

Smykové vlastnosti kompozitů dle ASTM 4255

Jakub Bělohlávek

Bakalářská práce
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub Bělohlávek**
Osobní číslo: **T16052**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Smykové vlastnosti kompozitů dle ASTM D 4255**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracování literární rešerše v dané oblasti**
- 2. Návrh konstrukčního řešení**
- 3. Zhotovení výkresové dokumentace**

Rozsah bakalářské práce: **cca 60 stran**
Rozsah příloh:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **Mallick, P. K. Composites Engineering Handbook, CRC Press, 1997, ISBN 0824793048**
2. **EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Milan Žaludek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství
Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2019**

Ve Zlíně dne 19. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 23. 5. 2019

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá kompozitními materiály a zkoušením jejich mechanických vlastností. Teoretická část se týká popisu kompozitních materiálů a různých podob jejich výztuží i matric. Také jsou zde nastíněny možné technologie výroby kompozitních dílů a problematika netradičního mechanického chování kompozitů při zatížení. V praktické části je řešen konstrukční návrh přípravků pro měření smykových vlastností kompozitů podle normy ASTM D 4255.

Klíčová slova: kompozitní materiál, smykové vlastnosti, přípravek

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with composite materials and testing of their mechanical properties. The theoretical part is focused on the description of composite materials and various forms of their reinforcements and matrices. There are also outlined possible technologies of composite parts production and problems of non-traditional mechanical behavior of composites under load. In the practical part is solved the design of measuring jigs for shear properties of composites measurement according to the standard ASTM D 4255.

Keywords: composite material, shear properties, measuring jig

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Milanovi Žaludkovi, PhD za cenné rady a odborné připomínky při zpracování této bakalářské práce. V neposlední řadě bych chtěl také velmi poděkovat mé rodině za materiální a duševní podporu po celou dobu mého studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	12
1.1 POŽADAVKY NA KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	13
1.2 VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	14
1.2.1 Spojení matrice – výztuž	14
1.2.2 Synergismus	15
1.2.3 Vlastnosti spojené s orientací výztuže	15
2 MATRICE	17
2.1 POLYESTEROVÉ PRYSKYŘICE	17
2.2 VINYLESTEROVÉ PRYSKYŘICE	17
2.3 FENOLICKÉ PRYSKYŘICE	18
2.4 EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE	18
2.5 TERMOPLASTICKÉ MATRICE	18
3 VÝZTUŽ	19
3.1 ČÁSTICOVÉ KOMPOZITY	20
3.2 VLÁKNOVÉ KOMPOZITY	20
3.2.1 Struktura vláknových výztuží	20
3.3 MATERIÁLY VÝZTUŽE VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ.....	22
3.3.1 Skelná vlákna	23
3.3.2 Uhlíková vlákna	24
3.3.3 Aramidová vlákna	25
3.3.4 Další materiály vláken.....	26
4 TECHNOLOGIE VÝROBY VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ	28
4.1 RUČNÍ KLADENÍ.....	28
4.1.1 Metoda mokré laminace	29
4.1.2 Ruční laminace s následným dotlakem	29
4.2 METODA VAKUOVÉ INFUZE (VAKUOVÉ PROSYCOVÁNÍ).....	29
4.3 STRÍKÁNÍ.....	30
4.4 NAVÍJENÍ.....	31
4.5 PULTRUZE	31
4.6 RTM	32
4.6.1 Vysokotlaké RTM	32
4.6.2 Lehké RTM (light RTM)	32

4.7	LISOVÁNÍ PREPREGŮ	33
4.8	SENDVIČOVÉ STRUKTURY	33
4.9	DEFEKTY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	34
5	MECHANICKÉ ZKOUŠKY KOMPOZITŮ	35
5.1	ZKOUŠKA TAHEM	36
5.2	ZKOUŠKA OHYBEM.....	37
5.2.1	Statická zkouška ohybem.....	38
5.2.2	Dynamická zkouška ohybem	38
5.3	ZKOUŠKY SMYKEM.....	39
5.3.1	Zkouška smykem dle ASTM D 5379 (Iosipescu shear test).....	40
5.3.2	Zkouška smykem dle ASTM D 7078 (V-notched rail shear test).....	41
5.3.3	Zkouška smykem dle ASTM D 4255 (Rail shear method).....	41
5.4	ZKOUŠKY INTERLAMINÁRNÍ SMYKOVÉ PEVNOSTI	43
5.5	DLOUHODOBÉ STATICKÉ ZKOUŠKY	44
II	PRAKTICKÁ ČÁST	45
6	NORMA ASTM D 4255	46
6.1	TERMINOLOGIE	46
6.2	PRŮBĚH A VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY.....	47
6.2.1	Ohyb zkušebního tělesa.....	47
6.2.2	Smykové napětí.....	47
6.2.3	Poměrná smyková deformace	48
6.2.4	Modul pružnosti ve smyku.....	48
7	ZKUŠEBNÍ STROJE PRO ZKOUŠKU ASTM D 4255.....	49
7.1	ZKUŠEBNÍ STROJ SHIMADZU AG-IC.....	49
7.2	ZKUŠEBNÍ STROJ ZWICK 1456	49
7.3	UPNUTÍ PŘÍPRAVKŮ NA ZKUŠEBNÍCH STROJÍCH	50
8	KONSTRUKČNÍ NÁVRH PŘÍPRAVKŮ	51
8.1	PŘÍPRAVEK PRO METODU A.....	51
8.1.1	Technologický postup výroby – Konzola 1, Konzola 2.....	52
8.1.2	Technologický postup výroby – Nosná deska	53
8.1.3	Technologický postup výroby – Čep	54
8.1.4	Technologický postup výroby – Upínač	55
8.1.5	Normalizované součásti	56
8.1.6	Pevnostní výpočet	57
8.2	PŘÍPRAVEK PRO METODU B.....	58
8.2.1	Technologický postup výroby – Podstava	59
8.2.2	Technologický postup výroby – Střední konzola opěrná.....	60
8.2.3	Technologický postup výroby – Střední konzola nosná	61
8.2.4	Technologický postup výroby – Konzola krajní.....	62
8.2.5	Technologický postup výroby – Vedení	63
8.2.6	Technologický postup výroby – Upínka	65
8.2.7	Technologický postup výroby – Příložka	66

