/D doporučuje hodnotu 6. Dalším doporučeným poměrem je poměr mezi průměrem díry a tloušťkou vzorku D/h s hodnotou v rozmezí 1,5 až 3, nicméně ten nebyl brán v potaz vzhledem k cílenému testování daných tlouštěk a daného průměru díry. Norma dále nabízí 2 konfigurace rozměrů. Zde byla zvolena konfigurace B, která je primárně určena pro kvaziizotropní lamináty se skladbou 0/90/45/-45. Tato konfigurace definuje šířku vzorku 36 mm, průměr díry 6 mm, délku vzorku v rozmezí 200 až 300 mm a délku gripu 35 až 55 mm. Zde byla zvolena délka $L = 200$ mm a délka gripu $L_G = 50$ mm, tedy počáteční měřená délka $L_0 = 100$ mm.

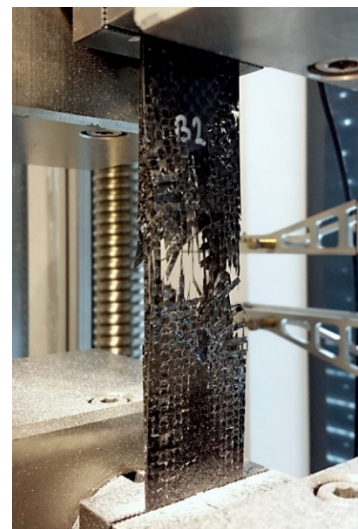
Samotný postup měření poté stanovuje norma *D3039/D3039M-08*, která udává doporučenou rychlost zatěžování 2 mm/min. Výstupem trhacího stroje byla závislost síly na posuvu příčnicku. Veškeré další veličiny byly vypočítány dle příslušných vztahů.



Obrázek 60: Vzorek B2 před testováním



Obrázek 61: Vzorek B2 po testování

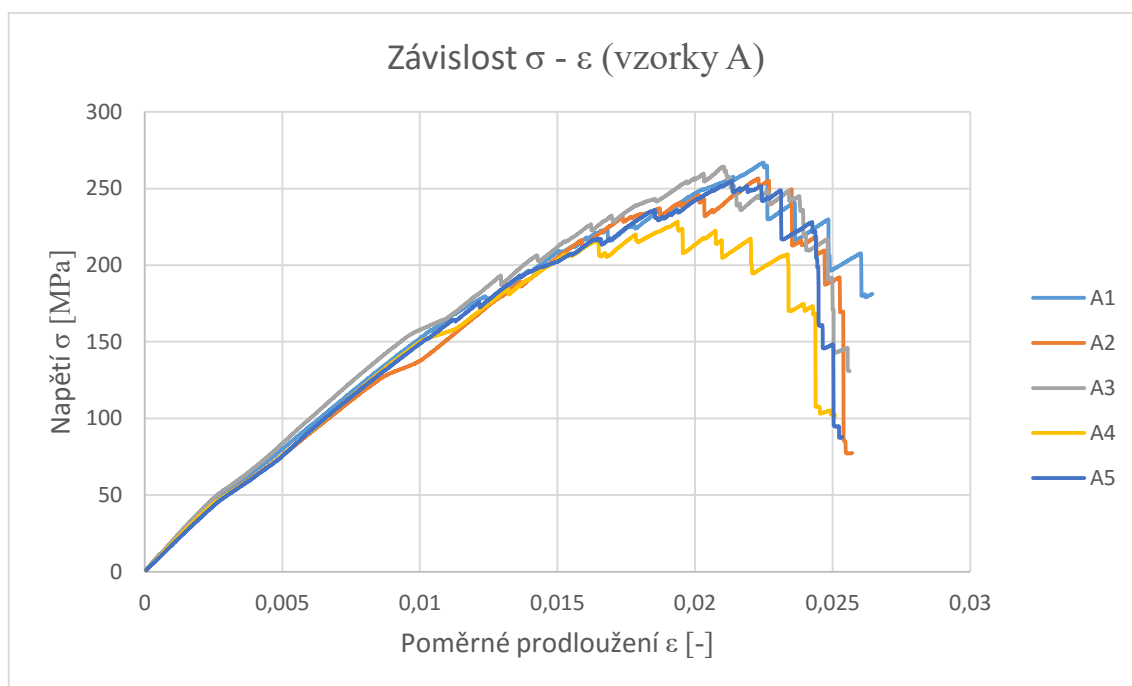


Obrázek 62: Vzorek B2 po testování

Vzorky A						
	Tloušťka a [mm]	Šířka b [mm]	Pevnost do prvního porušení σ_{pp} [MPa]	Mez pevnosti σ_m [MPa]	Poměrné prodloužení na mezi pevnosti ε_m [%]	Modul pružnosti E [GPa]
1	0,46	36,15	178,5	266,9	2,3	13,485
2	0,45	36,16	189,2	256,6	2,2	12,635
3	0,45	36,19	193,3	264,3	2,1	14,465
4	0,49	36,21	184,6	228,4	1,9	12,824
5	0,48	36,09	175,7	255,1	2,1	12,829
6*	0,52	36,25	131,4	166,5	1,6	11,761
Stř. hod.	0,47	36,16	184,3	254,3	2,1	13,248
Směr odch.	0,02	0,04	6,5	13,7	0,1	0,674
Min.	0,45	36,09	175,7	228,4	1,9	12,635
Max.	0,49	36,21	193,3	266,9	2,3	14,465
Medián	0,46	36,16	184,6	256,6	2,1	12,829

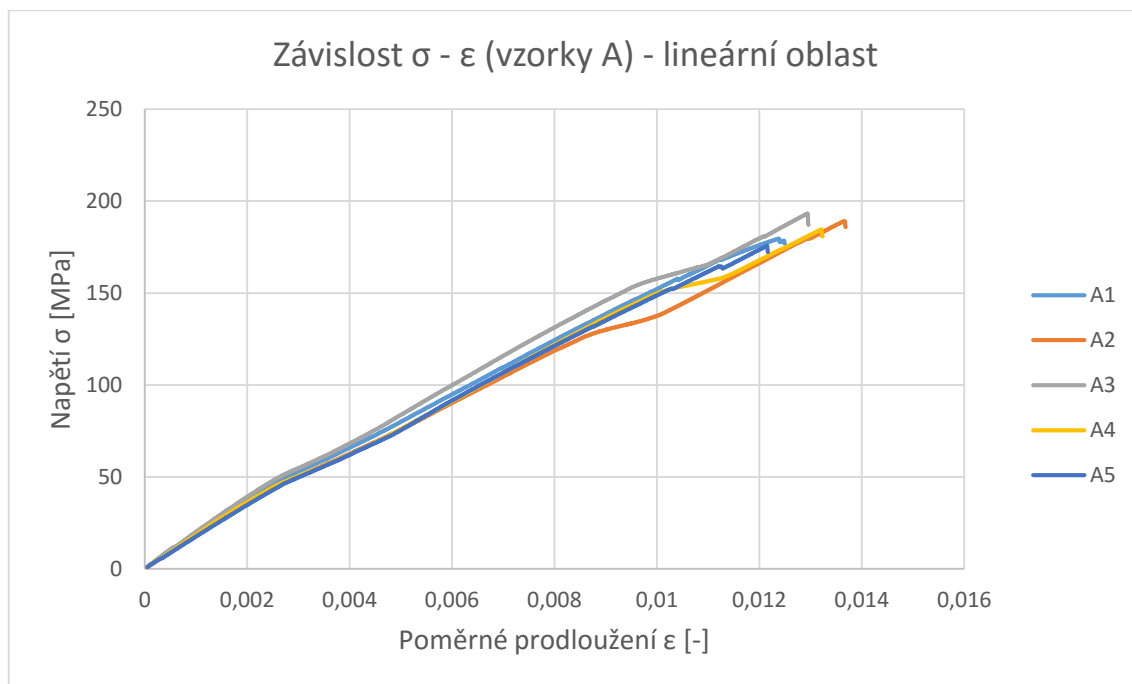
Tabulka 8: Základní naměřená data pro vzorky série A

*Vzorek 6 (červeně vyznačený) byl vyřazen ze statistiky.



Graf 9: Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorky A

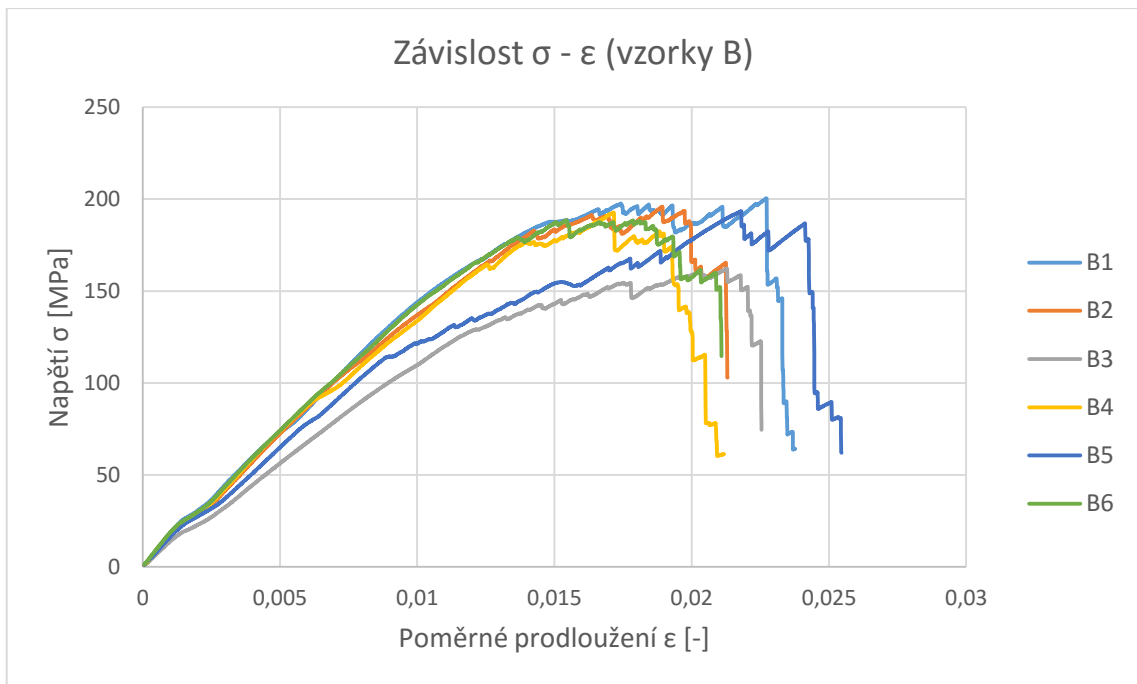
Vzhledem k pilovitému tvaru grafu, který je způsoben postupným porušováním svazků vláken, je třeba udělat několik úprav. Pro reálné využití je pro nás totiž zajímavá pouze část grafu do prvního výrazného porušení (tedy poklesu napětí). Napětí při tomto prvním poklesu můžeme označit jako reálnou mez pevnosti, která je v tomto případě oproti celkové mezi pevnosti výrazně nižší.



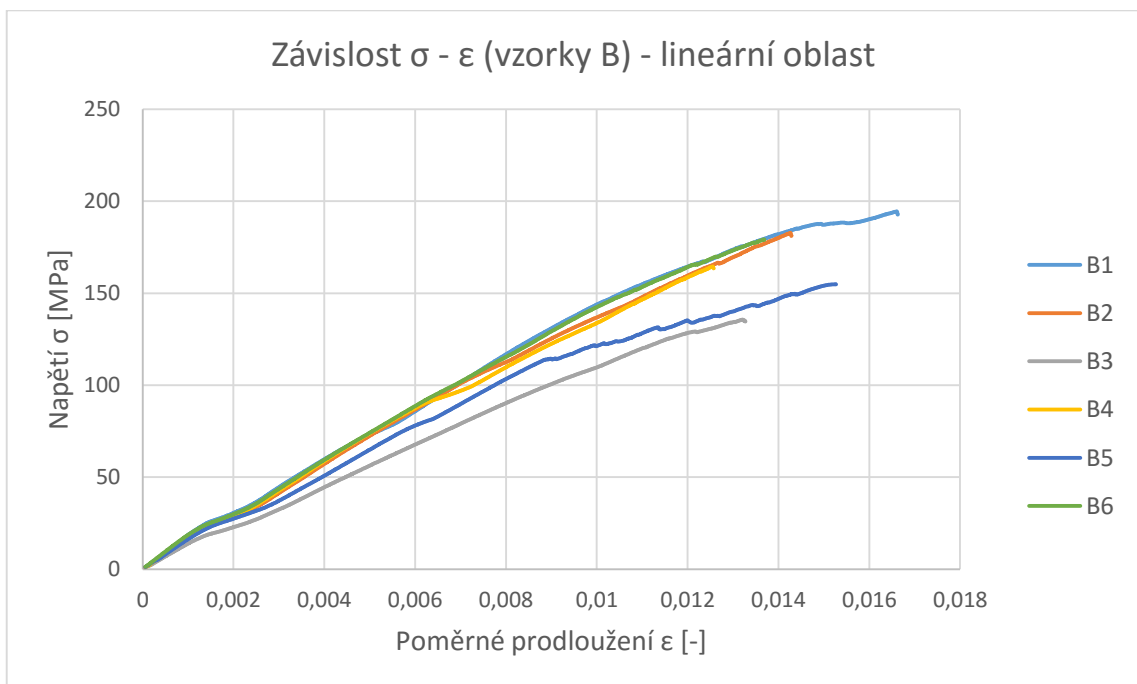
Graf 10: Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorky A – lineární oblast

Vzorky B						
	Tloušťka a [mm]	Šířka b [mm]	Pevnost do prvního porušení σ_{pp} [MPa]	Mez pevnosti σ_m [MPa]	Poměrné prodloužení na mezi pevnosti ϵ_m [%]	Modul pružnosti E [GPa]
1	0,89	35,92	194,5	200,5	2,3	14,257
2	0,95	36,04	182,8	195,8	1,9	15,563
3	1,03	35,92	135,2	190,9	2,1	11,927
4	0,95	35,96	164,6	192,7	1,7	15,608
5	0,93	35,98	154,9	193,4	2,2	13,876
6	0,94	36,05	179,3	188,5	1,5	15,247
Stř. hod.	0,95	35,98	168,6	193,6	2,0	14,413
Směr odch.	0,04	0,05	19,6	3,8	0,3	1,287
Min.	0,89	35,92	135,2	188,5	1,5	11,927
Max.	1,03	36,05	194,5	200,5	2,3	15,608
Medián	0,95	35,97	171,9	193,1	2,0	14,752

Tabulka 9: Základní naměřená data pro vzorky série B



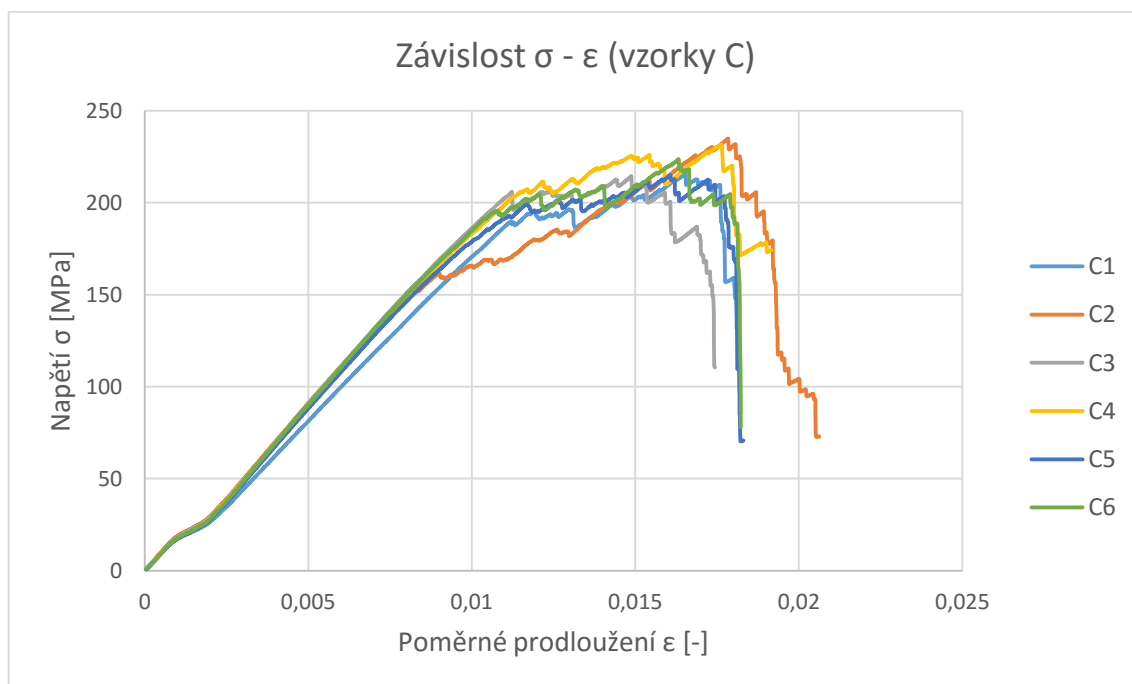
Graf 11: Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorky B



