

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická

Studium vlivu materiálů a způsobů laminace na
pevnostní charakteristiky spojů kompozitních
trubek

Pavel Zajíc

Diplomová práce

2018

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel Zajíc**
Osobní číslo: **C16524**
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Technologie výroby a zpracování polymerů**
Název tématu: **Studium vlivu materiálů a způsobu laminace na pevnostní charakteristiky spojů kompozitních trubek**
Zadávající katedra: **Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek**

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

1. Vypracujte literární rešerši na téma kompozitní materiály se zaměřením na reaktoplastické matrice s různými typy výztuže.
2. V teoretické části se dále zaměřte na problematiku technologie přípravy kompozitních materiálů se zaměřením na výrobu trubkových profilů.
3. Charakterizujte jednotlivé vstupní suroviny a připravte laminované spoje kompozitních trubek s různými materiály a rozdílnými způsoby laminace.
4. Studujte vliv materiálů a způsobu laminace na pevnostní charakteristiky spojů kompozitních trubek určených pro stavbu cyklistických rámců.
5. Srovnajte a diskutujte zjištěné mechanické vlastnosti u jednotlivých testovaných kompozitních vzorků. Zhodnoťte vliv materiálů a způsobu laminace na pevnost spojů kompozitních trubek.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Luboš Prokůpek, Dr.

Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek


Datum zadání diplomové práce: **18. prosince 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2018**



prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.
děkan

L.S.



Ing. David Veselý, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 28. února 2018

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše. Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne:

Pavel Zajíc

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěl nejprve upřímně poděkovat doktorovi inženýrovi Luboši Prokúpkovi za skvělé vedení mé diplomové práce. Stejně upřímně musím poděkovat všem ve firmě FESTKA za úžasnou příležitost a za to, že jsem veškerou přípravu vzorků mohl provádět v nejpříjemnější kamarádské atmosféře. Zároveň bych chtěl poděkovat všem, kteří mi jakýmkoliv způsobem na této práci pomohli. A v neposlední řadě musím vyjádřit veškeré díky své rodině, a především snoubence za bezednou míru podpory a tolerance.

ANOTACE

Obsahem této práce je charakterizace laminovaných spojů kompozitních trubek a materiálů pro laminaci používaných při výrobě rámu jízdních kol firmy FESTKA. Jsou zde navrženy i laminační materiály jiného výrobce a porovnání mezi jednotlivými laminačními systémy.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kompozity, laminace, T-spoj, trubky, zkoušky tahem, epoxidové pryskyřice, aminová tvrdidla

TITLE:

Strength characterisation of composite tubes joints influenced by different lamination design and different materials.

ANNOTATION:

This thesis deals with characterisation of materials used for laminated joints of composite tubes. These joints are used in construction of bicycle frames by Czech company FESTKA. Different lamination materials are tested and compared in this thesis.

KEYWORDS:

Composites, lamination, T-joints, tubes, tensil testing, epoxy resins, amine hardeners

Obsah

Seznam Obrázků:	11
Szenam tabulek	14
Seznam zkratk:	16
Úvod.....	17
1 Teoretická část.....	20
1.1 Základní pojmy.....	20
1.2 Vytzužující vlákna.....	21
1.2.1 Přírodní vlákna.....	24
1.2.2 Skleněná vlákna.....	26
1.2.3 Uhlíková vlákna	27
1.2.3.1 Uhlíková vlákna na bázi polyakrylonitrilu (PAN).....	28
1.2.3.2 Uhlíková vlákna na bázi smol (pitch)	29
1.2.3.3 Uhlíková vlákna na bázi celulózy.....	30
1.2.4 Polymerní vlákna.....	31
1.2.4.1 Aramidová vlákna (aromatické polyamidy).....	31
1.2.4.2 Polyethylen s ultra vysokou molekulovou hmotností (UHMWPE)	32
1.2.4.3 Polyethylentereftalátová vlákna.....	34
1.3 Pojivo – matrice.....	34
1.3.1 Reaktivní pryskyřice	35
1.3.1.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP).....	36
1.3.1.2 Epoxidové pryskyřice (EP)	38
1.4 Výrobní technologie – zpracování kompozitů	42
1.4.1 Ruční laminace.....	43
1.4.2 Stříkání.....	44
1.4.3 Lisování vakuem – Vacuum bagging.....	44
1.4.4 Vakuová infuze – VARTM.....	45
1.4.5 RTM	46
1.4.6 Autokláv.....	47
1.4.7 Pultruze.....	49

1.4.8	Navíjení vláken	50
2	Experimentální část.....	52
2.1	Přehled použitých látek a materiálů	52
2.1.1	Matrice a tvrdidla pro laminaci.....	52
2.1.1.1	Laminační pryskyřice LG 700	52
2.1.1.2	Laminační tvrdidlo HG 700	53
2.1.1.3	Laminační tvrdidlo HG 286.....	54
2.1.1.4	Pryskyřice CHS-EPOXY 501.....	54
2.1.1.5	Pryskyřice CHS-EPOXY 520	55
2.1.1.6	Tvrdidlo TELALIT 0590	55
2.1.1.7	Tvrdidlo TELALIT 0420	56
2.1.2	Výztužné materiály.....	56
2.1.2.1	Uhlíková vlákna: UD páska ASPRO AT40	56
2.1.2.2	Uhlíková tkanina Style 461.....	57
2.1.2.3	Uhlíková tkanina TeXtreme® 1027	57
2.1.2.4	Mikrosféry Q-Cell® 7014/7019.....	58
2.1.3	Lepidla	59
2.1.3.1	Epoxidové lepidlo Spabond 345.....	59
2.1.3.2	Vteřinové lepidlo ALTECO Super Glue.....	59
2.1.4	Trubky ze skelných vláken.....	59
2.2	Technologie přípravy zkušebních vzorků a tělísek	60
2.2.1	Příprava desek z matricových materiálů a zkušebních tělísek	60
2.2.2	Technologie výroby zkušebních těles laminovaných spojů ve tvaru písmene T	61
2.2.2.1	Současná podoba laminace spojů pro rámy FESTKA ONE	69
2.2.2.2	Současná podoba laminace ONE bez vloženého vlákna při lepení na tupo.....	71
2.2.2.3	Současná podoba laminace ONE bez použití výkonnostního lepidla Spabond při lepení na tupo.....	71
2.2.2.4	Současná podoba laminace ONE za použití pryskyřic CHS Epoxy 501 a 520 spolu s tvrdidly Telalit 0420 a Telalit 0590	71
2.2.2.5	Současná podoba laminace spojů pro rámy FESTKA Scalatore.....	72

2.3	Použité zkušební metody a zařízení	73
2.3.1	Charakterizace matric	73
2.3.1.1	Stanovení obsahu epoxidových skupin podle Jaye (epoxidový ekvivalent)	73
2.3.1.2	Stanovení aminového čísla tvrdidel	74
2.3.1.3	Stanovení viskozity dle Höpplera	75
2.3.1.4	Stanovení extrahovatelného podílu	75
2.3.1.5	Stanovení tvrdosti dle Brinella	76
2.3.1.6	Zkouška v tahu matricových materiálů	76
2.3.1.7	Zkouška v ohybu matricových materiálů	76
2.3.1.8	Rázová houževnatost Charpy	77
2.3.1.9	Termomechanická analýza (TMA)	77
2.3.1.10	Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací	78
2.3.2	Zkoušky zkušebních těles T tvaru	78
2.3.2.1	Zkouška tahem	78
2.3.2.2	Zkouška tahovým lomem	79
2.3.2.3	Stanovení obsahu popela	91
3	Výsledky a diskuze	92
3.1	Charakterizace matricových materiálů	92
3.1.1.1	Stanovení obsahu epoxidových skupin podle Jaye	92
3.1.1.2	Stanovení aminového čísla tvrdidel	92
3.1.1.3	Stanovení viskozity dle Höpplera	93
3.1.1.4	Stanovení extrahovatelného podílu	94
3.1.1.5	Stanovení tvrdosti dle Brinella	95
3.1.1.6	Zkouška matricových materiálů v tahu	95
3.1.1.7	Zkouška matricových materiálů v ohybu	97
3.1.1.8	Rázová houževnatost Charpy	98
3.1.1.9	Termomechanická analýza (TMA)	99
3.1.1.10	Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací	100
3.1.2	Zkoušky zkušebních těles T tvaru	102
3.1.2.1	Zkouška tahem	102

3.1.2.2	Zkouška tahovým lomem	106
3.1.2.3	Stanovení obsahu popela	109
4	Závěr	111
5	Seznam použité literatury:	113

Seznam Obrázků:

Obrázek 1: Rám kola FESTKA One disc vyrobený z kompozitních trubek z uhlíkových vláken spojených k sobě ruční laminací (2)	19
Obrázek 2: Rám kola Bastion Road disc vyrobený z kompozitních trubek z uhlíkových vláken spojených k sobě pomocí rámových spojek z titanu vyrobených technologií 3D tisku (3)	19
Obrázek 3: Plátňová (a), keprová (b) a atlasová (c) vazba tkanin (7)	23
Obrázek 4: Znázornění rozdílů mezi tkaninou TexTreme a běžnou tkaninou z rovingů (8).....	23
Obrázek 5: Rám jízdního kola od výrobce BooBoo Bikes konstrukčního typu tube-to-tube, kde je jakožto trubkový materiál využit bambus a jako vlákenná výztuž pro laminaci spojů je využito konopné vlákno (10)	25
Obrázek 6: Struktura aramidů PPTA.....	31
Obrázek 7: Prototyp rámu kola od výrobce Filament bikes využívající hybridní tkaninu z uhlíkových a UHMWPE vláken Dyneema (17)	33
Obrázek 8: Chemický vzorec PET	34
Obrázek 9: Reakce syntézy UP pryskyřice, kde R a R' jsou nasycené uhlovodíkové řetězce	37
Obrázek 10: Epoxidová neboli oxiranová skupina	39
Obrázek 11: Schéma polyadiční vytvrzovací reakce epoxidové pryskyřice a diaminu jako tvrdidla.....	40
Obrázek 12: Reakční schéma vzniku glycidylové epoxidové pryskyřice z BPA a epichlorhydrinu	41
Obrázek 13: Reakce diandiglycidyletheru s další molekulou dianu a vznik vyšemolekulární látky	41
Obrázek 14: Schéma ručního kladení do formy (23 s. 67).....	44
Obrázek 15: Schematické znázornění lisování vakuem (23 s. 68).....	45
Obrázek 16: Schematické složení aparatury pro aplikaci vakuové infuze (26 s. 511)	46
Obrázek 17: Schematické zobrazení podoby formy pro VARTM (27 s. 94)	46
Obrázek 18: Schematické uspořádání aparatury pro RTM (28 s. 22).....	47
Obrázek 19: Schematické zobrazení autoklávové metody (23 s. 74).....	48

Obrázek 20: Forma pro výrobu monocoque rámu z prepregu pomocí autoklávu (29).....	49
Obrázek 21: Schematické znázornění pultruzní výrobní linky (30).....	50
Obrázek 22: Návrh zařízení pro navíjení rovingů na jádro (31 s. 2).....	51
Obrázek 23: Spoj hlavové (head tube) a horní (top tube), resp. dolní (down tube) rámové trubky který simulují zkušební tělesa (32).....	61
Obrázek 24: Tvarová úprava trubky tzv. mitrování.....	63
Obrázek 25: Podoba jednoduché fixační stolice (vlevo) a části zkušebních těles v ní sesazené pro kontrolu nastavení kolmosti (vpravo)	63
Obrázek 26: Svazek uhlíkových vláken nanesený do hrany lepeného spoje.....	64
Obrázek 27: Zafixovaná zkušební tělesa	65
Obrázek 28: Zkušební těleso s nanesenou "bílou hmotou" jakožto podklad a tvarovou definicí laminovaného spoje.....	66
Obrázek 29: Vrstva strhávací textilie nanesená na přelaminovaný spoj (vlevo) a ruční odstraňování této textilie (vpravo).....	68
Obrázek 30: Hotové zkušební těleso připravené pro provedení pevnostních zkoušek.....	68
Obrázek 31: Nanesená první vrstva UD pásků Aspro AT40 (vlevo) a nanesené plátno Style 461 jako druhá laminační vrstva a započaté nanášení třetí vrstvy v podobě dalších UD pásků AT40	70
Obrázek 32: Schematické znázornění umístění částí plátna 30x60 mm (modře) pro překrytí spojů hlavního kusu laminačního plátna (červeně).....	70
Obrázek 33: Vrstva tkaniny TeXtreme 1027 použitá jako v pořadí třetí vrstva v laminaci spoje typu FESTKA Scalatore	73
Obrázek 34: Jednotlivé části upínacího přípravku pro zkoušku tahem (vlevo) a použitý přípravek s upnutým zkušebním tělesem v trhačím stroji (vpravo).....	79
Obrázek 35: Jednotlivé části upínacího přípravku pro zkoušku tahovým lomem (vlevo) a použitý přípravek s upnutým zkušebním tělesem v trhačím stroji (vpravo)	80
Obrázek 36: Technický výkres spodní základny upínacího přípravku.....	81
Obrázek 37: Technický výkres horní části upínacího přípravku	82
Obrázek 38: Technický výkres části upínacího přípravku určeného pro provlečení trubkou zkušebního tělesa	83
Obrázek 39: Technický výkres části, která sloužila jako pojistná koncovka trnu 1 a byla zajištěna šroubem M10.....	84

Obrázek 40: Technický výkres trnu s okem pro propojení s horní částí upínacího přípravku.....	85
Obrázek 41: Technický výkres svorné objímky, která má funkci zajištění zkušebního tělesa na trnu 2	86
Obrázek 42: Technický výkres třmenu, kterého byly použity dva kusy pro upevnění trnu 1 ke spodní základně upínacího přípravku	87
Obrázek 43: Technický výkres části, která je nasunuta na spodní základnu a slouží jako spojovací část s okem trnu 1 pro měření tahového lomu	88
Obrázek 44: Technický výkres části, která nasunutím na trn 1 slouží k přesnému vymezení vzdálenosti zkušebního tělesa od okraje trnu 1.....	89
Obrázek 45: Technický výkres části, která slouží pro propojení spojovacích ok na trnu 1 a trnu 2 na jejich protikusech. Této části byly použity 2 kusy pro měření tahového lomu.	90
Obrázek 46: Porovnání mezi pevnosti v tahu různých matric	97
Obrázek 47: Porovnání mezi pevnosti v ohybu různých matric.....	98
Obrázek 48: Graf určení T_g pomocí TMA pro epoxidový systém CHS Epoxy 520 a tvrdidlo Telalit 0590	100
Obrázek 49: FTIR spektrum pryskyřice LG 700	101
Obrázek 50: FTIR spektrum tvrdidla HG 286.....	101
Obrázek 51: FTIR spektrum tvrdidla HG 700	102
Obrázek 52: Porovnání hodnot meze pevnosti v tahu jednotlivých typů zkušebních těles	105
Obrázek 53: Průběh závislosti prodloužení na zatížení u zkušebních těles bez použitého lepidla Spabond k lepení na tupo jako ukázka typického průběhu zkoušky	106
Obrázek 54: Porovnání hodnot meze pevnosti tahovým lomem jednotlivých typů zkušebních těles	109

Szenam tabulek:

Tabulka 1: Vlastnosti epoxidové pryskyřice LG 700 udané výrobcem.....	53
Tabulka 2: Orientační mechanické parametry vytvrzené pryskyřice bez výztuže	53
Tabulka 3: Vlastnosti tvrdidla HG 700 udávané výrobcem	53
Tabulka 4: Vlastnosti tvrdidla HG 286 udávané výrobcem	54
Tabulka 5: Vlastnosti epoxidové pryskyřice CHS-EPOXY 501 udané výrobcem	54
Tabulka 6: Vlastnosti epoxidové pryskyřice CHS-EPOXY 520 udané výrobcem	55
Tabulka 7: Vlastnosti tvrdidla TELALIT 0590 udané výrobcem	56
Tabulka 8: Vlastnosti tvrdidla TELALIT 0420 udané výrobcem.....	56
Tabulka 9: Charakteristika vláken Tenax® IMS65.....	57
Tabulka 10: Charakteristika vláken Torayca T300	57
Tabulka 11: vlastnosti vláken PYROFIL™ HR40	58
Tabulka 12: Vlastnosti mikrosfér Q-Cell 7014/7019 uváděné výrobcem	58
Tabulka 13: Vlastnosti epoxidového lepidla Spabond 345 uváděné výrobcem ..	59
Tabulka 14: Přehled typů zkušebních těles a jejich počty	67
Tabulka 15: Výsledné hodnoty epoxidových ekvivalentů pro použité laminační pryskyřice v porovnání s hodnotami udané výrobcem	92
Tabulka 16: Hodnoty aminového čísla zjištěné experimentem v porovnání s hodnotami udávanými výrobcem	93
Tabulka 17: Experimentálně zjištěné hodnoty viskozity pro jednotlivá tvrdidla v porovnání s hodnotami udanými výrobcem.....	93
Tabulka 18: Experimentálně zjištěné hodnoty viskozity pro jednotlivé laminační pryskyřice v porovnání s hodnotami udanými výrobcem	93
Tabulka 19: Procentuální vyjádření extrahovatelného podílu pro všechny laminační systémy včetně tzv. bílé hmoty	94
Tabulka 20: Hodnoty tvrdosti laminačních systémů a podmínky měření	95
Tabulka 21: Výsledky tahových zkoušek matricových materiálů	96
Tabulka 22: Výsledky ohybových zkoušek matricových materiálů	97
Tabulka 23: Hodnoty rázové houževnatosti všech matricových materiálů	99
Tabulka 24: Výsledky termomechanické analýzy	99
Tabulka 25: Výsledky měření tahem pro jednotlivé typy zkušebních těles	103
Tabulka 26: Výsledky měření tahovým lomem pro jednotlivé typy zkušebních těles	106

Tabulka 27: Stanovené obsahy popela pro jednotlivé vzorky	110
---	-----

Seznam zkratek:

BPA	bisphenol A – bisfenol A
DNA	deoxyribonukleová kyselina
EP	epoxy resin – epoxidová pryskyřice
GF	glass fiber – skelné vlákno
PA6	polyamid 6
PA66	polyamid 66
PAN	polyakrylonitril
PET	polyethylentereftalát
PPTA	polyparafenylentereftalamid
PTFE	polytetrafluorethylen
PVA	polyvinylalkohol
OoA	out of autoclave – mimo autokláv
RTM	resin transfer moulding – injekční vstřikování
TMA	termomechanická analýza
UD	unidirectional – jednosměrné
UHMPE	ultra high modulus polyethylene – polyethylen s ultra vysokým modulem pružnosti
UHMWPE	ultra high molecular weight polyethylene – polyethylen s ultra vysokou molekulovou hmotností
UP	unsaturated polyester resin – nenasycená polyesterová pryskyřice
UV	ultra violet – ultra fialové záření
VARTM	vakuum assisted resin transfer moulding – vakuová infuze
VBO	vakuum bag only – pouze vakuový pytel

Úvod

Jízdní kolo je bezesporu nejrozšířenější dopravní prostředek na celém světě. Pro mnohé je nástrojem pro každodenní dopravu nebo přímo zdrojem obživy. Především v chudých asijských a afrických oblastech můžeme vidět transportovat pomocí kola zboží, suroviny, zvěř a plodiny, o kterých by nás ani nenapadlo, že je možné na jízdním kole převážet.

Na opačném konci spektra vnímání cyklistiky se nachází špičkoví sportovci. Růst popularity sportovní cyklistiky je jev, který lze pozorovat na všech světových kontinentech, snad jen s výjimkou Antarktidy. Tento trend s sebou nese i snahu trhu nabízet stále dokonalejší jízdní kola a jejich části. Slovo „dokonalejší“ v tomto odvětví znamená především lehčí při zachování, či dokonce vylepšení, výkonu v pevnosti. Samozřejmě, že vývoj se zabývá i jinými aspekty, jakými jsou například zpřesnění řazení pomocí miniaturních počítačů, vylepšení jízdních vlastností pomocí změny geometrie rámu, hledání nových konstrukčních řešení všech komponent atd. Vše ale vždy začíná, a někdy bohužel i končí, otázkou: „A o kolik to bude lehčí?“

A přesně tato otázka nás už od samého vynálezu jízdního kola nutí hledat stále nové a nové materiály. Po prvotních pokusech se dřevem nastoupila dlouhotrvající, asi stoletá, éra železa a oceli, která ale nakonec dorazila ke svým materiálovým limitům. Logickým krokem bylo zabývat se slitinami lehkých kovů, především hliníku, hořčíku a dalších. Záhy své uplatnění našly i polymerní kompozitní materiály, které se v této otázce stále jeví jako bezkonkurenčně nejvýkonnější. Je vsak těžko představitelné, že by jiný dosud známý materiál dovolil výrobu takového bicyklu, který celý v kompletním stavu schopném běžné jízdy váží pouhých 2,72 kg, jako se to povedlo v roce 2008. Autorem tohoto kola je Gunter Mai (1). Jím postavené kolo bylo vyrobeno ze speciálních, na míru vyrobených nebo upravených dílů, které téměř všechny byly z uhlíkového kompozitu. Jako důkaz, že i takto extrémně lehké kolo může být plně funkční poslouží fakt, že na daném bicyklu bylo ujet 20 000 km bez známek poškození či abnormálního opotřebení.

Zdá se, že vývoj techniky se v honbě za nejlehčími a nejvýkonnějšími materiály nezastaví ani s ohledem na vysokou cenu. Zajímavé na tom je, že některá opravdu špičková jízdní kola jsou dokonce natolik lehká, že jim není ani povoleno startovat na prestižních závodech, a přesto se najde nemalá skupina zákazníků, kteří jsou za takové

kolo ochotni zaplatit cenu nového automobilu střední třídy. To je další z faktů, který hraje do karet vývoji cyklistiky, protože i díky tomu si někteří výrobci mohou dovolit pracovat s materiály, které by byly běžně k užití pouze v extrémně náročných odvětvích, jakými jsou armádní letectví, kosmonautika atd.

Kompozitní materiály nabízejí téměř nekonečné množství kombinací matic a výztuží. Vzhledem k možnosti používat různé polymerní matrice, které lze všelijak modifikovat a díky obrovské škále dostupných výztužových materiálů, které můžeme kombinovat do různých skladeb, nabízí polymerní kompozity opravdu mnohem sofistikovanější pohled na věc, nežli kovové trubky z „monolitického“ materiálu.

Velkou otázkou vývoje kompozitu není jen složení materiálu, ale také postup a technologie výroby. Přístupů ke konstrukci cyklistických rámu je hned několik. Jednou z nich je tzv. tube-to-tube, kde jsou jednotlivé trubky tvořící konstrukci rámu sesazeny k sobě a různým způsobem spojeny. Tato konstrukce se, díky vyšším nárokům na kvalitu ruční práce a časovou náročnost, využívá pro výrobu jízdních kol prémiových značek, jakým je například český výrobce firma FESTKA (obrázek 1). Díky jednoduchému tvaru trubky je relativně jednoduché definovat mechanické vlastnosti, což neplatí pro tvarově složitější spoje. Někteří výrobci proto volí jiné konstrukční řešení (například tzv. monocoque), které tento problém odstraní, ale nese jiná úskalí. Jiní výrobci se drží tube-to-tube konstrukce, ale spoje řeší předem vyrobenými rámovými spojkami z kompozitu nebo kovu, například titanu, jak tomu je v případě australské firmy Bastion Cycles (obrázek 2). Český výrobce špičkových jízdních kol, firma FESTKA, využívá ruční laminace spojů trubek. Ruční přelaminování spojů uhlíkovým kompozitním materiálem nabízí vysokou pevnost při nízké váze a zároveň dovoluje stavbu rámu přímo na míru jezdcí, protože každý vyrobený kus může mít jiný úhel spoje trubek, na rozdíl od řešení předpřipravenými rámovými spojkami, které mají vždy úhel stejný. Celkovou analýzou těchto spojů výrobce FESTKA se zabývá tato diplomová práce.



Obrázek 1: Rám kola FESTKA One disc vyrobený z kompozitních trubek z uhlíkových vláken pojených k sobě ruční laminací (2)



Obrázek 2: Rám kola Bastion Road disc vyrobený z kompozitních trubek z uhlíkových vláken pojených k sobě pomocí rámových spojek z titanu vyrobených technologií 3D tisku (3)

1 Teoretická část

1.1 Základní pojmy

Ze všeho nejdříve je potřeba si definovat pojem „kompozitní materiál“ a co vše pod ním rozumíme. Zkráceně o nich hovoříme jako o kompozitech a myslíme tím takový materiál, který je složen ze dvou nebo více složek neboli fází, přičemž mají jiné chemické složení a zároveň i mechanické a fyzikální vlastnosti. Nejčastěji je takový materiál složený z tzv. spojitě, kontinuální, fáze, kterou nazýváme matrice či pojivo a nespojitě, diskontinuální, fáze, o které mluvíme jako o výztuži. Výztuž bývá tvořena vlákny nebo částicemi nejrůznějších druhů a tvarů. Důležité je též, aby podíl výztuže v matrici byl nejméně 5 %. Pokud je poměrné naplnění matrice menší, nelze o materiálu hovořit jako o kompozitu. (4 s. 5) Zásadní výhodou kompozitních materiálů je, že výsledné vlastnosti materiálu jsou lepší nežli pouhý součet vlastností jednotlivých složek. Takovému stavu říkáme synergismus či synergický jev.

Vzhledem k faktu, že výztuže mohou mít podobu částic, vláken, destiček atd. a matrice mohou být jak organické, tak anorganické či kovové, lze v tomto ohledu považovat za kompozitní celou řadu materiálů. Od materiálů starověku, jako slámou vyztužené cihly ve starém Egyptě, až po pokročilé materiály moderní doby, jako jsou keramické kompozity, či některé nanomolekulární materiály. V případě cyklistiky se zatím používají výhradně kompozity s polymerní matricí a vlákennou, resp. částicovou výztuží, které zažívají svůj prudký vývoj od poloviny 20. století.

Neméně důležité je vysvětlení pojmu polymerní látky. Jedná se o makromolekulární látky tvořené kovalentními vazbami spojenými strukturními (stavebními) jednotkami – mery – a proto je nazýváme polymery. (5 s. 5)

Velmi často je používán pojem pryskyřice, který má historický původ. Původně označoval přírodní produkty některých rostlin, které se používaly pro výrobu lepidel, nátěrů atd. Postupem času byly tyto přírodní pryskyřice nahrazovány uměle vyrobenými syntetickými materiály, proto pojem pryskyřice označuje i je. Nazýváme je přesněji jako syntetické pryskyřice. Nejčastěji se jedná o látky s ne příliš vysokou molekulovou hmotností v řádu stovek až tisíců, která samovolně, nebo v reakci s jinou látkou, přechází do stavu makromolekuly, nejčastěji v podobě polymerní sítě (5 s. 5).

1.2 Vyztužující vlákna

Jako konstrukční materiály samotná vlákna nenalézají širokého uplatnění. V kompaktní podobě díky použití v kompozitních materiálech se ale díky vysoké měrné pevnosti, případně tuhosti, stávají zajímavým konstrukčním prvkem. Vlákna jsou vždy pevnější než stejný materiál v kompaktní podobě. Důležitým faktorem ovlivňujícím pevnost vlákna je jeho průřez. Vlákna mají nejčastěji kruhový průřez s průměrem v širokém rozmezí. Se zmenšujícím se průměrem se zpravidla pevnost zvyšuje. To je dáno vnitřní strukturou vlákna na molekulární úrovni. Při výrobě vláken se uplatňují zpevňující procesy v závislosti na stupni deformace.

Dle průměru můžeme vlákna dělit do několika skupin. Nejmenší průměr do 100 nm mají nanovlákna. Při průměru od 0,1 do 1 μm hovoříme o tzv. mikrovláknách. Do této kategorie spadají například tzv. whiskery, tedy monokrystalická vlákna s extrémně vysokým poměrem délky k tloušťce. Střední vlákna jsou taková, která mají svůj průměr v rozmezí od 1 do 10 μm a spadá sem většina textilních vláken, ale též vlákna skleněná nebo uhlíková. Skupina vláken s největším průměrem, tedy 10 μm a víc, jsou vlákna hrubá a patří mezi ně borová vlákna, ale též vlákna TiB_2 , SiC a podobně. (6 s. 26)

Vlákněné výztuže si ale nemusíme představovat pouze jako textilie. Geometrie různých materiálů je opravdu rozmanitá. Jednotlivá vlákna se ihned po zvláknění sdružují do pramenců a ty lze dále zpracovávat do dalších podob.

Nejjednodušším svazkům vláken říkáme prameny. Ty mohou být se zákruty i bez nich. Pokud prameny obsahují minimální počet zákrutů, tzn. maximálně 40 zákrutů/metr, nazýváme je rovingy. Ty slouží jako nejčastější zdroj materiálu pro další zpracování. Nejčastěji jsou v podobě role navinuté na válcovitou cívku a pro výrobu tkanin jsou navinuty na menší kónické cívky v různých jemnostech, nejčastěji však ve 3K. Hodnota označovaná písmenem K (3K, 10K, 12K, 20K,..) určuje kolik tisíc monovláken se nachází v jednom prameni. Pro charakteristiku samostatných vláken se používá hodnota tex popisující hmotnost v gramech jednoho kilometru vlákna. Hodnota tex se jinak nazývá také délková hustota a často se můžeme setkat i s hodnotou dtex, tedy hmotnost deseti kilometrů vlákna a dnes nahrazuje starou hodnotu denier (den), která popisovala hmotnost produktu v gramech pro 9000 metrů délky.

Jako je roving název pro pramen vláken bez zákrut, stejně máme název jednoduchá/lablovaná příze, nebo též yarn, pro zkrucované svazky, které se dále využívají v některých technických tkaninách.

Další z možností zpracování jsou sekané prameny (chopped fibers), které se vyrábí mechanickým sekáním, nejčastěji na délku 50 mm. Ty lze využívat v různých zpracovatelských technologiích, především do lisovacích a stříkaných směsí.

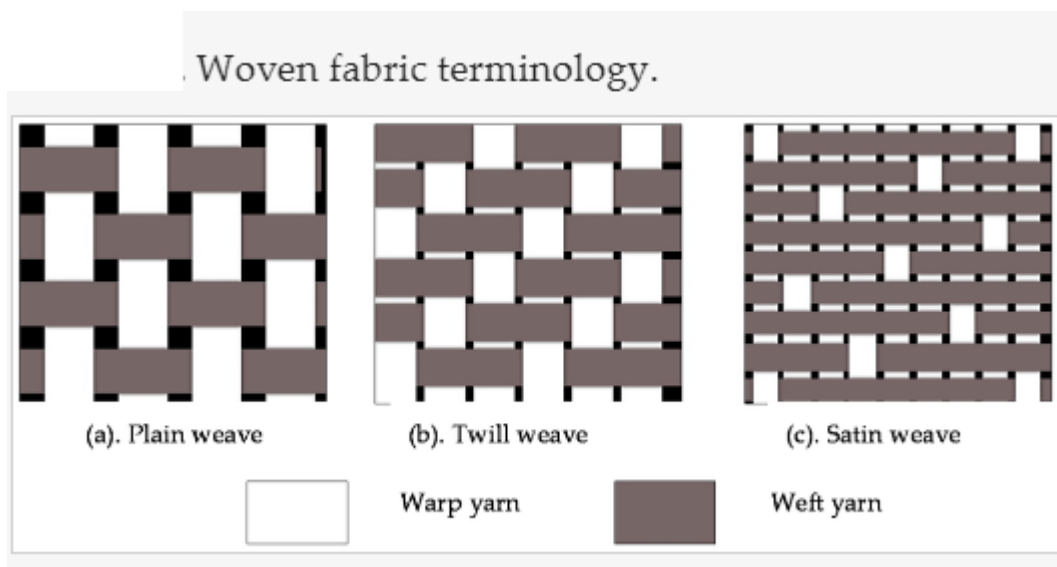
Kratší vlákna než sekaná lze vyrobit mechanickým mletím (milled fibers) za předpokladu, že vlákna jsou dostatečně křehká.

Pro konstrukční účely mají značný podíl jednosměrná neboli UD (unidirectional) pásy a pláty. Jedná se o plošný materiál složený pouze z vláken, která mají všechna stejný směr orientace. Takové materiály jsou velmi často používány pro pevnostní konstrukce, protože je možné při laminaci skládat jednotlivé vrstvy každou pod požadovaným úhlem, aby bylo dosaženo ideálních konstrukčních vlastností produktu. Další obzvláště přínosnou výhodou je fakt, že jednotlivá vlákna nejsou nijak zalomena či ohnuta, jako tomu je v případě tkaniny. Každý ohyb, či zalomení vlákna snižuje pevnost a do materiálu vnáší možnost defektu. Aby byl materiál soudržný a bylo možné s ním při laminaci pracovat, je potřeba jej předem prosytit pryskyřicí a nanést na podkladovou fólii, která se před samotnou laminací odstraní, jako tomu je v případě prepregů. Pro ostatní aplikace je potřeba vlákna spojit, a to většinou prošitím, propletením nebo slepením malým množstvím materiálu, který neovlivňuje vlastnosti kompozitu. Z popsanych důvodů se do této podoby zpracovávají především vlákna s vysokým a ultra vysokým modulem pružnosti v tahu a vysokou pevností.

Roviny lze zpracovat do podoby rovingových tkanin (fabrics) tkaním. Tkaniny se vyrábí v různých vazbách, především pak plátňová, keprová a atlasová vazba (obrázek 3). Tkaniny se vyrábí i v různých gramážích, které se uvádí v gramech na čtverečný metr [g/m²]. Takové tkaniny jsou hojně využívány pro výrobu prepregů, kontaktní laminování téměř všemi možnými laminačními technologiemi i pro navíjení a pultruzi.