8.2.8 Normalizované součásti	66
ZÁVĚR	67
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	68
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	71
SEZNAM OBRÁZKŮ	74
SEZNAM TABULEK.....	76
SEZNAM PŘÍLOH.....	77

ÚVOD

Za kompozity obecně označujeme materiály, které jsou tvořeny alespoň ze dvou různých složek. Nemluvíme však o kombinaci složek na úrovni atomů a molekul. Nejde tedy například o slitiny, ale spíše takto popisujeme rozptýlení, ať už orientované, či neorientované, částic jednoho materiálu – výztuhy, v materiálu jiném – matici. Výztuhou rozumíme vlákna, nebo jakékoli jiné částice, jejichž mechanické vlastnosti, jsou právě vlastnosti, které požadujeme od výsledného kompozitu. Výztužný materiál tedy tvoří „kostru“ kompozitu, která je pojena do celku maticí.

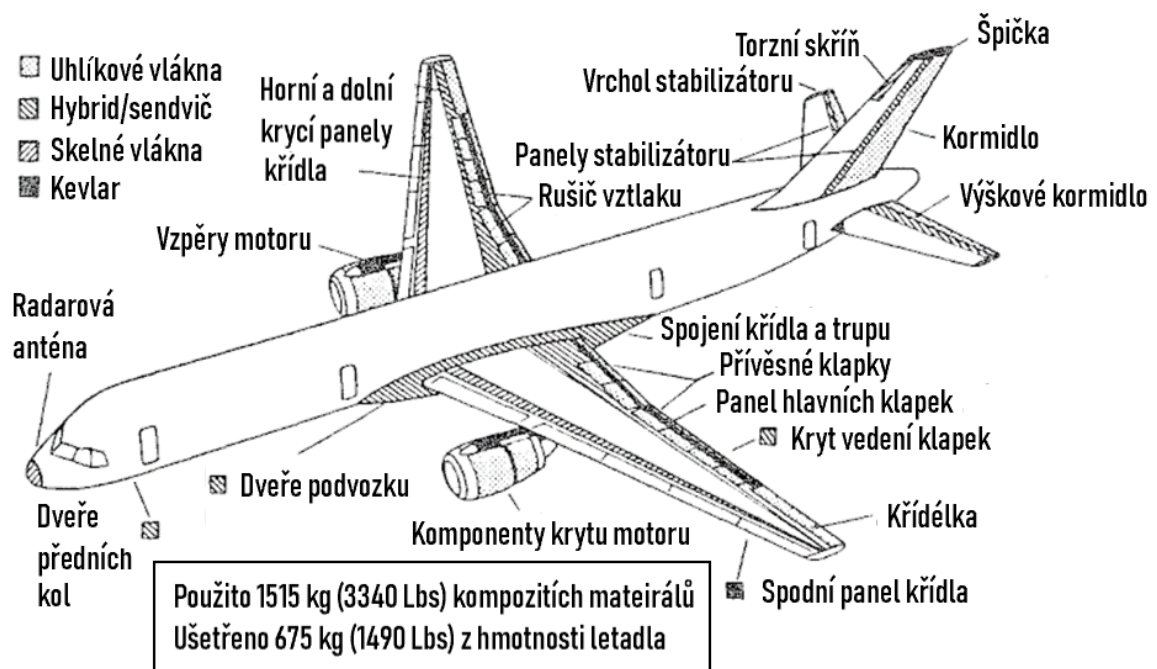
Pro kompozity využíváme takové výztuže a pojiva, jejichž kombinace zajistí, že se jejich vlastnosti nejen sečtou, ale razantně zvýší. Tento jev nazýváme synergismus. Člověk synergický účinek nevymyslel, ale objevil jej v přírodě. Například struktura bambusového stonku je velmi podobná struktuře epoxidového laminátu. Dalším prvkem, který výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti kompozitních materiálů je hmotnostní zastoupení jednotlivých složek a významnou roli také hraje jejich vzájemná adheze. V neposlední řadě je odrazem mechanických vlastností také orientovanost, druh a tvar výztuže.

Mechanické vlastnosti výsledného kompozitu jsou pak zjišťovány pomocí různých zkušebních metod. Jedná se jak o obvyklé mechanické zkoušky prováděné u běžných materiálů, tak také o specializované zkoušky, navržené právě pro odlišné chování a strukturu kompozitních materiálů oproti materiálům konvenčním. Tyto zkoušky jsou prováděny na běžných zkušebních strojích (většinou trhacích), kdy je zkoumané namáhání, například smykové napětí v rovině nebo smykové napětí mezi jednotlivými vrstvami, přenášeno do zkoušeného vzorku pomocí zkušebních přípravků.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiály mají dnes důležitou a často i nedocenitelnou roli v letectví, kosmonautice, vojenských aplikacích, domácnosti, stavebnictví, dopravním průmyslu či elektrotechnice. Mezi jejich jasné výhody patří mechanické vlastnosti srovnatelné (nebo alespoň dostačující v dané aplikaci) s kovy, ekonomická stránka, nenáročnost výroby kompozitních dílů a jejich trvanlivost. Dnes už můžeme mezi výhody řadit možnost recyklace, která je ale u reaktopastických výrobků stále relativně náročná. [1]



Obrázek 1: Využití kompozitních materiálů v leteckém průmyslu. [8]