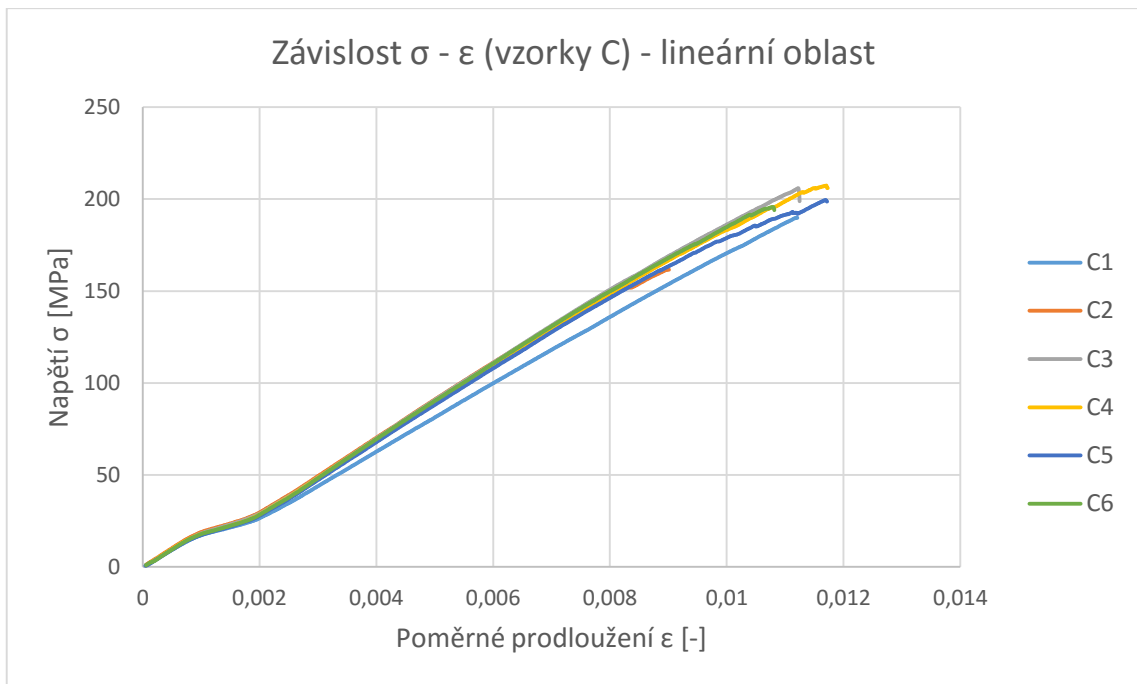
Graf 12: Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorky B – lineární oblast

Vzorky C						
	Tloušťka a [mm]	Šířka b [mm]	Pevnost do prvního porušení σ_{pp} [MPa]	Mez pevnosti σ_m [MPa]	Poměrné prodloužení na mezi pevnosti ε_m [%]	Modul pružnosti E [GPa]
1	1,31	35,86	189,9	215,9	1,7	18,671
2	1,17	35,99	161,7	234,9	1,8	20,825
3	1,19	35,86	205,9	214,5	1,5	21,071
4	1,25	35,97	207,4	231,7	1,8	20,615
5	1,29	35,98	199,6	215,0	1,6	20,439
6	1,26	36,18	195,7	223,7	1,6	21,018
Stř. hod.	1,25	35,97	193,4	222,6	1,7	20,440
Směr odch.	0,05	0,11	15,3	8,2	0,1	0,821
Min.	1,17	35,86	161,7	214,5	1,5	18,671
Max.	1,31	36,18	207,4	234,9	1,8	21,071
Medián	1,26	35,98	197,7	219,8	1,6	20,720

Tabulka 10: Základní naměřená data pro vzorky série C

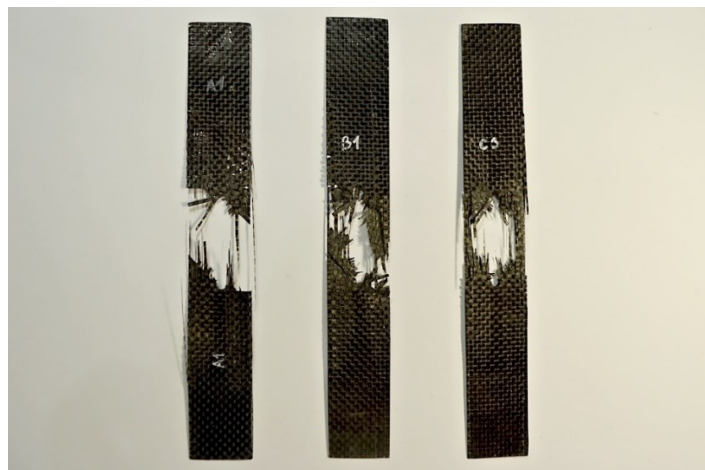


Graf 13: Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorky C



Graf 14: Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorky C – lineární oblast

Součástí výsledků je dle normy i hodnocení porušené části vzorku. To je zapsáno jako zkratka tří písmen, kde první písmeno hodnotí typ porušení a druhé a třetí upřesňují místo porušení. Tabulka s těmito písmeny je součástí normy. Zde došlo u všech vzorků k totožnému typu a umístění lomu, dle normy označenému jako MGM. To znamená, že lom vykazuje různé typy porušení (delaminace) v různých vrstvách kompozitu, a jeho umístění je vždy uprostřed měřené délky, tedy napříč dírou.



Obrázek 63: Vzhled lomů vzorků A1, B1 a C3

3.4.2 Vzorky se šroubovým spojem (A-S, B-S a C-S)

Pro tuto sérii testů byly použity totožné vzorky jako u předchozí série, tedy destičky o rozměru 200 x 36 mm, ve třech různých tloušťkách a s dírou o průměru 6 mm uprostřed. Jediným rozdílem byla přítomnost šroubového spoje v díře, který se skládal ze šroubu M6 x 10, matice a dvou podložek s vnějším průměrem 18 mm. Šroubový spoj byl předepnut utahovacím momentem 3 Nm. Tahová zkouška byla provedena dle norem *ASTM D3039/D3039M-08* a *ASTM D6742/D6742M-07* kdy postup a parametry zkoušky byly stejné jako u testování vzorků s prázdnou dírou.



Obrázek 64: Vzorek C7-S před testováním



Obrázek 65: Vzorek C7-S po testování

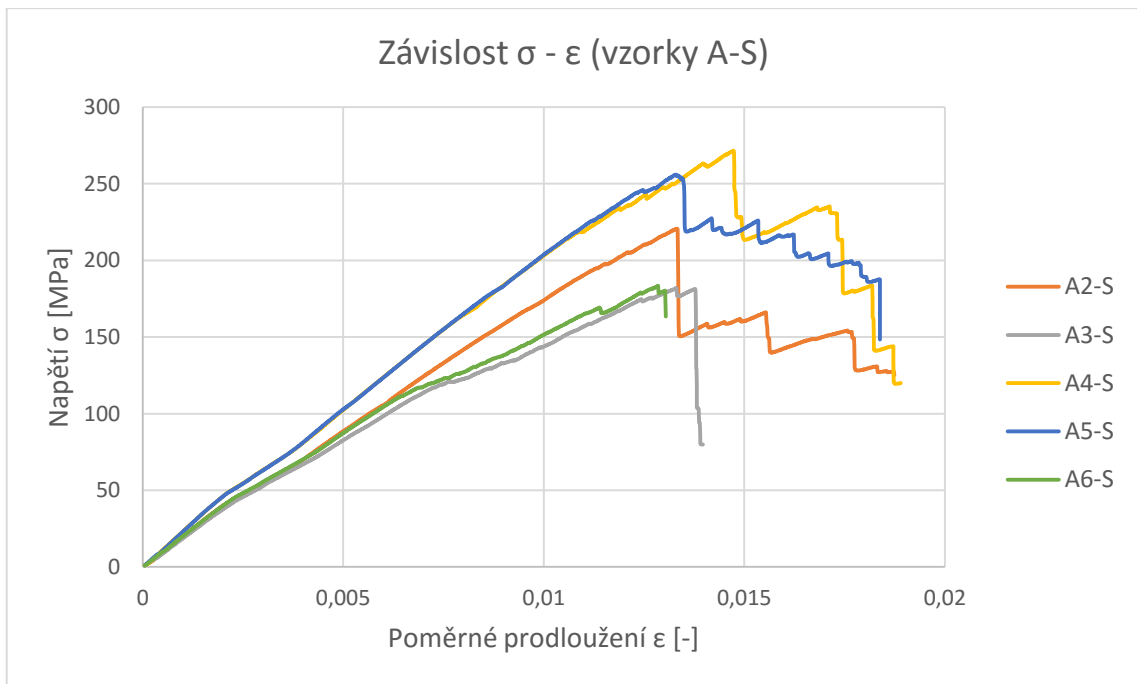


Obrázek 66: Vzorek C7-S po testování

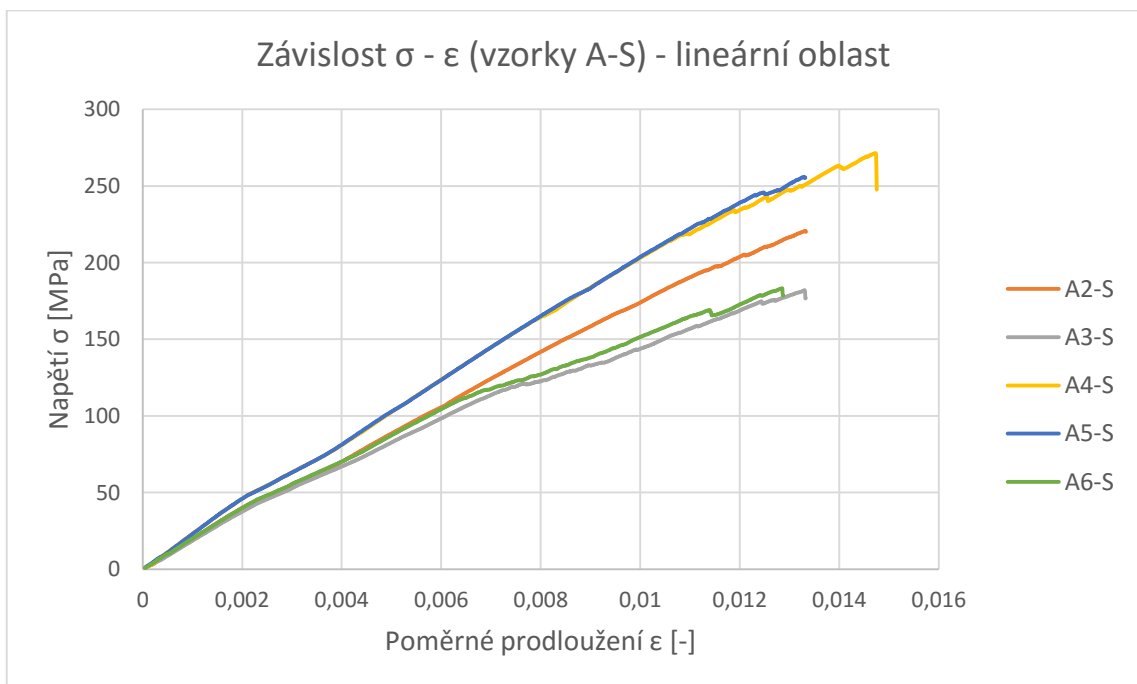
Vzorky A-S						
	Tloušťka a [mm]	Šířka b [mm]	Pevnost do prvního porušení σ_{pp} [MPa]	Mez pevnosti σ_m [MPa]	Poměrné prodloužení na mezi pevnosti ε_m [%]	Modul pružnosti E [GPa]
1*	0,53	35,60	144,9	144,9	1,2	15,181
2	0,54	36,20	220,7	220,7	1,3	16,798
3	0,52	35,85	182,1	182,1	1,3	14,943
4	0,47	36,23	243,3	271,5	1,5	19,658
5	0,47	36,32	244,3	256,0	1,3	19,965
6	0,50	36,15	169,2	183,4	1,3	15,925
Stř. hod.	0,50	36,15	211,9	222,7	1,3	17,458
Směr odch.	0,03	0,16	31,1	36,6	0,1	2,012
Min.	0,47	35,85	169,2	182,1	1,3	14,943
Max.	0,54	36,32	244,3	271,5	1,5	19,965
Medián	0,50	36,20	220,7	220,7	1,3	16,798

Tabulka 11: Základní naměřená data pro vzorky série A-S

*Vzorek 1 (červeně vyznačený) byl vyřazen ze statistiky.



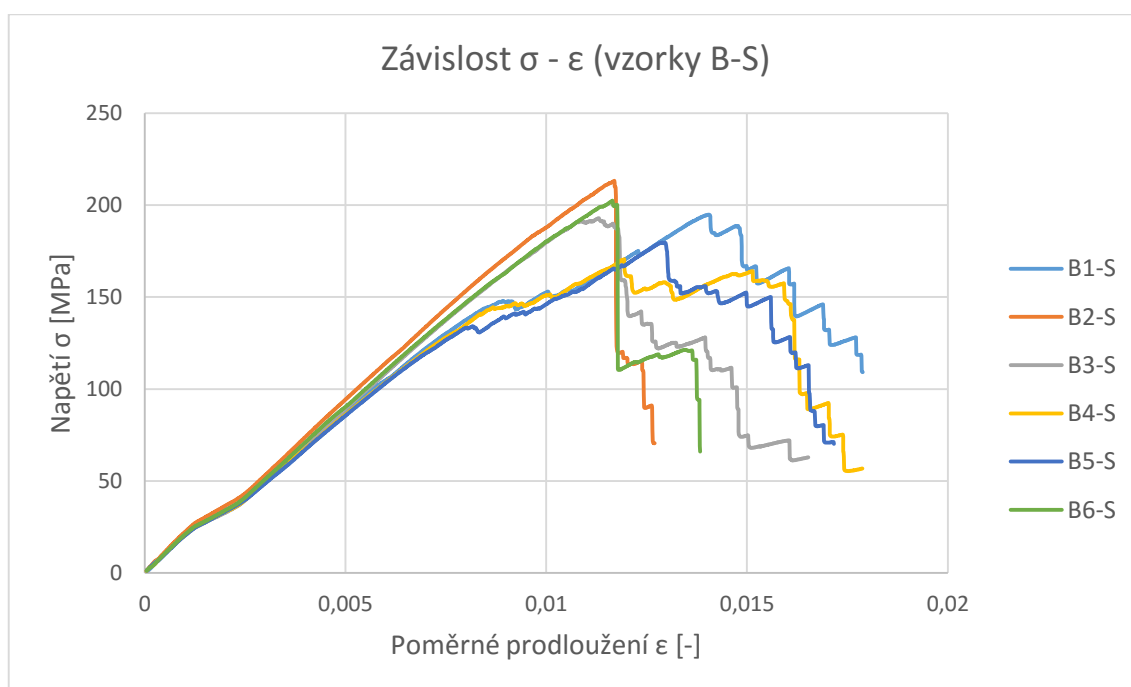
Graf 15: Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorky A-S



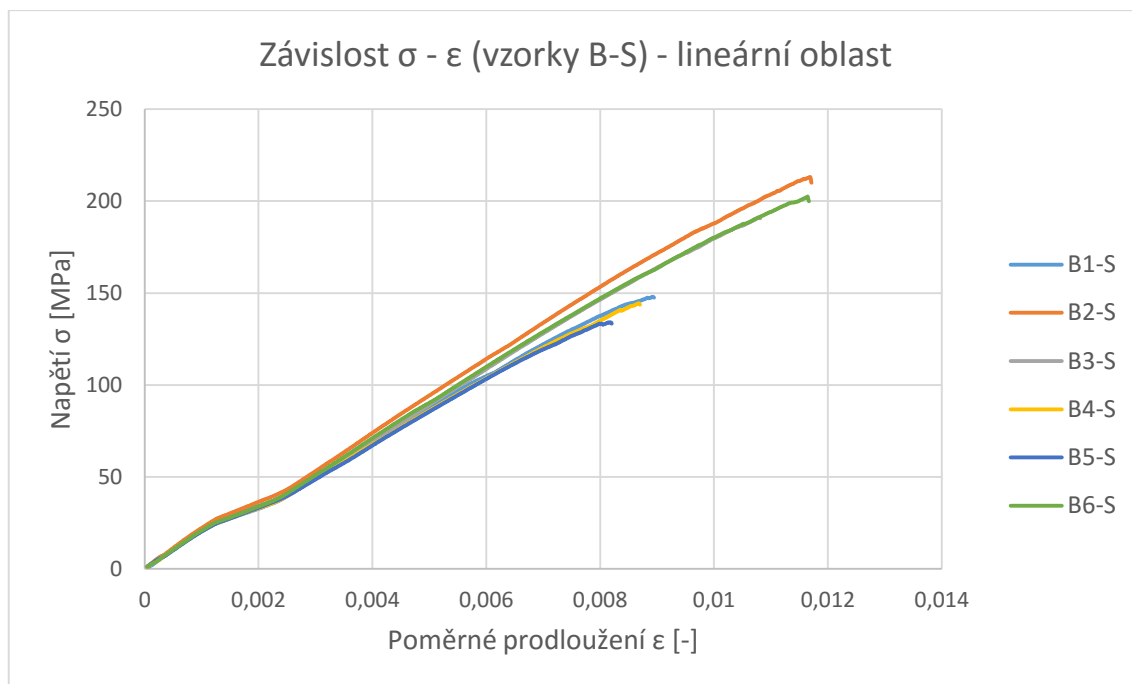
Graf 16: Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorky A-S – lineární oblast