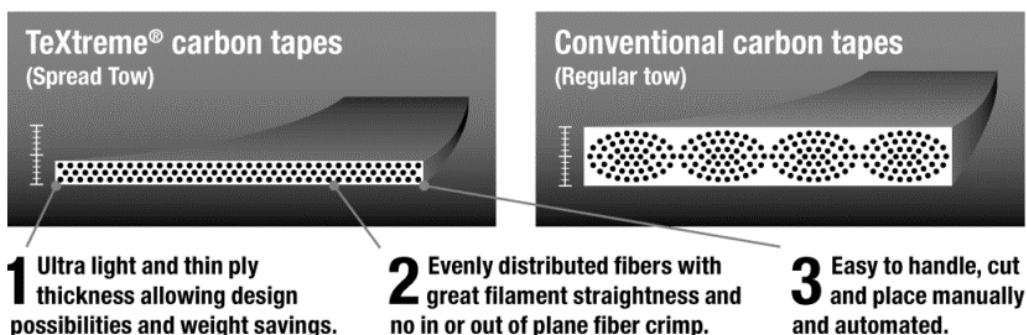
Zvláštním příkladem kombinace tkaniny a UD pásků je tkanina typu TextTreme® švédské firmy Oxeon, která vzniká tkaním UD pásků do podoby plátna. V porovnání s běžnou tkaninou má takové plátno nižší procento otvorů, a proto lze dosáhnout vyššího podílu výztuže v kompozitu. Ve firmě Oxeon jsou navíc UD pásy vyráběny jejich vlastní technologií, během které se dbá na rovnoměrné rozložení jednotlivých

vláken v celém objemu pásku (obrázek 4). TexTreme® tkanina může být vyrobena i hybridní z uhlíkových vláken s polymerními, čímž lze snížit hmotnost až o 20 %.

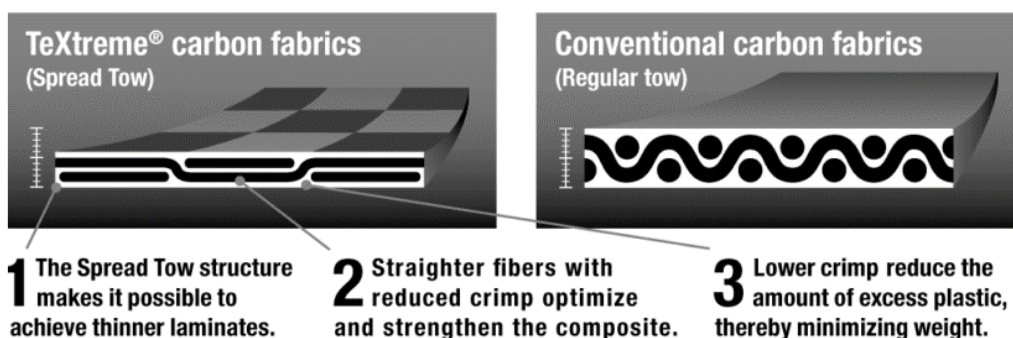


Obrázek 3: Plátnová (a), keprová (b) a atlasová (c) vazba tkanin (7)

Benefits of Spread Tow tapes



Benefits of Spread Tow fabrics



Obrázek 4: Znáznornění rozdílů mezi tkaninou TexTreme a běžnou tkaninou z rovingů (8)

Jak bylo již zmíněno, hybridní tkaniny vznikají kombinací různých druhů vláken během tkaní za účelem získání potřebných konstrukčních vlastností, nebo naopak

snížení ceny materiálu. Můžeme se běžně setkat s hybridními uhlík-aramidovými, uhlík-skleněnými, diolen-uhlíkovými, nebo diolen-aramidovými tkaninami.

Na rozdíl od tkanin, kde je orientace vláken přesně dána skladbou tkaní, existují i vlákenné rohože. Rohožemi neboli netkanými textiliemi rozumíme takový materiál, ve kterém jsou vlákna v jedné rovině nahodile orientována. Pro výrobu rohoží se používají jak kontinuální, tak sekaná vlákna. V případě těch sekaných je nutné použít emulzní nebo práškové pojivo, aby byla rohož tvarově stabilní a kompaktní. Práškově pojené rohože obecně platí za tužší, a proto se nejčastěji používají pro tvarově jednoduché, velkoplošné výrobky. U rohoží z kontinuálních vláken není pojiva potřeba, protože vlákna jsou vzájemně propletena a tím tvarově stabilní. Typická gramáž rohoží leží mezi 225 a 900 g/m².

Rohože, tkaniny, rovingy nebo UD plátna a pásy, které jsou již prosyceny polovytvrzenou pryskyřicí reaktoplastické nebo termoplastické matrice a takto určené ke zpracování se nazývají prepregy. V podobě prepregů lze nalézt jak jednovrstvý materiál, tak již vícevrstvé materiály tvořené plátny a tkaninami se vzájemnou orientací pod různými úhly a následně spojeny prošíáním. Existují i kombinované prepregy tvořené tkaninou a náhodně orientovanou výztuží. Díky vyššímu podílu pryskyřice v rohoži se tato vrstva umísťuje směrem k místu většího korozního namáhání a vrstva tkaniny směřuje ke straně většího mechanického namáhání.

Rozdělit vlákenné výztuže, které se používají v kompozitních materiálech, lze i podle povahy materiálu a to na: vlákna přírodní, skleněná, uhlíková a grafitová, polymerní, keramická, kovová a whiskery.

Konkrétních typů a výrobců vyztužujících vláken je samozřejmě dostupné nepřehledné množství. V následující části jsem se zaměřil na ty, které se nejčastěji používají ve výrobě jízdních kol a jejich částí.

1.2.1 Přírodní vlákna

Přírodní vlákna jsou nepříliš rozšířenou výztuží konstrukčních polymerních materiálů, nicméně je možné se s nimi setkat. Lze je obecně rozdělit do 2 základních skupin podle chemického složení, a to na vlákna založená na celulóze (bavlna, len, sisal, aj.) a na bílkovinová vlákna (pavučiny, hedvábí).

Konkrétně pavoučí vlákno je dodnes považováno za vzor skvěle výkonného vlákna. Při průměru až 7 μm vykazuje mez pevnosti 1140 MPa a tažnost až 31 % (6 s. 26) a proto mnoho výrobců hledá možnosti jeho umělé syntézy. Typickým příkladem jsou vlákna BioSteel® firmy Nexia Biotechnologies, která byla vyráběna díky úpravě DNA koz, do kterého byl vpraven vláknotvorný gen pavouka neřily kyjonohé (*Nephila clavipes*). Tyto kozy byly dojeny klasickým způsobem a protein obsažený v mléku byl následně zvláknován. Takto vyrobené kontinuální vlákno má široké využití v různých oborech, jako je balistická ochrana, výroba sportovního náčiní nebo částí strojů pro letectví a kosmonautiku. (9 s. 863) Nutno podotknout, že firma Nexia Biotechnologies v roce 2009 zkrachovala.

Vlákna na bázi celulózy mají v kompozitech spíše historický význam, nicméně nabízí například velmi zajímavou možnost výroby v některých rozvojových zemích, ve kterých se jeví jako jejich nejdostupnější surovina. Jako dostupný a relativně levný dopravní prostředek lze vyrobit jízdní kolo například z bambusu a přírodních vláken (obrázek 5) přímo v místě výskytu těchto rostlin.

Některá vlákna mají velice složitou fibrilární strukturu. Zajímavé a moderní využití celulózových vláken nabízí možnost výroby nanovláken důkladným rozvlákněním dřeva.

Velkou výhodou je též fakt, že naprostá většina přírodních vláken je plně biodegradovatelná.



Obrázek 5: Rám jízdního kola od výrobce BooBoo Bikes konstrukčního typu tube-to-tube, kde je jakožto trubkový materiál využit bambus a jako vláknenná výztuž pro laminaci spojů je využito konopné vlákno (10)

1.2.2 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna, též GF (z angl. glass fiber), je název pro všechna tenká vlákna s kulatým průřezem, vyrobená tažením z roztavené skloviny. Díky dobré dostupnosti a vhodným vlastnostem nacházejí široké uplatnění a v současnosti jsou stále nejrozšířenější vláknennou/textilní výztuží pro polymerní kompozity. S kompozitem na bázi skleněné výztuže se můžeme nejčastěji setkat pod názvem sklolaminát.

Jednou z vlastností skelného vlákna je izotropie, což znamená, že jeho materiálové charakteristiky jsou stejné jak v příčném, tak podélném směru. E-modul pružnosti v tahu je přibližně srovnatelný s hliníkem, je tedy asi na úrovni jedné třetiny modulu oceli. Pevnost v tahu je však podstatně vyšší nežli u většiny organických i anorganických vláken, a dokonce i oceli v kompaktní formě. Díky nižší hustotě skelného materiálu je zvláště vysoká měrná pevnost vláken. Jako značnou výhodu skelných vláken je třeba vyzdvihnout jejich nehořlavost a tepelnou odolnost.

Skelná vlákna se vyrábí tažením taveniny oxidů Si s příměsí oxidů dalších kovů, kterými jsou typicky Al, Ca, Mg, Pb a B s malým podílem oxidů alkalických kovů jako Na, nebo K. Směs výchozích surovin o daném složení se nazývá sklářský kmen. Různé typy skloviny se tedy liší svým složením, a proto rozeznáváme několik základních typů.

Nejrozšířenějším typem vlákna, která dnes zaujímají téměř 90 % trhu jsou tzv. E-vlákna vyrobená z E-skloviny. Jedná se o výrobek z bezalkalické skloviny, která funguje jako skvělý izolant, odtud plyne i označení písmenem E – jako elektrická.

Dalším typem je sklovina, která se vyznačuje vyšším obsahem SiO_2 , MgO a Al_2O_3 , díky čemuž má o 40-70 % vyšší pevnost. Odtud i označení S jako „strenght“, které se používá v USA, R-sklo jako „resistence“ pro Evropu, nebo T-sklovina v Japonsku.

Typ chemicky odolné skloviny, je označován jako C-sklo. Vyznačuje se skvělou odolností vůči kyselinám a chemicky agresivním látkám. Vysoce odolná bezboritá sklovina se také označuje jako ECR-sklovina, která má vyšší dielektrickou konstantu (7,0) oproti bor obsahující E-sklovina (5,9-6,6), proto není používána pro desky tištěných spojů.

Naopak proti alkáliím vysokou odolnost vykazují tzv. AR-vlákna, která jsou proto velmi vhodná pro výztuže do betonu. (11 s. 37)

Jednotlivá vlákna se mohou do jisté míry abrazivně poškozovat během zpracování, transportu atd., proto je potřeba povrch vláken dostatečně ochránit proti odírání. K tomu se používají lubrikační látky, jakými jsou nejčastěji oleje, vosky, škroby, želatina, nebo PVA. Tyto lubrikanty by při zpracování skelných přízí do kompozitu plnily nechtěnou funkci separátorů, a proto by neproběhlo dostatečně spojení vláken s pryskyřicí, proto je potřeba je včas odstranit.

Krom povrchové ochrany proti abrazi je další možností úprava vláken pomocí vazebných prostředků, aby mohlo dojít k dokonalému spojení vláken s matricí. Jako povrchové vazebné prostředky se nejčastěji používají organokovové prostředky, a to nejčastěji organosilany a chromkomplexy.

1.2.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna nacházejí v současné době opravdu široké využití. Díky svým výborným vlastnostem se stávají nejčastějším materiálem pro ultralehké konstrukce. Oproti skleněným vláknům mají asi desetinásobnou tuhost a poloviční hustotu, která bývá 1,8 až 2 g/cm³. Pokud jsou chráněna před oxidací, mají výborné tepelné vlastnosti až do 2000 °C, přičemž jejich pevnost neklesá do 1000 °C. Vykazují naprosto minimální tepelnou roztažnost, naopak ve směru osy vlákna se občas smršťují. Uhlíková vlákna jsou silně anizotropní. Vlastnosti ve směru osy vlákna a kolmo na osu se mohou lišit až stonásobně. Jsou velmi odolné vůči únavě, ale naopak je třeba se vyvarovat ostrým záhybům. Pokud v materiálu vlákna převládá krystalická struktura, hovoříme pak o grafitových vláknech (6 s. 29)

Hrubý materiál který se využívá k výrobě uhlíkových vláken se nazývá prekurzor. Jako typicky ideální prekurzor pro výrobu uhlíkových vláken s ohledem na kombinaci pevnosti a dalších mechanických vlastností se využívá vlákenný polyakrylonitril (PAN). Na bázi PAN je vyrobeno 90 % veškeré produkce uhlíkových vláken. Zbýlých 10 % se vyrábí především z ropných a uhelných smol. (12 s. 9)

1.2.3.1 Uhlíková vlákna na bázi polyakrylonitrilu (PAN)

Výrobu vláken na bázi polyakrylonitrilu lze rozdělit do několika základních kroků: polymerace PAN, jeho zvláknění, termální stabilizace, karbonizace, grafitizace a úprava povrchu vláken.

Akrylonitrilový prach se nejprve namíchá s jiným materiálem, nejčastěji methylnakrylátem nebo methylnmethakrylátem a následuje katalytická reakce konvenčním suspenzním nebo emulzním mechanismem. Takto vyrobený polymer je následně zvlákněn jednou z několika možných metod. V některých srážecích metodách je polymer v roztoku vytlačován tenkými tryskami do srážecí lázně, ve které se polymer vysráží na pevný vlákenný materiál. Stejným mechanismem se vyrábí klasická textilní polyakrylátová vlákna. Jiné metody jsou založeny na vytlačování směsi rozpouštědla s polymerem do odpařovací komory, kde rozpouštědlo rychle vytéká a zůstává jen pevné vlákno. Způsob, jakým bylo vlákno vyrobeno je podstatný, protože tím je určena vnitřní struktura vlákna.

Vyrobena vlákna jsou nejprve vymyta a následně dlužena na žádaný průměr. Dlužení pomáhá správné orientaci molekul uvnitř vlákna a vytváří tak žádaný základ pro těsně uspořádané krystaly uhlíku po procesu krystalizace. Před samotnou krystalizací je ale třeba vlákna převést z lineární atomární struktury do tepelně stabilnější žebříkovité struktury, což se provádí zahříváním v normální atmosféře vzduchu na 200-300 °C po dobu 30 až 120 minut, což umožní vláknům přijímat kyslík ze vzduchu a přestavět svou atomární strukturu. Stabilizace vláken může probíhat různými způsoby. Některé technologie jsou založené na soustavě tepelných komor, skrz které je vlákno protahováno, jiné technologie využívají vyhřívání válce, na kterých se vlákno udržuje dostatečně napnuté, v jiných se využívá proud směsi horkého vzduchu s jinými plyny, které pomáhají proces stabilizace urychlit.

Stabilizovaná vlákna jsou následně zahřívána na teplotu 1000-3000 °C v bezkyslíkaté atmosféře po dobu několika minut. Díky absenci kyslíku nedochází k hoření vláken. Zároveň je udržován vysoký tlak plynů. Během tohoto kroku se z vláken uvolňují neuhlíkové atomy v podobě směsi různých plynů: amoniak, vodní pára, oxidy uhelnatý a uhlíčitý, vodík a dusík. Po uvolnění všech neuhlíkových atomů se uhlíkové atomy uvnitř vláken seskupují do atomů, které jsou víceméně orientovány podél osy vlákna. Při některých výrobcích se používají dvě různé pece pracující při jiných teplotách, aby byl proces karbonizace lépe kontrolovatelný.

Po karbonizaci nemají vlákna povrch vhodný k vytvoření potřebně pevné vazby s epoxidovými pryskyřicemi a jinými materiály, které se používají jako matrice v kompozitních materiálech. Z tohoto důvodu je potřeba povrch vláken zlehka naoxidovat. Kyslík na povrchu zajistí lepší chemické spojení matrice s vlákny, ale zároveň se povrch stává hrubším, což zajistí i lepší mechanické spojení. Oxidace povrchu se provádí pomocí plynů jako jsou ozon, vzduch, oxid uhličitý, nebo pomocí kapalin, kterými jsou chlornan sodný nebo kyselina dusičná. Další možností je elektrolytické povlakování. Povrchová úprava vláken ale může být jak oxidativní, tak bezkyslíkatá. Bezkyšlíkaté metody zahrnují roubování polymerů nebo pyrolytické nanášení uhlíku na povrch vláken. Povrch uhlíkových vláken lze také upravovat pomocí plazmy, nebo může být přímo na povrch nanесena tenká vrstva epoxidové pryskyřice či jiných polymerů. Interlaminární smyková pevnost povrchově ošetřených uhlíkových vláken se nachází v rozsahu 30-90 MPa. V přítomnosti kyslíku uhlíková vlákna degradují při 400 °C a v inertních podmínkách zůstávají stabilní do teploty 2000 °C, proto se mohou ošetřovat proti oxidační degradaci nanášením povlaku SiC, Si₃N₄, BN a Al₂O₃. (12 s. 9-12)

1.2.3.2 Uhlíková vlákna na bázi smol (pitch)

Izotropní a mezofázové smoly pro výrobu uhlíkových vláken se získávají z ropy nebo černouhelného dehtu. Některá takto vyrobená vlákna vykazují lepší elektrické a tepelné vlastnosti nežli vlákna na bázi PAN. Vlákna na bázi smol byla poprvé vyrobena v 60. letech, do běžného prodeje se však dostala až v letech 80. Ve srovnání s výrobou vláken z PAN je výroba z mezofázových smol podstatně dražší. Výhodou je naopak lepší dostupnost vstupního materiálu, vyšší výtěžek a vysoký stupeň orientace struktury vlákna.

Výroba se skládá z několika základních kroků, kterými jsou: příprava smol, zvlákňování, tepelná stabilizace, karbonizace, grafitizace a povrchová úprava.

Nejdůležitějším krokem v přípravě smol je odstranění nečistot, jakými jsou pevné částice a gelové materiály, které by snižovaly pevnost výsledného vlákna. Neméně důležité je odstranění uhlovodíků s nízkou molekulární hmotností. Pitch vlákna mohou mít teoreticky stejný modul pružnosti v tahu jako grafit, tedy 1050 GPa, což je mnohem vyšší hodnota nežli 650 GPa, které mohou maximálně dosahovat vlákna

připravená z PAN prekurzoru. Izotropní smola má bod měknutí mezi 40 a 120 °C. Mezofázová smola je neizotropní stav tekutých krystalů uhlíkatých aromatických molekul, která má bod měknutí 300 °C. Smola v tomto stavu se připravuje pyrolýzou izotropních smol mezi 300 a 500 °C.

Molekulová hmotnost smol se nachází v rozpětí 150 a 1000 g/mol, kde jejich průměrná hodnota je 450 g/mol. Nejprve je smola natavena do podoby jednoho kontinuálního vlákna při 350 °C. Tvar trysky řídí nejen výsledný průřez vlákna, ale může rovnou ovlivňovat i vnitřní mikrostrukturu vlákna, která se mění i s podmínkami zvlákňování.

Následuje tepelná stabilizace vlákna mezi 200 a 300 °C. Při vyšších teplotách vlákno taje, protože se chová jako termoplast, ale díky stabilizaci přechází do stavu termosetu a díky tomu může následovat fáze karbonizace. Fázi stabilizace je potřeba pečlivě řídit a sledovat. Nedostatečně stabilizovaná vlákna při fázi karbonizace tají, příliš stabilizovaná vlákna zase nevykazují tak vysoké pevnostní hodnoty. Čas stabilizace je navíc jiný pro vlákna z mezofázových smol, který je zpravidla kratší nežli u vláken z izotropních smol. Po fázi karbonizace a grafitizace mají vlákna na bázi smol nejvyšší výtěžek uhlíku ze všech metod výroby uhlíkových vláken (70-80%).

1.2.3.3 Uhlíková vlákna na bázi celulózy

Pro výrobu uhlíkových vláken lze využít též viskóзовých vláken jakožto prekurzoru. První uhlíková vlákna na bázi celulózy byla vyráběna pro produkci klasických žárovek. Pro konstrukční účely jejich výroba začala v 60. letech 20. století firmou Union Carbide.

Výroba se skládá ze tří základních kroků: nízkoteplotní dekompozice, karbonizace a grafitizace.

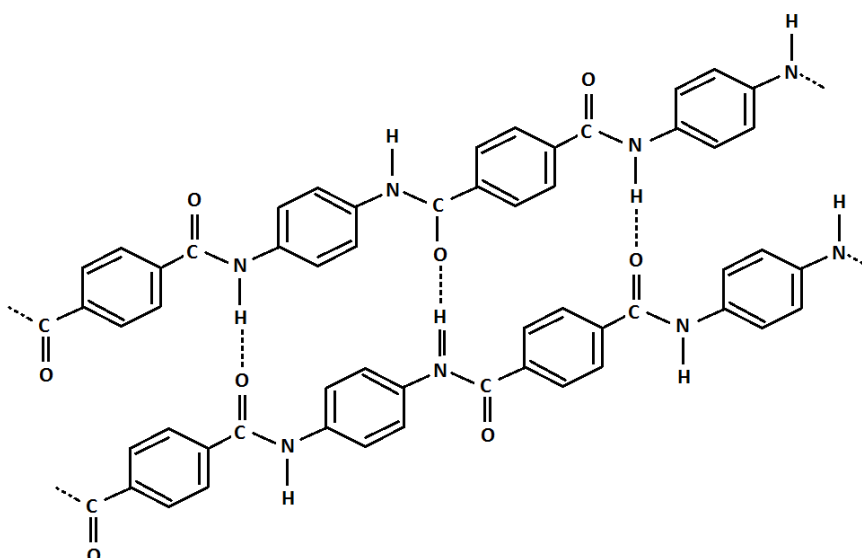
Ze všeho nejprve se viskóзовá vlákna nahřejí na 100 °C v inertní atmosféře, aby se odstranila veškerá voda. Teplota se postupně zvyšuje až k 400 °C, během čehož dochází ke strukturním změnám a vlákna ztratí na objemu až 70 %. Karbonizace probíhá během dloužení. Výtěžek této výroby se pohybuje od 10 do 30 %. Takto vyrobená vlákna mají Youngův modul 170-500 GPa a pevnost v tahu od 1 do 2 GPa (13 s. 649).

1.2.4 Polymerní vlákna

Největší výhodou polymerních vláken obecně je jejich nízká hustota. Nejběžnější polymerní vlákna, tedy z polyethyltereftalátu (PET), polyamidu (PA6 a PA66) a polyakrylonitrilu (PAN) mají pevnost a především modul pružnosti v tahu řádově nižší nežli vlákna skleněná. Lze dosáhnout vyšší pevnosti díky dloužení, a to až na 1000 MPa, ale youngův modul pružnosti se zvyšuje jen velmi málo, a to na maximálně 5-10 GPa u PA6, nebo 15 GPa pro PET. (14 s. 37) A přitom by kovalentní vazby mezi atomy v hlavní lineární molekule v ose vlákna mohly poskytovat teoreticky mnohonásobně vyšší hodnoty. Proto je potřeba při výrobě výkonných konstrukčních polymerních vláken volit jiný způsob výroby nežli pro běžná textilní vlákna.

1.2.4.1 Aramidová vlákna (aromatické polyamidy)

Nejznámějším vláknem je polyparafenyltereftalamid (PPTA), známý pod obchodním názvem Kevlar® společnosti DuPont. Jedná se o vlákna na bázi lineárních organických polymerů s kovalentními vazbami orientovanými ve směru osy vlákna. Největší výhodou je nízká hustota ($\rho=1440 \text{ g/cm}^3$) a velká odolnost vůči abrazi a schopnost se plasticky deformovat při působení síly ve směru kolmo na osu vlákna.



Obrázek 6: Struktura aramidu PPTA

Ve struktuře molekul je patrné pravidelné uspořádání amidových skupin (obrázek 6). Díky přítomnosti vodíkových můstků a aromatických jader materiál vykazuje vysokou tuhost. Teoretická pevnost je odhadnuta na 200 kN/mm², ale komerčně dostupná vlákna mají reálné výkony nižší. To je dáno nedokonalou orientací krystalických nadstruktur. Protože je teplota tání materiálu vyšší nežli teplota tepelného rozkladu, je nemožná výroba vláken z taveniny. Proto zvlákňování probíhá z vysoce viskózního 20% roztoku v koncentrované kyselině sírové. Jednotlivá vlákna se spojují do pramenců a následně je potřeba vícenásobně proprat, neutralizovat a opatřit pomocnými textilními prostředky pro zlepšení zpracovatelských a kluzných vlastností. (15 s. 225)

Aramidová vlákna lze použít v kombinaci se všemi běžnými reaktoplastickými pryskyřicemi i termoplasty. Avšak jako výztuž polymerních materiálů se používá řádově několik jednotek procent celosvětové produkce. Hlavní využití aramidových vláken je aplikace v pneumatikách, v oblastech balistické ochrany, bezpečnostních oděvů odolných vůči prodření a vyšším teplotám atd.

1.2.4.2 Polyethylen s ultra vysokou molekulovou hmotností (UHMWPE)

Z anglického názvu ultra-high molecular weight polyethylene se setkáváme s těmito vlákny nejčastěji pod zkratkou UHMWPE, nebo též UHMPE, tedy ultra-high module polyethylene, což znamená polyethylen s ultra vysokým modulem. Od roku 1985 je na trhu tento materiál pod názvem Dyneema[®] německé firmy DSM, nebo jako Tekmilon[®] japonské firmy Mitsui Petrochemical Ind., Tivar[®] firmy Quadrant PP, Tensylon[®] od Integrated textile systems, Gardur firmy Garland manufacturing, všechny tři z USA, nebo PolystoneM[®] firmy RöchlingEngineering Plastics z Německa.

Základem těchto vláken je polyethylen s přísně lineární, velmi dlouhou molekulou, která byla připravena zvlákňováním gelu. Kovalentní vazby mezi uhlíky v řetězci leží v rovině, a proto lze dosáhnout teoretického modulu pružnosti v tahu až 250 GPa. Ideálních materiálových charakteristik je dosaženo díky dloužení vláken z roztoku, kde je dosahováno dloužícího poměru 70 a více. Dloužící poměr je hodnota popisující kolikanásobně se zvětší délka úseku dlouženého vlákna. Materiál polymeru je vyrobený ve formě prášku z ethylenu a kyslíku pomocí katalyzátoru chloridu titaničitého. Ten je rozpuštěn do 5-10 % roztoku v jednom z příbuzných rozpouštědel

jako je dekalin, parafinový olej atd., ve kterém se separují molekuly, které se při průchodu kapilární tryskou lineárně uspořádávají.

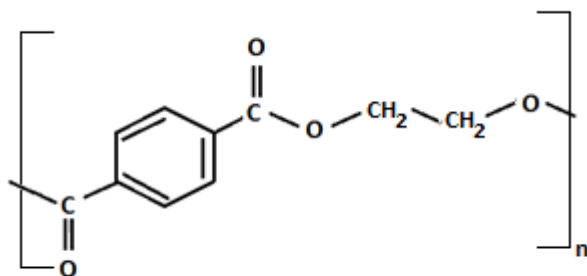
Mezi hlavní přednosti UHMWPE vláken patří nízká hustota $\rho=970 \text{ g/cm}^3$ a vysoká pevnost, především pak skvělá korozní odolnost. Tato vlákna taky, na rozdíl od aramidových, nepřijímají vlhkost a jsou odolnější vůči UV záření. Výhodou je i vyšší mechanická odolnost vůči přebroušení nebo přerézání vláken. Proto se se skvěle hodí do vrchních vrstev kompozitních laminátů, jako je viditelné na obrázku 7. Nevýhody jsou především v nízké tepelné odolnosti, která je maximálně okolo $135 \text{ }^\circ\text{C}$. (16 s.7-15)



Obrázek 7: Prototyp rámu kola od výrobce Filament bikes využívající hybridní tkaninu z uhlíkových a UHMWPE vláken Dyneema (17)

1.2.4.3 Polyethyltereftalátová vlákna

Tato vlákna, známá pod zkratkou PET (s chemickým vzorcem viz obrázek 8), spadají do skupiny takzvaných polyesterových vláken. Díky jejich nízké pevnosti nepatří mezi vláknenné výztuže kompozitů pro konstrukční účely v pravém slova smyslu. Jejich hlavní výhodou jsou nízká cena, dobrá odolnost vůči abrazi a možnost je různě barvit pomocí pigmentů. Z těchto důvodů je nacházíme nejčastěji v aplikacích, kde je kladen důraz na vzhled kompozitu a ne tak velký důraz na výkon. Typickým příkladem je kombinace se skelnými vlákny pro výrobu trupu kajaků a podobně. Tato vlákna jsou na trhu dostupná pod názvem Diolen® Nizozemské firmy Diolen Industrial Fibers B.V. (18)



Obrázek 8: Chemický vzorec PET

1.3 Pojivo – matrice

Aby vznikl materiál, který můžeme nazvat kompozitem, je potřeba prosytit systém vláken, případně jiných komponent tak, aby vznikl tvarově stálý výrobek. Hlavními funkcemi matrice v kompozitu je tedy definice geometrického tvaru, ochrana vláken a přenos sil. Síly působících v kompozitu asistovaných maticí je celá řada: přenos namáhání na vlákna, přenesení působení z vlákna na vlákno a stálé zajištění prostorové polohy vlákna ve výrobku. I z toho lze odvodit, že hlavním aspektem pro kvalitu kompozitu z hlediska styku matrice a vlákna je zajištění dostatečné adheze mezi těmito dvěma složkami. Krom fyzické vazby je potřebná i dostatečně silná chemická vazba a pro dosažení dobrých výsledků se na vlákna nanáší apretace vždy jiná dle druhu vlákna. Důležitá je samozřejmě i volba matrice se vhodnými vlastnostmi,

jako je především viskozita a povrchové napětí, aby bylo dosaženo co nejlepšího smočení vláken i při nízkém podílu pojiva v kompozitu a také aby v materiálu bylo minimální množství bublin.

Hlavně v minulosti byly nejpoužívanějšími, a téměř jedinými používanými, pojivy reaktoplastické pryskyřice na bázi vyztužených nenasycených polyesterů (UP), nebo epoxidů (EP). I v dnešní době jsou tyto pryskyřice hlavními druhy pojiv, ale ne jedinými. Jejich největší výhodou je, že jsou i při pokojové teplotě tekuté, a proto jednodušeji zpracovatelné. I když je jejich viskozita často vyšších hodnot, většinou v řádu stovek mPa.s, jsou stále méně viskózní nežli termoplastické taveniny za vyšších teplot, jejichž hodnoty se pohybují v řádech 10^3 až 10^5 mPa.s.

Vysoká pevnost a tuhost reaktoplastických pryskyřic sebou nese i vlastnost nízké tažnosti a křehkosti. Z tohoto důvodu je velmi často potřeba materiály matrice modifikovat. Naopak termoplastické matrice mají hlavní výhodu ve své houževnatosti, ale naprosté minimum termoplastů dosahuje tak výborné tepelné a chemické odolnosti a hodnot pevnosti jako zesítené reaktoplasty. Nevýhodou termoplastů jakožto matric jsou i vyšší nároky na zpracovatelské stroje, protože prosycování probíhá ve formě taveniny za vyšších teplot vysoce viskózní taveninou, a proto je náročnější vláknennou výztuž řádně prosytit. Proto se můžeme s termoplastickými kompozity setkat především v podobě plastu vyztuženém vláknou o délce kolem 0,2 mm pro výrobu vstřikováním, případně lisováním.

Ve výrobě kompozitních výrobků se využívá celá škála různých matric. V následující části práce se zaměřím na ty, které mají největší význam ve výrobě jízdních kol a jejich částí.

1.3.1 Reaktivní pryskyřice

Jednou z nejpoužívanějších skupin termosetů jsou tzv. reaktivní pryskyřice, což jsou látky, které se společně s jinými látkami, zvanými tvrdidla, nebo samostatně bez nich, používají pro výrobu kompozitu.

Tvrdidly rozumíme látky, které ovlivňují vytvrzování polyadičním mechanismem, nebo katalyticky iniciují polymerizaci. Polyadičním mechanismem se vytvrzují epoxidové pryskyřice obsahující dostatečné množství epoxidových neboli oxiránových, skupin vhodných k zesítení nebo izokyanátové pryskyřice. Katalyticky iniciované vytvrzovací reakce typicky probíhají například u nenasycených polyesterových

pryskyřic, které byly vyrobeny z nasycené vícesytné kyseliny a vícemocného alkoholu a následně byly rozpuštěny v reaktivním monomerním rozpouštědle, většinou styrenu, se kterým může následně kopolymerovat. Další takovou pryskyřicí jsou metakrylátové pryskyřice vyrobené ze směsi monomerních a polymerních esterů kyseliny metakrylové, vinylesterové nebo fenylakrylátové pryskyřice z fenolenových nebo fenylových derivátů.

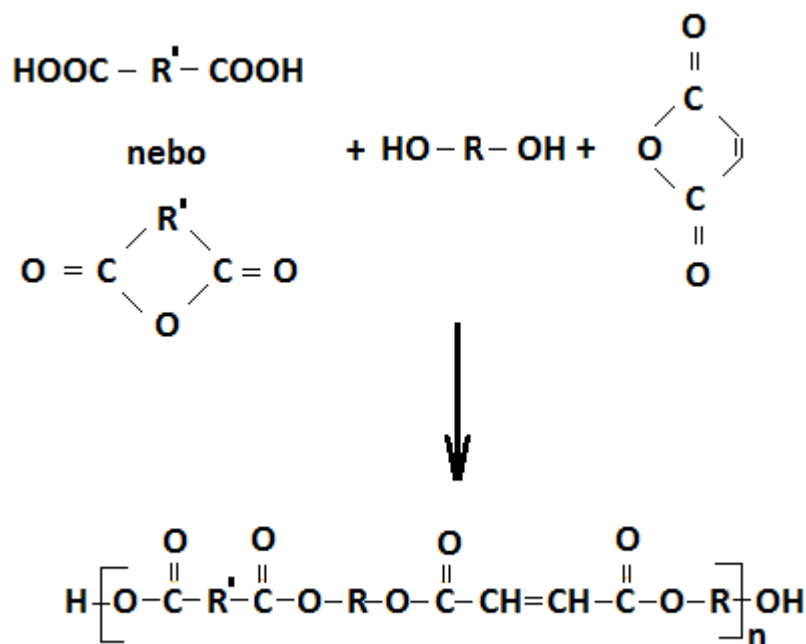
Krom tvrdidel se též často užívají látky zvané urychlovače, což jsou látky, které přidáním malého množství urychlí reakci zesílení.

1.3.1.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP)

Historicky druhou nejstarší syntetickou pryskyřicí, objevenou kolem roku 1940, byly nenasycené polyesterové pryskyřice. Taková pryskyřice se skládá z nenasyceného polyesteru, monomeru a inhibitoru. Opravdu velkého průmyslového využití získávají především díky velmi nízké viskozitě, nízké ceně a rychlé vytvrzovací reakci.