Na obrázku 1 je znázorněno použití kompozitních materiálů v letadlech. Kompozity se vyznačují velmi dobrými pevnostními charakteristikami při současné nízké hmotnosti. Toho je využito například právě při stavbě křídel, trupu i ocasních částí letadel. Velké množství kompozitních materiálů je ale použito i v interiérech všech dopravních prostředků, ať už to jsou právě letadla, automobily, autobusy či vlaky. Ušetřená hmotnost se pak může nahradit větší hmotností pasažérů nebo převáženého materiálu anebo vede ke snížení spotřeby paliva. Kompozity použité na znázorněném obrázku výše jsou vesměs struktury složené z polymerních matic a vláken skelných, aramidových nebo uhlíkových. Často používané jsou také hybridní sendvičové kompozitní materiály. [8]

Příklady kompozitních struktur nalezneme i v přírodě. Krom v úvodu zmíněného bambusu, také například mikroskopická struktura dřeva nebo vápencové schránky mořských měkkýšů

připomínají moderní kompozitní materiály. Účelem kompozitu je jednoduše řečeno kombinování různých vlastností různých materiálů k dosažení nějakého celkového materiálu s požadovanými vlastnostmi. V historii člověk například vyráběl stavební bloky, které byly tvořeny slámou a hlinou nebo například damascéskou ocel, která se skládá z vrstev středně a vysokouhlikové oceli, čímž vzniká optimální kombinace tvrdosti a houževnatosti. [2]

Kompozity jsou tvořeny matricí a výztuží, mohou být však i více než dvousložkové. Matrice je spojitou částí vzniklého celku, která udává konečný tvar výrobku. Výztuž pak nese požadované mechanické vlastnosti. Kompozitní materiál je zpravidla vytvářen míšením jednotlivých složek. Složky se ale v sobě vzájemně nerozpouští ani neslučují a je mezi nimi identifikovatelné rozhraní. Pro představu tedy nemluvíme například o slitinách kovů, ve kterých došlo k vyloučení různých fází. Když o kovů ale zůstaneme, o kompozitu můžeme mluvit, pokud je kov disperzně zpevněn částicemi oxidů – k tomuto totiž došlo mechanickým mícháním. Dalším příkladem z prostředí kovových materiálů může být hliník vyztužený borovými vlákny. [2]

1.1 Požadavky na kompozitní materiály

Kompozity vznikali a vznikají hlavně z důvodu získání materiálů, které mají lepší mechanické vlastnosti, jsou levnější, mají nižší měrnou hmotnost a jejich složky i technologie výroby jsou dostupnější. Požadavky u kompozitních materiálů a výrobků jsou kladeny hlavně na:

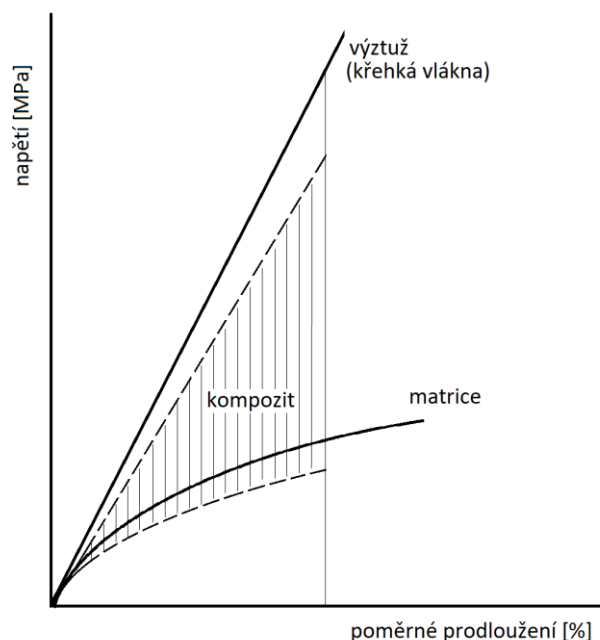
- tuhost
- pevnost
- rozměrová stabilita
- zvýšení houževnatosti (odstranění křehkosti)
- zvýšení teplotní stability a teplotního intervalu použitelnosti
- mechanické tlumení (tlumení vibrací a hluku)
- korozní a chemická odolnost
- redukce hmotnosti
- snížení ceny

1.2 Vlastnosti kompozitních materiálů

Na výsledných vlastnostech se podílí hlavně vlastnosti jednotlivých komponentních materiálů, dále vzájemná interakce mezi pojivem a výztuží, tvar a velikost výztuže a její orientace a také objemové zastoupení jednotlivých složek. Obecně lze o kompozitních materiálech tvořených polymerní maticí a vláknovou nebo částicovou výztuží říci, že mezi jejich podstatné výhody patří vysoká rozměrová stálost, korozní odolnost, nízká tepelná vodivost, rozmanitá škála vyrobitelných tvarů nebo téměř žádné požadavky na dlouhodobou odolnost. [6]

1.2.1 Spojení matrice – výztuž

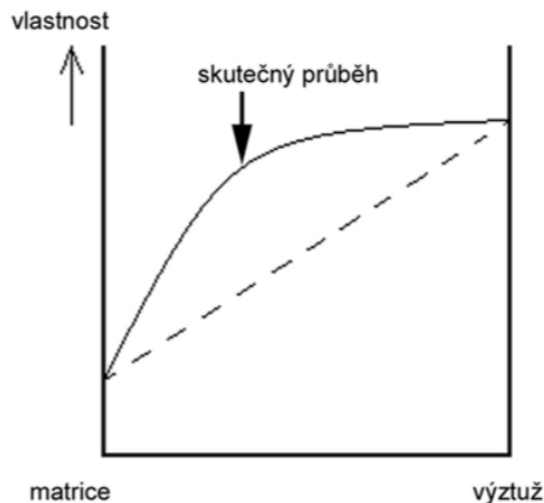
U polymerních maticí s vláknovou nebo částicovou výztuží je důležitou charakteristikou hlavně poměr matrice a výztuže, kdy u některých technologií je možné dosáhnout až více než 80 % zastoupení výztuže. Vlákna musí být dokonale smočená pojivem (maticí) a mezi těmito složkami musí být zabezpečena co nejlepší adheze, což je schopnost různých materiálů k sobě dokonale přilnout. Čím je výztuž méně nasycena pojivem, tím lepší jsou mechanické vlastnosti. Na druhou stranu ale nesmí být výztuž v žádném místě nasycena málo nebo vůbec. Na obrázku níže (obrázek 2) jsou schematicky znázorněny vlastnosti kompozitu (ve vyšrafované oblasti) v závislosti na objemovém zastoupení vláken a matrice. [1] [4] [5]