Vzorky B-S						
	Tloušťka a [mm]	Šířka b [mm]	Pevnost do prvního porušení σ_{pp} [MPa]	Mez pevnosti σ_m [MPa]	Poměrné prodloužení na mezi pevnosti ε_m [%]	Modul pružnosti E [GPa]
1	0,92	36,05	147,9	194,9	1,4	18,815
2	0,86	35,70	213,2	213,2	1,2	20,577
3	0,96	36,09	192,9	192,9	1,1	20,031
4	0,95	35,87	144,5	170,6	1,2	18,533
5	0,91	36,01	134,1	179,7	1,3	18,416
6	0,92	36,03	202,4	202,4	1,2	19,667
Stř. hod.	0,92	35,96	172,5	192,3	1,2	19,340
Směr odch.	0,03	0,13	31,2	14,0	0,1	0,806
Min.	0,86	35,70	134,1	170,6	1,1	18,416
Max.	0,96	36,09	213,2	213,2	1,4	20,577
Medián	0,92	36,02	170,4	193,9	1,2	19,241

Tabulka 12: Základní naměřená data pro vzorky série B-S



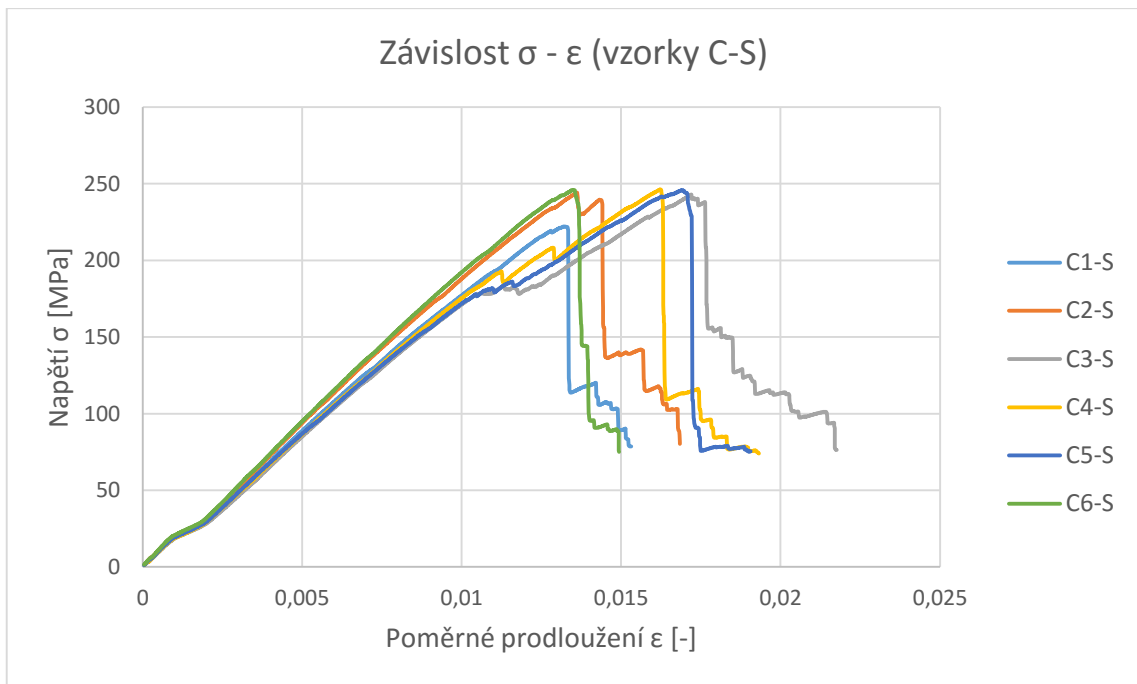
Graf 17: Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorky B-S



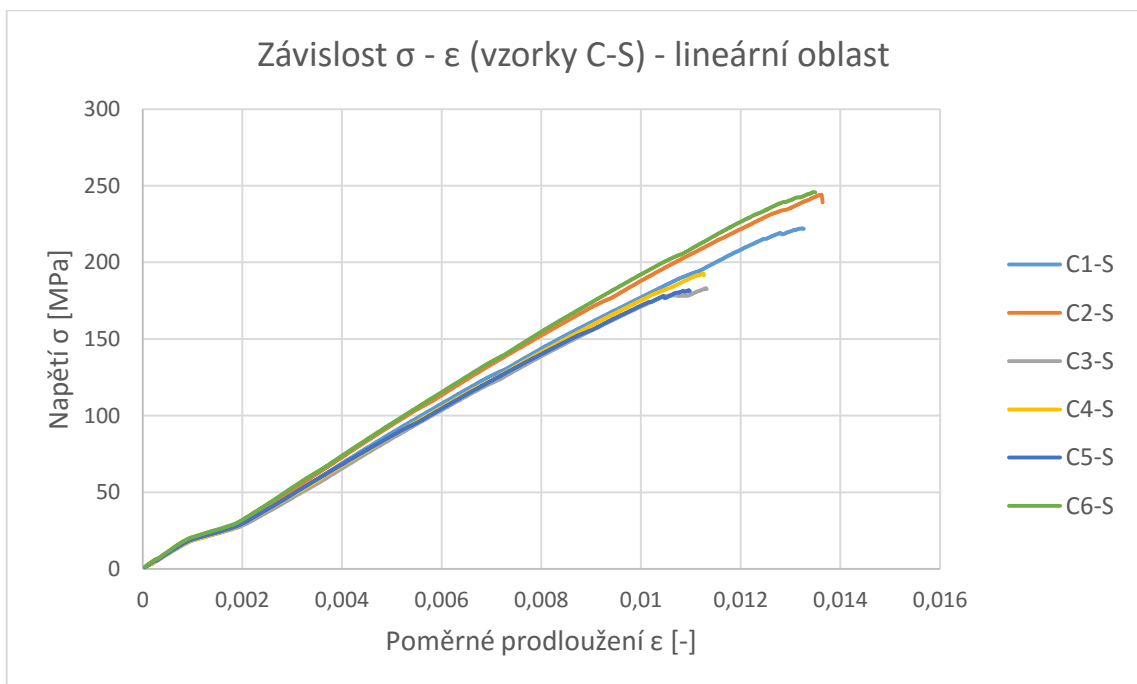
Graf 18: Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorky B-S – lineární oblast

Vzorky C-S						
	Tloušťka a [mm]	Šířka b [mm]	Pevnost do prvního porušení σ_{pp} [MPa]	Mez pevnosti σ_m [MPa]	Poměrné prodloužení na mezi pevnosti ϵ_m [%]	Modul pružnosti E [GPa]
1	1,28	36,06	222,2	222,2	1,3	19,862
2	1,23	35,95	244,2	244,2	1,4	21,328
3	1,26	35,86	183,1	243,0	1,7	19,393
4	1,27	35,68	192,8	246,4	1,6	19,222
5	1,25	35,62	181,9	245,9	1,7	19,129
6	1,19	36,09	245,9	245,9	1,4	20,998
Stř. hod.	1,25	35,88	211,7	241,3	1,5	19,989
Směr odch.	0,03	0,18	27,1	8,6	0,2	0,867
Min.	1,19	35,62	181,9	222,2	1,3	19,129
Max.	1,28	36,09	245,9	246,4	1,7	21,328
Medián	1,26	35,91	207,5	245,1	1,5	19,628

Tabulka 13: Základní naměřená data pro vzorky série C-S



Graf 19: Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorky C-S

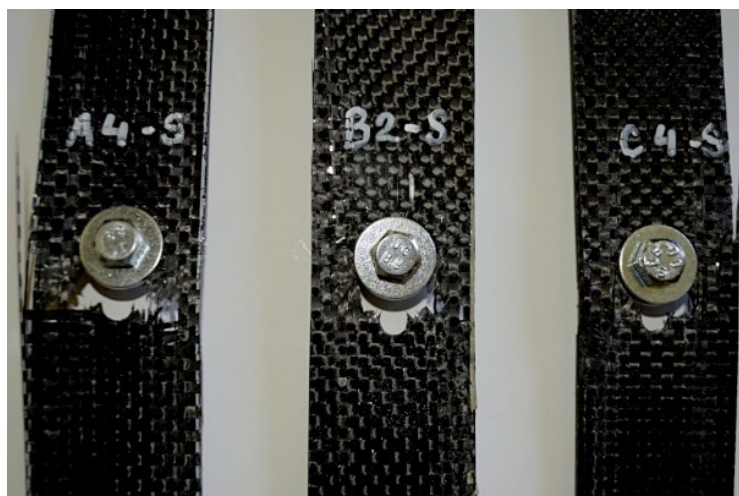


Graf 20: Závislost napětí na poměrném prodloužení pro vzorky C-S – lineární oblast

I v případě vzorků se šroubovým spojem docházelo převážně k lomu s označením MGM. Pouze u vzorku A1-S došlo k porušení v oblasti nad spodní čelistí, cca do vzdálenosti jedné šířky vzorku (typové označení MWB). Z tohoto důvodu byl vzorek A1-S vyřazen ze statistiky.



Obrázek 67: Vzhled lomů vzorků A4-S, B2-S a C4-S



Obrázek 68: Detail lomů vzorků A4-S, B2-S a C4-S



Obrázek 69: Detail vzorku A1-S s lomem mimo šroubový spoj

3.4.3 Vzorky s přeplátovaným šroubovým spojem (A-PS, B-PS a C-PS)

Přeplátované vzorky byly vyrobeny a testovány v souladu s normou ASTM D5961/D5961M – 10. Ta popisuje několik různých metod testování, z nichž byla vybrána metoda B. Vzorek testovaný touto metodou se skládá ze dvou destiček spojených šroubovým spojem (stejným jako u předchozích vzorků). Na koncích vzorku jsou poté dodatečně přilepeny příložky pro zamezení vzniku ohybového momentu a následuje statická zkouška tahem. Upnutá délka v tomto případě byla 50 mm a délka vzorku mezi čelistmi 134 mm. Rychlost zatěžování byla 2 mm/min, předpětí šroubového spoje 3 Nm. Norma dále stanovuje ukončení testu, pokud dojde k poklesu síly většímu než o 30% nebo dojde-li k celkovému protažení většímu než je polovina průměru

díry (zde byl limit zvýšen na 4 mm). Je to z toho důvodu, aby deformace v místě spoje nebyla zkreslena lomem celého vzorku a ulehčila se tak její identifikace. Nutno ještě poznamenat, že maximální únosnost je stanovena pouze v rámci maximální deformace 4 mm, při které byl test ukončen. Křivky některých vzorků totiž naznačují, že by při dalším zatěžování docházelo k dalšímu růstu napětí. V případě testování až do porušení by však test trval příliš dlouho. Z tohoto důvodu norma stanovuje předčasné zastavení testu, což bylo provedeno i zde.



Obrázek 70: Boční pohled na vzorek B5-PS před testováním



Obrázek 71: Vzorek B5-PS před testováním

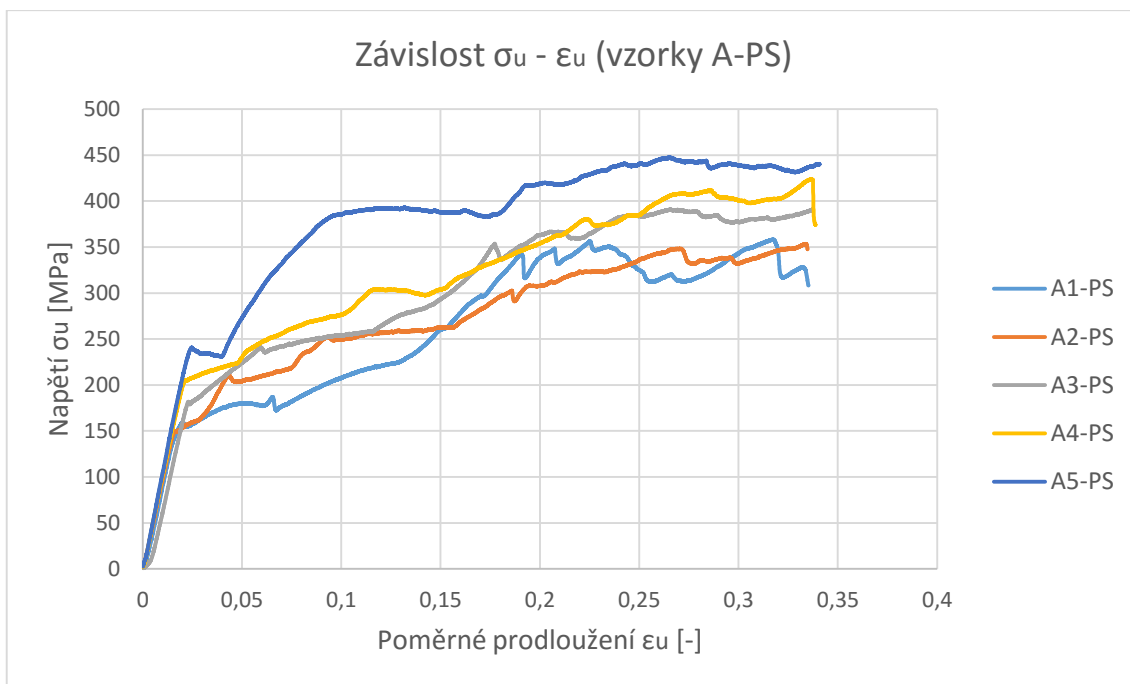


Obrázek 72: Vzorek B5-PS po testování

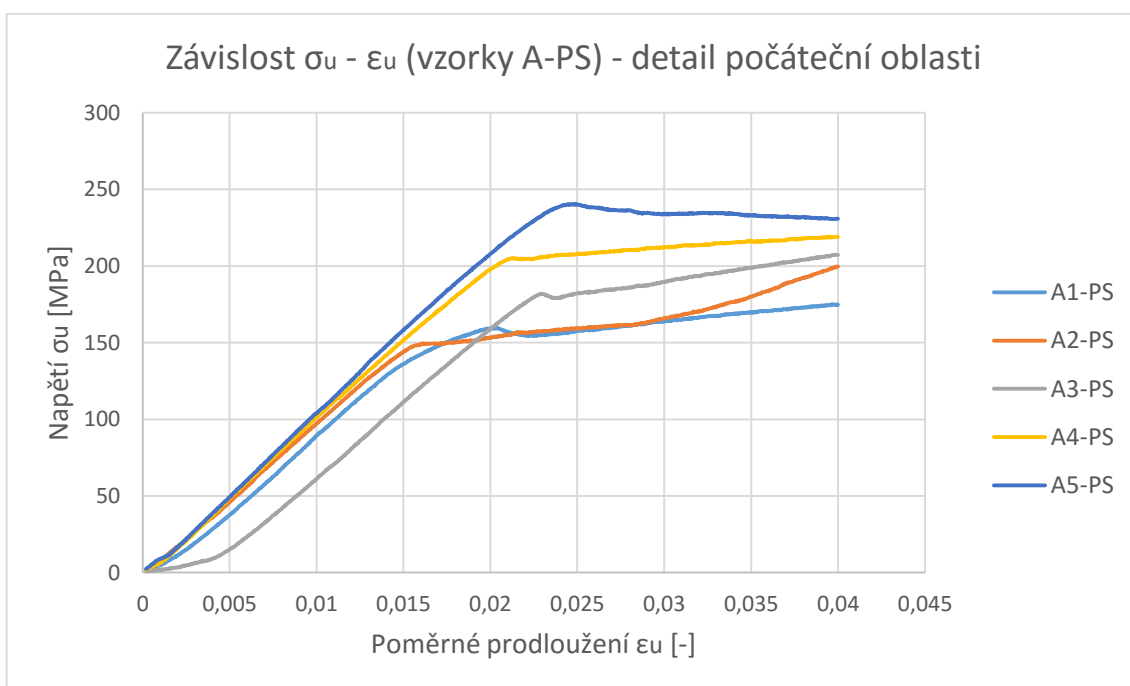
Vzorky A-PS						
	Tloušťka a [mm]	Šířka b [mm]	Únosnost při 2% deformaci σ_u [MPa]	Maximální únosnost σ_{um} [MPa]	Poměrné prodloužení na max. únosnosti ϵ_{um} [%]	Specifický modul pružnosti E_{ps} [GPa]
1	0,46	35,95	172,3	358,3	31,7	10,335
2	0,49	35,88	200,2	353,5	33,4	10,164
3	0,50	35,87	209,4	390,9	33,7	10,037
4	0,50	35,98	220,6	423,7	33,6	10,511
5	0,49	35,78	251,6	447,8	26,6	11,006
6*	0,51	35,89	311,8	417,9	21,3	10,180
Stř. hod.	0,49	35,89	210,8	394,8	31,8	10,411
Směr odch.	0,01	0,07	25,9	36,6	2,7	0,338
Min.	0,46	35,78	172,3	353,5	26,6	10,037
Max.	0,50	35,98	251,6	447,8	33,7	11,006
Medián	0,49	35,88	209,4	390,9	33,4	10,335

Tabulka 14: Základní naměřená data pro vzorky série A-PS

*Vzorek 6 (červeně vyznačený) byl vyřazen ze statistiky.