Polyestery lineárního tvaru vyrobené z glykolů a nasycených dikarboxylových kyselin jsou termoplastické a rozpustné. Jiné je to ovšem při použití nenasycených dikarboxylových kyselin, nebo nenasyceného diolu. Tím jsou do lineárního řetězce polyesteru vneseny další reaktivní místa v podobě dvojných vazeb. Dvojná vazba jsou schopné polymerizace a díky teplu, UV záření nebo kyslíku mohou lineární makromolekuly polyesterů zesíťovat.

Nenasycené polyesterové pryskyřice jsou tedy makromolekulární látky vyrobené reakcí dikarboxylových kyselin, nebo jejich anhydridů, s dioly (obrázek 9) a následně jsou tyto polyestery rozpuštěny v reaktivním rozpouštědle (monomeru), se kterým za určitých podmínek reagují. Nejčastějšími anhydridy jsou maleinanhydrid a ftalanhydrid a nejčastěji používanými dioly jsou etylenglykol nebo propylenglykol.



Obrázek 9: Reakce syntézy UP pryskyřice, kde R a R' jsou nasycené uhlovodíkové řetězce

Poměr diolu a dikyseliny v polyesterifikaci polykondenzací závisí na chemické struktuře reaktantů a jejich stechiometrii. Obecně můžeme říci, že glykolu se přidává lehký přebytek pro případnou kompenzaci možného úniku v podobě par. Reakce probíhá ve dvou krocích: vznik monoesteru následovaný polykondenzací při vyšší teplotě. Reakce je reversibilní a jako vedlejší produkt vzniká voda, kterou je nezbytné odstranit pro správný průběh reakce.

Odstraňování vody z reakční směsi probíhá kontinuálně pomocí vakua nebo pomocí rozpouštědla, například xylenu, který vytváří s vodou azeotropní směs v plynném stavu. Plynná směs kondenzuje v zachytivé nádobě, kde se fáze oddělují díky rozdílným hustotám. Xylen se nachází v horní fázi, která se kontinuálně vrací zpět do reaktoru a vodu usazovanou ve spodní části nádoby lze odstranit jednoduše výpustí ve dně nádoby. K tomu se používá Dean-Starkova aparatura. (20s. 84) Průběh reakce lze dobře sledovat pomocí množství vody odstraněného z reakce a pomocí čísla kyselosti.

Dalším krokem po polyesterifikaci je rozpuštění vzniklého polyesteru v reaktivním rozpouštědle. Tím je monomer, který musí splňovat tyto podmínky: musí být snášlivý s polyesterem za normální i nízké teploty. Musí během vytvrzování s polyesterem reagovat rychleji, než probíhá polymerace samotného monomeru. Často totiž dochází k nesnášlivosti mezi homopolymerem a kopolymerem. Pokud by tomu

tak nebylo, vytvrzený materiál by nebyl homogenní a čirý. A poslední podmínkou je, že kopolymerace musí za běžných podmínek probíhat v přijatelném časovém úseku.

Nejpoužívanějším monomerem v běžných typech pryskyřic je styren. Mezi jeho největší výhody patří to, že je levný, značně reaktivní a kopolymeruje s nenasyceným polyesterem nejen při zvýšené, ale i běžné teplotě. Naopak nevýhodou styrenu je znatelná těkavost, hořlavost a jeho omezená mísitelnost s běžnými typy polyesterů – podle typu polyesteru je to 30-50 %. (21 s. 357)

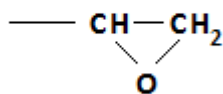
Problém s odpařováním lze řešit nahrazením styrenu monomerem allylového typu. Výhodou je i fakt, že mají více nežli jednu dvojnou vazbu a jejich kopolymeraci lze ovlivnit, nebo úplně zastavit, v libovolném stadiu. Díky tomu jsou výsledné materiály lépe tepelně odolné a vyšší funkčnost dovoluje výrobu různých meziproductů. Kopolymerace však musí probíhat za zvýšené teploty, a proto je vhodné takové polyesterové pryskyřice používat pro lisovací hmoty. Vyhovujícími monomery mohou být diallylftalát, diallylisoftalát anebo například triallylkyanurát.

1.3.1.2 Epoxidové pryskyřice (EP)

Velký význam mezi reaktoplastickými hmotami mají tzv. epoxidové pryskyřice. Nazýváme tak látky, které v molekule obsahují nejméně jednu epoxidovou skupinu (obrázek 10), která je velmi reaktivní s celou řadou dalších látek, díky čemuž může docházet k tvorbě polymerní sítě. Takto vzniklé látky mají široké možnosti uplatnění jako matrice pro kompozitní materiály, ale také jako zalévací, nátěrové a lisovací hmoty, lepidla, medicínální materiály atd.

Epoxidové pryskyřice mohou mít podobu viskózní kapaliny, ale i pevné látky. Často obsahují taky rozpouštědla a jiné pomocné aditivní látky. Na rozdíl od nenasycených polyesterových pryskyřic, kde je přidávaný katalyzátor jen donorem radikálu iniciujícího síťovací reakci, je v epoxidech přidané tvrdidlo látka, která se přímo účastní tvorby síťujících vazeb (obrázek 11). Z tohoto důvodu je velmi důležité, aby se pryskyřice s tvrdidlem mísila v přesném stechiometrickém poměru. Tvrdidla se přidávají v podobě kapalin, někdy pevných látek, a obsahují aktivní vodíkové ionty v molekule, které reagují s oxiranovými skupinami v molekule samotné epoxidové pryskyřice. Díky tomu, že jak pryskyřice, tak tvrdidla mohou být tvořena různými chemickými sloučeninami, tvoří epoxidové pryskyřice velmi rozmanitou skupinu

materiálů. Volbou vhodného tvrdidla lze výrazně ovlivnit vlastnosti výsledného materiálu.

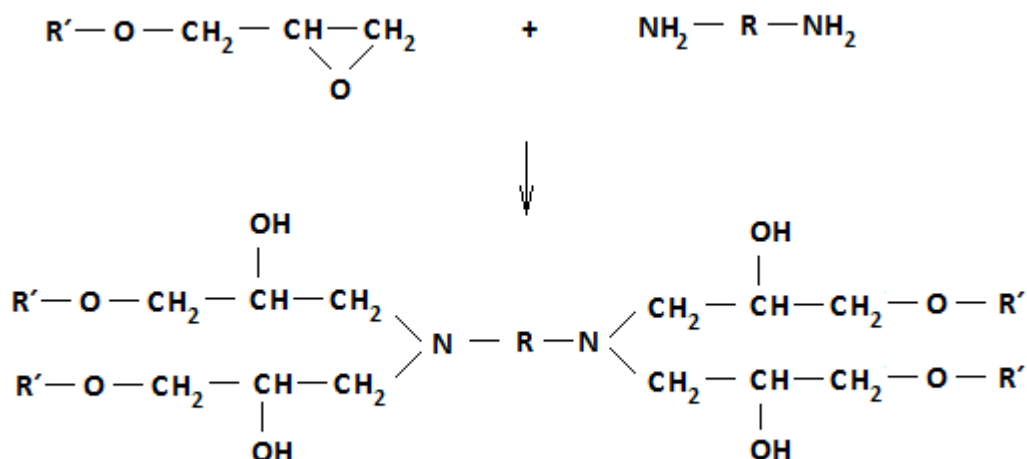


Obrázek 10: Epoxidová neboli oxiranová skupina

Na obrázku 10 můžeme vidět znázorněnou podobu epoxidové skupiny, která je charakterovým znakem nevytvrzené epoxidové pryskyřice. Tento trojčlenný kruh je značně napjatý a jeví značnou snahu se otevřít díky působení aktivních vodíkových atomů, které jsou obsaženy ve vícefunkčních tvrdidlech. Na tomto principu stojí mechanismus vzniku trojrozměrné polymerní sítě. To typicky probíhá polyadicí. Vodíkový atom, obsažený například v diaminech, se váže na kyslíkový atom epoxidové skupiny. Vzniklá –OH skupina je důvod výborné přilnavosti epoxidových pryskyřic. Na koncový atom uhlíku se váže dusík z aminové skupiny. Diamin, který obsahuje čtyři aktivní vodíky se váže se čtyřmi molekulami epoxidové pryskyřice. V ideálním případě neobsahuje vytvrzená epoxidová pryskyřice žádné volné epoxidové skupiny.

Jednou z výhod pro výrobní technologie je, že tímto adičním postupem zůstává reakční směs dostatečně tekutá i ve stavu, kdy již řada epoxidových skupin zareagovala s molekulami tvrdidla a gelace směsi probíhá postupně.

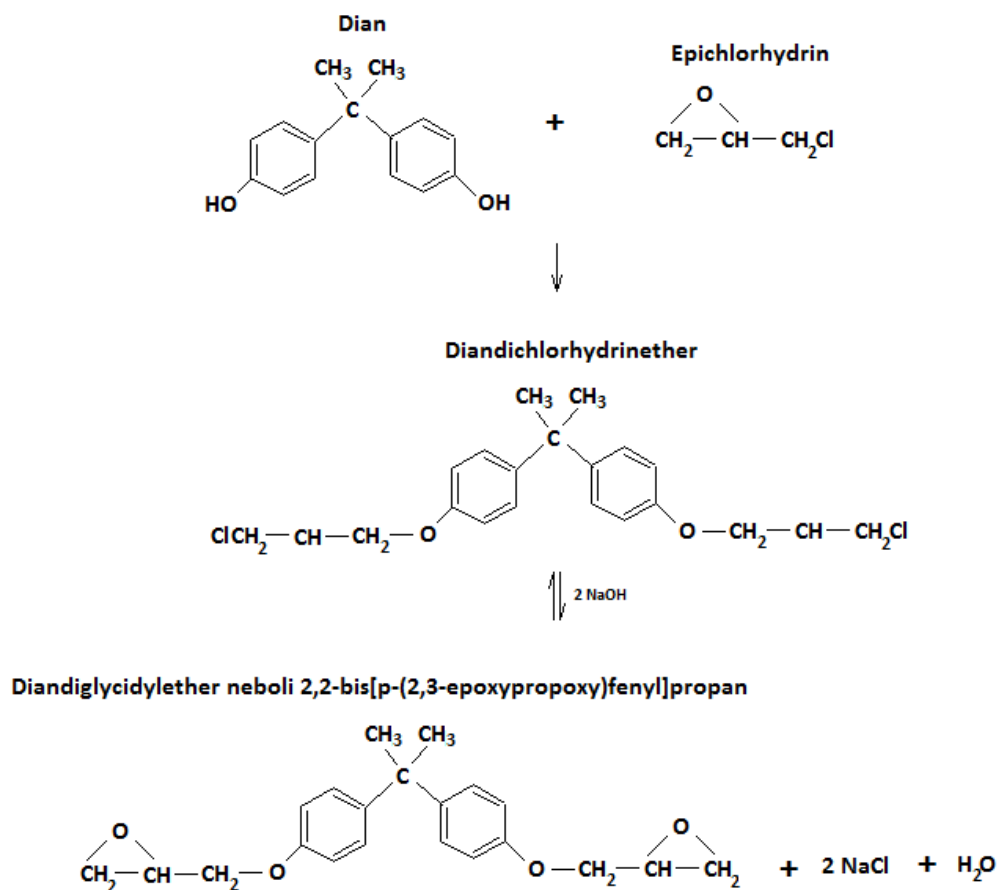
Nepopíratelně nejdůležitější skupinou epoxidových pryskyřic jsou ty na bázi BPA, tedy bisfenolu A. Další možné pryskyřice mohou být postaveny na novolakovém základu a vykazují vysokou tvarovou stálost za vyšších teplot, díky značné hustotě zesílení. Jednou z nevýhod aromatických epoxidových materiálů je nízká odolnost vůči UV, to lze řešit jejich nahrazením cykloalifatickými epoxidovými pryskyřicemi (22 s. 1790).



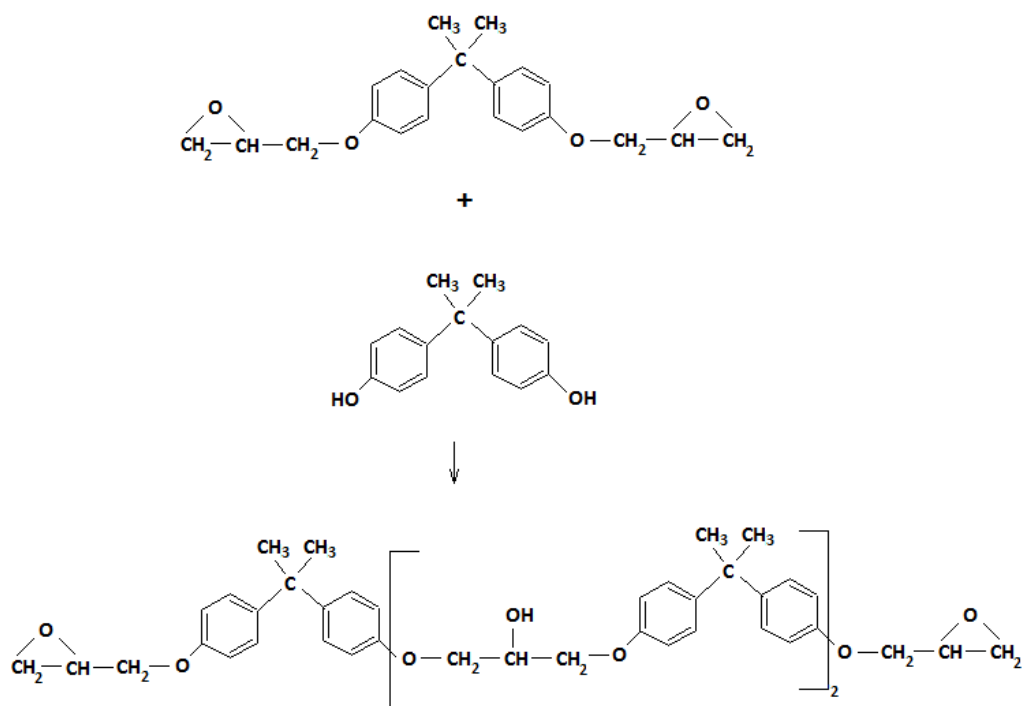
Obrázek 11: Schéma polyadiční vytvrzovací reakce epoxidové pryskyřice a diaminu jako tvrdidla

Krom běžných údajů se epoxidové pryskyřice charakterizují i některými specifickými hodnotami. Jednou z nich je tzv. epoxidový ekvivalent, který udává kolik epoxidových skupin je obsaženo ve váhové jednotce. Tento údaj je nezbytný pro výpočet stechiometrického poměru vmíchaného tvrdidla. Přesněji se dá říci, že epoxidový ekvivalent popisuje hmotnost pojiva v gramech, které obsahuje jeden mol epoxidových skupin. Další hodnotou je epoxidové číslo, které udává počet molů epoxidové skupiny ve 100 g pryskyřice. Stejnou logiku lze aplikovat na charakteristiku tvrdidla, kde se udává hodnota vodíkový ekvivalent a udává hmotnost tvrdidla v gramech, které obsahuje 1 mol aktivního vodíku.

Zmíněný bisfenol A (BPA), jako nejběžnější základ epoxidové pryskyřice glycidylového typu, je ve skutečnosti 2,2-bis(4-hydroxyfenyl)propan, někdy také zvaný krátce jako dian. Ten se používá k výrobě EP alkalickou kondenzací s epichlorhydrinem. (obrázek 12) Takto vypadá 85 % světové produkce. (21 s. 291) Tato výroba se skládá nejprve z alkalicky katalyzované adice epoxidové skupiny epichlorhydrinu na fenolický hydroxyl a následného odštěpení chlorovodíku ze vzniklých chlorhydrinetherů. Vznikající epoxidová skupina buď zůstane zachována, nebo reaguje s fenolickým hydroxylem další molekuly dianu a vzniká vyšemolekulární látka. (obrázek 13)



Obrázek 12: Reakční schéma vzniku glycidylové epoxidové pryskyřice z BPA a epichlorhydrinu



Obrázek 13: Reakce diandiglycidyletheru s další molekulou dianu a vznik vyšemolekulární látky

Epoxidové pryskyřice mají výborné izolační vlastnosti, dobrou odolnost vůči rozpouštědlům, výborné adhezni vlastnosti v použití jako lepidlo, mají v porovnání s nenasycenými polyesterovými pryskyřicemi mnohem lepší pevnostní a konstrukční vlastnosti. Mezi hlavní nevýhody patří vyšší cena, delší čas vytvrzovací reakce a nízká odolnost vůči UV záření, a proto jejich nutná následná ochrana UV odolným krycím lakem.

1.4 Výrobní technologie – zpracování kompozitů

Z předchozího popisu materiálových složek známe některé charakteristiky určující výsledné vlastnosti kompozitního výrobku, ale je třeba si uvědomit, že velmi podstatnou otázkou je zpracování. Je tedy nadmíru důležité zvolit správný technologický postup, jakým popsané matrice a výztuže propojit, aby došlo k dokonalému smíšení a zároveň se využilo možné maximum potenciálu použitých materiálů.

Rozhodně je nutné hodnotit hned několik faktorů pro volbu vhodné technologie. Prvně se zaměříme na velikost a členitost požadovaného výrobku. Některé výrobní technologie je možno použít jen pro omezený výběr tvarů. Například navíjením není možné vyrábět jiné díly nežli trubkové a jiné duté profily. Mimo tvaru je pro volbu zpracovatelské metody důležitý i požadavek na kvalitu povrchu, protože některými výrobními postupy lze získat výrobky, které mají požadovanou kvalitu povrchu pouze z jedné strany. Z konstrukčního hlediska je nejvíce důležitý faktor pevnostních vlastností, protože ty se většinou odvíjí od orientace výztuže a procentuálním zastoupením výztužné/pojivové složky. Velmi důležité je i zvážit sériovost výroby. Je logické, že u velkosériové výroby se rozhodně nevyplatí ruční kladení, a naopak by bylo velmi nevýhodné provádět kusovou nebo malosériovou produkci pomocí složité strojní technologie. Tímto se dostáváme k často zásadnímu faktoru a tím je finanční nákladnost výroby. Jak tomu, tak bývá, většinou se musí volit kompromisní řešení mezi zmíněnými otázkami.

Ortotropní materiál, jakým kompozit je, nelze jednoduše opracovávat do výsledného tvaru, jako tomu je u homogenních materiálů. Nelze výrobek tvarovat například soustružením nebo frézováním z jednoho bloku materiálu a očekávat požadované vlastnosti, jako tomu je třeba u zpracování kovů. Kompozity je třeba

vyrábět rovnou do požadovaných tvarů. Nezbytnou pomůckou jsou proto formy určující tvar a povrch výrobků.

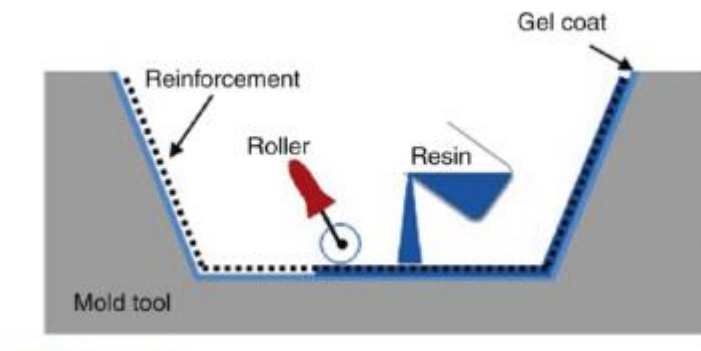
U výroby každé formy je nezbytné zvážit pro jakou technologii bude využívána. Pro ruční kladení a některé injektážní metody se nejčastěji používá laminát samotný nebo v kombinaci s pěnovými materiály, dřevem atd. Nejlevnější laminátové formy bývají vyrobené z nenasyčené polyesterové pryskyřice a skleněných rohoží. Na tvorbu kvalitního otiskovacího povrchu se používá formový gelcoat. Pro injekční a lisovací technologie, navíjení, tažení a lití se nejčastěji používají formy kovové. Povrch každé formy je vždy potřeba opatřit separátorem. Separátor je materiál, který zabrání tvorbě vazby mezi materiálem formy a povrchem výsledného výrobku. Separátory bývají nejčastěji vosky, oleje nebo polyvinylalkohol (PVA).

1.4.1 Ruční laminace

Ruční laminace, nebo také ruční kladení, anglicky hand lay-up je nejjednodušší, nejstarší a často též nejlevnější metoda výroby kompozitních dílců. Kvalita výroby však velice podstatně závisí na zkušenostech a schopnostech pracovníka provádějícího výrobu.

Nejčastěji je použita jednostranná forma a suchá tkanina, flies, rohož a jiný výztužný materiál, který je do formy kladen. Výztuž je ručně prosycována připravenou pryskyřicí válečkem nebo štětcem tak, jak je zobrazeno na obrázku 14. Je proto potřeba používat pryskyřice s relativně nízkými viskozitami, a i přesto může být prosycování textilií o vysoké gramáži značně náročné. Tento postup ale dovoluje tvorbu sendvičových struktur i za použití voštinových, tzv. honeycomb materiálů.

Výrobek ve formě vytvrzuje za atmosférických podmínek okolí. Vzhledem k časové náročnosti samotné práce laminátora a dlouhých časů vytvrzování je celý proces zdlouhavý. Nejčastěji je využíván pro hobby účely a na výrobu velkých částí, jakými jsou trupy lodí, křídla letadel či lopatky větrných elektráren atd. Tento způsob laminace je používán i pro přípravu zkušebních těles pro tuto diplomovou práci, stejně jako je používán pro výrobu spojů trubek v rámech kol značky FESTKA.



Obrázek 14: Schéma ručního kladení do formy (23 s. 67)

1.4.2 Stříkání

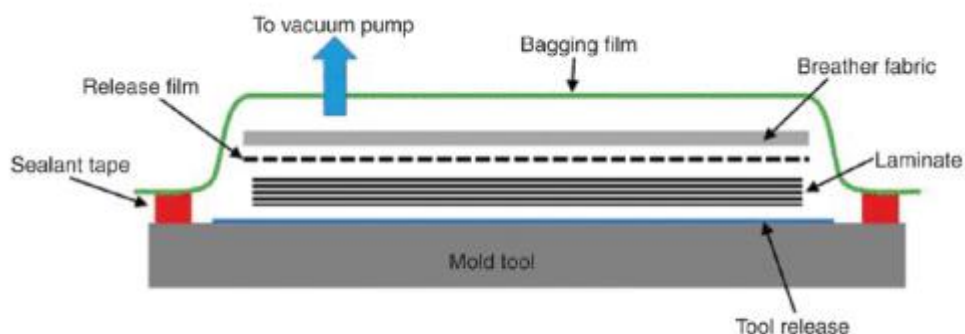
Stejně jako při ruční laminaci aplikuje pracovník materiál do jednostranné otevřené formy. Hlavním rozdílem je aplikace materiálu pomocí stříkací pistole, kterou se nanáší v souvislé vrstvě směs pryskyřice se sekanými vlákny výztuže. Pistole bývá opatřena zásobníkem s pryskyřicí a rolí rovingu, který rovnou seká a míchá v přesném poměru s pryskyřicí a pomocí stlačeného vzduchu aplikuje na povrch formy. Touto metodou připravený výrobek obsahuje vyšší podíl pryskyřice a nemá proto tak vysoké mechanické výkony. (24 s. 269) Tato technika se používá především pro výrobu velkých dílů, jakými jsou stěny nepravoúhle tvarovaných bazénů, aerodynamické kryty, hlavní části obytných karavanů atd.

1.4.3 Lisování vakuem – Vacuum bagging

Při používání této metody je pracovní postup nejprve shodný s ruční laminací do jednostranné otevřené formy, ale následuje překrytí separační vrstvou, kterou je perforovaná fólie z PTFE (polytetrafluorethylen) nebo strhávací textilie, též zvaná peel-ply. Následuje vrstva odvzdušňovací textilie a poté je takto připravená forma a všechny laminační vrstvy v ní překryta vakuovací fólií a utěsněna izolační lepicí páskou (schéma na obrázku 15). Vakuovací fólie je opatřena přívodem vakua. Většina vzduchu je evakuována z budoucího výrobku a zároveň je zajištěn odvod přebytečné pryskyřice, čímž je zajištěn relativně vysoký obsah plniva.

Tato technologie má velkou výhodu v univerzálnosti. Může být totiž použita jak pro ručně kladené materiály, tak pro prepregy. Další velkou výhodou je, že celá

evakuovaná forma může být vytvrzena v peci nebo může být použito elektronové lampy pro vytvrzovací reakce. (25 s. 88) Samozřejmě je velice důležité přesné utěsnění formy a zdroj dostatečně silného podtlaku.

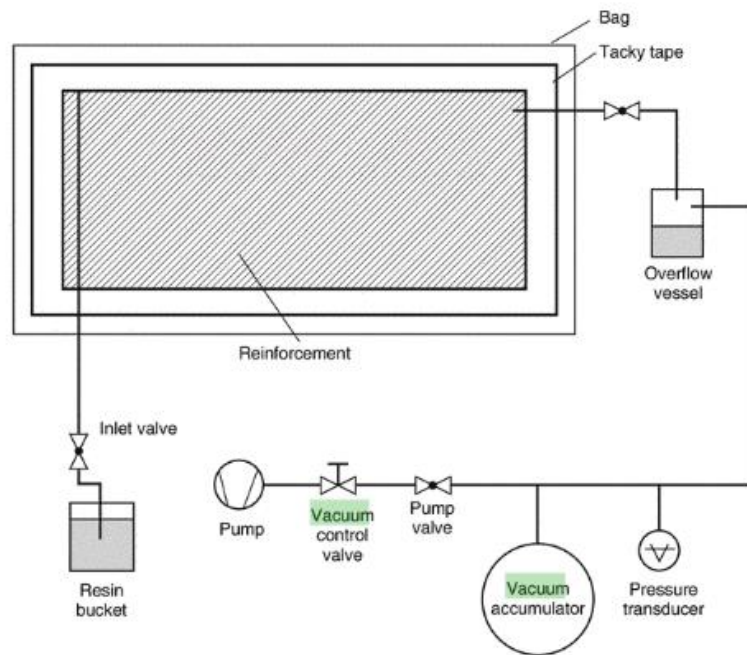


Obrázek 15: Schematické znázornění lisování vakuem (23 s. 68)

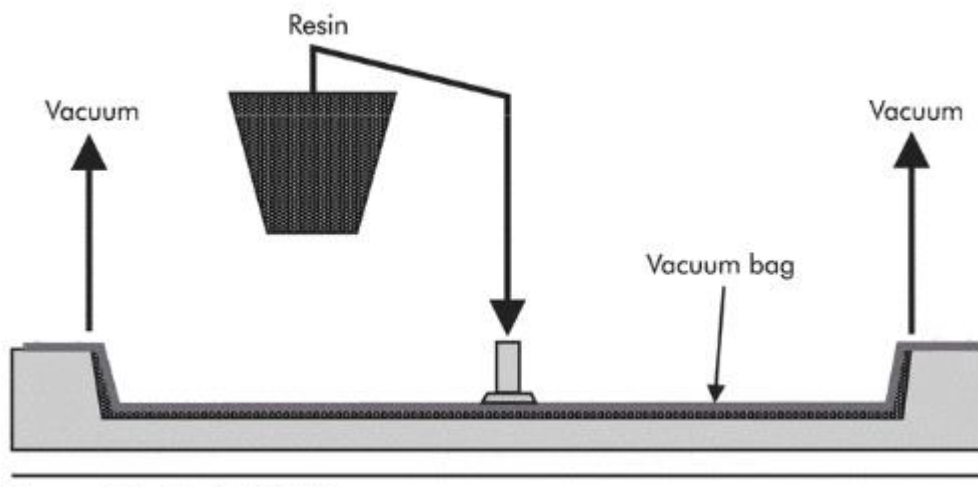
1.4.4 Vakuová infuze – VARTM

Metoda, česky nazvaná jako vakuová infuze, je mezinárodně známá jako VARTM, což je zkratka anglického označení metody vacuum assisted resin transfer moulding. Při této metodě jsou do jednostranné formy naskládány všechny vrstvy vlákně výtzuže na sucho a překryty vakuací fólií, opatřené 2 druhy ventilů (obrázek 16). Jeden ventil slouží k přívodu připravené pryskyřice předem zbavené vzduchových bublin a druhý ventil je připojený ke zdroji vakua. V případě zvláště rozměrných výrobků je použito několik sad těchto ventilů. Je vhodné pod fólii umístit jemnou síťku a po okrajích budoucího výrobku perforovanou hadičku či spirálovitý plast, který zajistí rovnoměrný rozvod vakua ve formě. Následuje otevření ventilu s přívodem připravené pryskyřice a celá forma se postupně naplní pryskyřicí tak, že výtzuž bude přesně prosycena. Protože dochází k velmi těsnému přilnutí fólie k výtzužnému materiálu, nevzniká zde prostor pro nadměrné hromadění materiálu matrice (obrázek 17).

Vytvrzování probíhá většinou za pokojové teploty. Vakuová infuze může být použita i pro velmi rozměrné výrobky, ale u nich může být velmi obtížné zajistit rovnoměrný rozvod pryskyřice a tím se vyvarovat suchým a špatně prosyceným oblastem.



Obrázek 16: Schematické složení aparatury pro aplikaci vakuové infuze (26 s. 511)



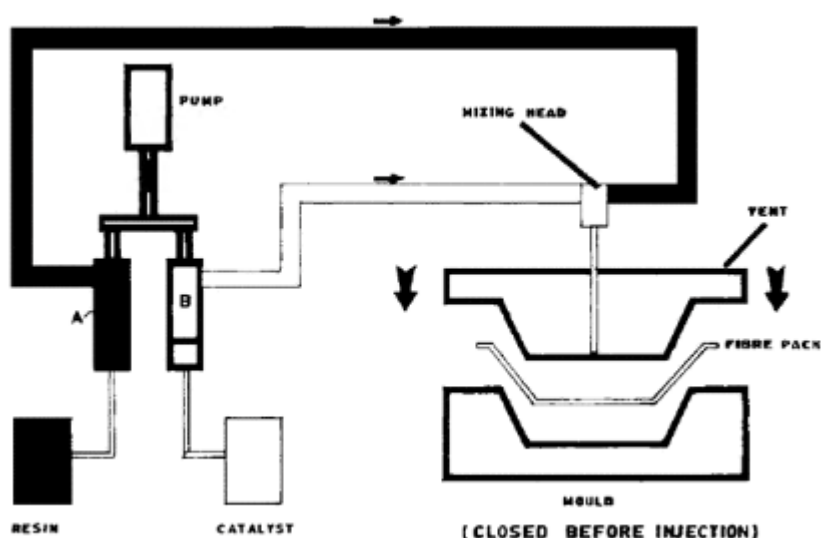
Obrázek 17: Schematické zobrazení podoby formy pro VARTM (27 s. 94)

1.4.5 RTM

Název RTM je zkratka anglického názvu resin transfer moulding. Tato metoda spočívá v uzavření suchých vrstev výztuže mezi 2 přesné formy (obrázek 18), které jsou k sobě zajištěny šrouby, svorkami nebo lisem. Následně je pryskyřice vstříknuta pod tlakem (2-20 bar). Forma může být opatřena několika místy vstřiku, záleží na

tvarové složitosti a rozměrech. Další důležitou hodnotou je viskozita pryskyřice, tlak, kterým je do formy vháněna a také druh vláknenné výztuže. Vytvrzování může být prováděno za pokojové, ale i zvýšené teploty, protože materiál a tvar formy to většinou dobře umožňuje.

Jak RTM, tak vakuová infuze umožňují výrobu kompozitních dílů s vysokým podílem výztuže, s minimalizovaným obsahem nežádoucích dutinek a s výbornými mechanickými vlastnostmi. V případě RTM má výrobek z obou stran povrch v kvalitě kopírující kvalitu povrchu formy. Nevýhodou je však vyšší cena této technologie. Tímto způsobem se vyrábí některé díly pro automobilový průmysl.



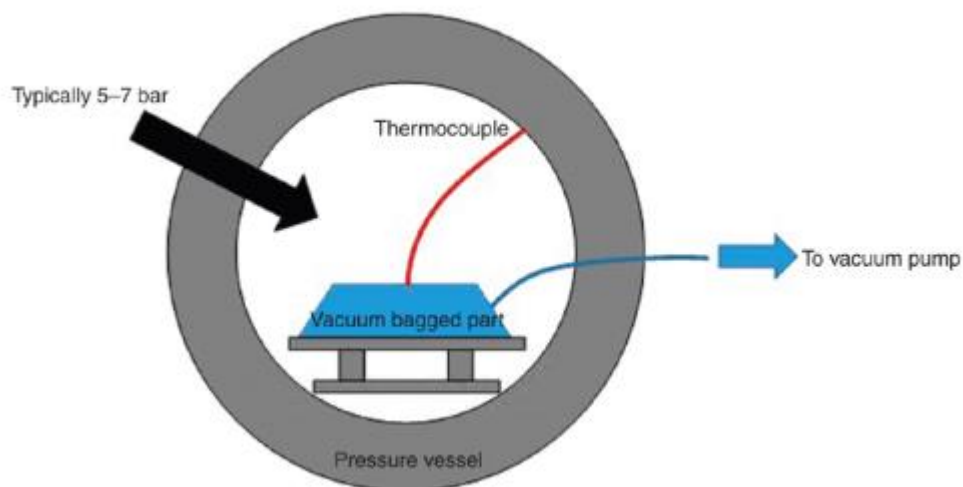
Obrázek 18: Schematické uspořádání aparatury pro RTM (28 s. 22)

1.4.6 Autokláv

Metody využívající autoklávu, tedy zařízení, které vytváří zvýšený tlak a teplotu, jsou hojně využívány v průmyslu, ačkoliv se jedná o jednu z nejdražších kompozitních technologií. Jedná se o využití především prepregových materiálů, které jsou vloženy do formy ať ručně nebo automaticky a zavakuovány pomocí tenké fólie. Celá forma je následně umístěna do autoklávu (obrázek 19). Typickým prostředím uvnitř autoklávu je teplota 120-180 °C a tlak 5-6 bar. (23 s. 74) Zároveň je výrobek i během přetlakového procesu v autoklávu stále připojen ke zdroji vakua.