Obrázek 2: Vlastnosti vláknových kompozitů v závislosti na objemovém zastoupení vláken [5]

1.2.2 Synergismus

Spojením výztuže a pojiva nezískáme prostý součet vlastností jednotlivých složek (čárkovaná čára v obrázku 3), ale můžeme (a především chceme) dosáhnout vlastností lepších. Tento jev se nazývá synergismus.



Obrázek 3: Synergické chování složek kompozitu [17]

Synergický jev platí například pro ohybovou tuhost, nebo při kombinaci vysoké pevnosti výztuže s vysokou houževnatostí pružné polymerní matrice. Nemůžeme ho ale považovat za pravidlo, které by platilo pro každou vlastnost výsledného kompozitu.

Dobře představitelné je synergické chování také u materiálu brusných kotoučů, kde matici tvoří oxid hlinitý (korund) Al_2O_3 , který je vyztužen karbidem křemíku SiC . Samostatně jsou oba materiály velmi křehké, při jejich kombinaci však získává výsledný kompozit určitou houževnatost. [3] [17]

1.2.3 Vlastnosti spojené s orientací výztuže

Množství běžně používaných materiálů vykazuje izotropní vlastnosti. To znamená, že jejich mechanické vlastnosti (mez pevnosti, modul pružnosti, Poissonovo číslo...) jsou ve všech směrech stejné. Jako izotropní také označujeme materiály, jejichž vlastnosti jsou stejné ve směru tří základních na sebe kolmých os a jsou symetrické podle tří rovin, které jsou těmito osami tvořeny. [2] [7]

Pokud má materiál v každém směru vlastnosti zcela odlišné, mluvíme o materiálu anizotropním. Zvláštním případem jsou ortotropní materiály. U těchto materiálů rozlišujeme tři na

sebe kolmé směry a tři plochy tvořeny těmito osami. V každém z těchto tří směrů ale materiál vykazuje rozličné vlastnosti. Typickým příkladem ortotropních materiálů jsou právě například vláknové kompozity, jejichž vlastnosti se v jednotlivých osách liší v závislosti na uspořádání vláken. Dalším typickým příkladem ortotropního materiálu je dřevo. [2]

2 MATRICE

Matrice zajišťuje geometrickou polohu výztuže a tvarovou stálost výrobku, neboť vlákna sama o sobě nemají ohybovou tuhost. Matrice také chrání výztuž před vnějšími vlivy jako kyselé či zásadité prostředí. Matrici mohou tvořit reaktoplastické pryskyřice, ale také termoplasty, elastomery, keramika či kov. Z keramických matric jsou nejběžnějšími zástupci karbid křemíku SiC, nitrid křemíku Si₃N₄ nebo oxid hlinitý Al₂O₃. Kovové matrice jsou převážně tvořeny slitinami hliníku, titanu, hořčíků a mědi. U pryskyřic je důležitou vlastností viskozita, která značně ovlivňuje to, jak dobře bude výztuž smáčena. [1] [8]

U reaktoplastů dochází k zesíťování, tedy ke změně tekuté pryskyřice na pevný stav, za pomoci nevratné chemické reakce. Po vytvrzení jsou tedy reaktoplasty netavitelné. Tato reakce je iniciována tvrdidly, které se do pryskyřice přimíchávají v přesně daném poměru. Pro urychlení reakce se také používají urychlovače. Při chemickém vytvrzování sledujeme také teplo, které se chemickou reakcí uvolní. Další charakteristickou vlastností pro průběh reakce je smrštění, které je běžně okolo 5 až 10 %, v závislosti na typu pryskyřice. [2]

2.1 Polyesterové pryskyřice

Polyesterové pryskyřice jsou nejpoužívanější při výrobě méně namáhaných dílů. Často se z nich vyrábějí velkoplošné výrobky jako bazény, skluzavky či trupy lodí, ale také výrobky určené pro dopravní a chemický průmysl. Jejich jednoznačnou výhodou je nízká cena. Při výrobě kompozitů z polyesterových pryskyřic ale dochází k uvolňování zdravotně závadného styrenu. K vytvrzování dochází již za normální teploty, může se ale používat i teplota zvýšená. Polyesterové pryskyřice existují v mnoha modifikacích, které se od sebe liší hlavně druhem základní molekuly – tedy chemickým složením. Jednotlivé druhy polyesterů se pak od sebe liší svými vlastnostmi. Podle druhu použité kyseliny existují pryskyřice s lepší chemickou odolností, houževnatostí či teplotní odolností. [1] [2]

2.2 Vinylesterové pryskyřice

Tyto pryskyřice jsou více houževnaté a mají lepší chemickou odolnost, lze je proto použít i v korozním prostředí. Oproti polyesterovým pryskyřicím jsou ale tvarově méně stálé za zvýšených teplot. Jejich chemické odolnosti se využívá zejména pro použití jako materiál trubek, potrubí, nádrží, v čistírnách odpadních vod a v dalších chemicky nepříznivých prostředích. [1] [8]

2.3 Fenolické pryskyřice

Nejpodstatnější vlastností fenolických pryskyřic je jejich nehořlavost a ohnivzdornost. Jsou teplotně a chemicky velmi odolné, a proto se používají nejčastěji pro interiérové aplikace nebo také v leteckém a automobilovém průmyslu. Sítování těchto pryskyřic probíhá ve třech reakčních stavech. První probíhá do teploty 80 °C, kdy se začnou odpařovat volné molekuly vody. Poté následuje endotermní reakce až do teploty 110 °C, následovaná silně exotermní zesíťovací reakce až do teploty 160 °C. [4]