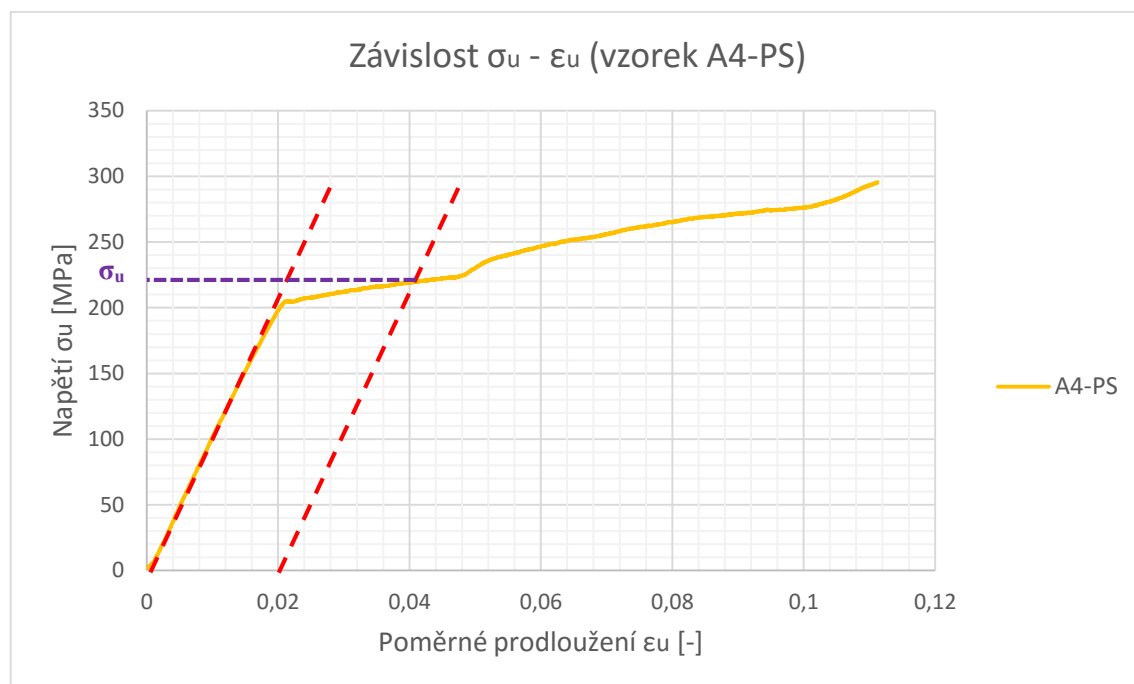


Graf 21: Závislost únosnosti spoje na poměrném prodloužení pro vzorky A-PS



Graf 22: Závislost únosnosti spoje na poměrném prodloužení pro vzorky A-PS – detail počáteční oblasti

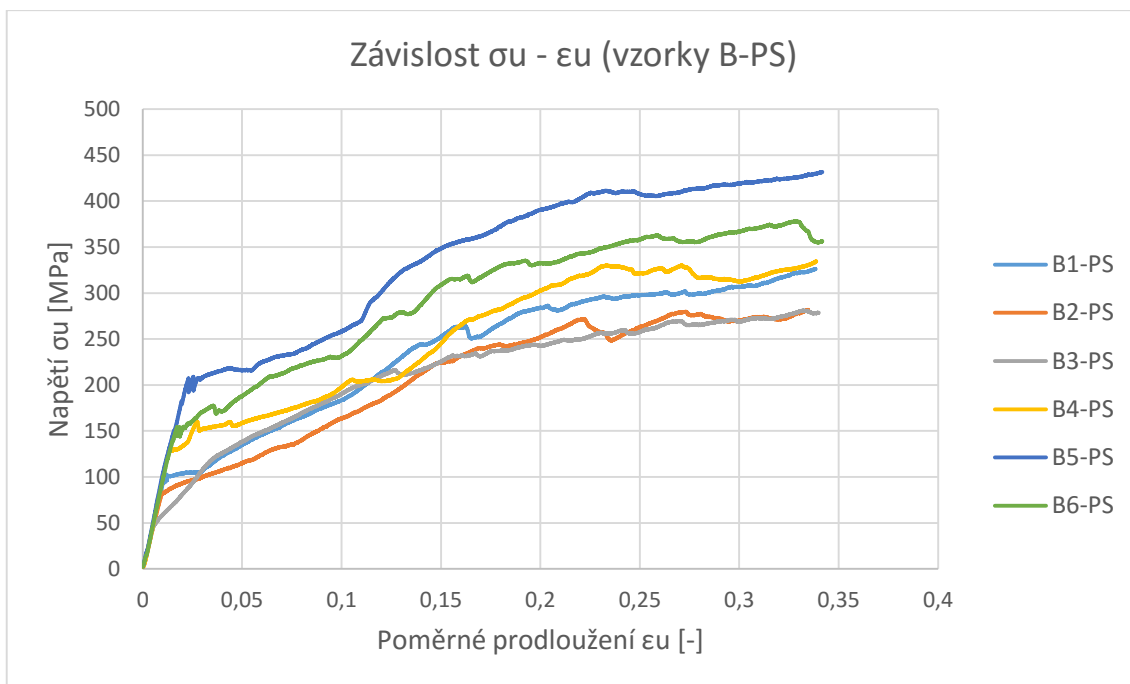
Na následujícím grafu je ukázáno, jakým způsobem norma stanovuje postup určení hodnoty únosnosti spoje při 2% deformaci (určováno vždy z počáteční lineární části grafu).



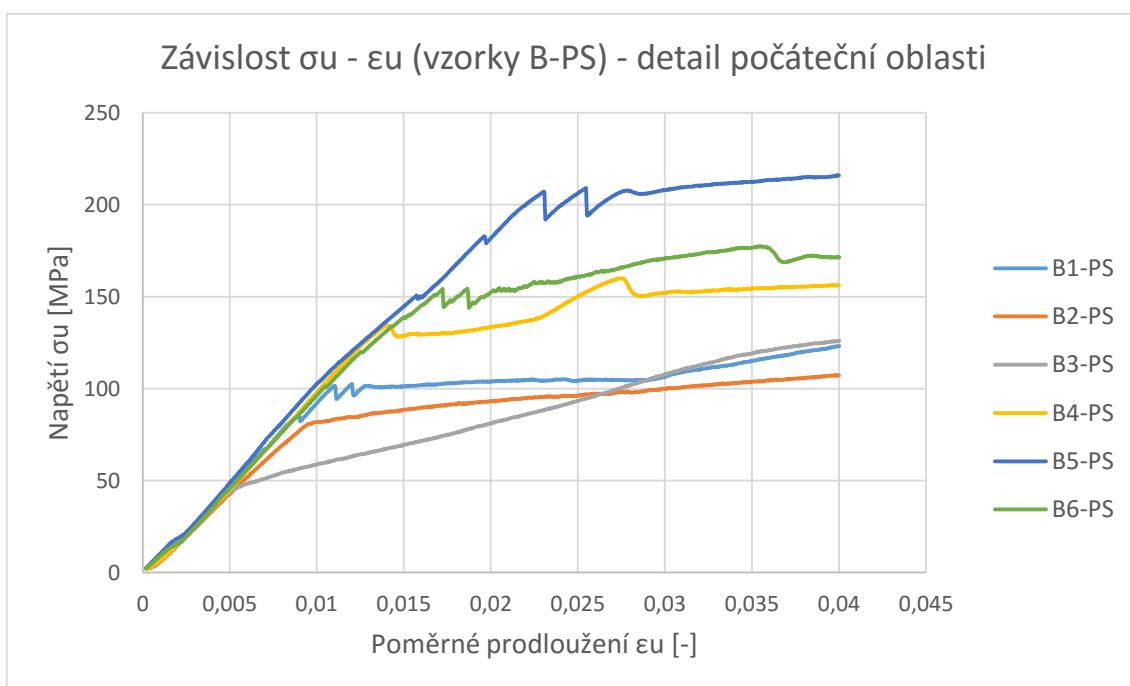
Graf 23: Stanovení únosnosti při 2% deformaci u vzorku A4-PS

Vzorky B-PS						
	Tloušťka a [mm]	Šířka b [mm]	Únosnost při 2% deformaci σ_u [MPa]	Maximální únosnost σ_{um} [MPa]	Poměrné prodloužení na max. únosnosti ϵ_{um} [%]	Specifický modul pružnosti E_{ps} [GPa]
1	0,93	36,05	109,1	326,2	33,8	10,367
2	0,94	36,01	101,8	281,7	33,5	8,851
3	0,95	36,03	110,0	281,1	33,2	9,199
4	0,85	35,96	154,3	334,7	33,9	10,390
5	0,96	35,91	216,7	431,7	34,2	10,813
6	0,89	36,03	175,8	377,9	32,8	10,172
Stř. hod.	0,92	36,00	144,6	338,9	33,6	9,965
Směr odch.	0,04	0,05	41,9	53,1	0,5	0,699
Min.	0,85	35,91	101,8	281,1	32,8	8,851
Max.	0,96	36,05	216,7	431,7	34,2	10,813
Medián	0,94	36,02	132,2	330,5	33,7	10,270

Tabulka 15: Základní naměřená data pro vzorky série B-PS



Graf 24: Závislost únosnosti spoje na poměrném prodloužení pro vzorky B-PS

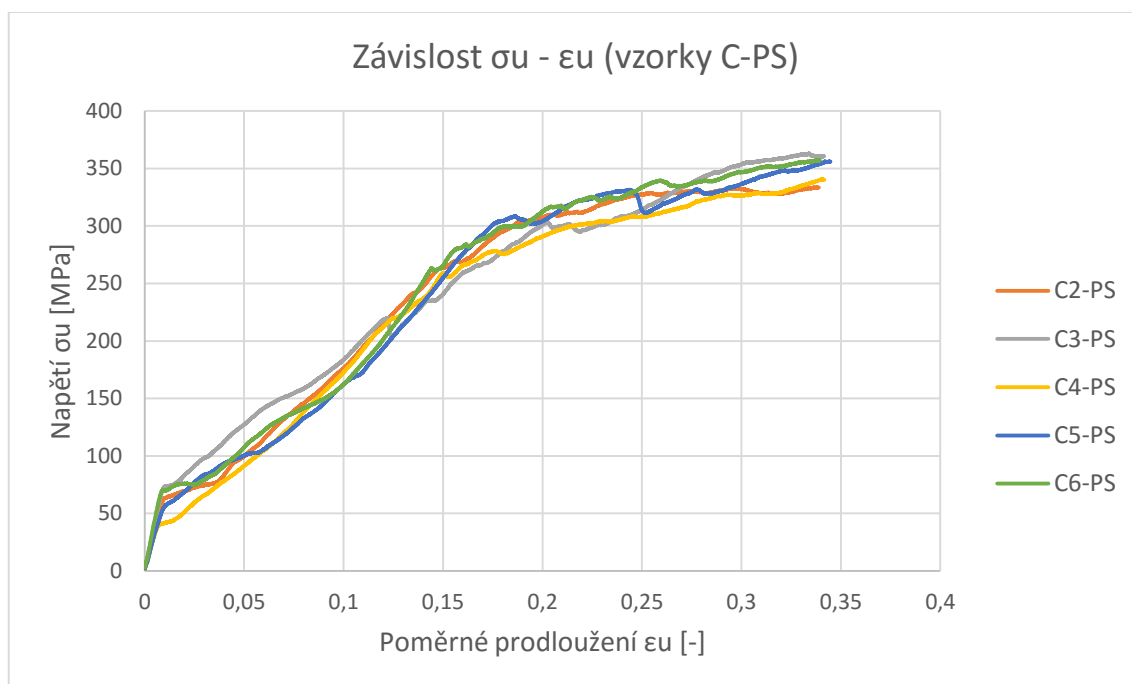


Graf 25: Závislost únosnosti spoje na poměrném prodloužení pro vzorky B-PS – detail počáteční oblasti

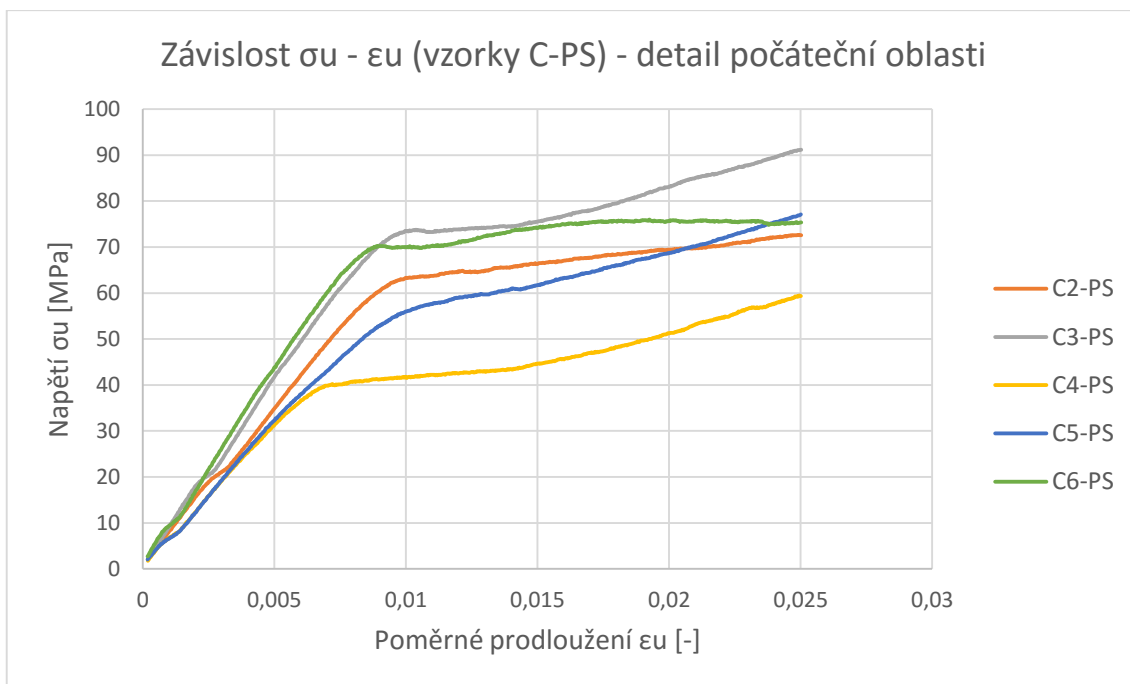
Vzorky C-PS						
	Tloušťka a [mm]	Šířka b [mm]	Únosnost při 2% deformaci σ_u [MPa]	Maximální únosnost σ_{um} [MPa]	Poměrné prodloužení na max. únosnosti ϵ_{um} [%]	Specifický modul pružnosti E_{ps} [GPa]
1*	1,36	36,03	257,0	371,7	33,3	7,847
2	1,41	36,06	74,9	333,6	33,7	7,205
3	1,35	35,98	102,5	363,0	33,4	8,571
4	1,36	35,96	66,9	340,7	34,0	5,351
5	1,41	35,86	87,6	356,1	34,4	5,562
6	1,21	36,02	77,7	357,1	33,9	8,759
Stř. hod.	1,35	35,98	81,9	350,1	33,9	7,090
Směr odch.	0,07	0,07	12,2	11,1	0,3	1,439
Min.	1,21	35,86	66,9	333,6	33,4	5,351
Max.	1,41	36,06	102,5	363,0	34,4	8,759
Medián	1,36	35,98	77,7	356,1	33,9	7,205

Tabulka 16: Základní naměřená data pro vzorky série C-PS

*Vzorek 1 (červeně vyznačený) byl vyřazen ze statistiky.