Výrobky vyrobené pomocí autoklávu se vyznačují výbornými mechanickými vlastnostmi, obsahují vysoký podíl plniva v matrici a je minimalizován obsah vzduchových bublin a jiných defektů. Tato metoda je využívána pro aplikace v leteckém průmyslu, výrobu dílů závodních dopravních prostředků atd. Pro výrobu cyklistických rámu se využívá asi nejčastěji pro velké série. Většina konfekčních karbonových rámu nebo cyklistických komponent je vyrobena touto metodou. Výroba populárních rámu konstrukce monocoque neumožňuje žádné uzpůsobení rozměrů nebo úhlů pevně daných tvarem formy (obrázek 20), ale dovoluje relativně rychlou, časově méně nákladnou výrobu rámu s líbivými tvary. Nevýhodou je především fakt, že nejvýkonnější uhlíková vlákna a tkaniny nejsou komerčně dostupné ve formě lehkou zpracovatelných prepregů a proto jsou pro tuto technologii nedostupné.

Z důvodů vysoké ceny především autoklávu jako takového je dnes populární vývoj takzvaných OoA metod (out of autoclave) anebo VBO metody (vacuum bag only), kde se využívá stejných prepregových materiálů, stejných forem, ale za použití pouze zvýšené teploty, kdy rozdíl tlaků je kompenzován dostatečně výkonným vakuem aplikovaným do formy.



Obrázek 19: Schematické zobrazení autoklávové metody (23 s. 74)



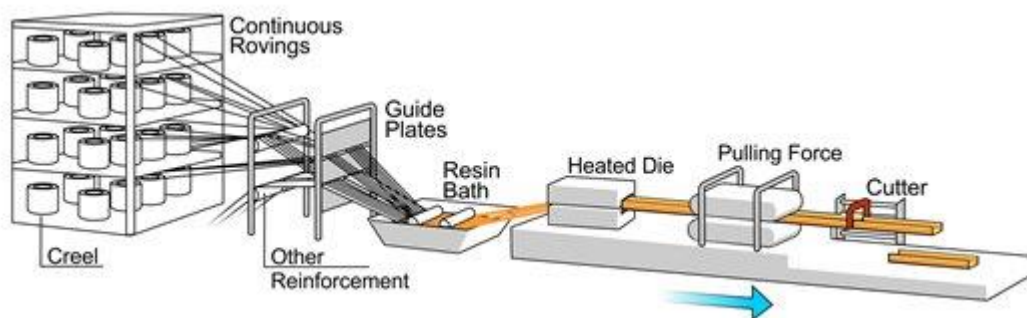
Obrázek 20: Forma pro výrobu monocoque rámu z prepregu pomocí autoklávu (29)

1.4.7 Pultruze

Metoda pultruze je zvláště výhodná pro výrobu kompozitních profilů s konstantním tvarem průřezu. Základním principem je prosycení vlákenného materiálu pryskyřicí a následným vytahováním tvarovací hlavou. V průběhu výroby lze dobře kontrolovat poměr výztuže/matrice a vyrábět profily s vysokým obsahem vláken.

Rovingy, vzácněji tkaniny, jsou odvíjeny z cívek, a protahovány skrz lázeň s pryskyřicí. Pomocí speciálních mřížek se vlákna rozprostřou do tvaru požadovaného profilu a jsou taženy do vytvrzovací hlavy, která udává výrobku celkový finální tvar. Vytvrzovací hlava bývá vyhřívána, podle vytvrzovacích potřeb použité pryskyřice. V modernějších pultruzních zařízeních se pryskyřice vstříkuje až na začátku vytvrzovací hlavy. Na konci linky je již produktem vytvrzený profil, který je řezán na požadované délky. Podobu výroby můžeme vidět na obrázku 21.

Pultruze je výborným zdrojem levných profilů. Výhodou je kromě ceny i možnost vysokého obsahu vlákenné výztuže ve směru 0° , což výrobku dává dobré mechanické vlastnosti ve směru osy výrobku. Kromě termosetických pryskyřic mohou být použity i termoplastické matrice.



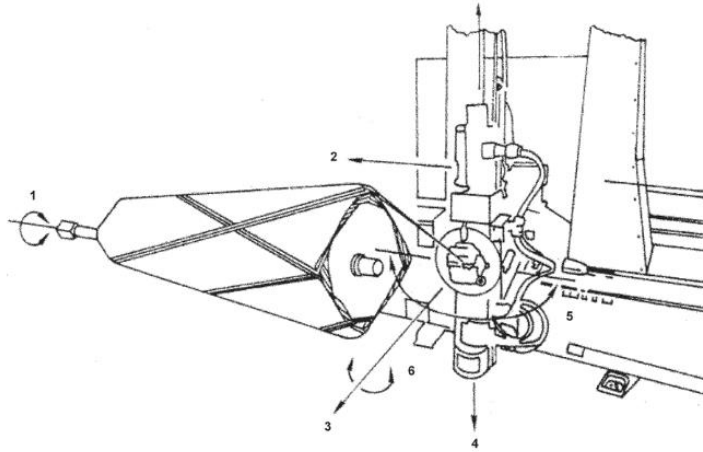
Obrázek 21: Schematické znázornění pultruzní výrobní linky (30)

1.4.8 Navíjení vláken

Při této metodě jsou využívány jednoduché rovingy, které jsou protahovány proscovací lázní a následně navíjeny na jádro. Jako jádro bývá nejčastěji použit kovový trn, který je umístěný na otočné ose. Strojně řízené rameno navíjecího stroje vykonává posuvný pohyb podél otáčejícího jádra. Rychlost posunu ramena je přesně synchronizována s rychlostí otáčení trnu a tím je přesně řízen úhel pokládky vlákna. Některá výrobní zařízení jsou opatřena systémem jehlic na konci otočného jádra, za které jsou vlákna po obou koncích jádra zajištěna, a tak je možné docílit až 0° úhlu náviny. Vzhledem k tomu, že lze navíjet na jeden profil vlákna v různých vrstvách pod rozmanitými úhly, může být zkonstruována výsledná trubka či profil s velmi dobrými pevnostními vlastnostmi. Po navinutí je výhodné aplikovat dodatečnou kompresi, a to buď ovinutím napnutou polymerní páskou nebo zalisování profilu i s trnem do vnější formy.

Můžeme se setkat i s mnohem složitějšími zařízeními, kdy je navíjecích ramen více nebo operují ve víceosém pohybu. Geometrická složitost kladení vláken na pozitivní formu v podobě jádra nahrazuje geometrii tkanin, ale má výhodu přesného uspořádání vláken precizně podle tvaru výrobku. Nevýhodou této metody je vysoká pořizovací cena zařízení a omezený výběr tvarů produktů, zvláště když je potřebné navinutý výrobek z trnu bezpečně stáhnout.

Tímto způsobem jsou vyráběny i vysoce kvalitní kompozitní trubky a jiné profily ve firmě Compo Tech ve městě Sušice. Tyto trubky jsou používány mimo jiné na výrobu rámu kol značky FESTKA a byly použity i pro přípravu zkušebních těles pro tuto diplomovou práci.



Obrázek 22: Nákres zařízení pro navíjení rovingů na jádro (31 s. 2)

2 Experimentální část

Aby bylo vůbec možné provést analýzu laminovaných spojů kompozitních trubek, bylo nejprve nutné stanovit jakou podobu budou mít vzorky a jaké analytické přístupy budou využity.

Jednou ze základních otázek bylo, jaké pevnostní charakteristiky má laminovaný spoj jako celek v podobě, ve které se používá ve výrobě rámmů kol firmy FESTKA. S tím je spjata otázka, jaký vliv mají jednotlivé složky kompozitu tvořícího spoj na výsledný spoj a jak se vlastnosti spoje změní, změní-li se i tyto složky.

Součástí této práce je i vytvoření samotné metody pevnostní charakterizace. Vyrobena zkušební tělesa proto mají podobu dvou sklolaminátových trubek spojených kolmo k sobě, tedy do tvaru písmene T jakožto nosiče laminovaného spoje z uhlíkového kompozitu.

2.1 Přehled použitých látek a materiálů

2.1.1 Matrice a tvrdidla pro laminaci

2.1.1.1 Laminační pryskyřice LG 700

Laminační systém LG 700 je produktem firmy GRM Systems Olomouc. Jedná se o epoxidový systém na bázi silně modifikované epoxidové pryskyřice.

Laminační pryskyřice LG 700 je nízkoviskózní pryskyřice se zvýšenou vazností a reaktivitou. Pryskyřice obsahuje různá modifikační činidla maximálně zlepšující průnik laminační směsi do tkaniny. Tato pryskyřice je určena především pro RTM, ale vhodná je i na ruční laminaci za pokojové i zvýšené teploty a vyznačuje se dobrou tepelnou odolností a mechanickými vlastnostmi pro pojení všech běžných výztuží, kterými jsou skleněná, uhlíková a aramidová vlákna. Hodí se pro výrobu běžných, ale i náročných a namáhaných kompozitních dílců a ve firmě FESTKA je používána jak pro laminaci, tak pro přípravu tzv. bílé hmoty.

Vlastnosti epoxidové pryskyřice LG 700 jsou uvedeny v tabulce 1. Je to bezbarvá, čirá, vazká kapalina. Tento epoxidový systém byl navržen pro zpracování při teplotě 18 až 30 °C běžnými zpracovatelskými postupy a při této teplotě i vytvrzuje. Dovytvrzení za zvýšené teploty (postcuring) je doporučeno. Podle typu použitého tužidla je doba zpracovatelnosti 20-180 minut při pokojové teplotě. Tepelná odolnost epoxidového systému LG 700 je až 120 °C.

Výrobce též uvádí orientační hodnoty mechanických vlastností vytvrzené pryskyřice bez jakékoliv výztuže. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 1: Vlastnosti epoxidové pryskyřice LG 700 udané výrobcem

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
viskozita	mPa.s (25 °C)	600-900
epoxidový hmotnostní ekvivalent	g/mol	156-165
epoxidový index	mol/kg	6-6,4

Tabulka 2: Orientační mechanické parametry vytvrzené pryskyřice bez výztuže

Mez pevnosti a ohybu	Jednotka	Hodnota:
E-modul: ohyb	MPa	2700-3300
mez pevnosti v tahu	MPa	75-85
mez pevnosti v tlaku	MPa	130-150
tažnost	%	5-6,5
rázová houževnatost	kJ/m ²	38-48
Shore D	-	85

2.1.1.2 Laminační tvrdidlo HG 700

Aminické tvrdidlo HG 700 je produktem firmy GRM Systems a je doporučovaným tvrdidlem k laminační pryskyřici LG 700, společně vytvářející laminační systém.

Toto tvrdidlo je nízkoviskózní kapalina namodralé barvy s vlastnostmi viz tabulka 3. Výrobcem je doporučováno především pro použití v kombinaci s pryskyřicí LG 700 a to pro vakuovou infuzi i extra tenkých materiálových skladeb, RTM, nebo ruční laminaci. Gel-time (100 g) při 23 °C je přibližně 3 hodiny.

Směsná viskozita systému LG 700 + HG 700 je udávána 300-350 mPa.s dle teploty. Hmotnostní poměr míchání pryskyřice s tužidlem je 100:30.

Ve firmě FESTKA se používá v kombinaci s pryskyřicí LG 700 pro ruční laminaci.

Tabulka 3: Vlastnosti tvrdidla HG 700 udávané výrobcem

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
viskozita	mPa.s (25°C)	15-20
aminové číslo	Mg KOH/g	480-550

2.1.1.3 Laminační tvrdidlo HG 286

HG 286 je cykloalifatické aminické nízkoviskózní tvrdidlo s dotvrzovacími přísadami a je produktem firmy GRM Systems. Původně bylo toto tvrdidlo navrženo pro epoxidový systém nazvaný LG 285, ale je dobře použitelné i s epoxidovou pryskyřicí LG 700. V této kombinaci se používá ve firmě FESTKA pro přípravu tzv. bílé hmoty.

Tvrdidlo HG 286 (vlastností viz tabulka 4) je určené pro vytvrzování epoxidových systémů náročných kompozitních dílů, jako je sportovní vybavení, části letadel atd. Gel-time (100 g) při 23 °C je přibližně 120 minut. Hmotnostní poměr míchání pryskyřice s tužidlem je 100:40.

Tabulka 4: Vlastnosti tvrdidla HG 286 udávané výrobcem

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
viskozita	mPa.s (25°C)	80-120
aminové číslo	Mg KOH/g	450-500

2.1.1.4 Pryskyřice CHS-EPOXY 501

Výrobek firmy Spolchemie (Spolek pro chemickou a hutní výrobu a.s. Ústí nad Labem) s označením CHS-EPOXY 501 je nízkomolekulární kapalná epoxidová pryskyřice na bázi bisfenolu A a bisfenolu F a je modifikována monofunkčním reaktivním ředidlem. Tato pryskyřice je nízkoviskózní, bezbarvá a čirá kapalina s vlastnostmi viz tabulka 5.

Je doporučována pro použití při výrobě lepících kompozic, kompozitních materiálů, high-solid antikoročních barev a jiné aplikace ve stavebnictví.

Tabulka 5: Vlastnosti epoxidové pryskyřice CHS-EPOXY 501 udané výrobcem

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
viskozita	mPa.s (25 °C)	600-800
epoxidový hmotnostní ekvivalent	g/mol	188-200
epoxidový index	mol/kg	5-5,3

2.1.1.5 Pryskyřice CHS-EPOXY 520

Výrobek firmy Spolchemie s označením CHS-EPOXY 520 je univerzální nízkomolekulární kapalná epoxidová pryskyřice na bázi bisfenolu A a není modifikována.

Tato pryskyřice je viskózní kapalina medové konzistence, je bezbarvá a čirá, s vlastnostmi viz tabulka 6.

Doporučována je pro modifikace, impregnace a pro použití v procesech zapouzdření a zalévání elektronických a elektrických prvků ve stavebnictví. Výrobce ji uvádí i jako pryskyřici vhodnou k laminaci kompozitních výrobků.

Tabulka 6: Vlastnosti epoxidové pryskyřice CHS-EPOXY 520 udané výrobcem

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
viskozita	mPa.s (25 °C)	12000-14500
epoxidový hmotnostní ekvivalent	g/mol	182-192
epoxidový index	mol/kg	5,208-5,495

2.1.1.6 Tvrdidlo TELALIT 0590

Výrobek firmy Spolchemie s označením TELALIT 0590 je univerzální tvrdidlo pro epoxidové systémy s vysokými užitnými vlastnostmi. Jedná se o tvrdidlo na bázi směsi primárních polyetheraminů. Tvrdidlo má podobu velmi nízkoviskózní bezbarvé a čiré kapaliny. Vlastnosti tvrdidla jsou uvedeny v tabulce 7.

Využíváno je jako tvrdidlo pro výrobu vysoce namáhaných kompozitních materiálů. Doporučeno je pro procesy ruční laminace, RTM atd. Tvrdidlo dle výrobce poskytuje epoxidovým systémům vynikající mechanické vlastnosti a perfektně smáčí plniva, uhlíková a skleněná vlákna. Znakem tohoto tvrdidla je i extra dlouhý pot-time. Použití tohoto tvrdidla tedy zaručuje extra dlouhou dobu zpracování epoxidového systému a velmi pomalé vytvrzování v porovnání s jinými tvrdidly. Hmotnostní poměr míchání pryskyřice CHS-EPOXY 501 s tužidlem je 100:30 a s pryskyřicí CHS-EPOXY 520 je 100:32.

Tabulka 7: Vlastnosti tvrdidla TELALIT 0590 udané výrobcem

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
viskozita	mPa.s (25°C)	5-10
vodíkový ekvivalent	g/mol	min. 59
aminové číslo	mg KOH/g	440-490

2.1.1.7 Tvrdidlo TELALIT 0420

Výrobek firmy Spolchemie s označením TELALIT 0420 je tvrdidlo pro vysoce namáhané laminační epoxidové systémy. Jedná se o tvrdidlo na bázi směsi optimálně modifikovaných cykloalifatických aminů. Tvrdidlo má podobu nízkoviskózní bezbarvé a čiré kapaliny. Vlastnosti tvrdidla jsou uvedeny v tabulce 8.

Tvrdidlo je výrobcem určeno k použití ve vysoce namáhaných laminačních systémech využívaných ve stavebnictví, elektrotechnice a kompozitech. Vhodná aplikace je za pokojové teploty se střední dobou zpracování 1-2 hodiny dle typu pryskyřice. Hmotnostní poměr míchání pryskyřice (CHS-EPOXY 501 i 520) s tužidlem je 100:21.

Tabulka 8: Vlastnosti tvrdidla TELALIT 0420 udané výrobcem

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
viskozita	mPa.s (25°C)	10-25
vodíkový ekvivalent	g/mol	min. 42,5
aminové číslo	mg KOH/g	600-650

2.1.2 Výztužné materiály

2.1.2.1 Uhlíková vlákna: UD páska ASPRO AT40

Unidirectional, tedy UD páska AT40 ruského výrobce ASPRO je materiálem uhlíkových vláken, kde všechna vlákna leží pod stejným úhlem. Šířka této pásy je 22 mm a její gramáž je 40 g/m².

Páska AT40 je vyráběna z vláken japonského výrobce Toho Tenax® a to konkrétně z vláken označených jako IMS65 E23 24K 83otex. Tato vlákna obsahují přesně o zákrutů na metr. Charakteristiky vláken jsou uvedeny v tabulce 9. Tato UD

páska je používána jako hlavní konstrukční prvek pro spoje kompozitních trubek. Ve spojích jsou laminátorem pásy kladeny přesně tak, aby ležely přesně ve směru největšího přenosu sil a namáhání a bylo proto maximálně využito jejich vlastností jakožto jednosměrného materiálu.

Tabulka 9: Charakteristika vláken Tenax® IMS65

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
průměr vlákna	μm	5,00
hustota	g/cm ³	1,78
pevnost v tahu	MPa	6000
modul v tahu	GPa	290
tažnost	%	1,9
specifický elektrický odpor	Ω cm	1,45.10 ⁻³

2.1.2.2 Uhlíková tkanina Style 461

Tkanina Style 461 je produktem německé firmy C. Cramer GmbH & Co. Tato tkanina má plátňovou vazbu a gramáž 80 g/m².

Tato textilie byla utkána z vláken výrobce Toray Carbon Fiber America Inc. a to konkrétně z vláken TORAYCA® T300. Vlastnosti vláken T300 jsou uvedeny v tabulce 10.

Tabulka 10: Charakteristika vláken Torayca T300

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
průměr vlákna	μm	7,00
hustota	g/cm ³	1,76
pevnost v tahu	MPa	3530
modul v tahu	GPa	230
tažnost	%	1,5

2.1.2.3 Uhlíková tkanina TeXtreme® 1027

Tkanina TeXtreme® 1027 s přesným označením TeXtreme® 60 pw hr40 je výrobkem švédské firmy Oxeon AB. V podstatě se jedná o plátňovou textilií utkanou

z UD pásků o šířce 20 mm. Tyto pásy jsou vyrobeny tak, aby byla vlákna rovnoměrně rozmístěna v celém průřezu pásu. Výsledkem je tkanina, která obsahuje mnohem méně volného prostoru mezi vlákny a ohybů vláken, které jinak snižují pevnost, a proto je možné dosáhnout velmi dobrého prosycení i malým množstvím pryskyřice. Tato tkanina se vyznačuje vysokou pevností i při nízké gramáži. Tloušťka této tkaniny je 0,06 mm.

Pro výrobu této textilie jsou používána uhlíková vlákna americké firmy Grafil Inc. a to konkrétně vlákna PYROFIL™ HR40. Tato vlákna mají vlastnosti uvedené v tabulce 11.

Tabulka 11: vlastnosti vláken PYROFIL™ HR40

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
hustota	g/cm ³	1,82
pevnost v tahu	MPa	4610
modul v tahu	GPa	390

2.1.2.4 Mikrosféry Q-Cell® 7014/7019

Tento materiál jsou ve skutečnosti duté, mikroskopické skleněné kuličky od amerického výrobce Potter Industries LLC. Tyto kuličky jsou určeny jako plnivo do polymerních materiálů, které má schopnost snižovat hustotu. Navíc fungují jako zvuková a tepelná izolace. Ve firmě FESTKA se používají v kombinaci s laminační pryskyřicí LG 700 a tvrdidlem HG 286 k přípravě tzv. bílé hmoty.

Mikrosféry Q-Cell® 7014/7019 mají podobu bílého prášku, který svým chováním na první pohled připomíná kapalinu a je velmi jednoduché dostat jeho částice do vznosu. V aplikaci pro firmu FESTKA se využívají k naplnění epoxidové pryskyřice a tvorbu lehkého tmelícího materiálu. Vlastnosti těchto skleněných mikrosfér jsou uvedeny v tabulce 12.

Tabulka 12: Vlastnosti mikrosfér Q-Cell 7014/7019 uváděné výrobcem

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
hustota	g/cm ³	0,11
sypná hmotnost	g/cm ³	0,08
průměrná velikost částic	μm	80
pevnost v tlaku	MPa	3,45

2.1.3 Lepidla

2.1.3.1 Epoxidové lepidlo Spabond 345

Spabond 345 je epoxidové, vysokovýkonné lepidlo od švýcarské firmy Gurit.

Toto dvousložkové lepidlo je dodávané ve výtlačných kartuších, ze kterých se přímo vytlačuje materiál v objemovém poměru 2:1 epoxidového materiálu s tvrdidlem.

Doba zpracovatelnosti po rozmíchání se pohybuje okolo 30-50 minut v závislosti na teplotě. Některé vlastnosti tohoto lepidla jsou uvedeny v tabulce 13.

Tabulka 13: Vlastnosti epoxidového lepidla Spabond 345 uváděné výrobcem

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
hustota (vytvrzeného materiálu)	g/cm ³	1,17
lineární smrštění	%	1,22
pevnost ve smyku (na oceli)	MPa	42

2.1.3.2 Vteřinové lepidlo ALTECO Super Glue

Super Glue je vteřinové lepidlo vyrobené japonskou firmou ALTECO. Jedná se o velice dostupné lepidlo na bázi ethyl-(2-kyanoakrylátu). Toto lepidlo bylo zvoleno do této diplomové práce, protože je velmi dobře dostupné a levné. Při přípravě jedné sady zkušebních těles řešilo bodovou fixaci jednotlivých částí, ze kterých se tělesa skládají. Účelem použití tohoto lepidla nebylo zkoumat jeho vlastnosti, ale pouze vytvořit situaci podobnou úplné absenci pevnostního lepidla Spabond při lepení na tupo, a proto hlubší charakteristika tohoto lepidla není podstatná.

2.1.4 Trubky ze skelných vláken

Kompozitní rámy jízdních kol ve firmě FESTKA se vyrábí pouze z uhlíkových vláken. Trubky z vláken skleněných byly zvoleny z důvodů nižších nákladů pro přípravu zkušebních těles. Protože trubky mají pouze funkci tvarového nosiče laminovaných spojů, nebyly kladeny vysoké nároky na poměr pevnost/hmotnost, jako tomu je v případě trubek z uhlíkových vláken.

Trubky byly vyrobeny navíjením firmou Compo Tech Plus spol. s r. o. Sušice. Přesně složení a charakteristiky trubek výrobce neposkytl.

2.2 Technologie přípravy zkušebních vzorků a tělísek

2.2.1 Příprava desek z matricových materiálů a zkušebních tělísek

Pro získání charakteristik samotných použitých matricových materiálů bylo potřeba připravit desky pro výrobu zkušebních tělísek. U každé pryskyřice bylo provedeno analytické stanovení obsahu epoxidových skupin (epoxidový ekvivalent podle Jaye) a poté změřena viskozita dle Höpplera při 25°C. Bylo též stanoveno aminové číslo pro aminová tvrdidla. U vzorků LG 700, HG 700 a HG 286, které jsou používány ve výrobě firmy FESTKA, byla pro charakterizaci použita infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací s diamantovým krystalem.

Do každé epoxidové pryskyřice bylo odváženo příslušné tvrdidlo v poměru udaném výrobcem, a tato směs byla dokonale promíchána. Takto připravená směs byla pomocí odstředivé síly zbavena vzduchových bublin a následně nalita do připravených forem. Forma je tvořena dvěma ocelovými deskami, které jsou opatřeny nepřilnavým nátěrem, potřeny silikonovým olejem v toluenu a poté je vložena silikonová distanční hadička, která zaručuje konstantní tloušťku odlité desky a to 4 mm. Vytvrzení bylo provedeno 24 hodin při laboratorní teplotě a poté následovalo dotvrzení 10 hodin na 90 °C, stejně jako při přípravě zkušebních těles T spojů.

Obdobným způsobem byla připravena i deska z tzv. bílé hmoty, kdy byla v příslušném poměru promíchána pryskyřice LG 700 s tvrdidlem HG 286 a potřebným množstvím skleněných mikrosfér Q-Cell. Hmota byla důkladně ručně promíchána a následně namačkána na kovovou desku formy s přichystaným 4 mm silikonovým distančním rámečkem ve formě hadičky a následně byla nanášena druhá polovina kovové formy a vše bylo staženo šroubovými svěrkami. Vytvrzení proběhlo stejně jako v případě odlitých desek.

Z matric byla vyřezána zkušební tělíska pro stanovení meze pevnosti, tažnosti a maximálního průhybu při zkouškách v tahu a ohybu. Byla vyřezána i tělíska pro stanovení rázové houževnatosti Charpy, extrahovatelného podílu a tvrdosti dle Brinella. Byla provedena též termomechanická analýza vytvrzených materiálů.

2.2.2 Technologie výroby zkušebních těles laminovaných spojů ve tvaru písmene T

Pro tahové zkoušky na trhačím stroji bylo potřeba vyvinout vlastní metodiku a s tím i podobu vlastních vzorků pro tato měření. Pro testování laminovaných spojů trubek bylo zásadní připravit takové vzorky, kde by bylo možné testovat mechanické vlastnosti jen samotného spoje trubkových materiálů. Použité trubkové profily musí plnit funkci pouhého nosiče spoje s laminací a pokud možno co nejméně ovlivňovat měření vlastními mechanickými charakteristikami.

Pro tato měření byl tedy vyvinut zcela nový druh přípravku pro upnutí do trhačímho stroje a pro něj i zkušební tělesa ve výsledné podobě. Zkušební tělesa plní svým tvarem požadavky na snadnou manipulaci při práci v upínacím přípravku a zároveň je nezbytné, aby svým tvarem a charakterizací ideálně simulovaly podmínky originálního použití spoje, tedy spoj kompozitních trubek jakožto konstrukční prvek rámu jízdního kola. Z tohoto důvodu má zkušební těleso podobu velmi blízkou spoji hlavové trubky a dolní, resp. horní rámové trubky (viz obrázek 23)



Obrázek 23: Spoj hlavové (head tube) a horní (top tube), resp. dolní (down tube) rámové trubky který simulují zkušební tělesa (32)

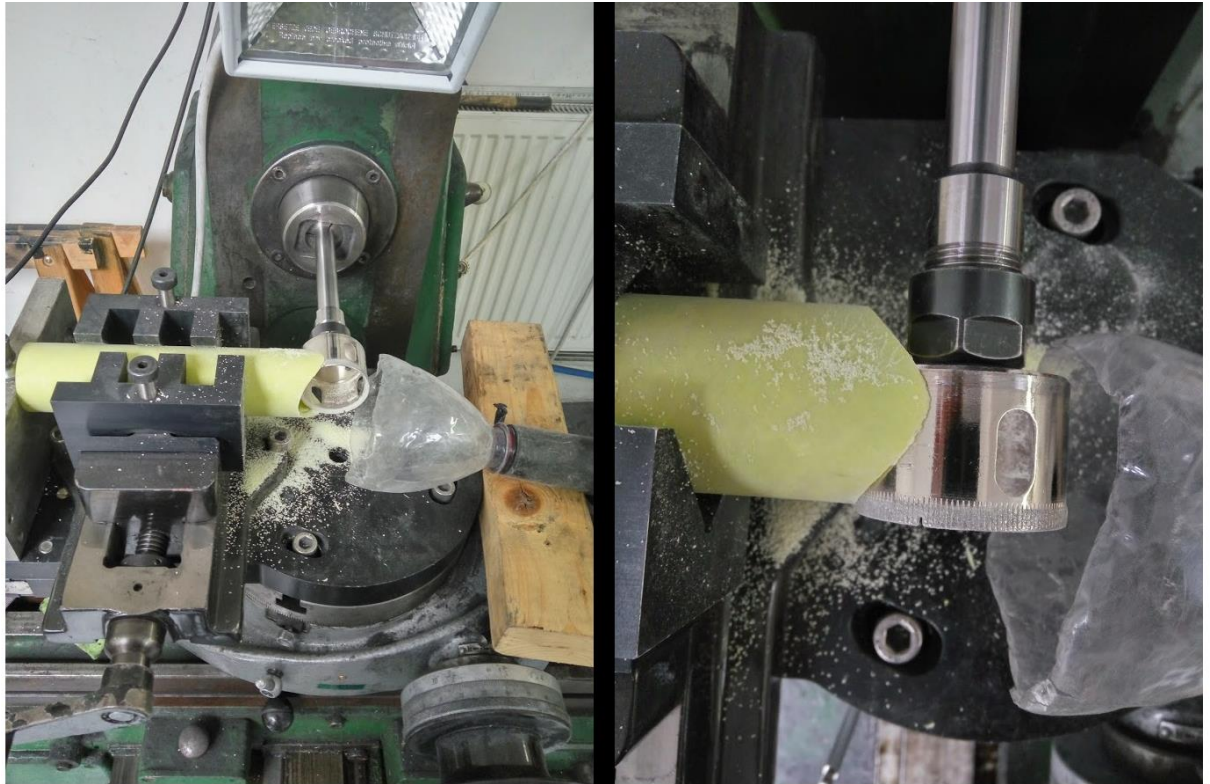
Zkušební tělesa mají podobu dvou k sobě kolmo spojených trubek do tvaru písmene T. Obě trubky jsou délky 165 mm a jedna je přisazena k druhé přesně v polovině její délky. Trubky jsou výrobky firmy Compo Tech Plus spol. s r.o. Sušice. Protože trubky mají funkci pouze jakéhosi nosiče laminovaného spoje a jejich hlavním

úkolem je definovat jeho tvar, nebylo nezbytně nutné, aby byly vyrobeny ze stejného materiálu, z jakého jsou vyráběny rámy jízdních kol. Vzhledem k vysoké ceně trubkových profilů, které jsou používány pro výrobu rámu, a které jsou vyrobeny z kompozitního materiálu jehož výztuží je uhlíkové vlákno s ultra vysokým modulem v tahu, byl zvolen materiál s co nejbližším složením a zároveň přijatelnou cenou. Výztužným materiálem trubek použitých pro výrobu zkušebních těles je tedy skleněné vlákno a jako matrice slouží stejná epoxidová pryskyřice, jako pro trubky s uhlíkovými vlákny. Tyto sklovlákněné trubkové profily byly zároveň vyrobeny naprosto stejnou technologií navíjením na stejných strojích, jako trubky pro konstrukci rámu.

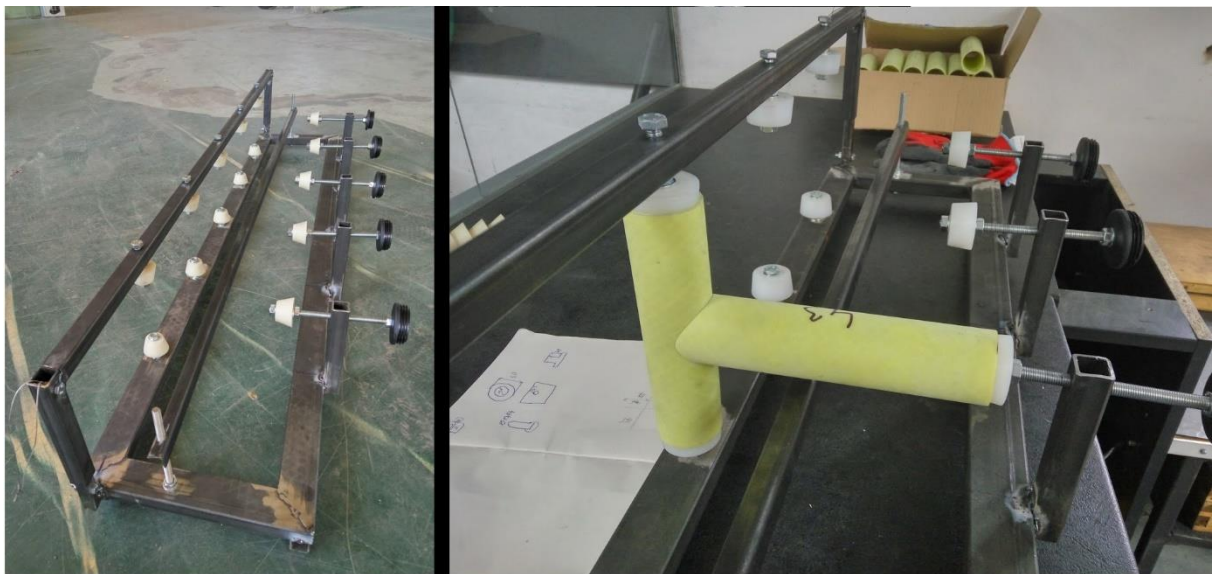
Samotná výroba zkušebních těles obnáší, stejně jako výroba spoje na rámu jízdního kola, celou řadu pracovních úkonů, které budou jednotlivě uvedeny v následujících odstavcích.

Trubky mají vnější průměr 42,8 až 43,2 mm. Vnitřní průměr je vždy 38,0 mm a je u všech trubek stejný. To je dáno výrobní technologií navíjení vláken na trn přesného průměru. Trubky jsou od firmy Compo Tech do dílny firmy FESTKA dodávány v délce 3 metry. Pomocí úhlové brusky byly trubky nařezány na části o délce 165 a 180 mm. Kratší části byly určeny k přímému sesazení a delší části byly určeny k tzv. mitrování. Mitrování je způsob úpravy tvaru těles tak, aby je bylo možné sesadit k sobě co nejtěsněji pod daným úhlem, v tomto případě 90°. Tato tvarová úprava byla provedena pomocí horizontální frézky a výkružnou korunkou s diamantovou abrazivní čelní plochou se stejným vnějším průměrem jako mají trubky (viz obrázek 24). Tímto postupem byly 180 mm dlouhé trubky upraveny na délku 165 mm (měřeno po místo kontaktu s druhou trubkou).