2.4 Epoxidové pryskyřice

Kompozity z epoxidových pryskyřic se vyznačují vysokou houževnatostí a všeobecně vyváženými mechanickými vlastnostmi. Proto jsou široce aplikovány hlavně v pevnostně namáhaných součástech (formy, nástroje, letecký a automobilový průmysl,). Epoxidy jsou však několikrát dražší než běžně používané polyesterové pryskyřice. Epoxidové skupiny mají také poměrně vysokou viskozitu a jejich vytvrzovací reakce je pomalá. Pryskyřice i používaná tvrdidla jsou zdravotně nezávadná, při alergii však může dojít k podráždění kůže. [1] [2]

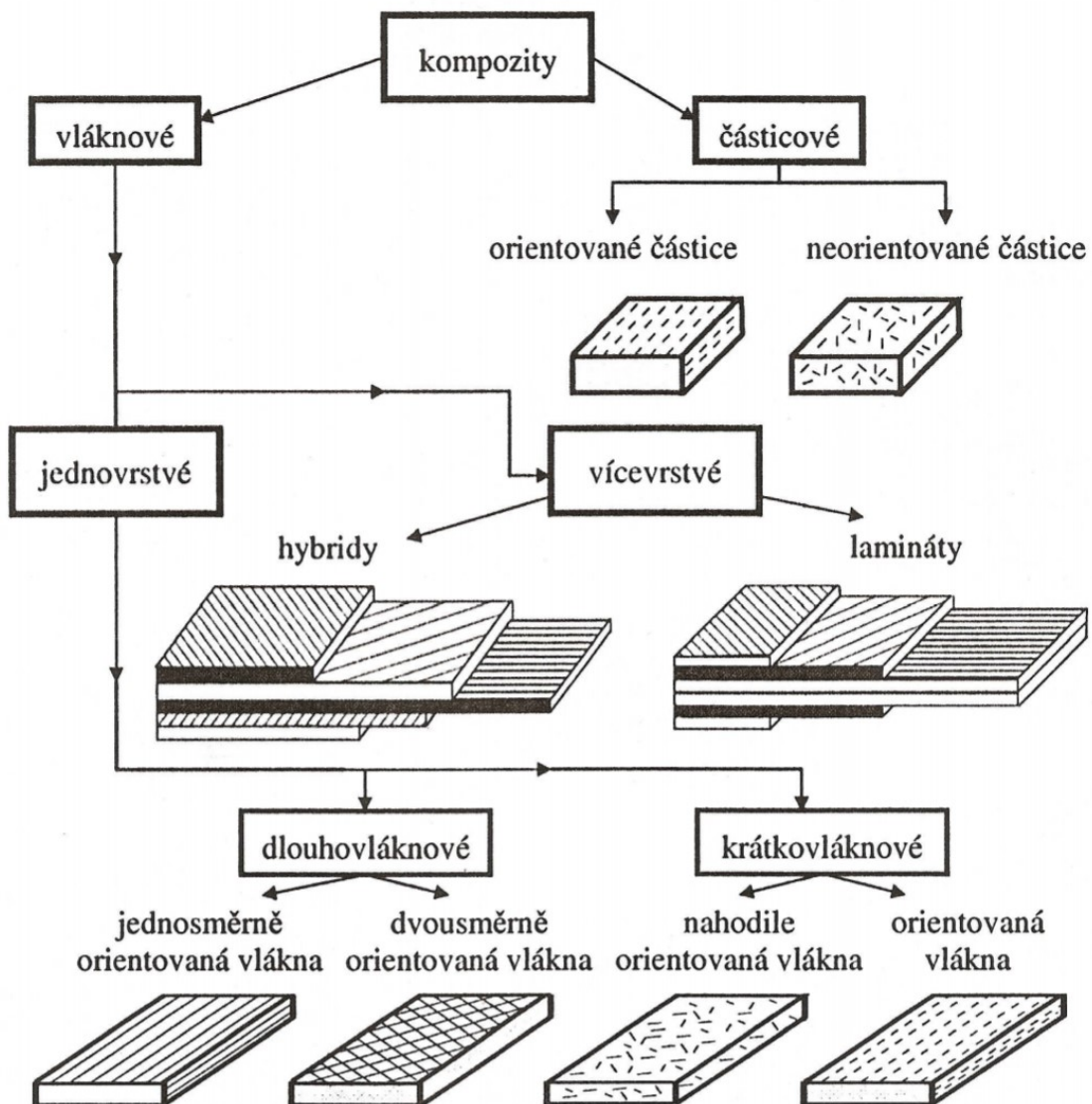
2.5 Termoplastické matrice

Termoplastů jako matrice v kompozitních dílech se využívá především při technologii vstřikování nebo lisování. Při vstřikování se používají krátká vlákna o velikosti do 0,2 mm. Při lisování se používají vlákna dlouhá až do velikosti 25 mm. Při technologii GMT se využívá takzvaných nekonečně dlouhých vláken, což jsou rohože, tkaniny nebo pásy.