Graf 26: Závislost únosnosti spoje na poměrném prodloužení pro vzorky C-PS

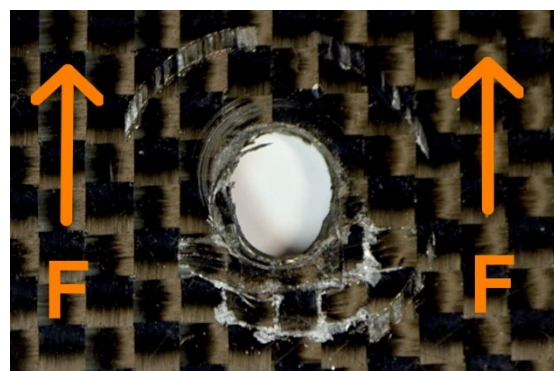


Graf 27: Závislost únosnosti spoje na poměrném prodloužení pro vzorky C-PS – detail počáteční oblasti

Stejně jako u předchozích norem i zde je součástí postupu hodnocení deformace/porušení díry. U všech vzorků probíhal stejný typ, tedy postupné otláčení a deformace části díry, o kterou se šroub při zatížení opíral, bez vzniku výrazných lomů a trhlin. Dle tabulky obsažené v normě je označení tohoto typu porušení BII.



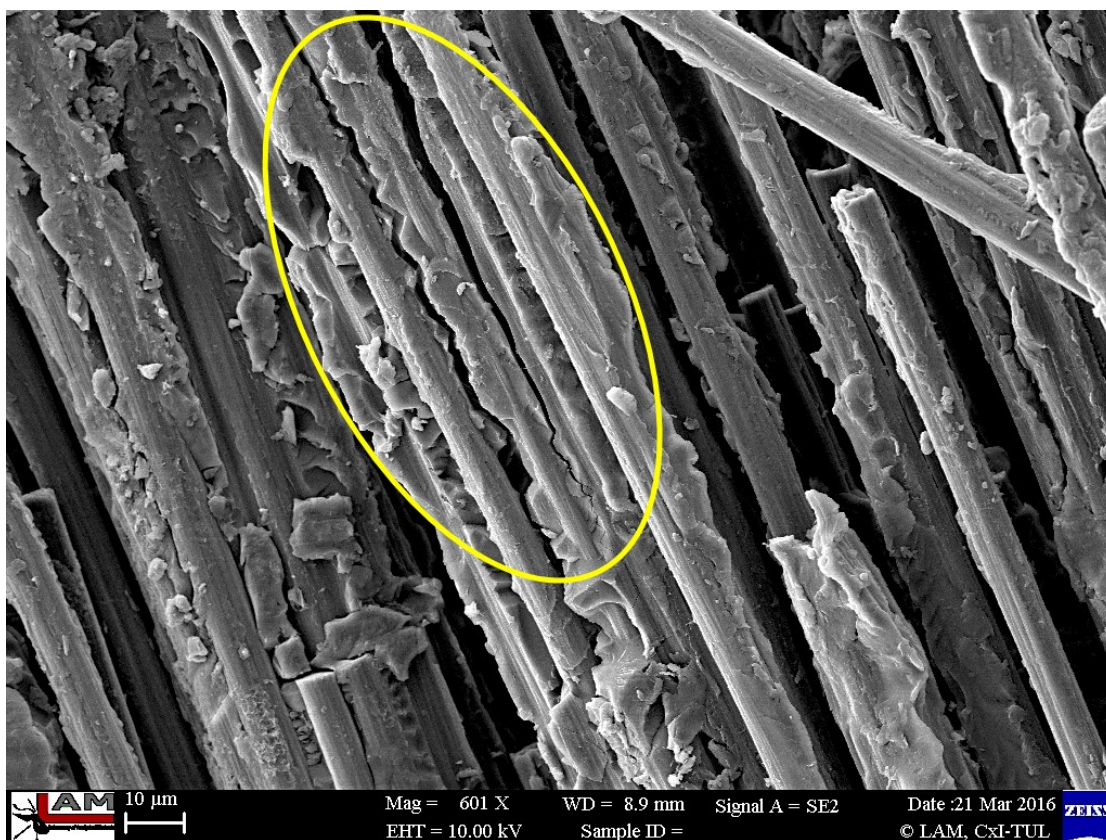
Obrázek 73: Deformovaná oblast díry vzorku C2-PS s vyznačeným směrem působení síly při tahové zkoušce



Obrázek 74: Detail deformované díry vzorku C2-PS s vyznačeným směrem působení síly při tahové zkoušce

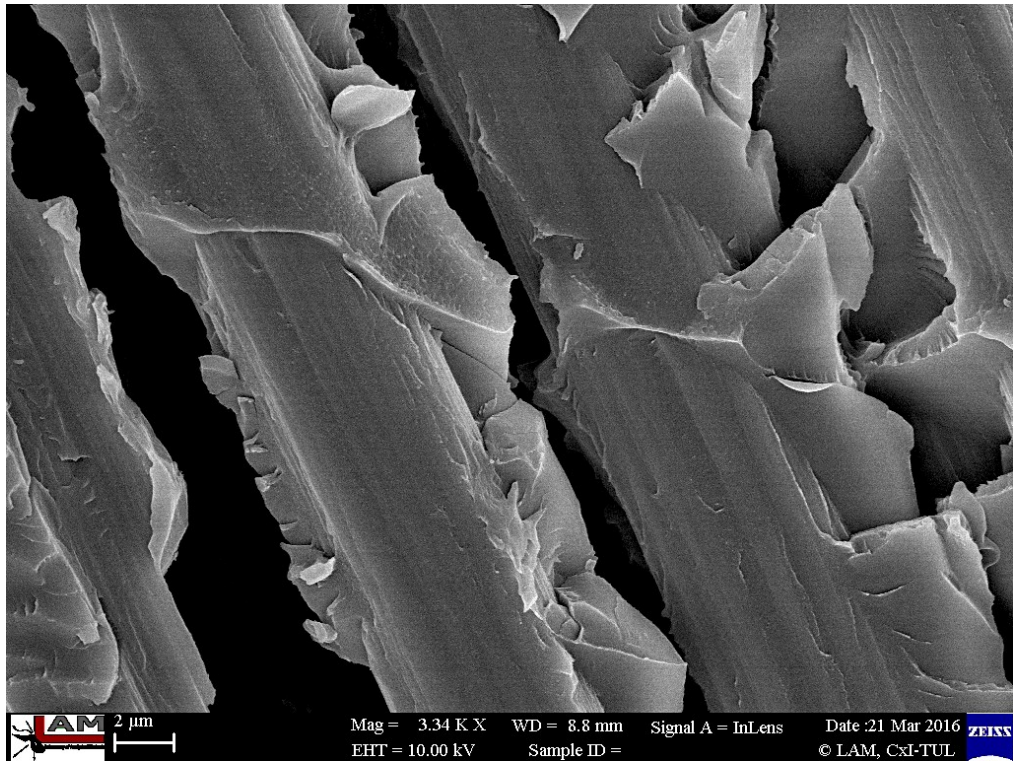
3.5 Mikroskopické hodnocení vybraných vzorků

Pro ověření smáčivosti uhlíkových vláken epoxidovou pryskyřicí a pro zhodnocení kvality vzniklého mezifázového rozhraní bylo provedeno pozorování několika částí vzorku s využitím elektronové mikroskopie. Reprezentativním vzorkem byl zvolen vzorek s označením B3 ze kterého bylo pomocí nůžek a štípacích kleští odebráno několik malých vzorků jak z oblasti lomu, tak z oblasti nepoškozeného povrchu. Tyto vzorky byly po umístění na manipulační terčíky následně pokoveny vrstvou platiny o tloušťce 2 nm na kombinovaném naprašovacím přístroji Quorum Q15R ES pro zlepšení kvality pozorování. Dále následovalo již samotné pozorování na elektronovém mikroskopu Carl Zeiss ULTRA Plus.

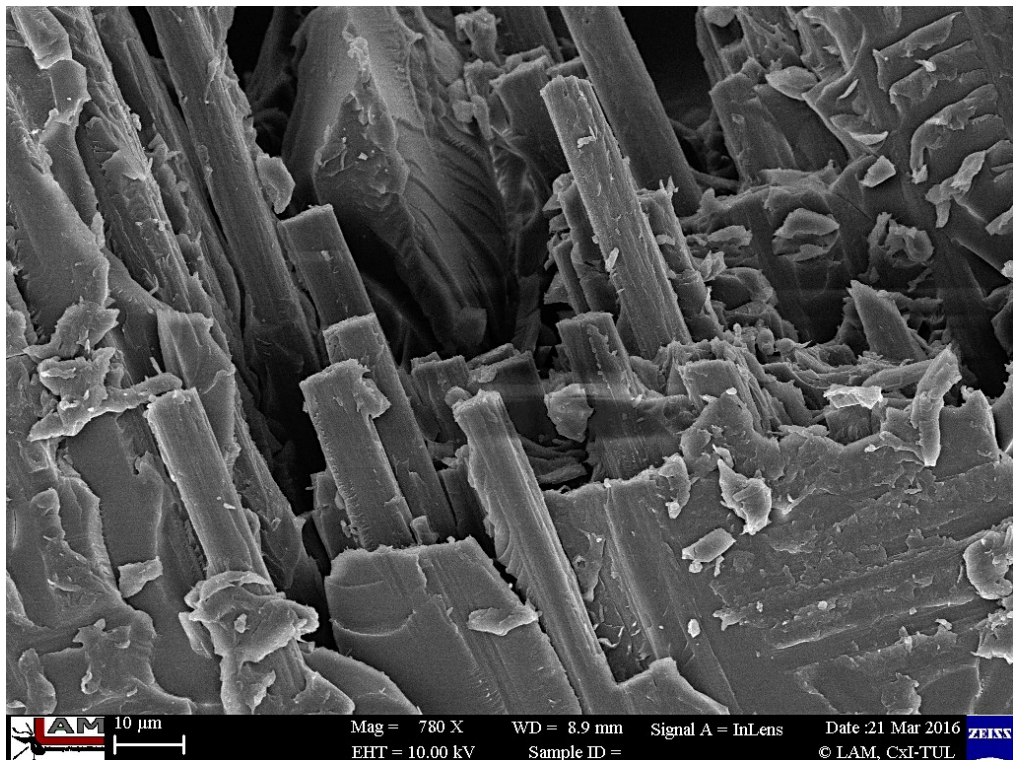


Obrázek 75: Uhlíková vlákna v oblasti lomu

Obrázek 75 byl pořízen z oblasti lomové plochy a jsou na něm jasně patrná jednotlivá uhlíková vlákna, jež se od sebe při lomu oddělila. Ve žlutě vyznačené oblasti lze vidět trhlinu, jež vznikla v matrici mimo fázové rozhraní mezi vláknem a matricí. To naznačuje velmi dobrou vzájemnou soudržnost složek. Na obrázku 76 je poté vidět detail vláken pokrytých pryskyřicí, kde je patrný křehký lom pryskyřice. Fázové rozhraní mezi pryskyřicí a vlákny je poměrně nevýrazné – matrice obaluje vlákno, což opět naznačuje velmi dobrou soudržnost.



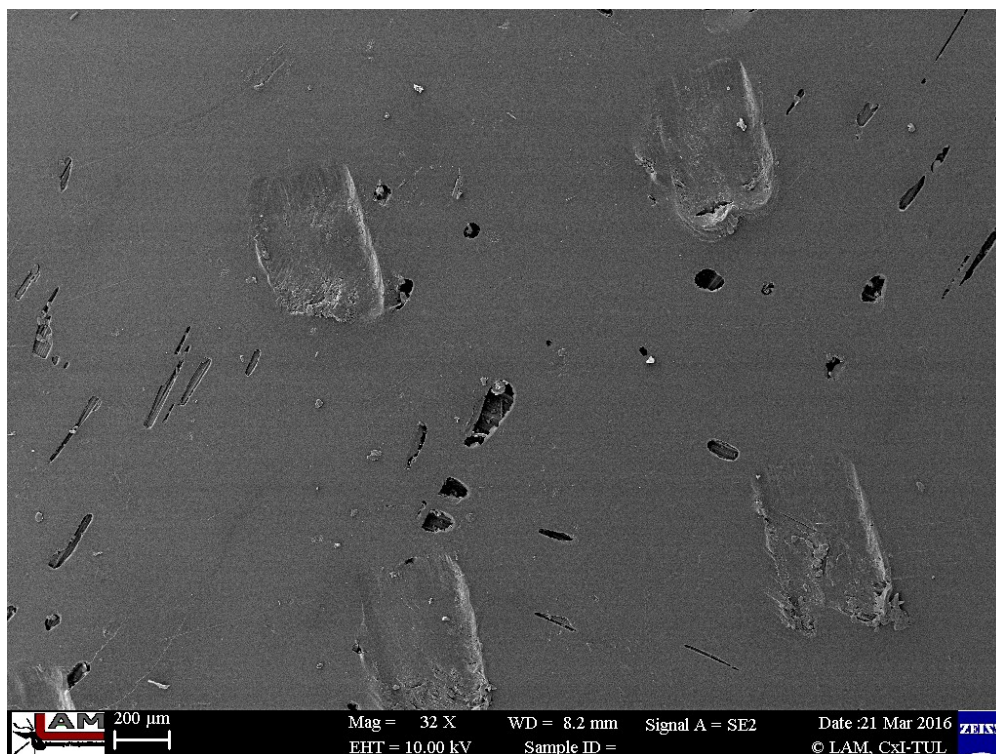
Obrázek 76: Detail pokrytí uhlíkových vláken pryskyřicí



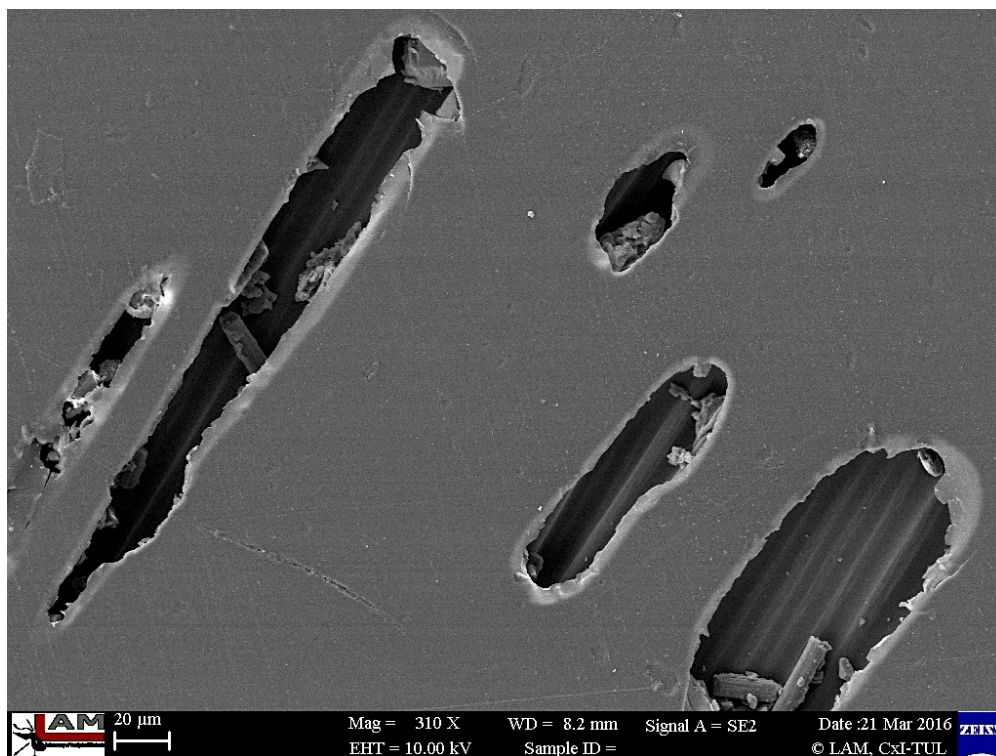
Obrázek 77: Zpřetrhaná vlákna částečně vytržená z matrice

Na obrázku 77 jsou vidět zpřetrhaná vlákna, jejichž konce byly při lomu vytrženy z matrice. Následující obrázky (78 a 79) ukazují kvalitu povrchu vyrobených vzorků. Je zde vidět

množství povrchových pórů, jejichž příčinou byla pravděpodobně přítomnost vzduchových bublin v pryskyřici při laminaci. Rozměr těchto pórů je velice malý, v řádu desítek μm . Čtyři pravidelné otlačené plochy na obrázku 78 jsou stopy po upínacích čelistech trhačského stroje.



Obrázek 78: Hladká plocha povrchu s viditelnými póry a stopami po upínacích čelistech



Obrázek 79: Detail povrchových pórů

4 Výsledky a jejich diskuse

Pro finální přehled všech zjištěných výsledků poslouží následující tabulka, která shrnuje střední hodnoty a směrodatné odchylky základních mechanických vlastností pro všechny zkoušené typy vzorků.

	A		B		C	
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
σ_{pp} [MPa]	184,3	6,5	168,6	19,6	193,4	15,3
σ_m [MPa]	254,3	13,7	193,6	3,8	222,6	8,2
ε_m [%]	2,1	0,1	2,0	0,3	1,7	0,1
E [GPa]	13,248	0,674	14,413	1,287	20,440	0,821

Tabulka 17: Střední hodnoty a směrodatné odchylky základních mechanických vlastností vzorků s prázdnou dírou (A, B a C)

Vysvětlivky k tabulkám 14 a 15: σ_{pp} je pevnost do prvního výrazného porušení, σ_m je mez pevnosti, ε_m je poměrné prodloužení na mezi pevnosti a E je modul pružnosti v tahu.