Po úpravě tvaru byly trubky sesazeny do jednoduché stolice (obrázek 25 vlevo), která měla za účel fixaci obou částí zkušebních těles. Stolice byla navržena pro uchycení 5 těles. Jednou z funkcí stolice je i možnost lehkého nastavení fixace tak, aby byl zaručen symetrický tvar všech těles, tedy aby se trubka přilepená k té druhé nacházela přesně v jejím středu. Důležitým tvarovým aspektem, který stolice zajišťovala, byla i kolmost spoje. Při sesazení obou částí zkušebních těles „na sucho“, jak je znázorněno na obrázku 25, byla provedena kontrola seřízení stolice měřením kolmosti a vzdáleností.



Obrázek 24: Tvarová úprava trubky tzv. mitrování



Obrázek 25: Podoba jednoduché fixační stolice (vlevo) a části zkušebních těles v ní sesazené pro kontrolu nastavení kolmosti (vpravo)

Po kontrole tvarového nastavení stolice byly všechny části zkušebních těles důkladně zbaveny nečistot a prachu a následně byl jejich povrch důkladně zbaven možné mastnoty pomocí acetonu, jakožto příprava pro lepení „na tupo“. Následovalo rozmíchání lepidla Spabond ve výrobcem udávaném poměru. Lepidlo bylo nanášeno v malém množství na styčnou plochu částí zkušebních těles, která byla následně

zafixována pomocí zmíněné stolice. Do vytlačeného lepidla po okrajích styčné plochy byl ručně vmáčknut malý svazek uhlíkových vláken, který byl důkladně prosycen stejným epoxidovým lepidlem (viz obrázek 26). Zkušební tělesa byla takto ponechána ve fixovací stolici (viz obrázek 27) po dobu minimálně 8 hodin, dokud nedošlo k zesítní epoxidového systému lepidla natolik, že spoj byl dostatečně pevný pro další manipulaci.

Následující fází je nanášení tzv. bílé hmoty. Bílá hmota je částicový kompozitní materiál připravovaný přímo v dílně firmy FESTKA a používá se jako tvarovací tmel. Jako matrice zde slouží epoxidová pryskyřice stejná jako pro laminaci a jako výztuž skleněné mikrosféry. Pomocí této hmoty jsou na přechodu mezi trubkami vyplněny spoje tak, aby se změnil v postupný přechod mezi trubkami. Pokud by nebyly spoje takto vyplněny, docházelo by k velkému zalomení uhlíkových vláken v následné laminaci a nebyla by možná potřebná distribuce sil působících na vlákna.



Obrázek 26: Svazek uhlíkových vláken nanesený do hrany lepeného spoje



Obrázek 27: Zafixovaná zkušební tělesa

Nejprve bylo nutné zkušební tělesa tvaru T znovu důkladně očistit a pomocí acetonu zbavit případné mastnoty a jiných nečistot. Následovalo rozmíchání potřebného množství pryskyřice LG 700 s tvrdidlem HG 286 ve výrobcem udaném poměru. Následně byly do tohoto epoxidového systému vmíchány skleněné mikrosféry Q-Cell 7014/7019 v takovém množství, dokud směs neměla mléčný vzhled, ale stále si zachovávala téměř nepozměněnou viskozitu. Přesný poměr je těžko změřitelný kvůli velice nízké hodnotě sytké hmotnosti skleněných mikrosfér a také proto, že k odměrování vždy dochází empiricky zkušeným pracovníkem. Skleněných mikrosfér jsou v této fázi do pryskyřice přidány přibližně 2 hmotnostní procenta. Touto směsí byla natřena plocha, která bude následně vytmelená. Nanesení tohoto „nátěru“ zajišťuje lepší adhezi bílé hmoty k materiálu trubek.

Poté bylo do této epoxidové směsi vmícháno další, podstatně větší, množství skleněných mikrosfér. Zkušený pracovník opět empiricky určuje množství mikrosfér přidaných do směsi. Cílem je vytvořit nelepivou hmotu, která je lehce tvarovatelná rukou. Množství mikrosfér odpovídá přibližně 29-33 hmotnostním procentům celé směsi. Takto vytvořená „bílá hmota“ je pak prsty vmačkávána do míst spoje trubek. Epoxidový systém „bílá hmota“ byl ponechán při pokojové teplotě k vytvrzení po dobu několika hodin. Podobu zkušebního tělesa s nanesenou bílou hmotou můžeme vidět na obrázku 28. Po úplném vytvrzení materiálu „bílá hmota“ následovalo její ruční

zabroušení do požadovaného tvaru a do dosažení hladkého povrchu pomocí brusné mřížky grit 120.



Obrázek 28: Zkušební těleso s nanesenou "bílou hmotou" jakožto podklad a tvarovou definicí laminovaného spoje

Následně bylo přistoupeno k samotné laminaci. Ta je prováděna jako precizní ruční přelaminování oblasti spoje pomocí různých vrstev uhlíkových vláknenných materiálů. Postup pokládání a složení jednotlivých vrstev různých druhů spojů jednotlivých typů zkušebních těles je popsáno v následujících podkapitolách 2.2.1.1 až 2.2.1.5.

Po nanesení poslední vrstvy laminace byla na celou oblast přelaminování nanesena vrstva strhávací textilie, zvaná též peel-ply (obrázek 29 vlevo). Jedná se o jemnou textilií utkanou z polyamidových vláken. Ta zaručuje lehkou kompresi jednotlivých vrstev laminace k podkladovému materiálu. Skrz strhávací textilií může projít přebytečné množství pryskyřice z laminovaného materiálu, která je v pozdější fázi jednoduše odstraněna i s touto textilií. Zároveň jsou pouhým pohledem dobře

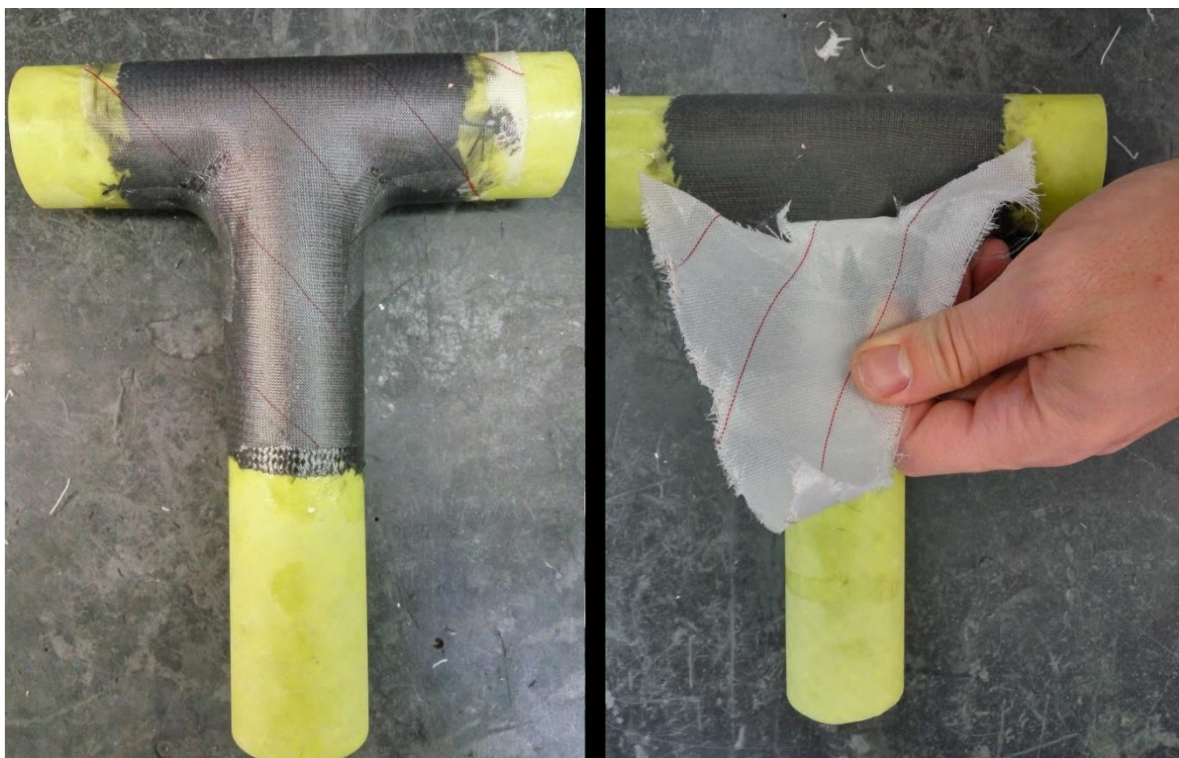
identifikovatelná místa v laminaci, která nebyla dostatečně prosycena materiálem matrice. Ta jsou jednoduše odstraněna důkladným prosycením pryskyřicí skrz tuto vrstvu. Laminovaný spoj byl v této podobě ponechán při pokojové teplotě k úplnému vytvrzení po dobu nejméně 24 hodin. Poté byla vrstva peel-ply jednoduše odstraněna ručním odtržením od materiálu laminace (obrázek 29 vpravo).

V této fázi byly zlehka zabroušeny nálitky pryskyřice na povrchu laminace pomocí brusné mřížky grit 120, které se nalézaly v místě překladu strhávací textilie. Pro úplné dokončení přípravy zkušebních těles je nutné už jen dovytvrzení laminační pryskyřice a dalších epoxidových materiálů použitých pro spoj, a to po dobu 10 hodin na 90 °C. Celková příprava každého zkušební tělesa do podoby, v jaké jej můžeme vidět na obrázku 30, vyžadovala přibližně 3 hodiny intenzivní ruční práce a přibližně 63 hodin celkového času (včetně časů vytvrzování atd).

Přehled jednotlivých typů a počty vyrobených zkušebních těles můžeme vidět v přehledu v tabulce 14.

Tabulka 14: Přehled typů zkušebních těles a jejich počty

Zkušební tělesa	počet zkušebních těles pro měření tahem	počet zkušebních těles pro měření tahovým lomem	celkem kusů
současná podoba laminace používána pro rám FESTKA ONE	10	10	20
současná podoba laminace ONE bez vloženého vlákna při lepení na tupo	5	5	10
současná podoba laminace ONE bez lepidla Spabond při lepení na tupo	5	5	10
současná podoba laminace ONE za použití pryskyřice CHS Epoxy 501 a tvrdidla Telalit 0420	5	5	10
současná podoba laminace ONE za použití pryskyřice CHS Epoxy 501 a tvrdidla Telalit 0590	5	5	10
současná podoba laminace ONE za použití pryskyřice CHS Epoxy 520 a tvrdidla Telalit 0420	5	5	10
současná podoba laminace ONE za použití pryskyřice CHS Epoxy 520 a tvrdidla Telalit 0590	5	5	10
současná podoba laminace používána pro rám FESTKA Scalatore	5	5	10
		Celkový součet:	90



Obrázek 29: Vrstva strhávací textilie nanesená na přelaminovaný spoj (vlevo) a ruční odstraňování této textilie (vpravo)



Obrázek 30: Hotové zkušební těleso připravené pro provedení pevnostních zkoušek

2.2.2.1 Současná podoba laminace spojů pro rámy FESTKA ONE

V předchozí kapitole byl popsán celý postup přípravy zkušebních těles tvaru písmene T. Jednotlivé typy zkušebních těles se však liší v jednotlivých částech. Základem však vždy byla laminace, která se používá pro rámy FESTKA ONE, který je základním modelem řady karbonových ráků FESTKA. Proto byl těchto zkušebních těles připraven dvojnásobný počet, aby se minimalizovala chyba při měření a hodnoty ostatních typů těles mohly být porovnávány právě s tímto typem.

Po tvarové přípravě a nanesení „bílé hmoty“ byla zkušební tělesa připravena pro samotnou laminaci. Následovalo nezbytné čištění povrchu těles od nečistot, prachu a případné mastnoty pomocí acetonu.

Nejprve bylo rozmícháno epoxidové lepidlo Spabond s tvrdidlem v poměru udávaném výrobcem. Tím byla v tenké vrstvě celá plocha pro laminaci důkladně potřena. Tato vrstva zajišťuje především snadnější nanášení vláknenných materiálů na plochu spoje a zároveň vytváří adhesivní vazbu mezi laminací a podkladovým trubkovým materiálem. Pro laminaci byla použita epoxidová pryskyřice LG 700 a tvrdidlo HG 700 od firmy GRM Systems.

První vrstvou vláknenné výztuže jsou UD pásy Aspro AT40. UD pásek o šíři 22 mm byl rozdělen na 8 ks o délce 110 mm a ty byly nanесeny na zkušební těleso. Orientace kladení vláken kopíruje předpokládaný směr namáhání ve spoji. Pásy byly kladeny symetricky okolo celé oblasti laminace, jak je znázorněno na obrázku 31.

Druhou vrstvou vláknenné výztuže je tkanina Style 461 výrobce firmy C. Cramer GmbH & Co. Plátно o rozměrech 115x230 mm bylo nanесeno na celou oblast laminace a vytvarováno přesně tak, aby kopírovalo celý tvar spoje bez nutnosti tento díl plátна, jakkoliv nastříhávat. Orientace směru vláken byla v tomto případě $\pm 45^\circ$ k ose symetrie zkušebního tělesa.

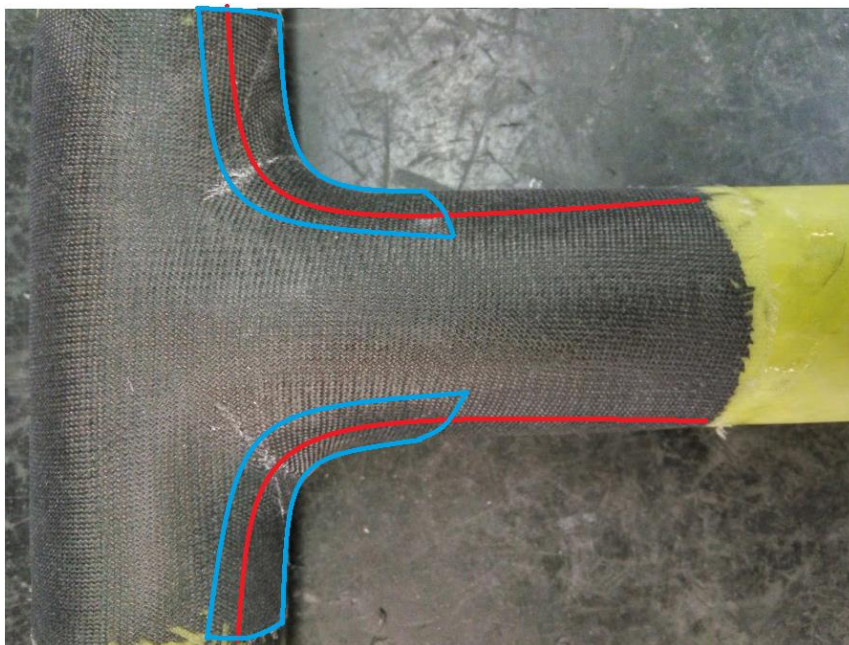
Jako třetí laminační vrstva byly opět použity UD pásy AT40 stejně jako v případě první vrstvy.

Na čtvrtou vrstvu bylo použito opět plátно Style 461 a je přesnou duplikací v pořadí druhé laminační vrstvy. Tato vrstva je zároveň horní kosmeticky optickou vrstvou, a proto byly na obě místa překryvu okrajů plátна nanесeny 2 úseky stejného

plátna o rozměrech 30x60 mm. Umístění těchto 2 tkanin můžeme vidět vyznačené modře na obrázku 32.



Obrázek 31: Nanesená první vrstva UD pásků Aspro AT40 (vlevo) a nanesené plátno Style 461 jako druhá laminační vrstva a započaté nanášení třetí vrstvy v podobě dalších UD pásků AT40



Obrázek 32: Schematické znázornění umístění částí plátna 30x60 mm (modře) pro překrytí spojů hlavního kusu laminačního plátna (červeně)

2.2.2.2 Současná podoba laminace ONE bez vloženého vlákna při lepení na tupo

Jedná se o naprosto stejný postup laminace i počet a složení vrstev jako bylo již popsáno. Jedinou změnou bylo vynechání kroku vložení vlákna do prvního slepení trubek na tupo pomocí lepidla Spabond.

Tato sada zkušebních těles má dokázat jak velký, jestli vůbec nějaký, vliv má tento krok na pevnostní charakter spoje.

2.2.2.3 Současná podoba laminace ONE bez použití výkonnostního lepidla Spabond při lepení na tupo

Stejně jako u předchozí sady zkušebních těles se jedná o naprosto stejný postup laminace i počet a složení vrstev jako bylo popsáno. Zásadní změnou je však naprostá absence výkonnostního lepidla při lepení trubek na tupo. Bylo použito jen naprosto zanedbatelné množství kyanoakrylátového vteřinového lepidla Alteco Super Glue pro lehkou fixaci obou trubkových částí zkušebních těles umožňující další kroky jejich výroby.

Pomocí této sady zkušebních těles lze určit, jak velkým podílem na celkové pevnosti se podílí lepidlo používané pro lepení na tupo.

2.2.2.4 Současná podoba laminace ONE za použití pryskyřic CHS Epoxy 501 a 520 spolu s tvrdidly Telalit 0420 a Telalit 0590

Všechny tyto 4 sady zkušebních těles vyrobené za pomoci epoxidových pryskyřic CHS Epoxy 501 a CHS Epoxy 520 společně s tvrdidly Telalit 0420 a Telalit 0590 byly připraveny naprosto stejným postupem, jakým byly připraveny referenční zkušební tělesa se standardní laminací spojů pro rámy FESTKA ONE. Liší se pouze použitými epoxidovými systémy pro laminaci.

2.2.2.5 Současná podoba laminace spojů pro rámy FESTKA Scalatore

Cyklistický rám s názvem FESTKA Scalatore je navržen pro vysoce výkonnostní sportovní použití, a proto nese vysoké nároky na tuhost celého rámu. Tomu je přizpůsobena i jiná skladba výztuže laminovaných spojů.

Sada zkušebních těles v tomto případě používá stejně jako v případě laminace pro rámy FESTKA One laminační pryskyřici LG 700 společně s tvrdidlem HG 700. Zásadním rozdílem je však skladba použitých vlákenných výztuží.

Na očištěný povrch zkušebních těles bylo nanášeno lepidlo Spabond. První vrstvou vlákenné výztuže jsou UD pásy AT40 o délce 110 mm. Nanesené stejně ve směru předpokládaného pevnostního namáhání spoje.

Druhá vrstva vlákenné výztuže byla duplikací vrstvy první.

Jakožto třetí vrstva bylo použito speciální plátno TeXtreme 1027 od výrobce Oxeon AB. Plátno o rozměru 115x230 mm bylo nanášeno na zkušební těleso tak, že orientace vláken k ose symetrie T tělesa byla $\pm 45^\circ$.

Na podporu jedné vrstvy tkaniny TeXtreme jsou aplikovány 2 úseky tkaniny Style 461 o rozměrech 20x50 mm na překrytí míst nutného nastříhnutí kusu tkaniny TeXtreme (vidíme na obrázku 33), kterou by jinak nebylo možné dostatečně vytvarovat pro potřeby zkušebního tělesa.

Jako v pořadí čtvrtá laminační vrstva se opět opakuje stejná aplikace 8 kusů UD pásek AT40.

V pořadí pátou vrstvou je tkanina Style 461 s rozměry 115x230 mm, která má funkci především optickou, protože je poslední, a tedy pohledovou laminační vrstvou. Stejně jako v případě laminace typu FESTKA One je místo překryvu okrajů hlavního laminačního plátna překryto dvěma kusy o rozměrech 30x60 mm (viz obrázek 32).



Obrázek 33: Vrstva tkaniny TeXTreme 1027 použitá jako v pořadí třetí vrstva v laminaci spoje typu FESTKA Scalatore

2.3 Použité zkušební metody a zařízení

2.3.1 Charakterizace matric

2.3.1.1 Stanovení obsahu epoxidových skupin podle Jaye (epoxidový ekvivalent)

U této metody je využito adice bromovodíku vznikajícího in situ z kvartérní aminové soli (hexadecyltrimethylamoniumbromid) a odměrného roztoku kyseliny chloristé.

Na titračních vahách bylo naváženo 0,2-0,5 g vzorku pryskyřice a navážka byla rozpuštěna v 25 ml chloroformu. Přidá se 1 g hexadecyltrimethylamoniumbromidu v tuhém stavu a vzorek se titruje 0,1 M roztoku kyseliny chloristé v ledové kyselině

octové na krystalovou violeť do modrozeleného zbarvení. Stejně byl proveden i slepý pokus.

$$\text{Výpočet dle vzorce: } \frac{EE}{kg} = \frac{(A-B) \cdot f \cdot 0,1}{n}$$

Ve kterém:

A je spotřeba 0,1 M HClO₄ na titraci [ml]

B je spotřeba 0,1 M HClO₄ na titraci pro slepý pokus [ml]

f je faktor 0,1 M HClO₄

n je navážka vzorku [g]

2.3.1.2 Stanovení aminového čísla tvrdidel

Hodnota aminového čísla hovoří o počtu mg KOH ekvivalentním aminovým skupinám v 1 g vzorku. Aminové číslo je důležitou charakteristikou látek obsahujících aminové skupiny a lze tuto metodu využít i pro určení čistoty polyaminů. Nelze s ní stanovit dusík vázaný jako amid a stejně tak není možné primární, sekundární, nebo terciální aminoskupiny u neznámých látek.

Na analytických vahách bylo do 100 ml odměrné baňky naváženo okolo 0,7 g vzorku a doplněno na rysku ledovou kyselinou octovou. Z roztoku bylo následně odpipetováno 5 ml do titrační baňky a smíšeno s dalšími 20 ml ledové kyseliny octové. Tento roztok byl titrován 0,1 M roztokem kyseliny chloristé v ledové kyselině octové na indikátor krystalová violeť do modrozeleného zbarvení. Obdobně byl proveden i slepý pokus.

$$\text{Výpočet dle vzorce: } \check{c}. a. = \frac{(A-B) \cdot f \cdot 5,611 \cdot z}{n} \text{ [mg KOH/1 g vzorku]}$$

Ve kterém:

A je spotřeba 0,1 M HClO₄ na titraci [ml]

B je spotřeba 0,1 M HClO₄ na titraci pro slepý pokus [ml]

f je faktor 0,1 M HClO₄

z je zřed'ovací faktor (zde 20)

n je navážka vzorku [g]

2.3.1.3 Stanovení viskozity dle Höpplera

Höpplerův viskozimetr slouží ke stanovení hodnoty viskozity kapalin a využívá principu průchodu zatížené skleněné kuličky skleněnou kyvetou, obojí o přesném průměru.

Kapalinou (epoxidovou pryskyřicí, resp. tvrdidlem) byla nejprve naplněna kyveta po rysku a zasazena do temperační nádoby, kde byla ponechána k vytemperování na příslušnou teplotu měření (25°). Bylo zvoleno vhodné závaží působící na kuličku a byla sledována dráha kuličky průchodu kapalinou a u toho měřen čas průchodu za pomoci stopek. Měření bylo provedeno 5x s přestávkami 1-3 minuty mezi jednotlivými měřeními.

Výpočet dle vzorce: $\eta_{(25\text{ }^{\circ}\text{C})} = kpt$ [mPa.s]

Ve kterém:

k je konstanta kyvety

p je zatížení [g]

t je doba průchodu kuličky drahou 30 mm [s]

2.3.1.4 Stanovení extrahovatelného podílu

Stanovení extrahovatelného podílu má velký význam pro určení části epoxidového systému, ve kterém neproběhlo dostatečné zesítnění.

Na analytických vahách bylo diferenčně naváženo 0,5 g pilin matricového materiálu a navážka byla v elenmayerově baňce přelita 50 ml chloroformu. Baňka se směsí byla po dobu 20 minut vytřepávána v třepačce a po ukončení byl obsah přefiltrován na fritách S3 a frity byly vysušeny po dobu 20 hodin při teplotě 105 °C. Měření bylo provedeno dvakrát.

Výpočet dle vzorce: $E = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \cdot 100$ [%]

Ve kterém:

m_0 je původní hmotnost pilin [g]

m_1 je hmotnost pilin po extrakci [g]

2.3.1.5 Stanovení tvrdosti dle Brinella

Tato metoda je založena na principu vtlačování kuličky do zkoušeného materiálu. Tvrdost je dána vztahem mezi silou, kterou je vtlačována kulička do zkoušeného materiálu a velikosti důlku, který vznikne po určité době působení na zkušebním tělese. Pro toto měření byla použita tělíska o tloušťce 4 mm. Měření bylo provedeno 10x.

K měření byl použit tvrdoměr HP 250 firmy Werkstoffprüfmaschinen.

$$\text{Výpočet dle vzorce: } HK = \frac{F}{S} = \frac{m \cdot g}{\pi \cdot D \cdot h} \text{ [MPa]}$$

Ve kterém:

F je síla, kterou se vtlačuje kulička do zkoušeného materiálu [N]

S je plocha důlku vytvořeného kuličkou [mm²]

h je hloubka důlku [mm]

m je hmotnost závaží [kg]

D je průměr ocelové kuličky [mm]

2.3.1.6 Zkouška v tahu matricových materiálů

Měření bylo provedeno na trhacím stroji MTS-4/M s maximálním tahem 20 kN dle normy ČSN EN ISO 527-1,2. Podstata zkoušky spočívá v zatěžování zkoušeného tělíska tahem, které je umístěno mezi svěrné čelisti stroje s upínací délkou 100 mm. Zatěžování probíhá tahem s rychlostí posunu čelistí 5 mm/min. Měření bylo provedeno 10x. Rozměr zkušebních tělísek nařezaných z odlitých desek pomocí kotoučové řezačky byl 150x10x4 mm. Touto metodou byla určena mez pevnosti v tahu [MPa, N] a prodloužení při maximu [%].

2.3.1.7 Zkouška v ohybu matricových materiálů

Měření bylo provedeno na trhacím stroji MTS-4/M dle normy ČSN EN ISO 178. Podstata zkoušky spočívá v zatěžování zkoušeného tělíska, které je položeno na podpěrách se vzdáleností 64 mm. Zatěžování probíhá přesně vprostřed vzdálenosti mezi podpěrami rychlostí posunu příčnicku 2 mm/min. Měření bylo provedeno 10x. Rozměr zkušebních tělísek nařezaných z odlitých desek pomocí kotoučové řezačky byl

80x10x4 mm. Touto metodou byla určena mez pevnosti v ohybu [MPa, N] a průhyb při maximu [%].

2.3.1.8 Rázová houževnatost Charpy

Pro tuto zkoušku byla připravena tělesa o rozměrech 50x6x4 mm pomocí kotoučové řezačky z odlitých desek. Měří se rozdíl mezi nulovým kyvem kladiva a kyvem při nárazu na zkušební tělísko. Podstatou je stanovení rázové práce potřebné k porušení zkušební tělesa, na které dopadne nos nárazového kladiva. Rázová houževnatost se vztahuje na plochu průřezu tělesa.

Měření bylo provedeno 10x pomocí kladiva 4J od výrobce Werkstoffprüfmaschinen.

$$\text{Výpočet dle vzorce: } a_n = \frac{A_n}{S} = \frac{A_n}{b \cdot h} \cdot 10^3 \text{ [KJ.m}^{-2}\text{]}$$

Ve kterém:

A_n je práce potřebná k přeražení tělíška [J]

S je plocha průřezu tělíška [mm²]

b je šířka zkušební tělíška [mm]

h je výška zkušební tělíška [mm]

2.3.1.9 Termomechanická analýza (TMA)

TMA metoda je schopná stanovit změny vzorku (růst, smršťování, pohyb atd.) jako funkci teploty, času a působící síly. V tomto případě byla metoda použita pro zjištění teploty skelného přechodu (T_g) matricových epoxidových systémů a tzv. bílé hmoty.

Měření bylo provedeno na přístroji TMA CX04R (výrobce R.M.I. Pardubice), který je schopen vyhodnotit skelný přechod na základě údajů získaných měřením teplotní roztažnosti vzorků (sledování změny výšky vzorku). Měřeno na Katedře obecné a anorganické chemie.

Podmínky měření:

1. krok 150 °C, rychlostí 3 °C/min, síla 50 mN

2. krok 30 °C, rychlostí 3 °C/min, síla 50 mN
3. krok 150 °C, rychlostí 3 °C/min, síla 50 mN
4. krok 30 °C, rychlostí 3 °C/min, síla 50 mN

2.3.1.10 Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací

Jedná se o metodu, která poskytuje především kvalitativní informace o složení materiálu. Této metody bylo využito jen pro materiály, které jsou v současné době používány firmou FESTKA, tedy pro analýzu laminační pryskyřice LG 700, tvrdidla HG 286 a HG 700.

Měření bylo provedeno na zařízení FTIR Nicolet iS50 (Thermo Scientific, USA). Měření proběhlo v rozsahu vlnových délek 4 000 - 500 cm^{-1} (32 skenů ve spektru) se spektrálním rozlišením 2 cm^{-1} .

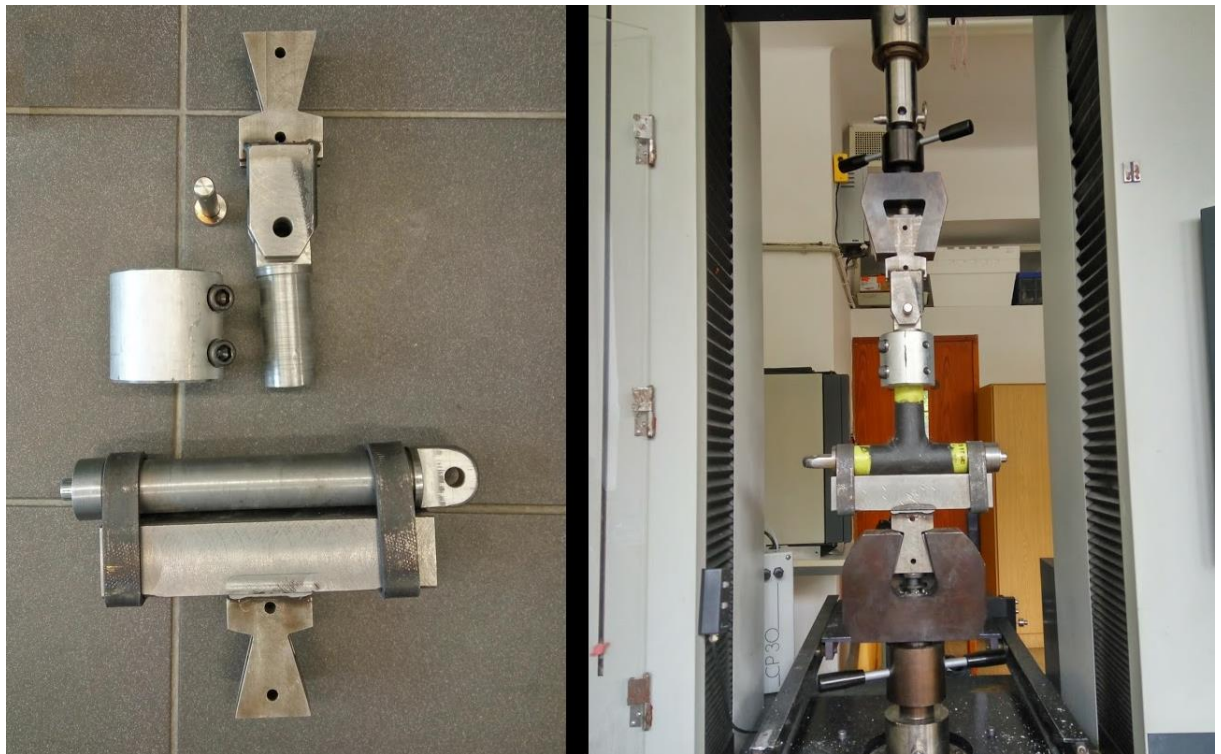
2.3.2 Zkoušky zkušebních těles T tvaru

2.3.2.1 Zkouška tahem

Pro tahové zkoušky na trhacím stroji bylo potřeba vyvinout vlastní metodiku a s tím spojený i vývoj a výroba speciálního upínací přípravku, pro trubkové vzorky tvaru písmene T. Měření bylo provedeno na trhacím stroji Adamel-Lhomargy DY 36 o maximálním výkonu tahu 100 kN ve společnosti SYNPO, a.s. Pardubice.

Podstata zkoušky spočívá v zatěžování zkoušeného tělesa tahem, které je umístěno mezi posuvníky stroje pomocí vlastního přípravku (viz obrázek 34 a technické výkresy na obrázcích 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42 a 45). Zatěžování probíhá tahem s rychlostí posunu 1 mm/min. Touto metodou byla určena mez pevnosti v tahu [MPa], maximální zatížení při porušení [N] a prodloužení při maximu [% , mm]. Pro sadu zkušebních těles se standardní laminací FESTKA One bylo měření provedeno 10x, pro ostatní typy pak 5x.

Bylo počítáno s plochou průřezu trubkového materiálu v místě laminace, tedy jako mezikruží vnitřního průměru trubky a vnějšího průměru trubky s laminačním spojem.