Obsah výztuže při vstřikování se pohybuje od 15 do 50 %. Při použití výztuže dochází ke zlepšení mechanických vlastností výrobku. Velkou nevýhodou jsou však abrazivní vlastnosti vláken, dochází tedy k výrazně vyššímu opotřebení vstřikovací formy než při klasickém vstřikování bez použití výztuže. Nejčastěji používané termoplastické matrice jsou PA6, PA66, PBT, PET, PC nebo POM. [1] [8]

3 VÝZTUŽ

Výztuž u kompozitních materiálů zajišťuje především tuhost, pevnost či finální modul pružnosti. Použitý tvar a materiál výztuže výrazně ovlivňují mechanické vlastnosti materiálu, ale například i jeho tepelnou či elektrickou vodivost. Jako výztuž se mohou používat částice různých tvarů nebo především vlákna, a to jak krátká, tak i dlouhá. Podle aplikace konečného výrobku se vlákna orientují v jedné ose (většinou výrobky namáhané pouze na tah), anebo ve více osách. [1]



Obrázek 4: Rozdělení kompozitních materiálů podle druhu výztuže. [7]

3.1 Částicové kompozity

Částicová výztuž se používá hojně u kompozitních kovů pro zlepšení obrobiteľnosti, či tepelné a elektrické vodivosti. V polymerním světě se částice často využívají jako plniva elastomerů nebo termoplastů. Tvar částic může být izometrický nebo anizometrický – tj. částice mají buďto ve všech směrech relativně stejné rozměry nebo jsou rozměry v jednotlivých směrech významně rozdílné. Částice pak mohou být kulovité, destičkovité, tyčinkovité nebo zcela nepravidelné. [4] [8]

Obecně o částicové výztuži můžeme říci, že zlepšuje odolnost výsledného materiálu proti lomu, opotřebení a otěru. Zvyšují tuhost, ale při použití tvrdých částic v křehkých materiálech, snižují celkovou pevnost. Použitím částicové výztuže lze také dosáhnout zvýšení povrchové tvrdosti a redukce smrštění. Tato výztuž, obdobně jako vlákna, přenáší namáhání, ale oproti vláknům v daleko menším rozsahu. Částicová výztuž je často aplikována pouze k ušetření množství pojivového materiálu (matrice) a díky tomu lze dosáhnout i značného snížení nákladů. [4]

3.2 Vláknové kompozity

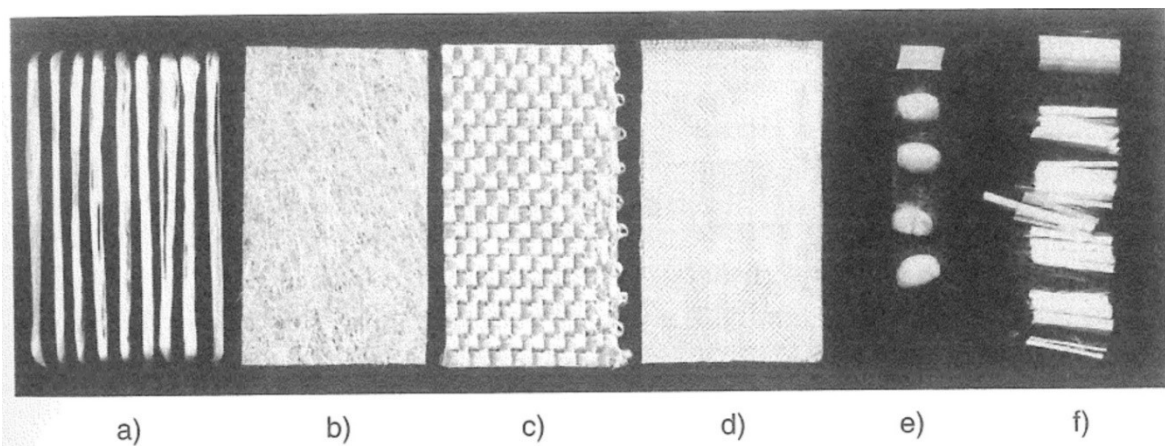
Vlákna jsou charakteristické svou pevností v tahu v podélném směru, která může být i podstatně větší než u běžných ocelí, a to při daleko menší měrné hmotnosti. Pokud jsou vlákna použita jako výztuž polymerní matrice, dochází díky adhezi mezi oběma složkami k přenosu vnějších zatěžujících takřka výlučně na vlákna. Přenos veškerého napětí z matrice na vlákna je umožněno tím, že adheze mezi vláknem a matricí způsobuje vznik smykových sil na jejich rozhraní. [5]

3.2.1 Struktura vláknových výztuží

Pro výrobu vláknových kompozitů jsou vlákna používána v mnoha formách. Typ vláknové struktury je volen především podle způsobu výroby cílového kompozitu. [1]

- Dlouhá vlákna: Jsou používána většinou k výrobě tkanin, pramenců, prepregů apod. Bývají také používána i v podobně samostatných vláken například při technologii navíjení. Tloušťky vláken se pohybují v řádech jednotek až desítek mikrometrů. U kovových vláken to ale mohou být až stovky mikrometrů.

- Krátká vlákna (stříž): Jsou nasekaná vlákna o délce většinou do 0,2 mm, kdy je délka většinou závislá na použité technologii. Používají se především při technologii vstříkování v termoplastických matricích. V reaktoplastických matricích se používají stříkání nebo odstředivém lití (viz kapitola 4 Technologie výroby)
- Kontinuální vlákna: Jsou taková vlákna, která se v celém kompozitním výrobku nachází v celé jeho délce bez přerušení. Teoreticky je to nekonečně dlouhé vlákno.
- Pramen: Vzniká spojením zhruba 200 vláken bez jejich zkrucování nebo proplétání. Spojením určitého počtu pramenů vznikají pramence (rovingy).
- Tkaniny: Tkaniny jsou často používanou strukturou vláknovou výztuže v kompozitech, a to díky její dobré zpracovatelnosti. Jedná se o vzájemně propletená vlákna nebo jejich pramence. U tkanin rozlišujeme několik druhů vazeb podle způsobu propletení pramenců. Mezi základní vazby se řadí vazba plátňová, keprová a atlasová.
- Prepreg: Prepregy neboli předimpregnované tkaniny jsou polotovary pro další výrobu. Jedná se o tkaniny, které jsou nasycené pryskyřicí a při zpracování se musejí tepelně vytvrdit. Pryskyřice je natolik teplotně citlivá, že se prepregy musejí skladovat ve speciálních mrazících boxech, protože už při pokojové teplotě by došlo k jejich částečnému vytvrzení a tím i k znehodnocení.
- Rohože: Výztuž, která se skládá z nekonečných nebo sekaných ale neorientovaných vláken nebo pramenců spojených pojivem. [1] [3]