	A-S		B-S		C-S	
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
σ_{pp} [MPa]	211,9	31,1	172,5	31,2	211,7	27,1
σ_m [MPa]	222,7	36,6	192,3	14	241,3	8,6
ε_m [%]	1,3	0,1	1,2	0,1	1,5	0,2
E [GPa]	17,458	2,012	19,340	0,806	19,989	0,867

Tabulka 18: Střední hodnoty a směrodatné odchylky základních mechanických vlastností vzorků s plnou dírou (A-S, B-S a C-S)

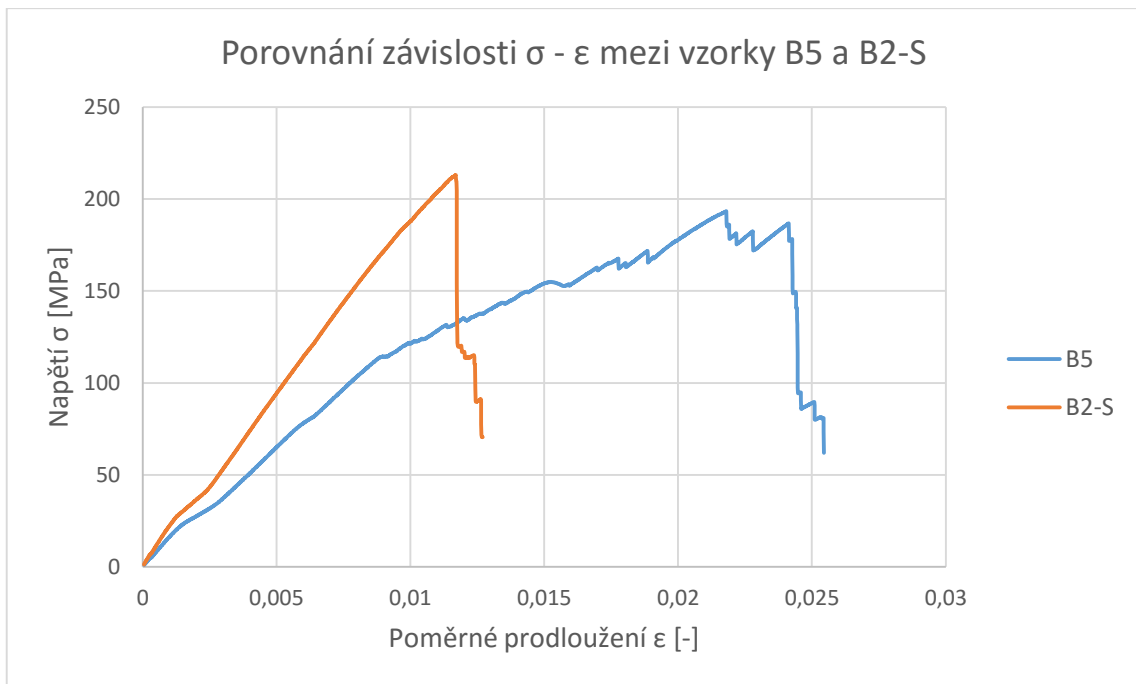
Vysvětlivky k tabulce 16: σ_u je únosnost při 2% deformaci, σ_{um} je maximální únosnost při deformaci do 4 mm (34%), ε_{um} je poměrné prodloužení na maximální únosnosti a E_B je specifický modul pružnosti (angl. bearing chord stiffness).

	A-PS		B-PS		C-PS	
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
σ_u [MPa]	210,8	25,9	144,6	41,9	81,9	12,2
σ_{um} [MPa]	394,8	36,6	338,9	53,1	350,1	11,1
ε_{um} [%]	31,8	2,7	33,6	0,5	33,9	0,3
E_{ps} [GPa]	10,411	0,338	9,965	0,699	7,090	1,439

Tabulka 19: Střední hodnoty a směrodatné odchylky základních mechanických vlastností vzorků s přeplátovaným šroubovým spojem (A-PS, B-PS a C-PS)

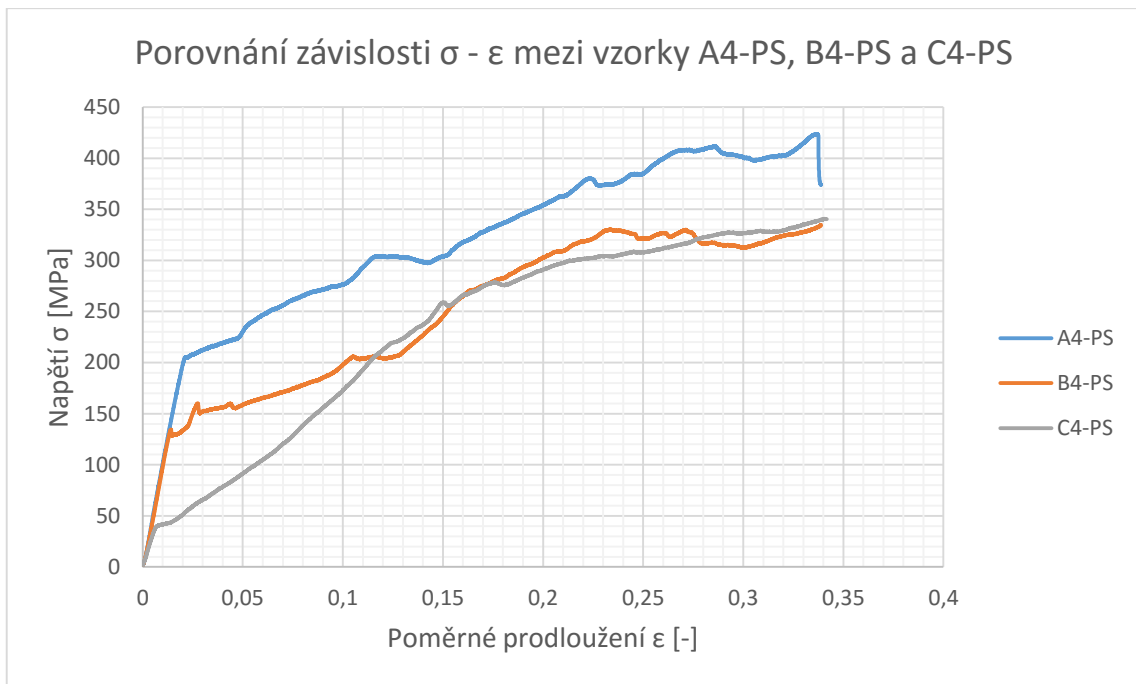
V případě vzorků s prázdnou dírou (A, B a C) vycházela pevnost v tahu do prvního výrazného porušení σ_{pp} nejlépe u vzorků C (6 vrstev tkaniny), se střední hodnotou 193 MPa. Rozdíl oproti tloušťkám A a B však nebyl tak výrazný (do 15%) a s přihlédnutím k rozptylu hodnot a velikosti směrodatné odchylky lze konstatovat, že pevnost σ_{pp} je u všech tří tloušťek vzorků téměř shodná. V případě celkové mezi pevnosti v tahu naopak vyniká skupina vzorků A se střední hodnotou 254 MPa. Vzorky C mají mez pevnosti nižší o cca 13%, vzorky B pak o cca 25%. Jak již ale bylo zmíněno, pokud je celková mez pevnosti v tahu u tohoto typu kompozitů vyšší než pevnost při prvním porušení, není to pro návrh součástí v praxi příliš použitelná hodnota. V takovém případě se již totiž nachází v oblasti, kdy dochází k nekontrolovatelnému porušování vláken a dochází k dějům, které lze těžko předvídat. Modul pružnosti v tahu rostl s rostoucí tloušťkou vzorku, kde nárůst u vzorků B proti A byl cca 10% a nárůst u vzorků C proti A cca 55%.

Porovnáme-li výsledky vzorků s prázdnou dírou (A, B a C) se vzorky se šroubovým spojem (A-S, B-S a C-S) zjistíme, že u vzorků A-S a C-S došlo k mírnému nárůstu pevnosti v tahu do prvního porušení. Mezi vzorky A a A-S je nárůst o 15% a mezi C a C-S o 10%. Modul pružnosti v tahu též vzrostl, konkrétně o cca 30% u vzorků A-S a B-S. U vzorků C-S zůstal stejný. Nárůst modulu je též patrný na nižších hodnotách poměrného prodloužení na mezi pevnosti. Při pohledu na diagramy z tahové zkoušky (viz Graf 20) je vidět, že přítomnost šroubu s podložkami způsobila eliminaci prvotních, méně výrazných poklesů v pevnosti, a došlo tak k prodloužení a vyhlazení lineární části diagramu. To přisuzují jednak tlakovému působení podložek a zároveň tomu, že šroub zabraňuje výrazným deformacím díry. Následný pokles pevnosti po dosažení σ_{pp} byl velmi výrazný a ve většině případů již nedošlo k jejímu dalšímu růstu. Proto je u většiny vzorků σ_{pp} shodné s celkovou mezí pevnosti σ_m .



Graf 28: Porovnání diagramů $\sigma - \epsilon$ mezi vzorky B5 a B2-S

Vzorky s přeplátovaným spojem (A-PS, B-PS a C-PS) byly stejně jako předchozí vzorky namáhány na tah, nicméně k přenosu zatížení docházelo odlišným způsobem. U přeplátovaného spoje je totiž zatížení přenášeno pouze styčnou plochou mezi šroubem a dírou. Hodnotí se tak únosnost spoje při konkrétní deformaci (2% dle normy), maximální únosnost a specifický modul, jež je v normě označován jako „bearing chord stiffness“. Naměřené hodnoty ukazují poměrně výrazný pokles únosnosti spoje σ_u s rostoucí tloušťkou laminátu. Nejvyšší hodnotu vykazují vzorky A-PS s průměrnou hodnotou 211 MPa. U vzorků B-PS je pokles σ_u o 30% a u C-PS o 60% oproti vzorkům A-PS (viz Graf 21). Modul E_B je též nejvyšší u vzorků A-PS a s rostoucí tloušťkou klesá. Tento jev může mít více vysvětlení. Jedním z nich je vznikající přídatné ohybové napětí. Ačkoliv byly u zkoušených přeplátovaných spojů v místě upnutí do čelistí použity příložky, které by měly případný vznik ohybového napětí eliminovat, je možné, že určitý ohyb přesto vzniká. Silnější a tužší vzorek může poté být tímto přídatným napětím výrazně oslabován. Dalším vysvětlením by mohla být delaminace, neboli ztráta soudržnosti mezi jednotlivými vrstvami tkaniny. S rostoucí tloušťkou totiž roste počet vrstev kompozitu a tím i počet rozhraní mezi těmito vrstvami. U silnějšího vzorku je tedy větší riziko, že v určité vrstvě k delaminaci dojde. To zároveň částečně souvisí s třetím vysvětlením a tím je jednoduše větší množství nedokonalostí a pórů ve struktuře kompozitu. Vzhledem k výrobní technologii ruční laminací totiž lze předpokládat, že z vícevrstevného laminátu je daleko obtížnější dostat vzduchové bublinky pryč. Vyšší porozita vytvrzeného kompozitu může poté výrazně snížit jeho mechanické vlastnosti.



Graf 29: Porovnání diagramů σ - ϵ mezi vzorky A4-PS, B4-PS a C4-PS

Chování materiálů tohoto typu je obecně velice složité a stejně tak obtížná je i jejich výroba, a to zejména tak, aby byla zajištěna určitá opakovatelnost a garance mechanických vlastností. Výsledky experimentů celkově ukazují hodnoty s přijatelnými směrodatnými odchylkami, což potvrzuje vhodnost použité výrobní technologie pro výrobu kompozitních tenkostěnných desek. Je tak možné efektivně vyrábět vzorky nejen s uhlíkovými vlákny, ale i s ostatními typy výztuže jako jsou skleněná, aramidová, přírodní či jiná vlákna.

5 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo testování vlivu šroubového spoje na spojované díly z uhlíkového kompozitu s polymerní matricí. Toto téma vzniklo v souvislosti s nově vznikajícím univerzitním týmem Studentské formule, kde se předpokládá značné využití uhlíkového kompozitu pro výrobu kapotáže a dalších aerodynamických prvků. V první fázi byl zvolen materiál kompozitu a to s ohledem na případnou budoucí aplikaci pro výrobu rozměrné tenkostěnné kapotáže. Kritériem tedy byla běžná dostupnost a nízká cena použitých materiálů. Pro epoxidovou pryskyřici byla navíc podmínkou dlouhá doba zpracovatelnosti, pro uhlíkovou výztuž byla pro lepší zpracovatelnost požadována forma tkaniny. Dle těchto kritérií byla zvolena epoxidová pryskyřice LH160 s tužidlem H287 a uhlíková tkanina o plošné hmotnosti 160 g/m².

Pro testování byly zvoleny normy *ASTM D3039/D3039M-08*, *ASTM D5766/D5766M-11*, *ASTM D6742/D6742M-07* a *ASTM D5961/D5961M-10*. Tyto normy se zabývají vlivem přítomnosti prázdné a plné díry ve vzorku z kompozitu s polymerní matricí a též hodnocením přeplátovaného šroubového spoje vzorků z téhož materiálu. Dle těchto norem byly stanoveny požadované rozměry vzorků pro následnou výrobu.

Výroba zkušebních vzorků spočívala nejdříve ve výrobě větších desek pomocí ruční kontaktní laminace ve třech různých tloušťkách, označených A (2 vrstvy tkaniny), B (4 vrstvy tkaniny) a C (6 vrstev tkaniny). Jejich vytvrzování probíhalo v prostředí s mírným podtlakem a za pokojové teploty mezi dvěma PMMA deskami, zatíženými závažím o hmotnosti 30 kg. Z těchto desek byly poté vyříznuty zkušební vzorky daných rozměrů. Tato metoda výroby tenkých vzorků se ukázala jako velmi efektivní a lze ji doporučit i pro kompozity s jinými typy výztuže.

Testovány byly tři různé typy vzorků ve třech různých tloušťkách dle zmíněných norem. Vzorky s prázdnou dírou (A, B a C), vzorky s plnou dírou (A-S, B-S a C-S) a vzorky s přeplátovaným šroubovým spojem (A-PS, B-PS a C-PS). U vzorků s prázdnou a plnou dírou byla měřena pevnost do prvního poklesu napětí, mez pevnosti, poměrné prodloužení na mezi pevnosti a modul pružnosti v tahu. Rozdíl v pevnostech mezi jednotlivými tloušťkami nebyl nijak výrazný, nicméně vzorky tloušťky C vykazovaly oproti vzorkům tloušťky A cca o 55% vyšší modul pružnosti v tahu a tedy i vyšší tuhost. U vzorků s plnou dírou došlo oproti vzorkům s prázdnou dírou k nárůstu σ_{pp} o 10 až 15%. Modul pružnosti v tahu vzrostl u vzorků A-S a B-S o 30%. Přítomnost šroubového spoje s podložkami tak způsobila zvýšení celkové tuhosti a vyhlazení lineární části zatěžovací charakteristiky.

U přeplátovaných spojů (A-PS, B-PS a C-PS) byl zjištěn výrazný vliv tloušťky spojovaných dílů na únosnost spoje. Nejlepší hodnoty únosnosti a specifického modulu pružnosti vykazovaly vzorky s nejnižší tloušťkou, tedy A-PS. S rostoucí tloušťkou tyto hodnoty klesají, v případě

únosnosti vždy o cca 30%. To je přisuzováno větší náchylnosti silnějších vzorků ke vzniku přídatného ohybového napětí při tahovém zatížení, delaminaci případně vyššímu obsahu pórů a jiných nedokonalostí vlivem použité výrobní technologie.

Shrnutím veškerých získaných poznatků lze konstatovat, že pro zajištění maximální únosnosti šroubových spojů kompozitních dílů s polymerní matricí je nutné zajistit kvalitní vyvrtání díry tak, aby nedošlo k výrazné delaminaci povrchových vrstev. Dále je třeba zajistit dostatečnou vzdálenost díry od okraje spojovaného dílu tak, aby při zatížení nedošlo k vytržení šroubového spoje či vzniku praskliny směrem k okraji dílu. Zde byl použit poměr vzdálenosti středu díry od okraje E a průměru díry D , tedy $E/D = 3$, což zajistilo příznivou deformaci díry postupným otlačením a lze proto tento poměr doporučit. Velikost vůle mezi šroubem a dírou hraje též významnou roli a snahou by mělo být snížit tuto vůli na minimum. Volbou dostatečně velkých podložek pak zajistíme optimální rozložení tlaku šroubového spoje a zabráníme tak vzniku případných prasklin v kompozitu. Jelikož podstatou šroubových spojů je jejich rozebíratelnost, je nutné pro kompozitní díly tyto spoje správně navrhnout, a to zejména u opakovaně montovaných a demontovaných dílů jako je např. kapotáž studentské formule.