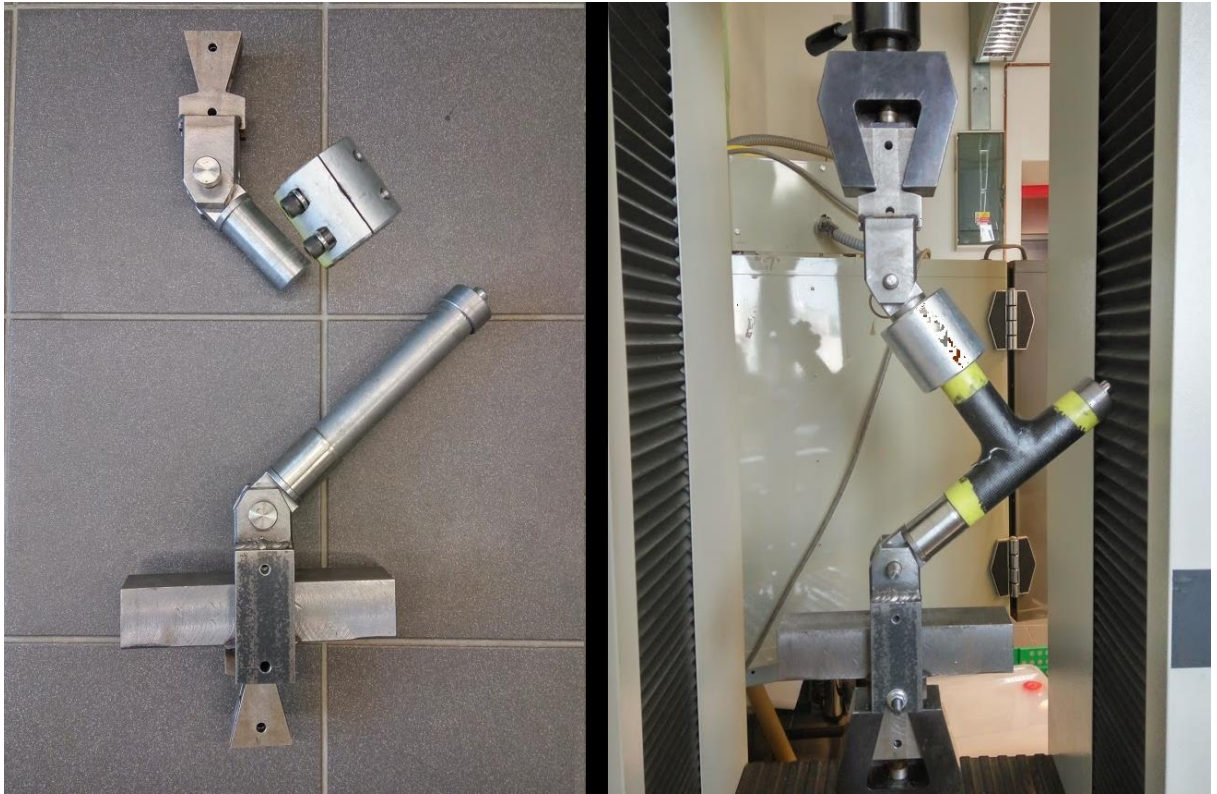


Obrázek 34: Jednotlivé části upínacího přípravku pro zkoušku tahem (vlevo) a použitý přípravek s upnutým zkušebním tělesem v trhacím stroji (vpravo)

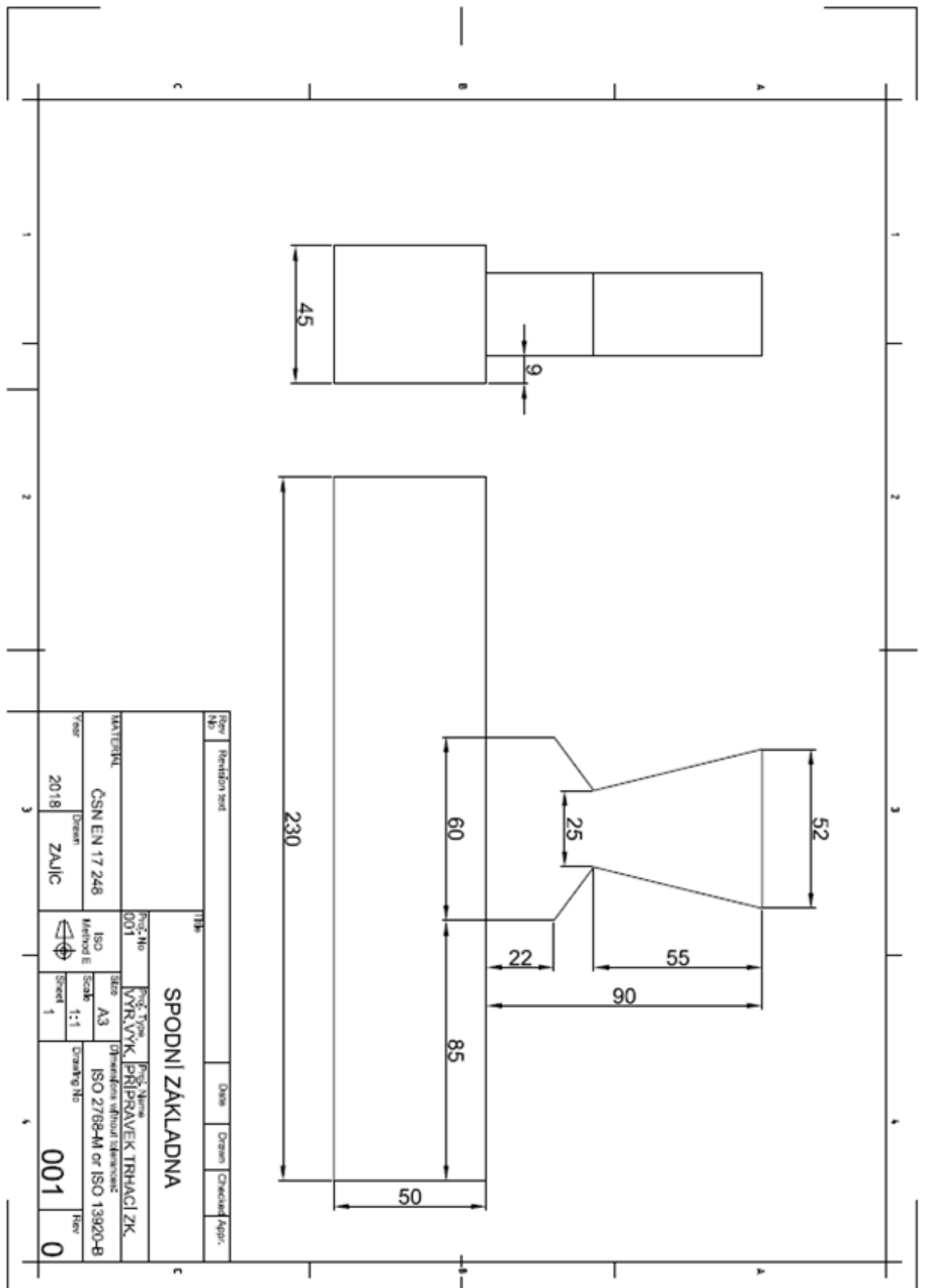
2.3.2.2 Zkouška tahovým lomem

Pro lomové zkoušky tahem na trhacím stroji bylo potřeba vyvinout vlastní metodiku a s tím spojený i vývoj a výroba speciálního upínacího přípravku, pro trubkové vzorky tvaru písmene T. Měření bylo provedeno na trhacím stroji MTS-4/M o maximálním výkonu 20 kN. Podstata zkoušky spočívá v zatěžování zkoušeného tělesa tahem tak, že dochází k porušení laminovaného spoje v lomu. Měřené těleso je umístěno mezi posuvníky stroje pomocí vlastního přípravku (viz obrázek 35 a dále technické výkresy na obrázcích 36, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 44 a 45), který umožňuje na obě trubkové části zkušebních těles působit pod úhlem 45° . Zatěžování probíhá tahem s rychlostí posunu 1 mm/min. Touto metodou byla určena mez pevnosti v tahu [MPa], maximální zatížení při porušení [N], a prodloužení při maximu [% , mm]. Pro sadu zkušebních těles se standardní laminací FESTKA One bylo měření provedeno 10x, pro ostatní typy pak 5x.

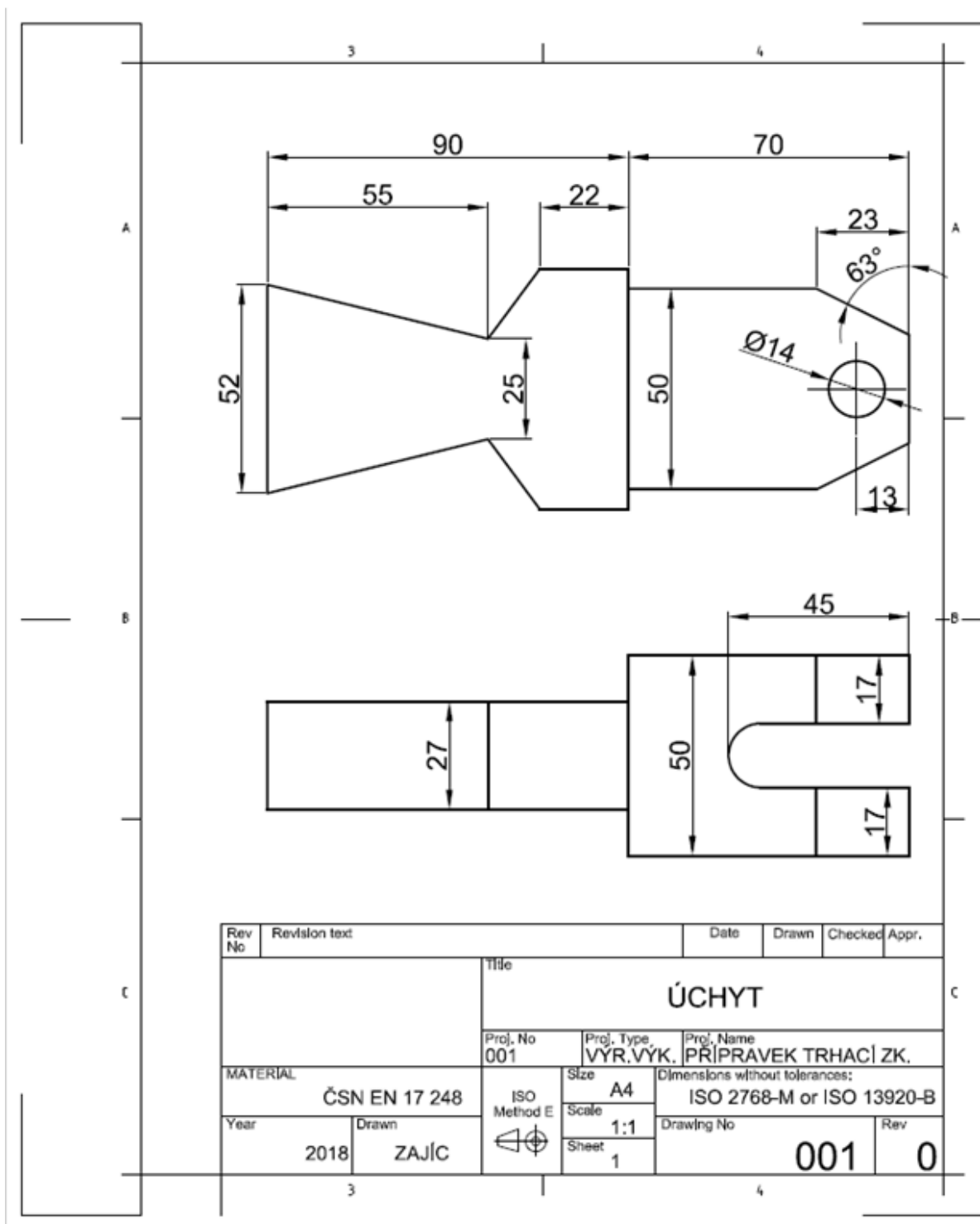
Bylo počítáno s plochou průřezu trubkového materiálu v místě laminace, tedy jako mezikruží vnitřního průměru trubky a vnějšího průměru trubky s laminačním spojem. Rychlost posunu byla 1 mm/min.



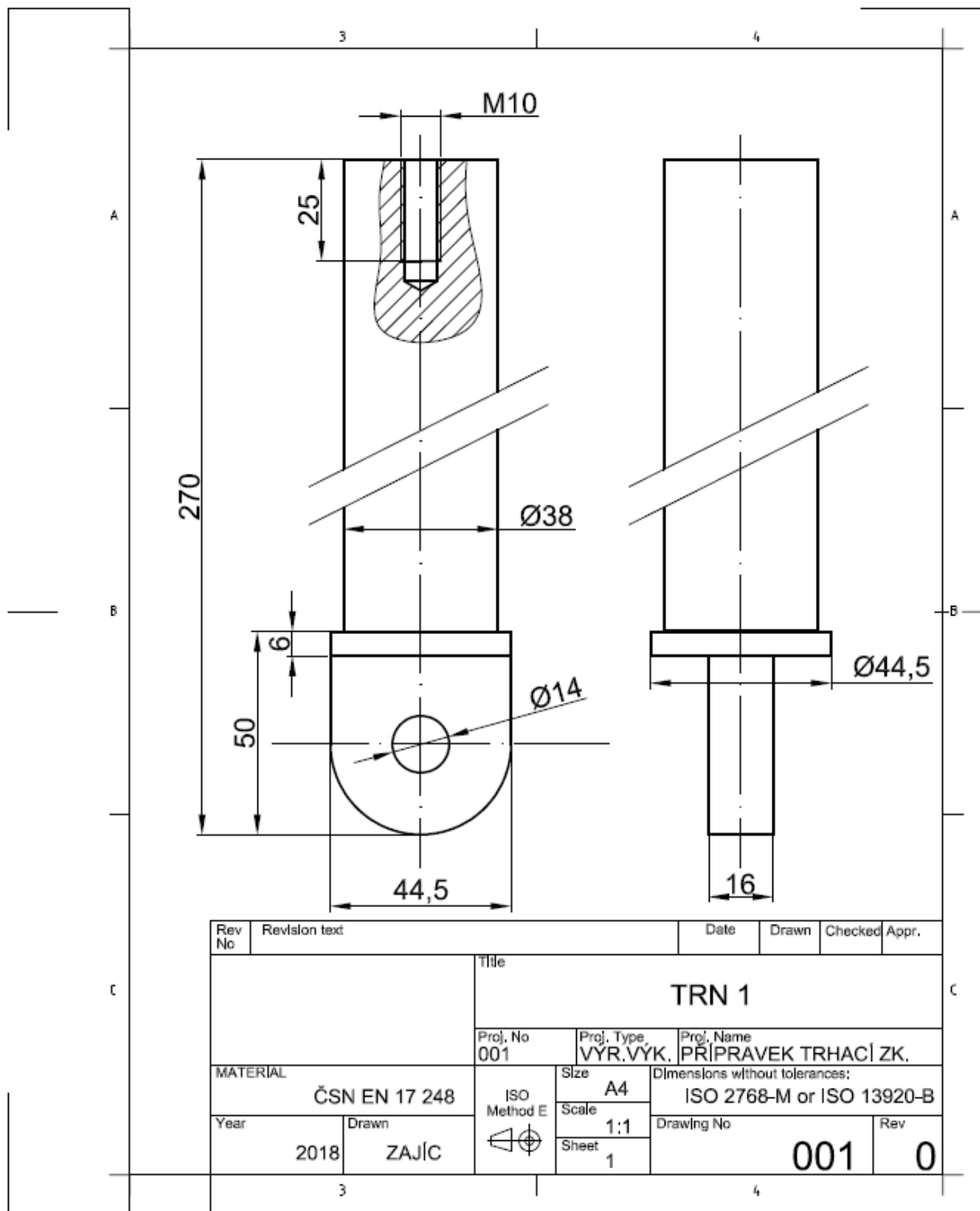
Obrázek 35: Jednotlivé části upínacího přípravku pro zkoušku tahovým lomem (vlevo) a použitý přípravek s upnutým zkušebním tělesem v trhacím stroji (vpravo)



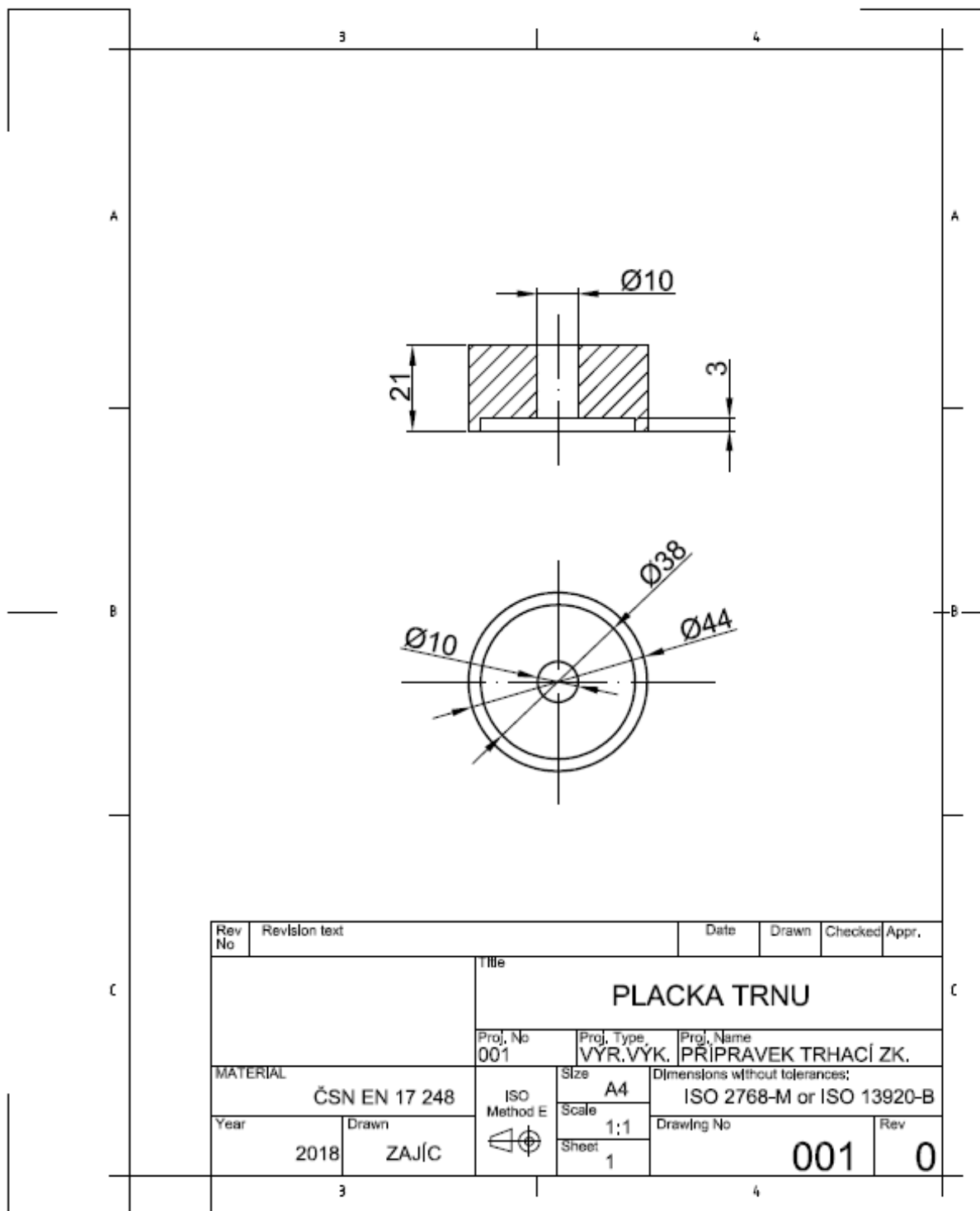
Obrázek 36: Technický výkres spodní základny upínacího přípravku



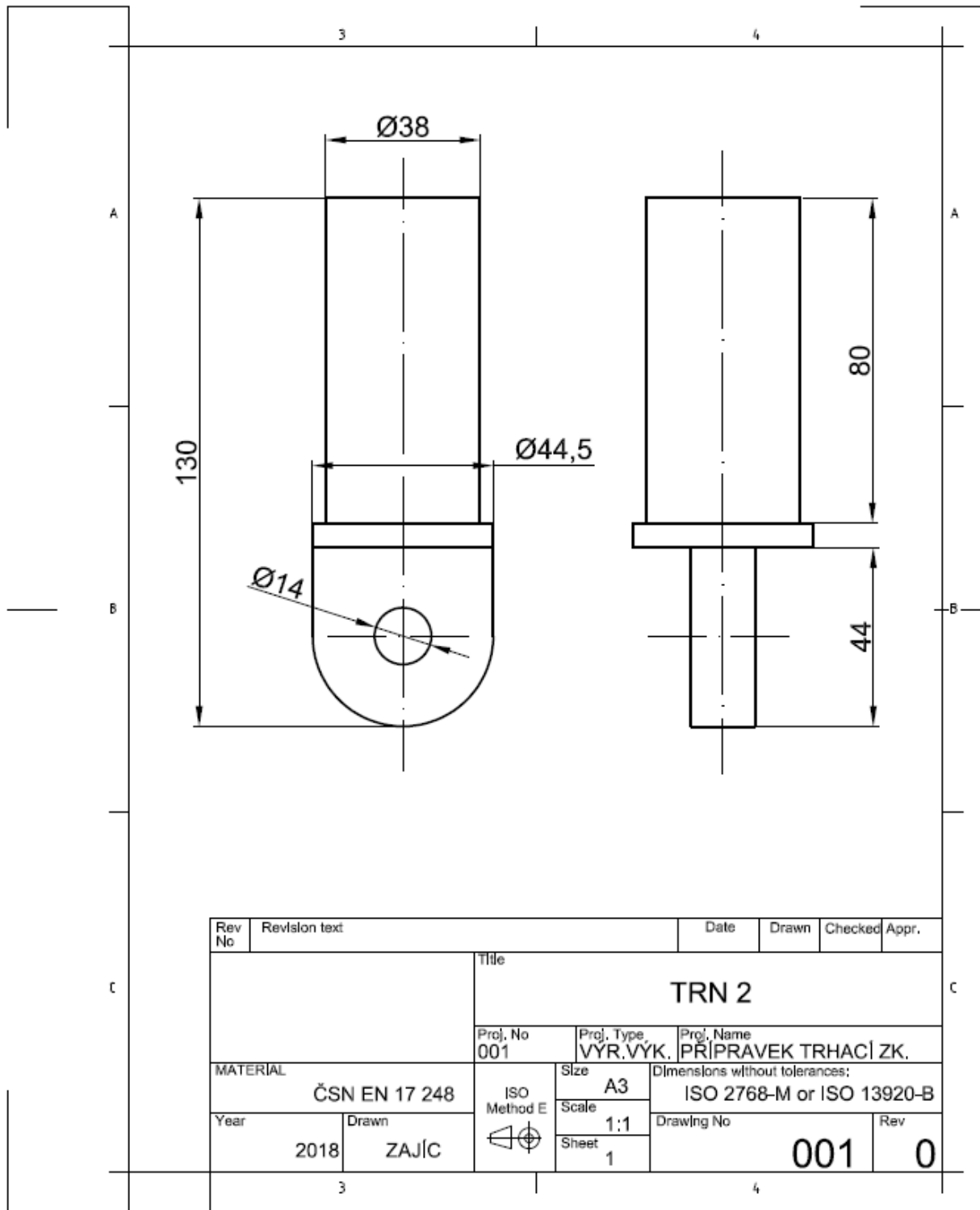
Obrázek 37: Technický výkres horní části upínacího přípravku



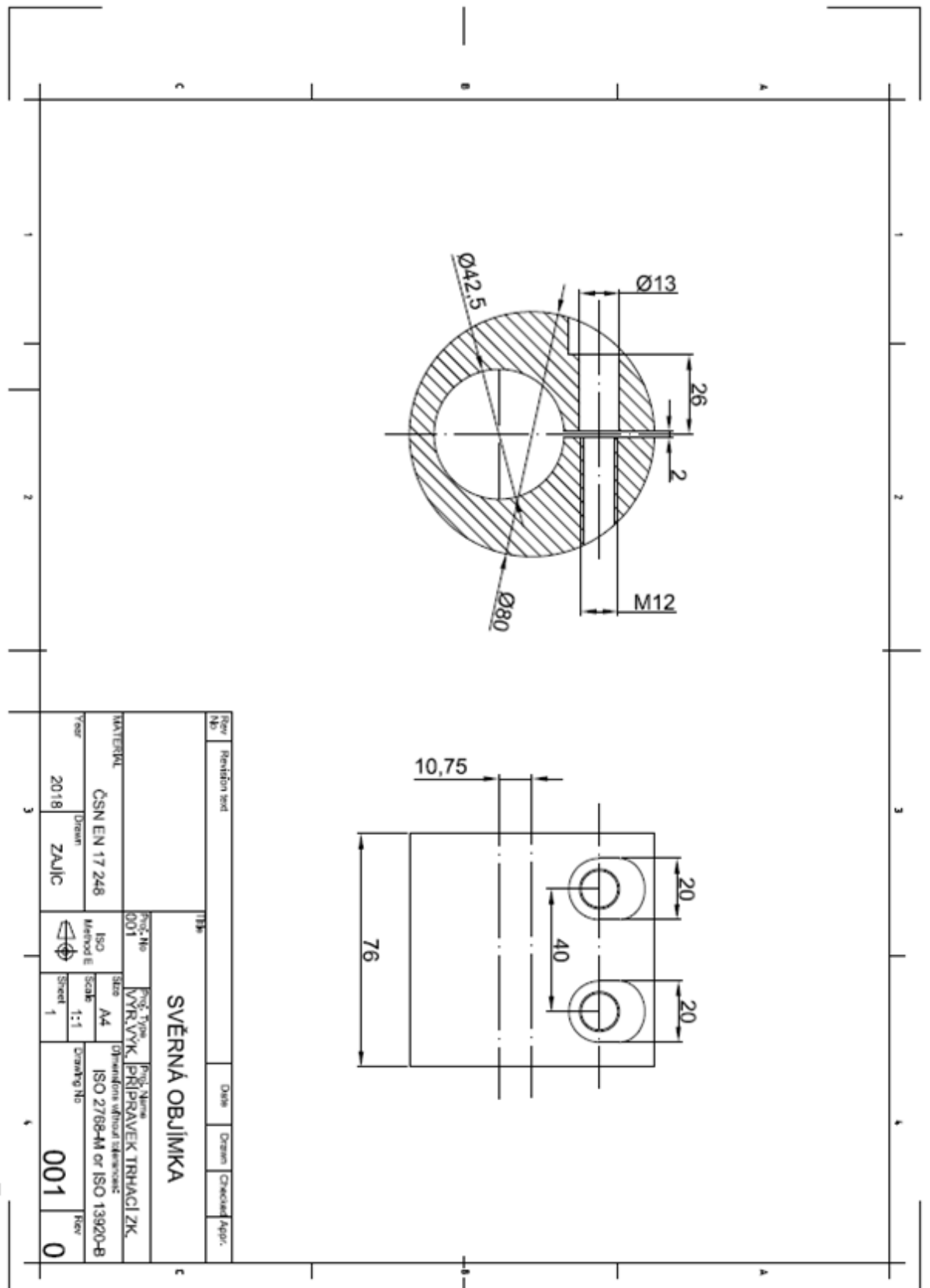
Obrázek 38: Technický výkres části upínacího přípravku určeného pro provlečení trubkou zkušební tělesa



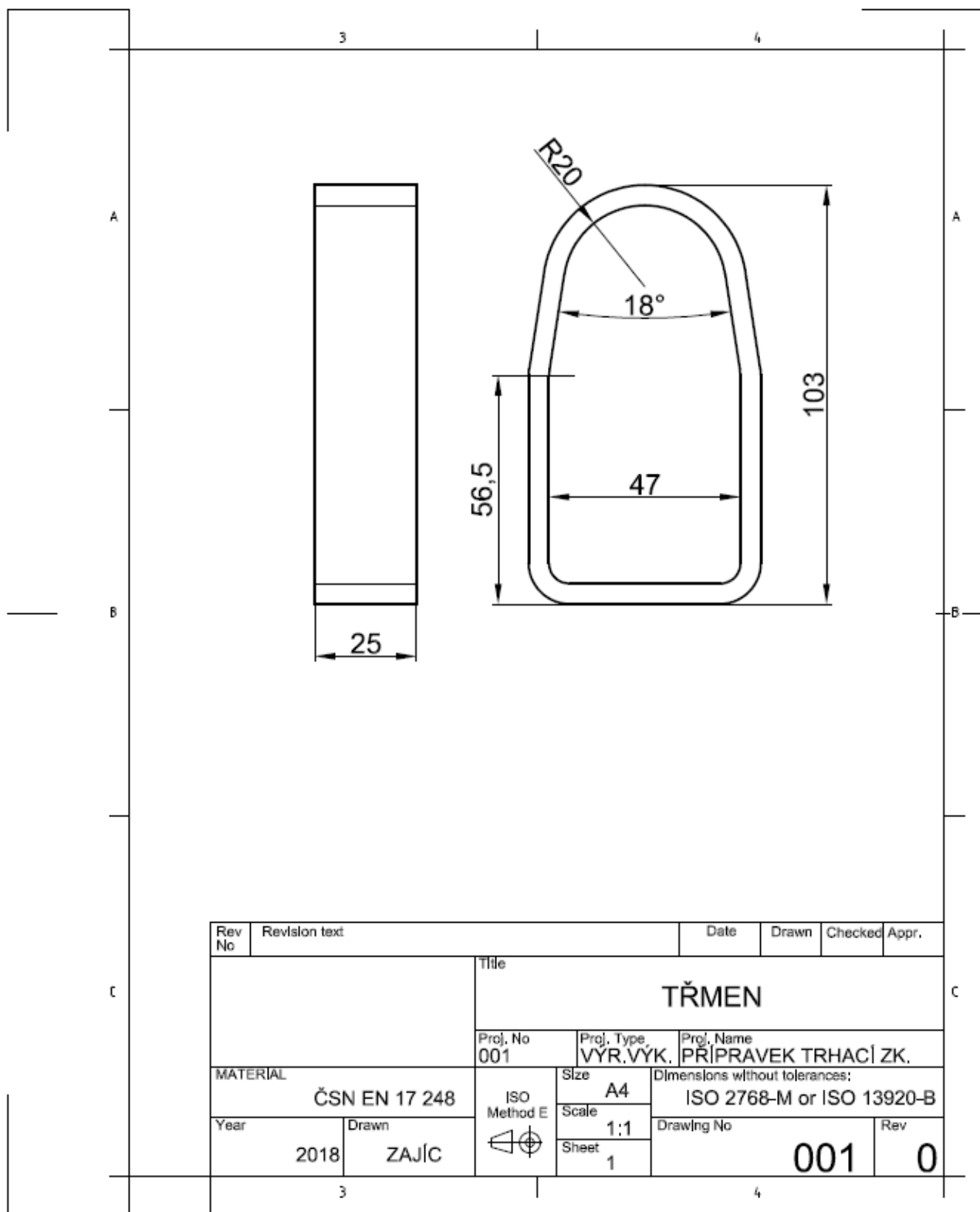
Obrázek 39: Technický výkres části, která sloužila jako pojistná koncovka trnu 1 a byla zajištěna šroubem M10



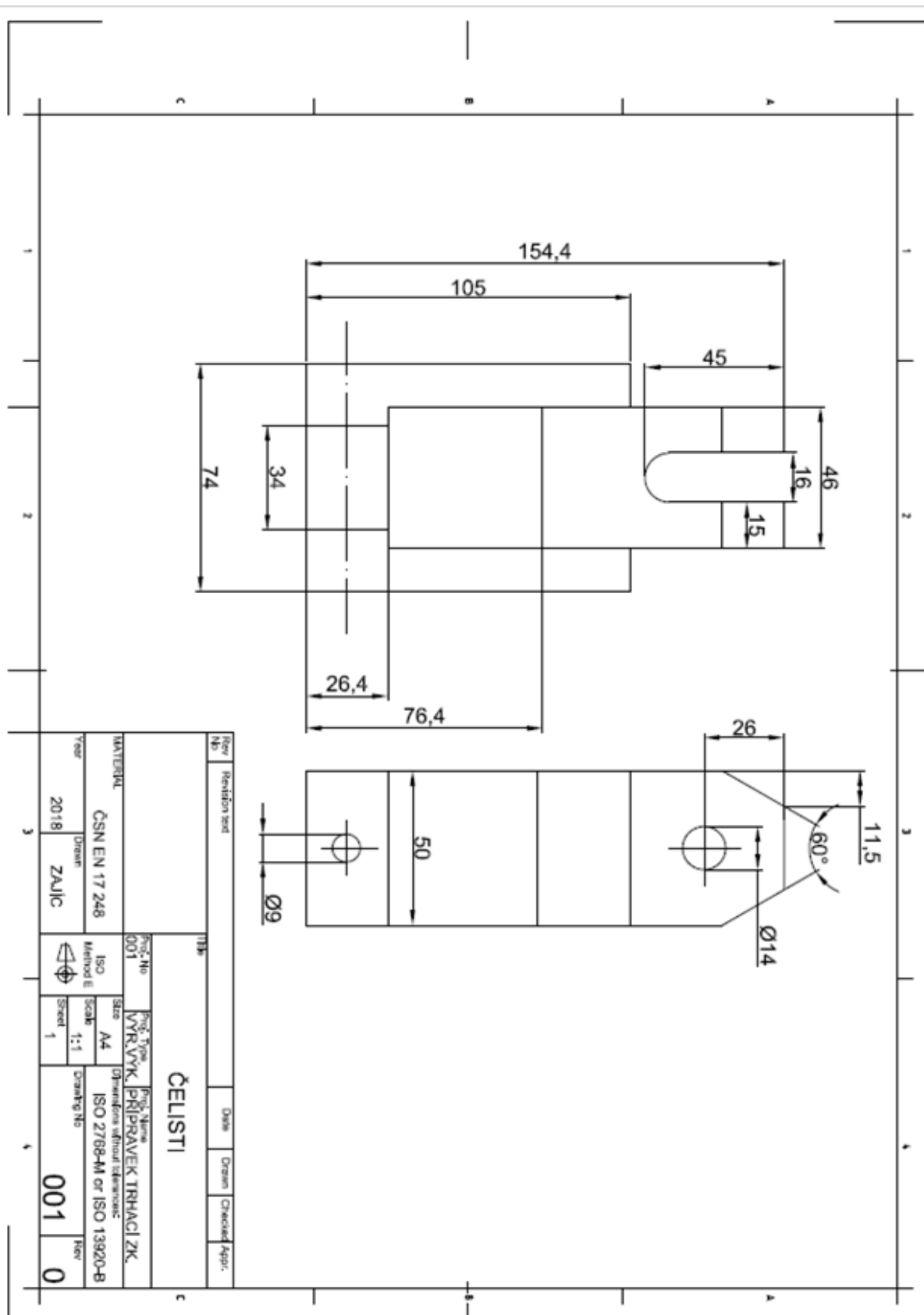
Obrázek 40: Technický výkres trnu s okem pro propojení s horní částí upínacího přípravku