Obrázek 5: Vlákna v jednotlivých formách polotovarů pro další zpracování v kompozitech: a) prameny, b) rohož, c) tkanina z pramenců, d) tkanina z vláken, e) sekaná krátká vlákna (0,22 mm) f) krátká vlákna (cca 5 mm). [1]

3.3 Materiály výztuže vláknových kompozitů

Mezi nejpoužívanější materiály vláken používaných u kompozitů patří sklo, uhlík, polymery, kovy, keramika nebo přírodní materiály. Materiály výztuže se používají v různých modifikacích v závislosti na potřebách konkrétní aplikace. V tabulce 1 jsou uvedeny vlastnosti vybraných materiálů používaných jako vláknová výztuž. Pro srovnání jsou uvedeny i vlastnosti konvenčních materiálů v kompaktní formě. [1]

Tabulka 1: Porovnání vlastností vybraných materiálů. [2] [4] [8]

Materiál		Modul pružnosti v tahu E [GPa]	Mez pevnosti v tahu σ_p [GPa]	Hustota ρ [g/cm ³]
materiál ve formě vlákna	E - sklo	72,4	3,5 *	2,54
	S - sklo	85,5	4,6 *	2,48
	Uhlík (vysokomodulový)	390,0	2,1	1,90
	Uhlík (vysokopevnostní)	240,0	2,5	1,90
	Kevlar 49 (aramid)	130,0	2,8	1,50
	Bór	385,0	2,8	2,63
	Křemen	72,4	5,8	2,19
	Wolfram	414,0	4,2	19,30
	Berylium	240,0	1,3	1,83
přírodní vlákna	Konopí	70,0	0,56	1,50
	Juta	60,0	0,44	1,30
	Len	100,0	0,34	1,50
	Bavlna	27,0	0,3	1,50
kompaktní materiál	Sklo	70,0	0,7 - 2,1	2,50
	Ocel	210,0	0,34 - 2,1	7,80
	Hliníkové slitiny	70,0	0,14 - 0,62	2,70
	Wolfram	350,0	1,1 - 4,1	19,30
	Berylium	300,0	0,7	1,83

* hodnoty skutečné pevnosti před zabudováním do kompozitu jsou 2,1 GPa

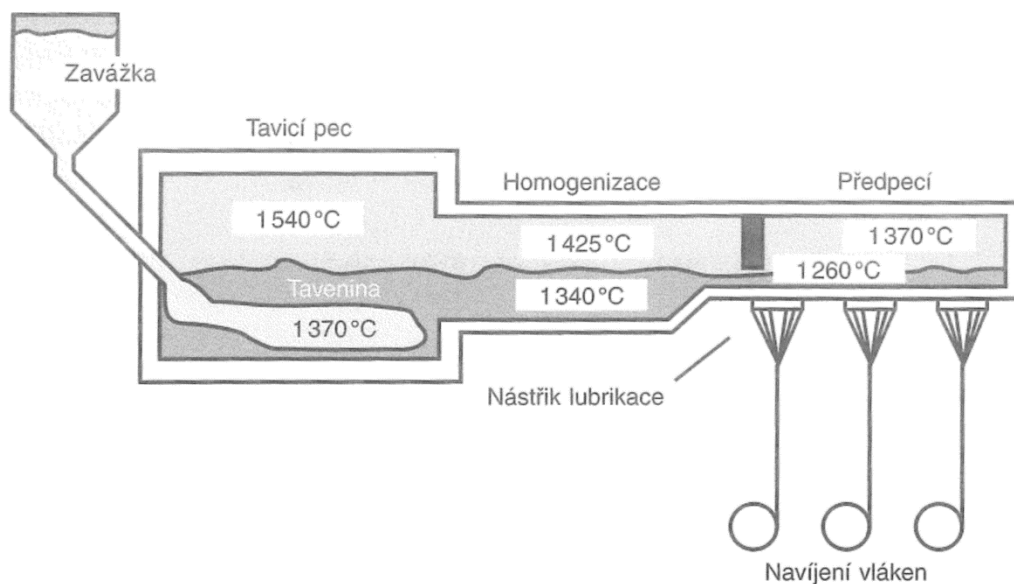
Z tabulky 1 je patrné, že kompozitní materiály z uhlíkových vláken, jsou vlastnostmi při zatížení v tahu schopny vyrovnat, ba dokonce i předčít, výrobky z oceli. Nutné je ale zdůraznit že se jedná o vlastnosti čistě tahové. Kompozity (a ty vláknové především) jsou ortotropní látky, které se vykazují vysokou pevností v tahu v podélném směru vláken. V příčných směrech nebo při jiném než tahovém zatížení, jsou ale jejich mechanické vlastnosti výrazně horší (opět v závislosti na použitém materiálu vlákna).

3.3.1 Skelná vlákna

Skelná vlákna jsou nejběžněji používanou výztuží v polymerních matricích. Sklo se ale vyznačuje ne zrovna dobrými adhezními vlastnostmi. Proto jsou skelná vlákna při výrobě povrchově upravována látkami na bázi organosilanů, které mají dobrou přilnavost k vláknům i k matrici. Tato úprava vláken se nazývá apretace či lubrikace. Nevýhodou však je, že lubrikovaná vlákna mají nižší pevnost. [2] [9]

Skelná vlákna jsou vyráběna dloužením (tažením) proudu roztaveného skla procházejícího přes trysky zvláknovací hlavy. Sklo použité na výrobu vláken je složeno ze směsi oxidů křemíku a oxidů hliníku, vápníku, hořčíku a bóru. Ve směsi je také velmi malý podíl alkaliálních kovů (sodík, draslík). Skelné vlákna se vyrábí v několika modifikacích. [2] [13]