Je také zřejmé, že řešená problematika je poměrně široká, a v případě šroubových spojů kompozitních dílů lze dále experimentovat s různými materiály výztuže či matrice, různými skladbami vrstev kompozitu či odlišnou konfigurací šroubového spoje a najít tak vhodná řešení pro konkrétní aplikace.

6 Zdroje

- [1] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-720-4248-3.
- [2] DAŘOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [3] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. *Vláknové kompozity: celostátní vysokoškolská příručka pro vysoké školy technické*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987, 294 s.
- [4] SMITH, Faye. *The use of composites in aerospace: Past, present and future challenges*. [online prezentace]. Newbury, UK: Avalon Consultancy Services Ltd, [cit. 2016-01-16]. Dostupné z: <https://avaloncsl.files.wordpress.com/2013/01/avalon-the-use-of-composites-in-aerospace-s.pdf>
- [5] SELVARAJU, S. a S. ILAIYAVEL. Applications of composites in marine industry. *Journal of Engineering Research and Studies* [online]. 2011, 2(2), 3 [cit. 2016-01-15]. E-ISSN 0976-7916. Dostupné z: <http://www.technicaljournalonline.com/jers/VOL%20II/JERS%20VOL%20II%20ISSUE%20II%20APRIL%20JUNE%202011/ARTICLE%2019%20JERS%20VOL%20II%20ISSUE%20II%20APRIL-%20JUNE%202011.pdf>
- [6] KRAUS, Thomas a Michael KÜHNEL. *Composites market report 2015: Market developments, trends, outlook and challenges* [online]. 2015, s. 44 [cit. 2016-01-21]. Dostupné z: http://www.eucia.eu/userfiles/files/Composites_Market%20Report_2015.pdf
- [7] *Aviation maintenance technician handbook: Airframe* [online]. 1. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2012, s. 588 [cit. 2016-01-23]. FAA-H-8083-31. Dostupné z: https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_airframe_handbook/media/amt_airframe_voll.pdf

- [8] *Plastics and polymer composites: Technology roadmap for automotive markets* [online]. American Chemistry Council, 2014, s. 64 [cit. 2016-01-24].
Dostupné z: <https://plastics-car.com/Tomorrows-Automobiles/Plastics-and-Polymer-Composites-Technology-Roadmap/Plastics-and-Polymer-Composites-Technology-Roadmap-for-Automotive-Markets-Full-Report.pdf>
- [9] PATIL, Praveengouda. *Applications of composite materials in the automobile industry* [online]. 2010 [cit. 2016-01-23].
Dostupné z: <https://www.scribd.com/doc/32475280/Composites-in-the-Automobile-Industry>. Seminární práce. University Visvesvaraya, College of Engineering.
- [10] SCHRANK, Marc, Ping GONG a Yingying PAN. Simulation of crushing behavior for automotive composites structures. In: *China Conference of Automotive Safety Technology* [online]. Baoding, Hebei, China, 2014, s. 8 [cit. 2016-02-02].
DOI: 10.13140/2.1.2424.4489. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/265865493_Simulation_of_Crushing_Behavior_for_Automotive_Composites_Structures
- [11] JACOB, G. C., J. F. FELLERS, S. SIMUNOVIC a J. M. STARBUCK. Energy Absorption in Polymer Composites for Automotive Crashworthiness. *Journal of Composite Materials* [online]. 2002, **36**(7), 813-850 [cit. 2016-02-05].
DOI: 10.1177/0021998302036007164. ISSN 0021-9983.
Dostupné z: <http://thyme.ornl.gov/composites/reports/jocm01.pdf>
- [12] Disciplines in Formula Student competition. *Formula Student Germany* [online]. [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/disciplines/>
- [13] SAE INTERNATIONAL. *2016 Formula SAE rules* [online]. 2016 [cit. 2016-02-10].
Dostupné z: http://www.fsaeonline.com/content/2016_FSAE_Rules.pdf
- [14] KELLY, Gordon. *Joining of carbon fibre reinforced plastics for automotive applications* [online]. Stockholm, 2004, 36 s. [cit. 2016-02-23]. ISBN 91-7283-824-8.
Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:9674/FULLTEXT01.pdf>

- [15] CANHAO, Helena a Joao EURICO FONSECA, FÁTIMA VAZ, Maria (ed.). Bone: A composite natural material. In: TESINOVA, Pavla. *Advances in composite materials: Analysis of natural and man-made materials* [online]. InTech, 2011, s. 195-228 [cit. 2016-01-18]. ISBN 978-953-307-449-8.
Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/advances-in-composite-materials-analysis-of-natural-and-man-made-materials/bone-a-composite-natural-material>
- [16] VLACH, Jarmil. *Metodika návrhu a strukturální analýzy kompozitních součástí*. Liberec: VÚTS, a.s., 2015. ISBN 978-80-87184-59-2.
- [17] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-704-3273-X.
- [18] MIGUEL P. DURAO, Luís, Joao MANUEL R.S. TAVARES a Victor HUGO C. DE ALBUQUERQUE. Drilling Damage in Composite Material. *Materials* [online]. 2014, **2014**(7), 3802-3819 [cit. 2016-02-24]. DOI: 10.3390/ma7053802. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/7/5/3802/htm>
- [19] ASTM D3039/D3039M. *Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials*. 8. vydání. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2008. DOI: 10.1520/D3039_D3039M-08.
- [20] ASTM D5766/D5766M. *Standard test method for open-hole tensile strength of polymer matrix composite laminates*. 11. vydání. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2011. DOI: 10.1520/D5766_D5766M-11.
- [21] ASTM D6742/D6742M. *Standard practice for filled-hole tension and compression testing of polymer matrix composite laminates*. 7. vydání. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2007. DOI: 10.1520/D6742_D6742M-07.
- [22] ASTM D5961/D5961M. *Standard test method for bearing response of polymer matrix composite laminates*. 10. vydání. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2010. DOI: 10.1520/D5961_D5961M.

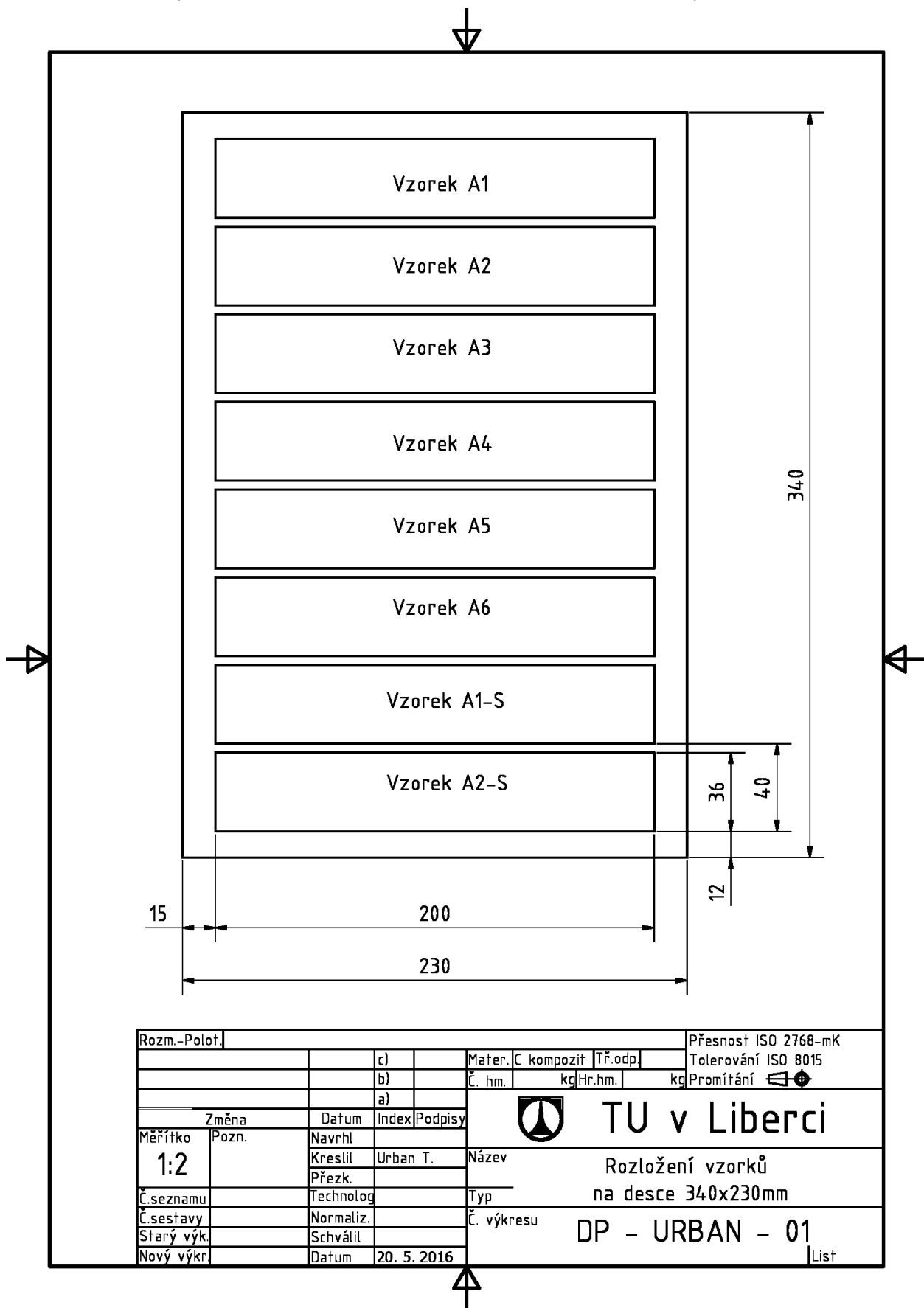
Seznam tištěných příloh

- Příloha A - Výkres rozložení vzorků na desce 340 x 230 mm pro řezání
- Příloha B - Výkres rozložení vzorků na desce 170 x 230 mm pro řezání
- Příloha C - Výkres rozložení vzorků na desce 370 x 290 mm pro řezání
- Příloha D - Technický list uhlíkové tkaniny 160g/m²
- Příloha E - Technický list epoxidové pryskyřice LH 160
- Příloha F - Technický list tužidla H 287
- Příloha G - Technický list separačního vosku TR 104
- Příloha H - Technický list PVA separátoru

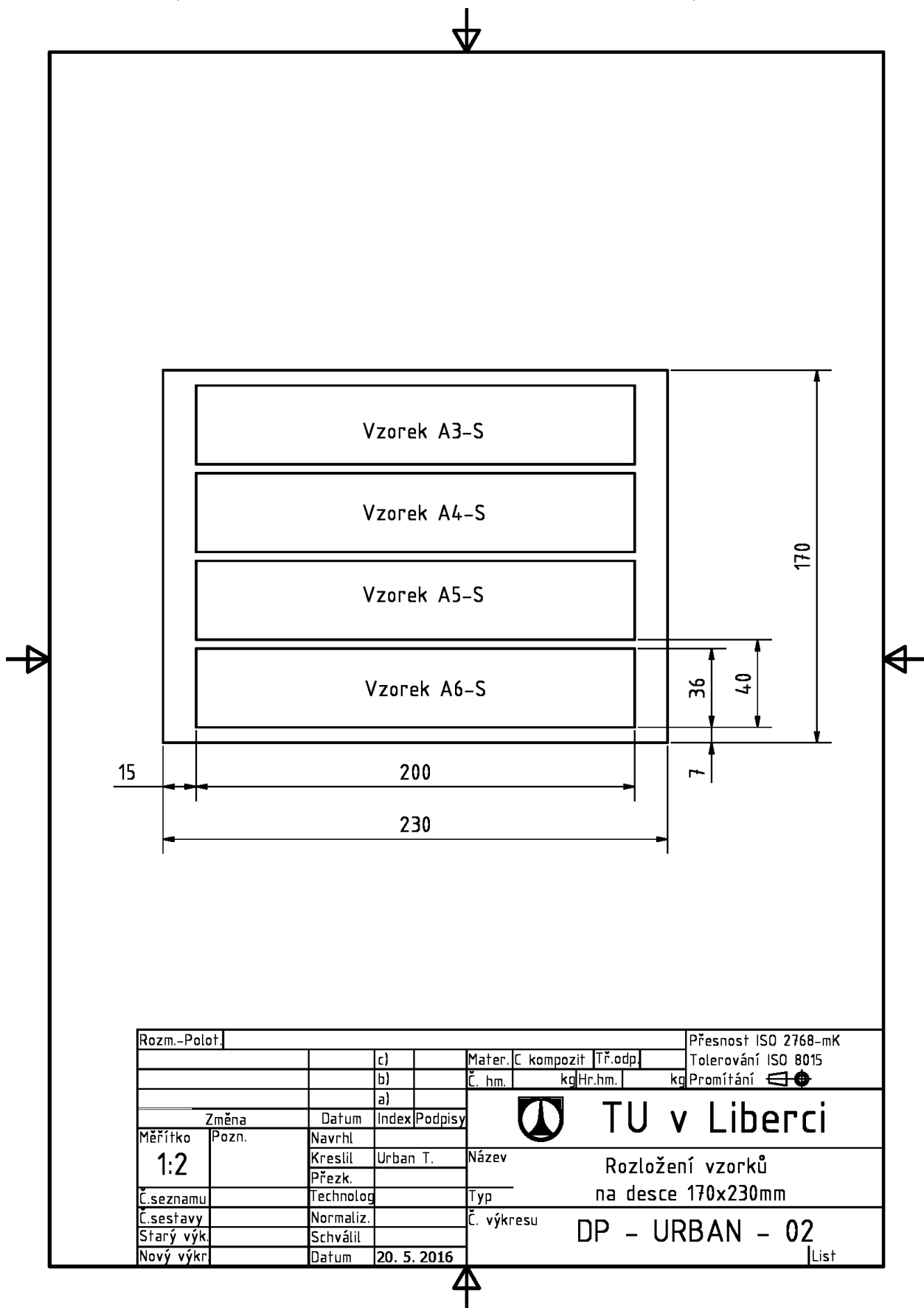
Seznam příloh na CD

- Analýza napjatosti v okolí kruhové díry
 - Napjatost_v_okoli_diry_rez_X_X.wxm (Výpočetní program)
 - Napjatost_v_okoli_diry_rez_Y_Y.wxm (Výpočetní program)
- Bezpečnostní listy použitých materiálů
- Technické listy použitých materiálů
- Fotografie z elektronového mikroskopu
- Výkresy desek
- Diplomová práce v elektronické podobě ve formátu .pdf

Příloha A – Výkres rozložení vzorků na desce 340 x 230 mm pro řezání

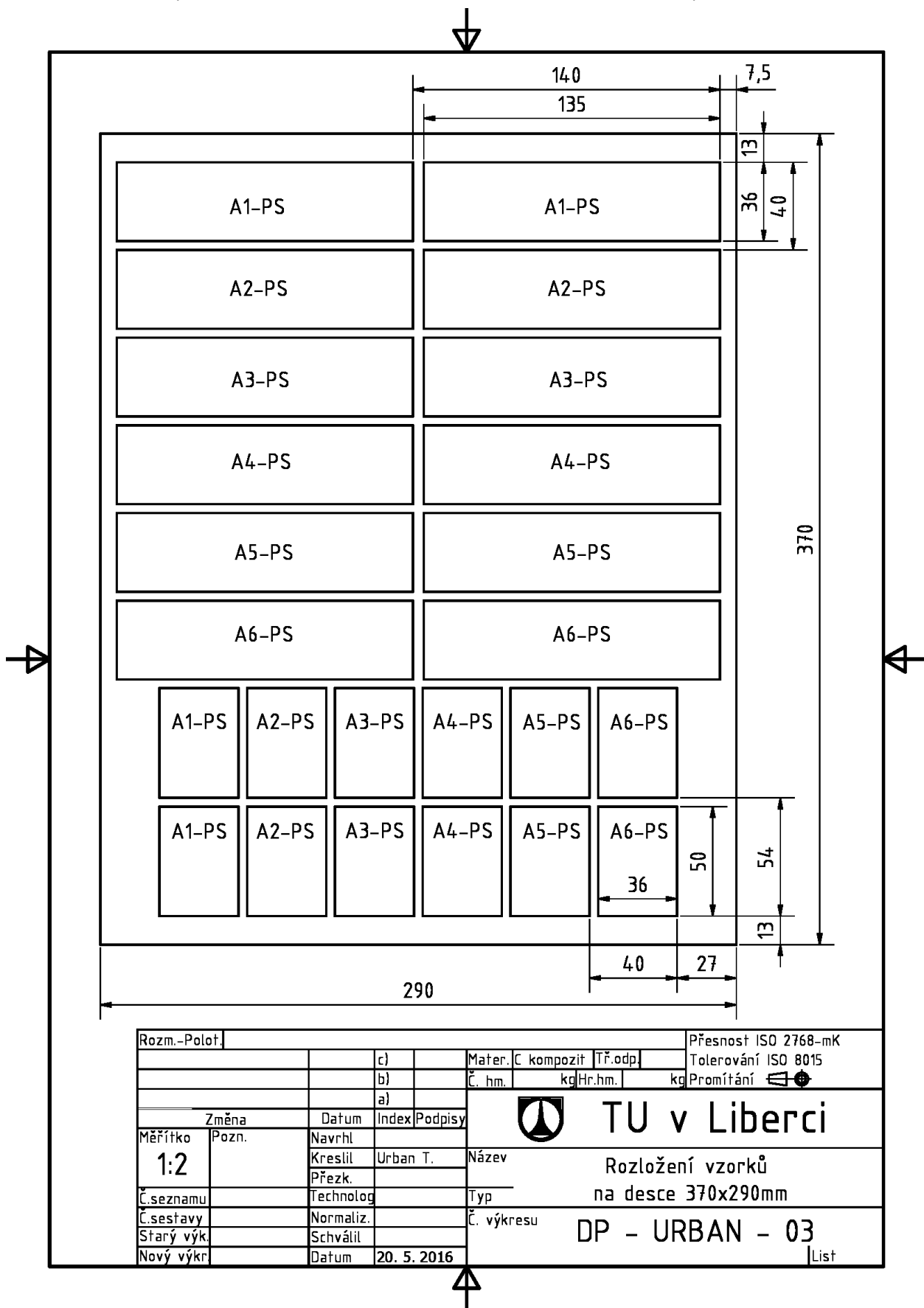


Příloha B – Výkres rozložení vzorků na desce 170 x 230 mm pro řezání



Rozm.-Polot.				Přesnost ISO 2768-mK			
		c)		Mat.	C kompozit	Tř.odp.	Tolerování ISO 8015
		b)		Č. hm.	kg	Hr.hm.	kg
		a)		Promítání			
Změna		Datum	Index	Podpis	TU v Liberci		
Měřítko	Pozn.	Navrhl					
1:2		Kreslil	Urban T.		Typ	na desce 170x230mm	
Č.seznamu		Přezk.			Č. výkresu	DP - URBAN - 02	
Č.sestavy		Technolog					
Starý výk.		Normaliz.					
Nový výkr.		Schválil					
		Datum	20. 5. 2016			List	