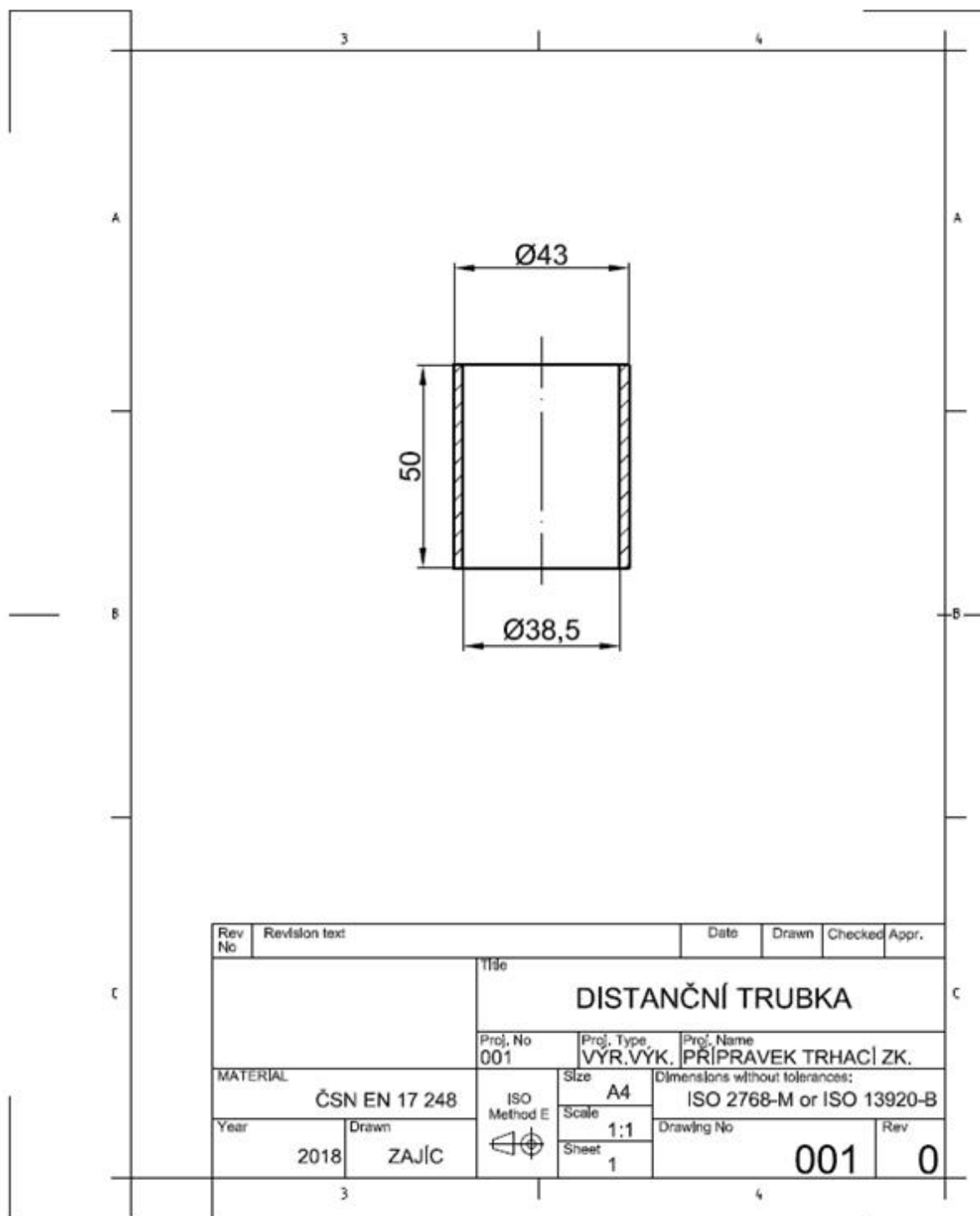
Obrázek 41: Technický výkres svorné objímky, která má funkci zajištění zkušebního tělesa na trnu 2



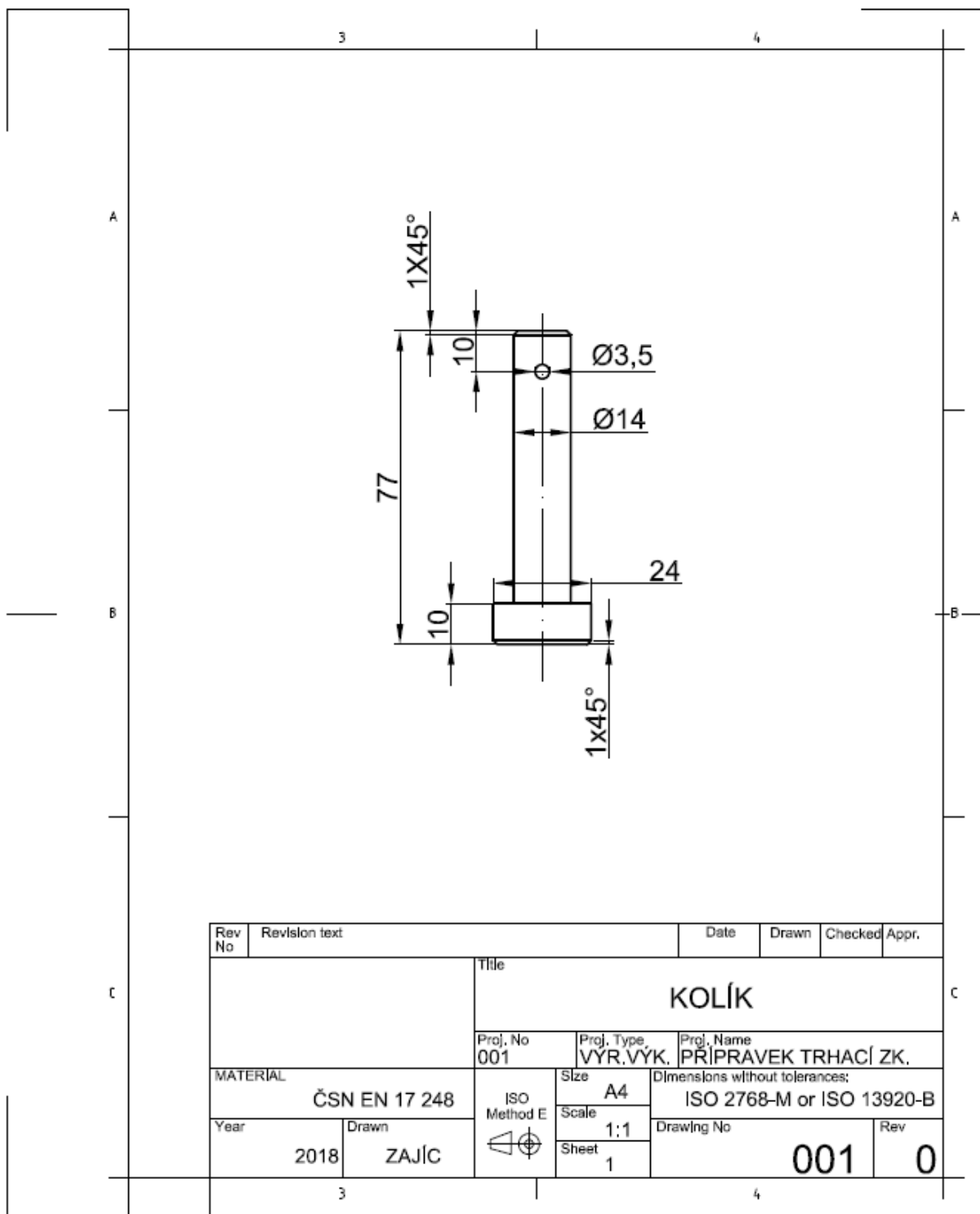
Obrázek 42: Technický výkres třmenu, kterého byly použity dva kusy pro upevnění trnu 1 ke spodní základně upínacího přípravku



Obrázek 43: Technický výkres části, která je nasunuta na spodní základnu a slouží jako spojovací část s okem trnu 1 pro měření tahového lomu



Obrázek 44: Technický výkres části, která nasunutím na trn 1 slouží k přesnému vymezení vzdálenosti zkušební tělesa od okraje trnu 1



Obrázek 45: Technický výkres části, která slouží pro propojení spojovacích ok na trnu 1 a trnu 2 na jejich protikusech. Této části byly použity 2 kusy pro měření tahového lomu.

2.3.2.3 Stanovení obsahu popela

Stanovení popela neboli obsah nespalitelných složek slouží k určení míry prosycení vlákně výztuže laminátu matricí.

Porcelánové kelímky byly vyžháný v peci na 1 hodinu při 600 °C. po vychladnutí v exikátoru byly kelímky přesně zváženy na analytických vahách. Do kelímku bylo naváženo 1-2 g vzorku a ten byl následně spalován 1 hodinu při 600 °C. poté byly kelímky vyjmuty a opět ponechány ke zchladnutí v exikátoru. Konečně byly kelímky s popely přesně zváženy na analytických vahách a byl vypočítán obsah nespalitelných složek.

$$\text{Výpočet dle vzorce: } \% = \frac{m_2}{m_1} \cdot 100$$

Ve kterém:

m_1 je hmotnost suché navážky zkoušeného vzorku [g]

m_2 je hmotnost popela v [g]

3 Výsledky a diskuze

3.1 Charakterizace matricových materiálů

Nejprve byla provedena experimentální charakterizace materiálů sloužících k laminaci, a to především epoxidových systémů, které byly použity jako matrice.

3.1.1.1 Stanovení obsahu epoxidových skupin podle Jaye

U všech třech laminačních epoxidových pryskyřic, které byly použity pro přípravu laminovaných spojů zkušebních těles byl experimentálně určen obsah epoxidových skupin dle Jaye.

Tabulka 15: Výsledné hodnoty epoxidových ekvivalentů pro použité laminační pryskyřice v porovnání s hodnotami udané výrobcem

epoxidová pryskyřice	EE/kg	EE/kg dle výrobce
LG 700	5,86	6,00-6,40
CHSE 501	5,14	5,00-5,30
CHSE 520	5,08	5,208-5,495

V tabulce 15 můžeme vidět výsledné hodnoty obsahu epoxidových skupin zjištěné měřením v porovnání s hodnotami, které udává výrobce. U Laminační pryskyřice CHS Epoxy 501 se zjištěná hodnota přesně shoduje s rozsahem udaným výrobcem.

U pryskyřice CHS Epoxy 520 a stejně tak u pryskyřice LG 700 byla hodnota zjištěná měřením lehce nižší nežli hodnota udaná výrobcem.

3.1.1.2 Stanovení aminového čísla tvrdidel

U všech tvrdidel použitých pro výrobu laminovaných spojů trubek zkušebních těles bylo provedeno experimentální určení hodnoty aminového čísla a výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 16.

Aminová čísla pro tvrdidla HG 700, Telalit 0420 i Telalit 0590 byla zjištěna ve skutečnosti vyšší, než jaká udává výrobce.

U tvrdidla HG 286 byla zjištěná hodnota aminového čísla přesně v rozsahu udávaném výrobcem.

Tabulka 16: Hodnoty aminového čísla zjištěné experimentem v porovnání s hodnotami udávanými výrobcem

tvrdidlo	Aminové číslo	a. č. dle výrobce
Telalit 0420	662,97	600-650
Telalit 0590	554,53	440-490
HG 700	604,59	480-550
HG 286	453,16	450-500

3.1.1.3 Stanovení viskozity dle Höpplera

U všech epoxidových pryskyřic i tvrdidel užitých k přípravě zkušebních těles byly naměřeny hodnoty viskozity, které jsou uvedeny v tabulkách 17 a 18.

Tabulka 17: Experimentálně zjištěné hodnoty viskozity pro jednotlivá tvrdidla v porovnání s hodnotami udávanými výrobcem

	zjištěná viskozita mPa.s (25 °C)	výrobcem udaná viskozita mPa.s (25 °C)
HG 700	13,48	15-20
HG 286	68,35	80-120
Telalit 0420	13,5	10-20
Telalit 0590	8,35	5-10

Tabulka 18: Experimentálně zjištěné hodnoty viskozity pro jednotlivé laminační pryskyřice v porovnání s hodnotami udávanými výrobcem

	zjištěná viskozita mPa.s (25 °C)	výrobcem udaná viskozita mPa.s (25 °C)
LG 700	631,59	600-900
CHS Epoxy 501	872,72	600-800
CHS Epoxy 520	14622,9	12000-14500

Z výsledků zjištěných v tabulce číslo 17 můžeme jasně vidět, že tvrdidla Telalit 0420 i Telalit 0590 vykazují skutečné hodnoty viskozity nacházející se v rozsahu udaném výrobcem. Na rozdíl od toho u obou tvrdidel od výrobce GRM Systems můžeme pozorovat, že zjištěná skutečná hodnota je vždy nižší, nežli je spodní mez rozsahu, který udává výrobce.

Experimentálně zjištěné hodnoty viskozit pro všechny epoxidové pryskyřice můžeme vidět v tabulce 18, kde je můžeme porovnat s hodnotami, které uvádí výrobce. Hodnota pryskyřice LG 700 se shoduje s rozsahem, který udává výrobce. U obou pryskyřic CHS Epoxy je skutečná hodnota vždy o něco vyšší než rozsah udaný výrobcem.

3.1.1.4 Stanovení extrahovatelného podílu

Stanovení extrahovatelného podílu bylo provedeno u všech laminačních systémů, ze kterých byly připraveny desky a z těch následně zkušební tělíska. Krom laminačních systémů byl extrahovatelný podíl určen i u tzv. bílé hmoty.

Tabulka 19: Procentuální vyjádření extrahovatelného podílu pro všechny laminační systémy včetně tzv. bílé hmoty

	extrahovatelný podíl [%]
LG 700 + HG 700	6,21
LG 700 + HG 286	2,73
CHSE 501 + Telalit 0420	6,31
CHSE 501 + Telalit 0590	4,18
CHSE 520 + Telalit 0420	13,59
CHSE 520 + Telalit 0590	1,79
bílá hmota	3,71
tzv. LG 700 + HG 286 + mikrosféry Q-Cell	

Výsledné hodnoty tohoto měření můžeme vidět v tabulce 19. Všechny systémy vykazují extrahovatelný podíl pod 10 % s výjimkou systému CHS Epoxy 520 s tvrdidlem Telalit 0420. Některé systémy dokonce vykazují hodnotu nižší jak 5 %.

3.1.1.5 Stanovení tvrdosti dle Brinella

U všech laminačních systémů a tzv. bílé hmoty byla zjištěna hodnota tvrdosti (tabulka 20). Ta byla měřena na zkušebních tělíscích vyrobených z odlitých desek.

Tabulka 20: Hodnoty tvrdosti laminačních systémů a podmínky měření

laminační systém	podmínky měření	tvrdost [MPa]
LG 700 + HG 700	HK/5/306,6/10	940,14 ± 168,70
	HK/5/306,6/60	766,45 ± 131,81
LG 700 + HG 286	HK/5/306,6/10	1015,68 ± 190,97
	HK/5/306,6/60	758,93 ± 165,77
CHS Epoxy 501 + Telalit 0420	HK/5/306,6/10	1662,33 ± 275,68
	HK/5/306,6/60	927,414 ± 211,61
CHS Epoxy 501 + Telalit 0590	HK/5/306,6/10	1352,35 ± 253,84
	HK/5/306,6/60	586,78 ± 99,43
CHS Epoxy 520 + Telalit 0420	HK/5/306,6/10	878,24 ± 121,18
	HK/5/306,6/60	890,83 ± 146,44
CHS Epoxy 520 + Telalit 0590	HK/5/306,6/10	869,08 ± 157,15
	HK/5/306,6/60	748,80 ± 109,03
bílá hmota	HK/5/306,6/10	905,97 ± 152,10
	HK/5/306,6/60	725,86 ± 144,14

Z hodnot uvedených v tabulce 20 vyplývá, že největší tvrdost vykazuje pryskyřice CHS Epoxy 501 s tvrdidlem Telalit 0420. Jako druhý nejtvrdší systém byl určen též se základem pryskyřice CHS Epoxy 501 s tvrdidlem Telalit 0590. Naopak nejnižší hodnota tvrdosti byla změřena u obou systémů se základem pryskyřice CHS Epoxy 520.

3.1.1.6 Zkouška matricových materiálů v tahu

Tato zkouška byla provedena pro všechny matricové materiály, ze kterých byly připraveny desky a taktéž pro tzv. bílou hmotu. U této zkoušky bylo určeno: mez pevnosti v tahu [MPa, N] a tažnost [%] (viz tabulka 21).

Tabulka 21: Výsledky tahových zkoušek matricových materiálů

	LG 700 + HG700	LG 700 + HG 286	CHSE 501 + Telalit 0420
mez pevnosti v tahu [MPa]	62,89 ± 6,59	62,28 ± 5,15	53,47 ± 4,07
mez pevnosti v tahu [N]	2761,36 ± 239,95	3361,12 ± 245,17	2415,2 ± 42,52
tažnost [%]	2,57 ± 0,85	3,61 ± 1,07	1,68 ± 0,35

	CHSE 501+ Telalit 0590	CHSE 520+ Telalit 0420	CHSE 520+ Telalit 0590
mez pevnosti v tahu [MPa]	57,49 ± 1,16	18,78 ± 1,72	64,98 ± 0,72
mez pevnosti v tahu [N]	1815 ± 37,95	681,15 ± 61,89	2862,15 ± 274,68
tažnost [%]	3,61 ± 0,29	0,25 ± 0,07	5,33 ± 2,07

	bílá hmota
mez pevnosti v tahu [MPa]	2,76 ± 0,49
mez pevnosti v tahu [N]	194,15 ± 36,63
tažnost [%]	0,62 ± 0,32

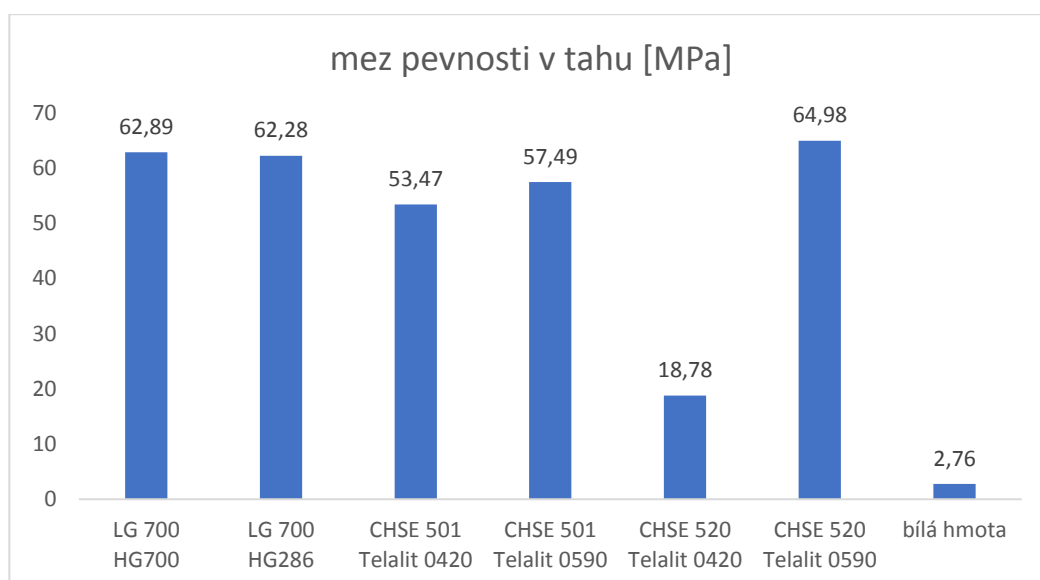
Z tohoto porovnání hodnot jasně vyplývá, že tzv. bílá hmota vykazuje mnohonásobně nižší hodnoty pevnosti v tahu nežli samotné matricové systémy, což bylo očekávatelné vzhledem k struktuře a funkci „bílé hmoty“.

Laminační systém s nejnižší hodnotou pevnosti v tahu je CHS Epoxy 520 s tvrdidlem Telalit 0420 a to dokonce o 70,1 % nižší hodnotou meze pevnosti, nežli vykazuje systém LG 700 s HG 700. Tento systém vykazuje i nejnižší tažnost ze všech.

Nejvyšší hodnota meze pevnosti v tahu i tažnosti byla zjištěna u systému CHS Epoxy 520 s tvrdidlem Telalit 0590.

Oba systémy využívající pryskyřice LG 700 vykazují mez pevnosti i tažnost téměř shodnou a zároveň druhou nejvyšší ze všech porovnávaných systémů.

Porovnání hodnot meze pevnosti v tahu jednotlivých systémů je zobrazeno na obrázku 46.



Obrázek 46: Porovnání mezí pevnosti v tahu různých matic

3.1.1.7 Zkouška maticových materiálů v ohybu

Tato zkouška byla provedena pro všechny maticové materiály, ze kterých byly připraveny desky a taktéž pro tzv. bílou hmotu. U této zkoušky bylo určeno: mez pevnosti v ohybu [MPa, N] a průhyb při maximu [%] (viz tabulka 22).

Tabulka 22: Výsledky ohybových zkoušek maticových materiálů

	LG 700 + HG700	LG 700 + HG 286	CHSE 501 + Telalit 0420
mez pevnosti v ohybu [MPa]	6,69 ± 0,48	6,95 ± 0,69	6,55 ± 0,55
mez pevnosti v ohybu [N]	316,64 ± 30,65	390,76 ± 34,66	309,52 ± 48,28
průhyb při maximu [%]	6,55 ± 0,84	6,27 ± 1,34	6,09 ± 0,75

	CHSE 501+ Telalit 0590	CHSE 520+ Telalit 0420	CHSE 520+ Telalit 0590
mez pevnosti v ohybu [MPa]	3,27 ± 0,17	1,42 ± 0,82	5,18 ± 0,46
mez pevnosti v ohybu [N]	107,8 ± 12,26	62,55 ± 8,75	235,84 ± 39,87
průhyb při maximu [%]	4,56 ± 0,24	1,49 ± 0,25	6,424 ± 0,31

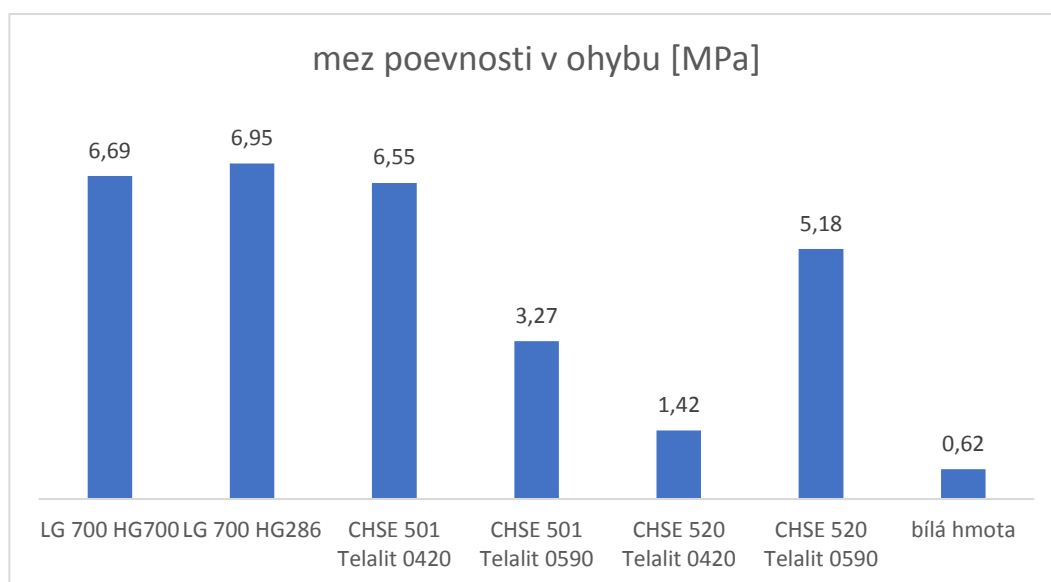
	bílá hmota
mez pevnosti v ohybu [MPa]	0,62 ± 0,16
mez pevnosti v ohybu [N]	44,3 ± 12,71
průhyb při maximu [%]	0,79 ± 0,04

Z tohoto porovnání opět vyplývá, že nejnižší hodnotu meze pevnosti v ohybu vykazuje tzv. bílá hmota, což je očekávatelné vzhledem ke struktuře a určení tohoto materiálu.

Nejvyšší hodnotu meze pevnosti v ohybu vykazuje systém LG 700 s tvrdidlem HG 286 a druhou nejvyšší hodnotu stejná pryskyřice s tvrdidlem LG 700 od výrobce GRM Systems.

Nejvyšší hodnota průhybu při maximu byla zjištěna u pryskyřice LG 700 s tvrdidlem HG 700. Druhou nejvyšší hodnotu pak vykázal systém CHC Epoxy 520 s Telalit 0590.

Porovnání hodnot meze pevnosti v ohybu jednotlivých systémů je zobrazeno na obrázku 47.



Obrázek 47: Porovnání mezí pevnosti v ohybu různých matric

3.1.1.8 Rázová houževnatost Charpy

Hodnota rázové houževnatosti byla změřena pro všechny matricové materiály a tzv. bílou hmotu. Měření proběhlo na tělískách připravených z desek. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 23.

Tabulka 23: Hodnoty rázové houževnatosti všech matricových materiálů

	rázová houževnatost [kJ/m²]
LG 700 + HG700	12,2
LG 700 + HG 286	13,8
CHSE 501 + Telalit 0420	16,6
CHSE 501+ Telalit 0590	31,63
CHSE 520+ Telalit 0420	12,01
CHSE 520+ Telalit 0590	36,9
bílá hmota	4,88

Zdaleka nejvyšší hodnota rázové houževnatosti je pozorovatelná u tzv. bílé hmoty, což bylo plně očekávatelné vzhledem ke struktuře tohoto materiálu. Nejnížší hodnoty rázové houževnatosti byly zjištěny u epoxidových laminační systémů, které byly vytvrzeny pomocí tvrdidla Telalit 590. Všechny ostatní systémy vykazují hodnotu houževnatosti asi třetinovou oproti nejsilnějším systémům, a jejich hodnoty si jsou velmi podobné.

3.1.1.9 Termomechanická analýza (TMA)

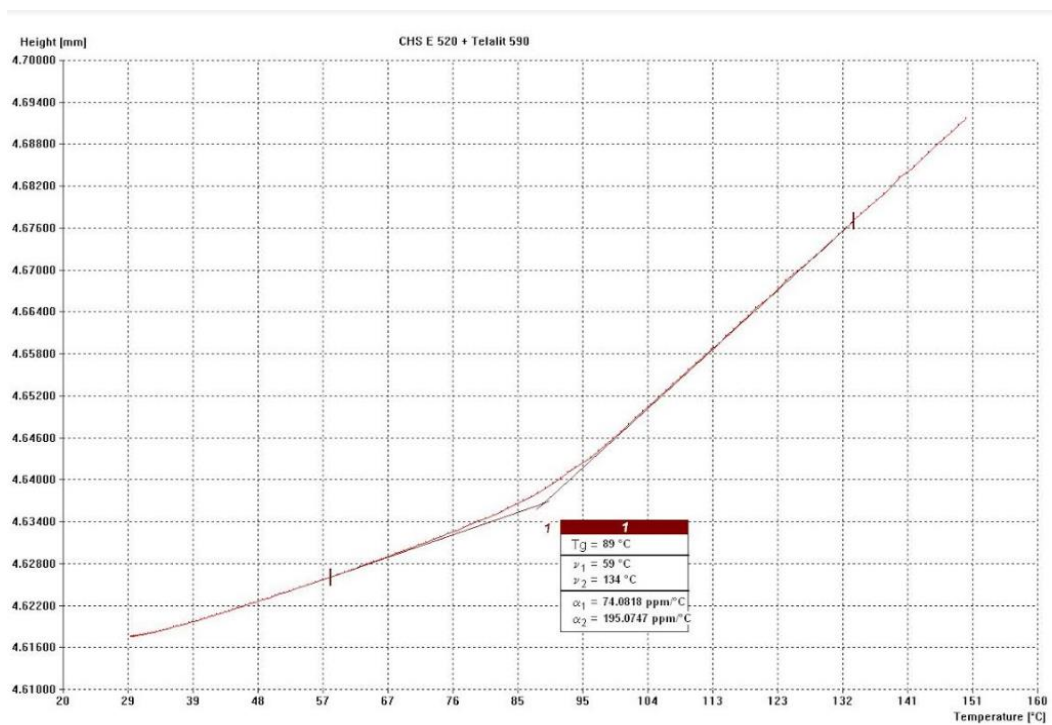
Měření metody TMA bylo provedeno pro stanovení teploty skelného přechodu (T_g) matricových systémů a tzv. bílé hmoty. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 24.

Tabulka 24: Výsledky termomechanické analýzy

	T_g	α_1	α_2
LG 700 + HG700	89	76,88	179,02
LG 700 + HG 286	85	76,95	182,92
CHSE 501 + Telalit 0420	84	84	188,54
CHSE 501+ Telalit 0590	50	77,63	207,72
CHSE 520+ Telalit 0420	126	63,23	174,8
CHSE 520+ Telalit 0590	89	74,08	195,07
bílá hmota	87	26,85	77,64

Nejvyšší hodnota teploty skelného přechodu byla zjištěna u epoxidové pryskyřice CHS Epoxy 520 s tvrdidlem Telalit 0420. Naopak nejnížší hodnota T_g byla zjištěna u systému CHS Epoxy 501 s tvrdidlem 0590. Všechny ostatní hodnoty T_g byly zjištěny vcelku podobné.

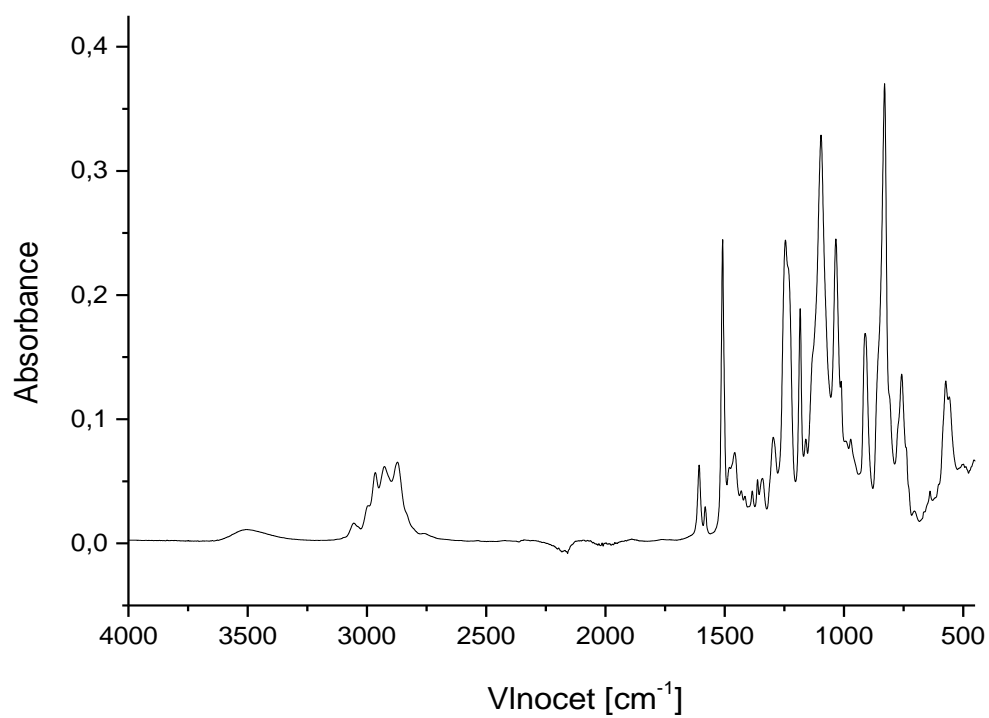
Grafické zjištění teploty skelného přechodu je vyobrazeno na obrázku 48.