Příloha C – Výkres rozložení vzorků na desce 370 x 290 mm pro řezání



Příloha D – Technický list uhlíkové tkaniny 160 g/m²



Inspection Certificate 3.1

EN 10 204: 2004

Certificate No.: C0024101

Material Code: TOR000501
Material Designation: **CC 160 P - 100**
Manufacturing Date: 8.1.2014
Article no.: CA0005-641-0001
Test roll No.: C0024101
Finish: loomstate

Kind of material - warp: Toray 3K 200 tex
Kind of material - weft: Toray 3K 200 tex
Compatibility: Epoxide resin
Binding: Plain

Results of specific tests according to Specification No.: TOR000501						
Characteristic	Unit	Target values	Tolerance (min. - max.)		Test results	Note
Sett of warp	n/m	400	395	410	* 400	EN 1049-2
Sett of weft	n/m	400	395	410	* 410	EN 1049-2
Thickness	mm	0,3	0,26	0,34	* 0.32	EN 5084
Area weight	g/m ²	160	155	170	162	EN 12127
Width	cm	100	99,5	100,5	* 100.2	EN 1773
Density	g/cm ³	1,76				
* orientation value						
Corresponding rolls: C0024103, C0024102,						



Address of Manufacturer:

KORDÁRNA Plus a.s.
696 74 Velká nad Veličkou 890
Czech Republic

Contact of Techn. Dept.: Kučera Jiří, +420 518 312 528
 + 420 518 329 302, kuceraj@kordarna.cz

LAMINAČNÍ PRYSKYŘICE LH 160 TUŽIDLA 135 - 136, 285 - 287, 500 - 502 H 147

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 vytvrdnou a mohou být zpracovávány a používány bez následného tepelného vytvrzení.

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 a H 300/ může být zvýšena na přibližně 80 °C postupným tepelným 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.

Laminační pryskyřice L 285 s tužidlem 285 nebo laminační pryskyřice L 335 s tužidlem 335 / 340

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/cm³ / 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 147

Specifikace

		Tužidlo 135	Tužidlo 136	Tužidlo 500
Hustota	g/cm³ / 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
Hustota	g/cm³ / 25 °C	
Viskozita	mPas / 25 °C	600
Aminové číslo	mg KOH / g	-
Barva	Gardner	

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	
Průměrná hodnota epoxidu	-	-	
Průměrný ekvivalent aminu	64	-	
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 zamízení 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. Nezahřívajte 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	---

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
20 - 25 °C	přibl. 2 - 3 hodiny	přibl. 4 - 5 hodin
40 - 45 °C	přibl. 40 - 50 min.	přibl. 60 - 80 min.

	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	---

Příloha F – Technický list tužidla H 287



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

Tužidlo H 287

Technický list, instrukce k použití

Charakteristika:	Tekuté tužidlo do epoxidových pryskyřic.
Aplikace:	Výroba laminátů s požadavkem na vysokou kvalitu Poměry míchání 100:40 hmotnostně L 285 (MGS) LH 160 LH 210 LH 385 Zpracovatelnost při 20°C cca 4 hod.
Procesní teplota:	10-80°C alespoň 3°C nad rosným bodem Vytvrzení: 24h při 23°C+15h při 50-80°C
Aplikační metody:	Ruční laminace, vakuová infuze, aj.
Speciální vlastnosti:	UV stabilita Extra čírost Extremně dobrá fyziologická kompatibilita Dobré mechanické a tepelné vlastnosti Teplotní odolnost až do 100°C

Úvod

Systém laminační pryskyřice a tužidla byl vyvinut jako přímá náhrada známého systému LR 285 výrobce MGS (Hexion). Je vhodný pro výrobu kompozitů s použitím skelných, uhlíkových a kevlarových vláken a vyznačuje se vysokými statickými a dynamickými vlastnostmi.

Předpokládá se, že po tepelném dotvrzení (post curing) při 50 - 55 °C systém splňuje standard pro větroně a motorové větroně (pracovní teplota - 60 °C až + 54 °C). Pro splnění požadavků motorových letadel (pracovní teploty - 60 °C až + 72 °C) je nezbytné tepelné vytvrzení při 80 °C. Pro takovou aplikaci je třeba nechat si systém certifikovat.

Doporučený poměr míchání epoxid:tužidlu 100:40 hmotnostně. Doba zpracovatelnosti (tzv. pot life) je mezi přibližně 4 - 5 h. Po počátečním vytvrzení při pokojové teplotě jsou vyrobené komponenty opracovatelné a lze je vytáhnout z formy. Získáte vysoce se lesknoucí a nelepivé povrchy, a to dokonce i při nepříznivých podmínkách při vytvrzování, tj. nižší teploty nebo vysoká vlhkost.

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, mikrobalony, bavlněné vločky, kovový prášek apod.

Uvedené vlastnosti získá pouze po tepelném vytvrzení při teplotách nad 50 °C.

Atesty

Nejsou

Laminační systém má lehce hydrofilní charakter (vyšší absorpce vlhkosti, nižší odpor rozptylu páry). Proto neočekáváme žádné problémy kompatibility při jeho kombinaci s polyesterovými gelcoaty, rozmanitými barvami (např. na bázi PUR) atd. Bohužel však nemáme k dispozici testy těchto kombinací.

Aplikace

Výroba kluzáků, motorových kluzáků a motorových letadel, lodě a stavba lodí, sportovní náradí, letecké modely, formy a nástroje. Pro dosažení nejlepších vlastností je vhodné výrobek temperovat, vytvrzení proběhne ale i při teplotě 25°C

Aditiva

Bez plniv

Fyzikální a chemické vlastnosti

		Tužidlo H 287
Hustota	g/cm ³ / 25 °C	0,93 - 0,96
Viskozita	mPas / 25 °C	80 - 100
Aminové číslo	mg KOH / g	450 – 500 (AE=64)
Barva		Modrá transparentní

Skladování

Tužidlo H 287 je dodáváno v sudech, nebo menších 30l, 25l, 10l, 5l, 3l, 1l kanystrech. Ideální skladovací podmínky jsou v uzavřeném obalu při konstantní teplotě 20°C mimo sluneční světlo. Při dodržení těchto podmínek je doba skladování max. 6 měsíců.

BOZP

Přečtěte si prosím samostatný podklad – Bezpečnostní list materiálu.

Vytvrzování je exotermická reakce, míchejte jen takové množství, které stihnete včas zpracovat!!

Poznámka pro čtenáře

Společnost Havel Composites CZ s.r.o. (Havel) byla přesvědčena o přesnosti zde uvedených informací v době přípravy tohoto materiálu nebo tyto informace byly převzaty ze zdrojů, o kterých byla společnost přesvědčena, že jsou spolehlivé; uživatel ovšem zodpovídá za prostudování ostatních relevantních zdrojů informací a porozumění jim tak, aby dodržoval všechny zákony a postupy aplikovatelné na bezpečnou manipulaci a zacházení s výrobkem, a za stanovení vhodnosti daného výrobku k zamýšlenému užití. Pro všechny výrobky dodávané společností Havel platí prodejní termíny a podmínky společnosti Havel. SPOLEČNOST HAVEL NEPOSKYTUJE ŽÁDNOU ZÁRUKU, AŽ UŽ VÝSLOVNOU ČI IMPLIKOVANOU, NA JAKÉKOLI VÝROBKU NEBO JEJICH PRODEJNOST ČI ZPŮSOBILOST K JAKÉMUKOLI ÚČELU. SPOLEČNOST HAVEL DÁLE NEPOSKYTUJE ŽÁDNOU ZÁRUKU TÝKAJÍCÍ SE PŘESNOSTI JAKÝCHKOLI INFORMACÍ UVEDENÝCH SPOLEČNOSTÍ HAVEL, kromě záruky, že její výrobky budou odpovídat technickým parametrům společnosti Havel. Žádné zde uvedené informace nepředstavují nabídku prodeje jakéhokoli výrobku.

Vytvořil: Ing. Richard Moravec

Dne: 15.7.2015

Datum vydání: 15.7.2015

TR 104

Separací vosk

Popis výrobku:

Tuhá vosková pasta na vyrobená z nejkvalitnějšího rafinovaného karnaubského vosku smíšeného s dalšími syntetickými vysoce tepelně odolnými materiály a organickými destiláty.

Vlastnosti výrobku:

- Lehké nanášení a pozdější odstraňování. Lze lehce vyleštit i po dlouhém času od nanesení na povrch formy
- Dává tvrdý film s vynikající tepelnou a chemickou odolností
- Lehké dosažení vysokého lesku povrchu bez matných míst

Fyzikální vlastnosti:

Doba zrání po nanesení: 5 -10 minut při 23 C

Teplota měknutí: 88 - 98 C

Barva: bledě modrá

Tuhost: shodná s karnaubským voskem při 25 C

Doporučené aplikace:

Jako separační vosk na polyesterové, epoxidové, kovové a jiné formy s tvrdým povrchem. Vhodné pro použití do teplot nepřesahujících 90 C ve formě.

Na nové nebo opravené formy doporučujeme použít jako základní vrstvu plnič-leštič TR 301 před použitím vosků pro zlepšení separace, lesku a životnosti formy. Vosk nanášíte kruživým pohybem na povrch formy. Necháte vyzrát cca 5 minut a vyleštíte do finálního lesku. Pro nové nebo opravované formy dávejte minimálně 5 vrstev voskové pasty a po každém vyleštění necháte ještě vrstvu vyzrát po dobu 30 - 60 minut. Nejlepšího výsledku se dosahuje, jestliže po poslední nanesené a vyleštěné vrstvě se nechá voskový film vyzrát po dobu 10 a více hodin při pokojové teplotě.

Před vlastním použitím formy se nanese nová vosková vrstva, nechá vyzrát 30 - 60 minut a zařadí se do výrobního cyklu. Po odformování prvních 2 - 3 výrobků z nové formy je vhodné formu znovu převoskovat. Dále se forma již separuje podle potřeby, tak jak to vyžaduje technologický proces pro snadné odformování.

Informace zde uváděné jsou na základě testů. Každému uživateli je doporučeno provést si vlastní testy na jeho zamýšlené aplikaci, protože není možno obsáhnout veškeré materiály a technologické podmínky při testech u výrobce tak, aby byly hodnověrné a precizované pro danou konkrétní výrobu.

TECHNICKÝ LIST

Datum vydání: 30. 5. 2002
Datum revize: 19. 9. 2002

stránka 1/3
Verze 1.1

Separátor PVA - Havel

Popis

Separátor PVA Havel je tekutý produkt, zabraňující přilnutí dvou materiálů k sobě. Používá se především pro odseparování výrobků z kompozitních a kovových forem. Separátor PVA je též vhodné kombinovat se separačním voskem. Při těchto združených aplikacích je separační vosk použit jako první vrstva a potom jako druhá vrstva je aplikován separátor PVA.

Použití

Nejspolehlivější metodou separace je nejprve rozleštit nanesený primární vosk měkkým hadříkem tak, aby nedošlo k poškrábání a teprve potom aplikovat separátor PVA. Forma a vosk by měly být zahřaty na pokojovou teplotu (cca 20 – 25 °C). Nové formy se voskují 5 – 10x. To je důležité pro zalepení všech mikropórů na formě. Separátor aplikujeme houbičkou nebo savým hadříkem tak, že nanášíme rovnoměrnou tenkou vrstvu rovnoměrnými tahy jedním směrem. Bezprostředně po nanesení vrstvy separátoru je vhodné houbičku vyždímat a celou operaci zopakovat. Nová vrstva separačního vosku i separátoru PVA se aplikuje vždy znovu po každém vylopunutí výrobku z formy.

Separátor PVA aplikujeme pouze na čisté povrchy bez oleje a mastnoty. Pokud není toto pravidlo dodrženo, dochází k tzv. efektu "oškování", kdy separátor nepřilne dobře k povrchu formy a následná separace tak není zajištěna. Stejně nevhodné jsou absorpční povrchy jako je pěna, dřevo a další. Tyto materiály musí být nejprve zalakovány a zavoskovány. Při předúpravě kompozitních forem leštěním se tyto elektrostaticky nabíjí. Přitahují tak částice prachu z okolního ovzduší a ty následně znečišťují povrch. Doslova všechno, co padá z okolí se akumuluje ve filmu separátoru, zvláště během zasychání v něm cca 15 minut. Proto se před separací ujistěte, že vzduch je bez prachu.

Separátor PVA je rovněž vhodný pro separaci komponentů vytvrzovaných při vyšších teplotách. Teploty pro vytvrzování by však neměly přesáhnout 100°C. Nové formy je nejlepší vytvrzovat při zvýšené teplotě s první vrstvou vosku. Zvýšená teplota rovněž způsobuje, že vosk pronikne do povrchu kompozitní formy.

Po aplikaci zasychá separátor do 20ti minut (při pokojové teplotě) a vytváří vysoce lesklý povrch. Zbytky na formě a výrobku lze snadno odstranit vodou.

Separátor PVA Havel

stránka 2/3

Vlastnosti

Separátor PVA Havel je čirá kapalina slabého rozpouštělového zápachu. Chemicky se jedná o roztok polyvinylalkoholu ve vodnoalkoholickém prostředí. Je to hořlavá kapalina I. Tředy nebezpečnosti. Po uschnutí vytvoří lesklý, tuhý, fólii podobný, lakový film. Vhodný je pro separaci epoxidové, polyesterové, vinylesterové a polyamidové pryskyřce.

Balení

Separátor PVA - Havel jsme schopni dodat v obalech od 0,1 l až do 10 litrů

Skladování

Separátor se skladuje v dobře uzavřených obalech, aby se zabránilo tání rozpouštěla a vysychání. Výrobek nesmí projít mrazem a nemě by být vystavován dlouhodobě teplotám nad 35 °C. Záruční doba je 6 měsíců od data expedice.

Technické parametry

Skupenství	kapalina
Barva	čirá
Zápach	alkoholický
Rozpouštělo	Směs vyšších alkoholů a vody
Aplikace	Nanést houbitkou, nechat uschnout.
Rozpustnost/ředitelnost	Voda, alkoholy, glycerol, triethylenglykol
Teplota pracovní použitelnosti	15 - 120 °C
Tlak par při 20 °C	> 1150 mbar
Základy bezpečnosti	Odsávejte výpary, při práci nekuřte.
Nutné ochranné pomůcky	nepědpsány

Obecná pravidla

Při vyšších teplotách a slabších vrstvách osychá separátor PVA podstatně rychleji. Dodržujte při práci předpisy pro manipulaci s hořavinami.

Informace

Další případné informace o výrobku vám poskytneme na telefonním čísle: +420 585 129 011 nebo 585 129 013

Objednávky

Zelená linka 800 242 835, fax +420 585 129 040, tel. +420 585 129 011
e-mail info@havel-composites.cz , www.havel-composites.cz