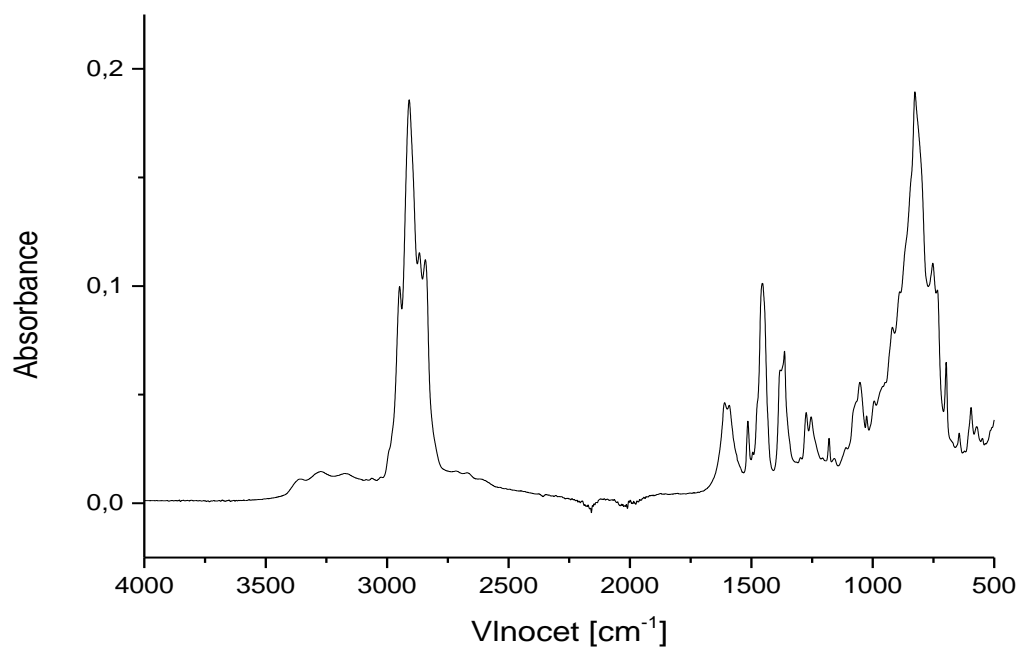
Obrázek 48: Graf určení T_g pomocí TMA pro epoxidový systém CHS Epoxy 520 a tvrdidlo Telalit 0590

3.1.1.10 Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací

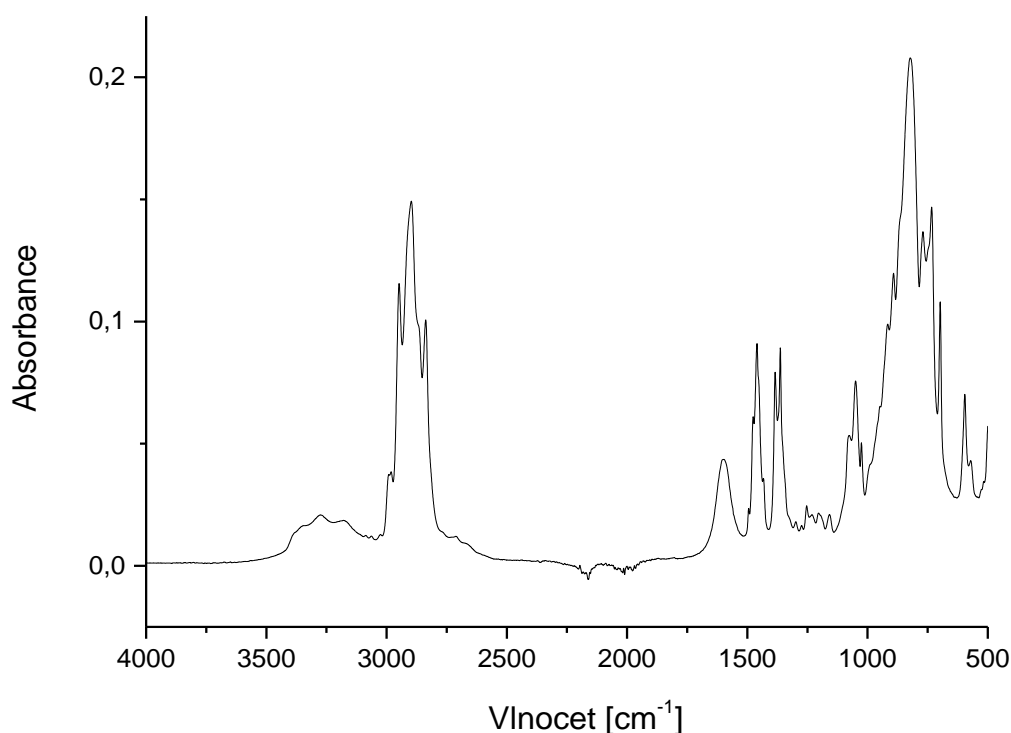
Infračervená spektroskopie byla použita pro analýzu laminačních materiálů používaných ve firmě FESTKA, tedy laminační pryskyřice LG 700 a tvrdidla HG 286 a HG 700. Výsledná spektra vidíme na obrázcích 49-51.



Obrázek 49: FTIR spektrum pryskyřice LG 700



Obrázek 50: FTIR spektrum tvrdidla HG 286



Obrázek 51: FTIR spektrum tvrdidla HG 700

Spektrum pryskyřice LG 700 (obrázek 49) odpovídá předpokládanému infračervenému spektru epoxidové pryskyřice na bázi bisfenolu A. Ze spektra na obrázku 50 lze usuzovat, že složení tvrdidla HG 286 je směsí blíže neurčených cykloalifatických aminů. Spektrum tvrdidla HG 700 (obrázek 51) bylo po porovnání se záznamy v knihovně infračervených spekter určeno jako spektrum látky isoforondiamin.

3.1.2 Zkoušky zkušebních těles T tvaru

3.1.2.1 Zkouška tahem

Měření bylo provedeno pro všechny sady zkušebních těles laminovaných spojů. Při měření byla určena mez pevnosti v tahu [MPa], maximální zatížení při přetržení [N] a prodloužení [mm, %]. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 25.

Tabulka 25: Výsledky měření tahem pro jednotlivé typy zkušebních těles

	laminace používána pro rám FESTKA ONE
mez pevnosti v tahu [MPa]	95,03 ± 9,21
zatížení při přetržení [N]	36601,20 ± 3834,34
prodloužení při přetržení [mm]	2,67 ± 0,34
tažnost [%]	2,97 ± 0,38

	laminace ONE bez vloženého vlákna při lepení na tupo
mez pevnosti v tahu [MPa]	100,11 ± 4,87
zatížení při přetržení [N]	36373,80 ± 2795,72
prodloužení při přetržení [mm]	2,66 ± 0,27
tažnost [%]	2,96 ± 0,30

	laminace ONE bez lepidla Spabond při lepení na tupo
mez pevnosti v tahu [MPa]	91,56 ± 3,30
zatížení při přetržení [N]	33828,40 ± 1243,10
prodloužení při přetržení [mm]	2,66 ± 0,10
tažnost [%]	2,96 ± 0,11

	laminace ONE za použití pryskyřice CHS Epoxy 501 a tvrdidla Telalit 0420
mez pevnosti v tahu [MPa]	77,42 ± 8,75
zatížení při přetržení [N]	32708,40 ± 1725,17
prodloužení při přetržení [mm]	2,41 ± 0,17
tažnost [%]	2,68 ± 0,19

	laminace ONE za použití pryskyřice CHS Epoxy 501 a tvrdidla Telalit 0590
mez pevnosti v tahu [MPa]	82,51 ± 2,35
zatížení při přetržení [N]	34992,80 ± 959,13
prodloužení při přetržení [mm]	2,74 ± 0,08
tažnost [%]	3,04 ± 0,09

	laminace ONE za použití pryskyřice CHS Epoxy 520 a tvrdidla Telalit 0420
mez pevnosti v tahu [MPa]	78,59 ± 4,41
zatížení při přetržení [N]	29385,20 ± 1830,11
prodloužení při přetržení [mm]	2,20 ± 0,15
tažnost [%]	2,44 ± 0,17

	laminace ONE za použití pryskyřice CHS Epoxy 520 a tvrdidla Telalit 0590
mez pevnosti v tahu [MPa]	89,91 ± 3,69
zatížení při přetržení [N]	33405,00 ± 2344,59
prodloužení při přetržení [mm]	2,66 ± 0,27
tažnost [%]	2,96 ± 0,30

	laminace používána pro rám FESTKA Scalatore
mez pevnosti v tahu [MPa]	100,95 ± 5,78
zatížení při přetržení [N]	41186,50 ± 1369,55
prodloužení při přetržení [mm]	3,02 ± 0,17
tažnost [%]	3,35 ± 0,19

Z hodnot v tabulce 25 můžeme vyvodit několik zajímavých závěrů. Důležitá sada zkušebních těles pro toto měření byla ta, která reprezentuje podobu laminace, která je nyní běžně používána pro spoje typu FESTKA One. Z tohoto důvodu bylo vyrobeno dvojnásobné množství zkušebních těles než sad ostatních. Výsledky měření jiných sad zkušebních těles jsou porovnávány s výsledky této základní sady FESTKA One. Ostatní sady měly za úkol dokázat, jaký podíl na celkové pevnosti mají složky, jakými jsou vložené svazky uhlíkových vláken nebo lepidlo Spabond. Laminační systémy využívající pryskyřice CHS Epoxy a tvrdidla Telalit 0420 a 0590 byly navrženy jako možné alternativy jiného výrobce, a proto i vlákenná skladba laminace byla stejná.

Prvním je fakt, že vzorky bez vložených vláken do lepeného spoje na tupo vykázaly mez pevnosti vyšší o 5,07 % oproti běžné laminaci typu FESTKA One. Vložený svazek vláken tedy pevnost snižují.

Další zajímavý výsledek je zjištění, že u zkušebních těles bez lepidla Spabond pro slepení na tupo byla naměřena mez pevnosti nižší o 3,65 % a pro přetržení spojů bylo potřeba menší zatížení o 7,58 %.

V případě laminace za použití laminačního systému CHS Epoxy 501 s tvrdidlem Telalit 0420 byla naměřena mez pevnosti nižší o 13,17 % nežli v případě použití epoxidového systému, který se běžně používá pro výrobu spojů typu FESTKA One. Pro přetržení bylo potřeba zatížení menší o 10,6 %.

V případě použití stejné pryskyřice, tedy CHS Epoxy 501 a tvrdidla Telalit 0590 byla zjištěna mez pevnosti nižší o 13,18 % a maximální zatížení bylo nižší o 4,41 %. Z toho plyne, že při použití stejné pryskyřice a jiného tvrdidla bylo dosaženo srovnatelné pevnosti spoje.

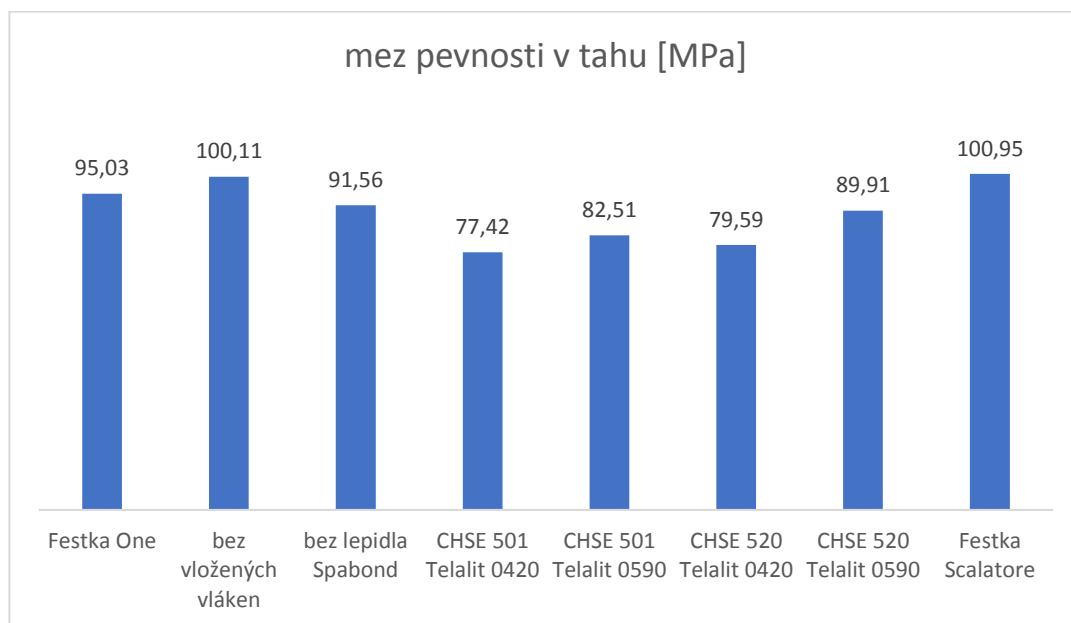
Při použití pryskyřice CHS Epoxy 520 a tvrdidla Telalit 0420 bylo dosaženo pevnosti o 17,3 % nižší nežli v případě klasické laminace FESTKA One se systémem LG 700 + HG 700. Maximální zatížení při přetržení je nižší o 19,72 %.

Pryskyřice CHS Epoxy 520 byla použita pro laminaci i v kombinaci s tvrdidlem Telalit 0590 a v tomto případě bylo dosaženo meze pevnosti nižší o 5,39 % a napětí při přetržení má hodnotu nižší o 6 %.

Když porovnáme výsledky všech 4 systémů kombinující různé pryskyřice CHS Epoxy a tvrdidla Telalit, zjistíme, že systémy používající tvrdidlo Telalit 0420 vykazují výraznější snížení pevnosti v tahu, nežli v případě použití tvrdidla Telalit 0590. Nicméně systém využívající pryskyřice LG 700 a tvrdidlo HG 700 vykazuje stále nejvyšší pevnost v tahu v porovnání s jinými testovanými epoxidovými systémy.

Zkušební tělesa s jinou vlákenou skladbou, která je využívána pro laminaci typu FESTKA Scalatore vykazuje zvýšení meze pevnosti v tahu o 6,23 % oproti laminaci FESTKA One. Napětí potřebné k přetržení je v případě FESTKA Scalatore skladby vyšší o 12,53 %. Vzhledem k použití většího množství výztužných vláken bylo navýšení předpokladatelné. Porovnání všech hodnot mezi pevnosti je graficky znázorněno na obrázku 52.

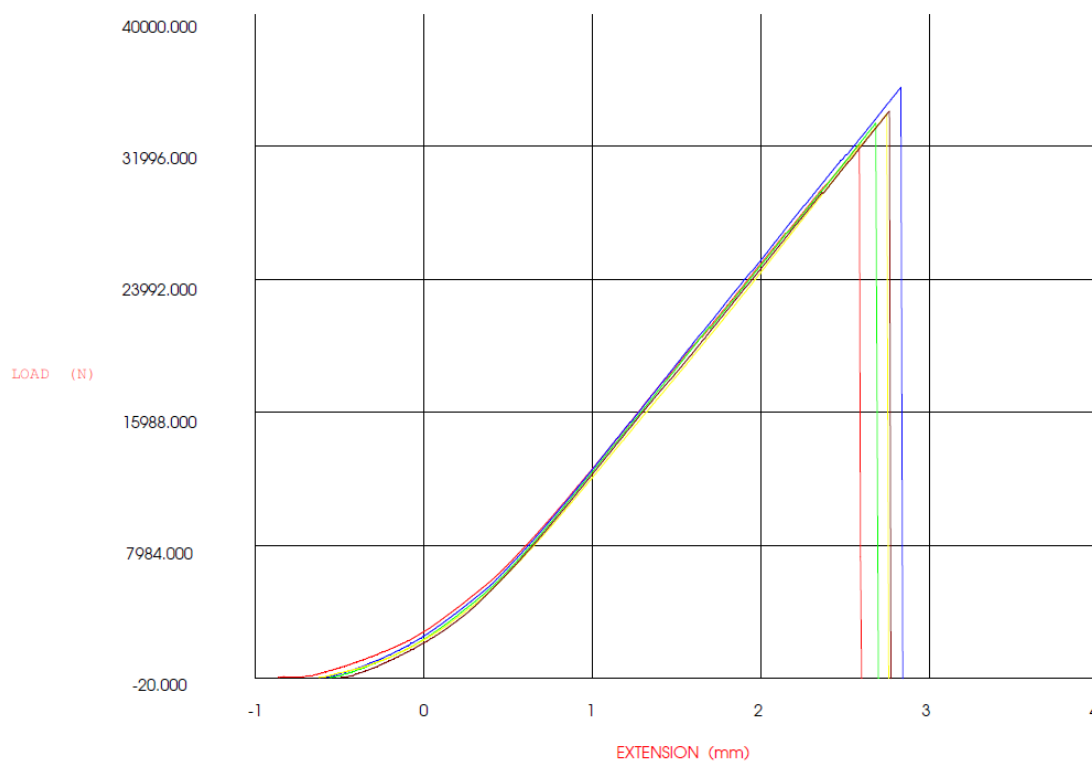
Tažnost byla zjištěna u všech zkušebních těles srovnatelná.



Obrázek 52: Porovnání hodnot meze pevnosti v tahu jednotlivých typů zkušebních těles

Dalším úkolem této zkoušky bylo dokázat, zda během zatěžování zkušebních těles tahem nedochází k postupné delaminaci jednotlivých vrstev laminátu. V grafu (obrázek 53) můžeme jasně vidět strmě stoupající křivku bez poklesů, což vypovídá o tom, že v kompozitním materiálu funguje naprostá soudržnost všech vrstev až

do přetržení, které proběhlo u všech vrstev v jeden okamžik. K postupné delaminaci vrstev tedy nedošlo. Průběh byl stejný pro všechny typy zkušebních těles.



Obrázek 53: Průběh závislosti prodloužení na zatížení u zkušebních těles bez použitého lepidla Spabond k lepení na tupo jako ukázka typického průběhu zkoušky

3.1.2.2 Zkouška tahovým lomem

Měření tahovým lomem bylo provedeno pro všechny sady zkušebních těles laminovaných spojů. Při měření byla určena mez pevnosti v ulomení [MPa], maximální zatížení [N] a prodloužení [mm] při vylomení a tažnost [%].

Tabulka 26: Výsledky měření tahovým lomem pro jednotlivé typy zkušebních těles

	současná podoba laminace používána pro rám FESTKA ONE
mez pevnosti tahovým lomem [MPa]	12,52 ± 1,01
zatížení při přetržení [N]	4654,49 ± 354,20
prodloužení při přetržení [mm]	4,04 ± 0,50
tažnost [%]	4,50 ± 0,57

	laminace ONE bez vloženého vlákna při lepení na tupo
mez pevnosti tahovým lomem [MPa]	14,37 ± 2,01
zatížení při přetržení [N]	5753,24 ± 218,01
prodloužení při přetržení [mm]	4,72 ± 0,10
tažnost [%]	5,24 ± 0,10

	laminace ONE bez lepidla Spabond při lepení na tupo
mez pevnosti tahovým lomem [MPa]	12,14 ± 0,99
zatížení při přetržení [N]	4804,48 ± 314,00
prodloužení při přetržení [mm]	4,95 ± 0,99
tažnost [%]	5,50 ± 1,10

	laminace ONE za použití pryskyřice CHS Epoxy 501 a tvrdidla Telalit 0420
mez pevnosti tahovým lomem [MPa]	12,58 ± 1,60
zatížení při přetržení [N]	5180,36 ± 653,40
prodloužení při přetržení [mm]	5,15 ± 1,48
tažnost [%]	5,72 ± 1,64

	laminace ONE za použití pryskyřice CHS Epoxy 501 a tvrdidla Telalit 0590
mez pevnosti tahovým lomem [MPa]	12,48 ± 1,22
zatížení při přetržení [N]	5322,20 ± 527
prodloužení při přetržení [mm]	4,49 ± 0,55
tažnost [%]	4,99 ± 0,60

	laminace ONE za použití pryskyřice CHS Epoxy 520 a tvrdidla Telalit 0420
mez pevnosti tahovým lomem [MPa]	14,70 ± 0,88
zatížení při přetržení [N]	5706,84 ± 258,33
prodloužení při přetržení [mm]	4,80 ± 0,30
tažnost [%]	5,35 ± 0,33

	laminace ONE za použití pryskyřice CHS Epoxy 520 a tvrdidla Telalit 0590
mez pevnosti tahovým lomem [MPa]	14,75 ± 0,49
zatížení při přetržení [N]	5519,84 ± 293,90
prodloužení při přetržení [mm]	4,48 ± 0,18
tažnost [%]	4,97 ± 0,20

	laminace používána pro rám FESTKA Scalatore
mez pevnosti tahovým lomem [MPa]	13,40 ± 2,20
zatížení při přetržení [N]	5624,84 ± 806,8
prodloužení při přetržení [mm]	5,04 ± 1,18
tažnost [%]	5,60 ± 1,31

V tabulce 26 jsou uvedeny výsledky měření tahovým lomem všech zkušebních těles. Jako hlavní typ pro měření byla sada zkušebních těles se standardní laminací typu FESTKA One a proto bylo připraveno dvojnásobné množství těles než pro ostatní typy.

Prvním zajímavým zjištěním z těchto hodnot je, že zkušební tělesa bez vloženého svazku vláken do lepení na tupo vykázala o 14,7 % vyšší mez pevnosti v tahu a pro jejich zlomení bylo potřeba v průměru o 23,6 % vyšší napětí nežli u klasické laminace typu FESTKA One.

V případě úplného vynechání lepidla Spabond pro lepení trubek na tupo byla naměřena mez pevnosti o 3 % nižší a pro jejich destrukci bylo potřeba o 1,3 % nižší napětí než v případě použití tohoto lepidla. S ohledem na předchozí zkoušku tahem můžeme proto tvrdit, že při zatěžování zkušebních těles má lepidlo Spabond na celkovou pevnost vcelku zanedbatelný vliv.

Zkušební tělesa, u kterých byl pro laminaci použit epoxidový systém CHS Epoxy 501 a Telalit 0420 prokázala v průměru 0,48 % vyšší pevnost. Proto můžeme tvrdit, že tento laminační systém je v tomto směru zátěže výkonem srovnatelný se systémem LG 700 s HG 700.

Při použití stejné pryskyřice CHS Epoxy 501 s tvrdidlem Telalit 0590 byla naměřená mez pevnosti nižší o 0,32 %, a proto lze tvrdit, že pevnostní výkon tohoto spoje v tomto směru namáhání je přibližně stejný jako v případě použití systému pro laminaci FESTKA One.

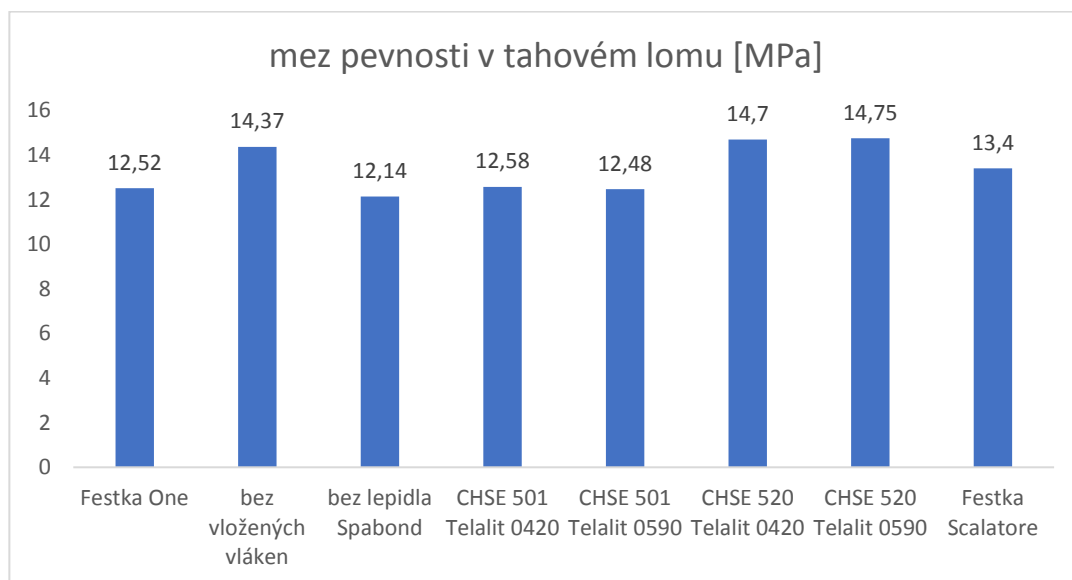
U systému CHS Epoxy 520 a Telalit 0420 byla mez pevnosti naměřena o 17,4 % vyšší a bylo potřeba o 22,6 % vyšší napětí pro zlomení spoje nežli v první sadě vzorků.

Při použití stejné pryskyřice CHS Epoxy 520 a tvrdidla Telalit 0590 bylo zjištěno, že mez pevnosti je o 17,8 % vyšší a je to tedy v tomto ohledu nejvýkonnější z porovnávaných vzorků. Pro přetržení bylo ale potřeba vložit napětí větší o 14,9 %.

Z toho jasně vyplývá, že epoxidová pryskyřice CHS Epoxy 520 vykazuje v tomto směru měření vyšší pevnost při kombinaci s oběma zkoušenými tvrdidly, nežli standardní laminační systém LG 700 + HG 700.

Zkušební tělesa se zesílenou skladbou vlákně výztuže FESTKA Scalatore vykázala zvýšení hodnoty meze pevnosti o 7 % a pro jejich zlomení bylo potřeba o 17,08 % vyšší napětí.

Tažnost byla u všech zkušebních těles zjištěna velmi podobná. Porovnání všech hodnot mezí pevnosti je graficky znázorněno na obrázku 54.



Obrázek 54: Porovnání hodnot meze pevnosti tahovým lomem jednotlivých typů zkušebních těles

3.1.2.3 Stanovení obsahu popela

Jako zdroj vzorků pro stanovení popela byly použity části laminátu ze zkušebních těles tvaru T po jejich destrukci tahovou zkouškou. Takové vzorky nejlépe simulují skutečnou laminaci používanou pro výrobu laminovaných spojů v rámech jízdních kol. Díky tomu si můžeme udělat vcelku přesnou představu toho, jak je velký podíl výztuže a matrice ve skutečném laminátovém materiálu.

V tabulce 27 můžeme vidět výsledky stanovení popela pro jednotlivé kompozitní materiály. Za povšimnutí stojí, že nejnižší podíl nespalitelných složek se nacházel u vzorků základní laminace FESTKA One, která je běžně používána. Naopak nejvyšší podíl nasycení byl naměřen pro laminátové materiály s pryskyřicí CHS Epoxy 501. To bylo očekávatelné, protože díky velmi nízké viskozitě laminačního epoxidového systému bylo možné důkladně prosytit tkaninu a následně měla přebytečná pryskyřice

tendenci svévolně vytékat. Obecně jsou tyto hmotnostní poměry nespalitelné složky relativně nízké. Důvodem je nízká hustota vláknenné výztuže, tudíž hmotnostně procentuální zastoupení je velmi rozdílné od objemového a s nejvyšší pravděpodobností na tom svůj podíl nese i technologie ruční laminace.

Tabulka 27: Stanovené obsahy popela pro jednotlivé vzorky

	zastoupení popela v hm. % (výztuž)	zastoupení vyžíhané části v hm. % (matrice)
Laminace Festka One (LH 700 + HG 700)	12,65	87,35
Laminace Festka Scalatore (LH 700 + HG 700)	27,31	72,69
Laminace Festka One (CHSE 501 + Telalit 0420)	29,12	70,88
Laminace Festka One (CHSE 501 + Telalit 0590)	29,68	70,32
Laminace Festka One (CHSE 520 + Telalit 0420)	27,45	72,55
Laminace Festka One (CHSE 520 + Telalit 0590)	26,27	73,73
Bílá hmota	21,56	78,44
sklolaminátová trubka	79,95	20,05

Velké rozdíly ve zjištěných hodnotách obsahu popela může být dána různým místem odběru vzorku, protože technologie ruční laminace se většinou projevuje nerovnoměrným poměrem prosycení výztuže laminátu pryskyřicí. U sklovláknenné trubky je hodnota vysoká díky tomu, že byla použita skleněná vlákna s vyšší měrnou hustotou a také protože trubky jsou vyráběny strojně: počítačem řízeným zařízením s prosycovací lázní vospělé konstrukce.

4 Závěr

Byla provedena charakterizace epoxidových systémů použitých pro laminaci. Z matricových materiálů byly připraveny desky a z nich dále vyrobena zkušební tělíska pro další zkoušky.

Byla navržena podoba zkušebních těles laminovaných spojů kompozitních trubek ve tvaru písmene T. Pro měření pevnosti v tahu a tahovém lomu těchto zkušebních těles byl navržen, vyvinut a vyroben vlastní upínací přípravek pro upnutí zkušebních těles do 2 různě výkonných trhacích strojů.

Byly připraveny různé typy laminovaných spojů kompozitních trubek do tvaru písmene T lišící se použitými materiály či způsobem laminace.

Měření pevnosti v tahu dokázalo že nejvyšších výkonů dosahoval systém pryskyřice CHS Epoxy 520 s tvrdidlem Telalit 0590, které byla zároveň naměřena nejvyšší hodnota rázové houževnatosti Charpy. Nejvyšší mez pevnosti v ohybu byla naměřena u pryskyřice LG 700 s tvrdidlem HG 286, která se v současné době používá ve výrobě firmy FESTKA pro přípravu tzv. bílé hmoty.

Měřením pevnosti v tahu zkušebních těles laminovaných spojů kompozitních trubek bylo dokázáno, že nejvyšší pevnosti dosahuje laminační systém, který je v současné době používán firmou FESTKA, tedy systém pryskyřice LG 700 s tvrdidlem HG 700.

Zkouška zkušebních těles spojů tahem i tahovým lomem dokázala, že vložení vláknů do lepení na tupo nemá naprosto žádný přínos. Už v průběhu zpracování diplomové práce byl tento technologický krok z přípravy laminovaných spojů cyklistických rámu ve výrobě firmy FESTKA úplně vynechán.

Zkouškou tahem i tahovým ohybem bylo taktéž dokázáno, že podíl lepidla Spabond na celkové pevnosti je naprosto zanedbatelný. Při výrobě cyklistických rámu je tedy teoreticky možné použít jakékoliv jiné konstrukční lepidlo, mělo-li by kupříkladu kratší čas vytvrzování.

Při zkoušce tahovým lomem bylo prokázáno, že nejvyšších hodnot pevnosti bylo dosaženo u těles laminovaných pryskyřicí CHS Epoxy 520 (a to jak s tvrdidlem Telalit 0420, tak i s Telalit 0590) a to dokonce o 17,4 %, resp. 17,8 % více jak u systému LG 700 + HG 700.

Předmětem dalšího výzkumu by mohla být snaha zaměřit se na další vlivy ovlivňující pevnost spojů, a to především jiné pracovní postupy a výrobní technologie. Výrobní postup ruční laminací nese vysokou pravděpodobnost vzniku defektů uvnitř laminace nebo špatného prosycení vlákenné výztuže pryskyřicí. Svůj podíl na pevnosti určitě nese i fakt, že laminátový materiál spoje není vytvrzován ve vakuu, a proto je vysoká pravděpodobnost existence vzduchových bublinek uvnitř materiálu, které snižují celkový pevnostní výkon.

V budoucnu by bylo vhodné dále využívat metodu upínacího přípravku pro měření tahem a tahovým lomem zkušebních těles spojů trubek do tvaru písmene T. Existuje řada dalších a někdy revolučních technologií pro pojení kompozitních trubek, které jen čekají na otestování.

5 Seznam použité literatury:

1. World's Lightest Bike | Cycle EXIF. Cycle EXIF | Custom and classic bicycles [online]. Copyright © 2008 [cit. 15.03.2018]. Dostupné z: <http://www.cycleexif.com/worlds-lightest-bike>
2. FESTKA.com. *Festka* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: www.festka.com
3. BASTION-Cycles.com. *Bastion* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: www.bastion-cycles.com
4. MÍŠEK, Bohumil. *Kompozity*. Brno: Technický dozorčí spolek - Sekce materiálů a svařování, 2003. ISBN 80-903386-0-7.
5. ŠŇUPÁREK, Jaromír. *Makromolekulární chemie: úvod do chemie a technologie polymerů*. Vyd. 3., dopl. a upr. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2014. ISBN 978-80-7395-761-2.
6. DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
7. NURUL FAZITA, M.R., Krishnan JAYARAMAN, Debes BHATTACHARYYA, M.K. MOHAMAD HAAFIZ, Chaturbhuj SAURABH, M. HUSSIN a Abdul H.P.S. Green Composites Made of Bamboo Fabric and Poly (Lactic) Acid for Packaging Applications—A Review. *Materials*. 2016, 9(6), 435-. DOI: 10.3390/ma9060435. ISSN 1996-1944.
8. *Textreme: Technology: What is spread tow?* [online]. Boras [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://www.textreme.com/technology/what-is-spread-tow-technology/>
9. STOYKO, FAKIROV a Debes BHATTACHARYYA. *Handbook of engineering biopolymers: homopolymers, blends and composites*. Cincinnati, Ohio: Hanser, 2007. ISBN 1569904057.
10. *BooBoo Bikes: gallery* [online]. Ghana, 2018 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: www.boobobikes.com
11. EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
12. BAJPAI, Pratima. *Update on carbon fibre*. Shawbury, England: Smithers Rapra, 2013. ISBN 9781628700466.

13. BRALLA, John. *Handbook of manufacturing processes how products, components and materials are made*. New York: Industrial Press, 2007. ISBN 9781601199331.
14. KOŘÍNEK, Zdeněk. Kompozity – vlákna. <http://mujweb.cz/zkorinek/vlakna> [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/vlakna>
15. EDITED BY BUDDY D. RATNER ... [ET AL.]. *Biomaterials science: an introduction to materials in medicine*. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2013. ISBN 9780080877808.
16. KURTZ, Steven M. *UHMWPE biomaterials handbook: ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacement and medical devices*. Third edition. Boston: Elsevier/WA, William Andrew is an imprint of Elsevier, 2016. ISBN 978-0-323-35401-1.
17. Filament Bikes. In: Instagram [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://www.instagram.com/filamentbikes>
18. Diolen industrial fibers. *Swicofil.com* [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <http://www.swicofil.com/diolen.html>
19. RATNA, Debdatta. *Handbook of Thermoset Resins*. Smithers Rapra Technology, 2009. ISBN 978-1-84735-410-5.
20. MLEZIVA, Josef. *Polestery - jejich výroba a zpracování*. 2. přepr. vyd. Praha: SNTL, 1978.
21. MLEZIVA, Josef, ŠŇUPÁREK, Jaromír. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7.
22. WILEY, John. *Ullmann's Polymers and Plastics - Products and Processes*, 4 Volume Set - 58.21.1.2 Epoxy Vinyl Ester Composites. John Wiley & Sons, 2016. ISBN 978-1-5231-1122-0
23. GOODSHIP, Vanessa. *Design and manufacture of plastic components for multifunctionality: structural composites, injection molding, and 3D printing*. Boston, MA: Elsevier, 2015. ISBN 978-0-323-34061-8.
24. MURALISRINIVASAN, Natamai Subramanian. *Polymer blends and composites: chemistry and technology*. Beverly, Massachusetts: Scrivener Publishing, 2017. ISBN 978-1-118-11889-4

25. WOLFF-FABRIS, Felipe. *Electron beam curing of composites*. Cincinnati: Hanser Publications, 2011. ISBN 978-1-56990-473-2.
26. DANIEL, B., *ASM handbook*. 10th editon. Materials Park, Ohio: ASM International, 2016. ISBN 978-0-87170-703-1.
27. BULLEN, George N. *Successful Composites Technology Transfer: Applying NASA Innovations to Industry*. Dearborn -USA: Society of Manufacturing Engineers (SME), 2015. ISBN 978-0-87263-880-8.
28. KULSHRESHTHA, A.B. a C. VASILE. *Handbook of Polymer Blends and Composites: Volumes 1-4*. Smithers Rapra Technology, 2002. ISBN 978-1-85957-309-6.
29. *JUST RIDE the BIKE: Honest John's insider's guide to the bike industry #1: carbon frame moulds* [online]. 2017 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://www.justridethebike.com/single-post/2017/01/23/Honest-Johns-insiders-guide-to-the-bike-industry-1-carbon-frame-moulds>
30. *NUPLEX: Pultrusion* [online]. 2017 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://www.nuplex.com/composites/processes/pultrusion>
31. PETERS, S. T. *Composite filament winding*. Materials Park: ASM International, 2011. ISBN 978-1-61503-722-3.
32. Festka. In: *Facebook* [online]. [cit. 2018-05-1]. Dostupné z: www.facebook.com/pg/festka/photos/