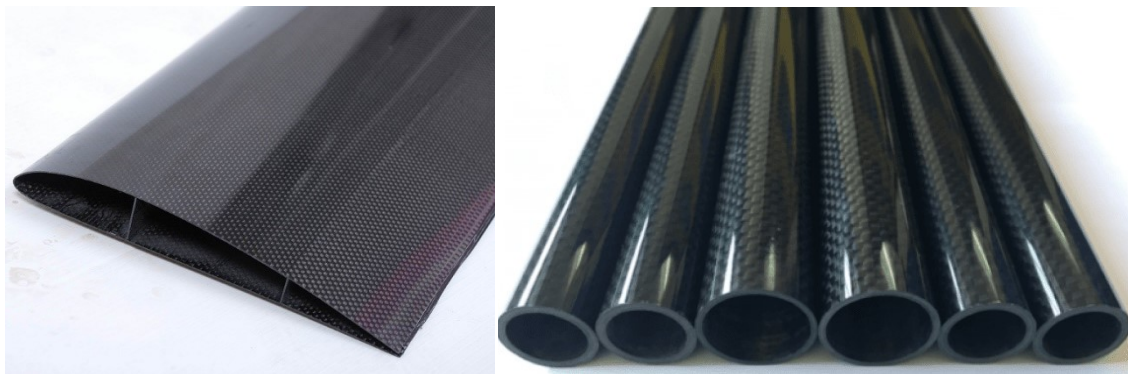
- E – sklo: nejběžnější skelná vlákna, elektroizolační vlastnosti
- S – sklo: vyznačuje se vysokou pevností, složením je blízko tabulovému sklu
- A – sklo: ze skelných vláken má nejnižší tepelnou vodivost
- C – sklo: odolné chemickým a korozním vlivům, za to horší mechanické vlastnosti
- L – sklo: vysoký obsah olova – nepropustnost rentgenovému záření, aplikace v lékařských, výzkumných a vojenských zařízeních



Obrázek 6: Schéma výroby skelných vláken. [1]

3.3.2 Uhlíková vlákna

Uhlík ve vláknové výztuži nalezneme ve dvou základních formách – amorfni uhlík, nebo krystalický grafit. Podle obsahu těchto struktur pak rozlišujeme vlákna uhlíková a grafitová. Amorfni struktura je více tažná, naopak krystalický grafit se vyznačuje křehkostí. Uhlíková vlákna nalézají uplatnění v nepřeberném množství aplikací, a to zvláště tam, kde se klade důraz na ušetření hmotnosti. Oproti skelným vláknům mají podstatně menší měrnou hmotnost. Pevnost uhlíkových vláken je při pokojové teplotě nižší než u vláken skelných nebo aramidových, na rozdíl od těchto materiálu ale pevnost uhlíkových vláken se vzrůstající teplotou neklesá a je konstantní až do teploty 1000 °C. Do této teploty jsou také vlákna z uhlíku chemicky inertní (netečné k chemickým reakcím). Uhlíková vlákna se také vyznačují velkou odolností proti únavě, ale při ostrých ohybech praskají snadněji než vlákna skelná. Uhlík je také elektricky vodivý a vlákna z něj jsou finančně nákladná. Cena uhlíkových vláken se pohybuje od dvojnásobku až po stonásobek ceny vláken skelných. [2] [8]



Obrázek 7: Příklady aplikací uhlíkových kompozitů. [14] [15]

Základem výroby uhlíkových vláken je polyakrylonitril PAN. Tento materiál se nejprve dlouží a poté je přeměněn pyrolýzou (karbonizací) na grafitickou strukturu. K druhému způsobu výroby uhlíkových vláken jsou používány smoly na bázi kamenouhelného dehtu nebo dehtů vznikajících při destilaci ropy. Tyto suroviny se nejprve tepelně zpracují na mezofázi, což je přechodový stupeň mezi kapalnou a krystalickou fází. Z této taveniny, která obsahuje velké množství kapalných krystalů jsou pak pomocí hydrodynamických procesů spřádána vlákna. [1]

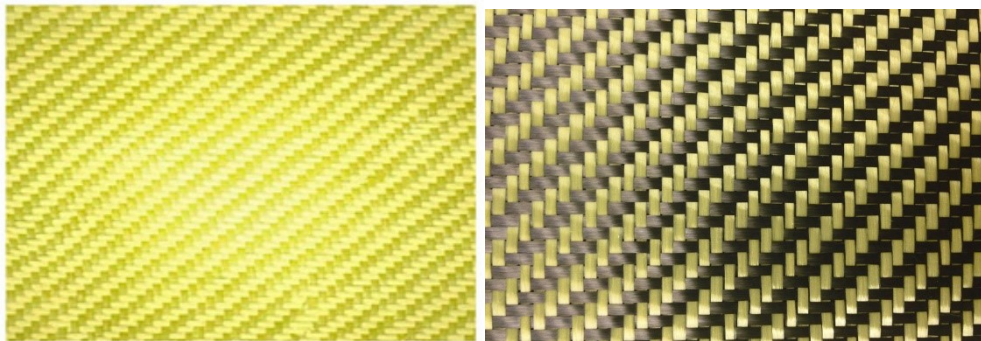
Zajímavou aplikací uhlíku jsou kompozity typu carbon-carbon (C-C, uhlík-uhlík), kdy se jedná o uhlíkovou výztuž v uhlíkové matici. Tyto kompozitní materiály jsou v neoxidačním prostředí stabilní až do teploty 3000 °C. Bez vnější povrchové ochrany ale za přítomnosti

kyslíku degradují už při teplotách mezi 400 °C a 500 °C. Díky jejich vysoké teplotní vodivosti jsou tyto materiály vhodné pro aplikace, kde hrozí teplotní šoky. C-C kompozity se používají jako materiál raketových trysek, brzdových kotoučů, předních částí letadel (nose cap) a předních hran křidel raketoplánů. V závislosti na použitém druhu vlákna a matrice se tyto kompozitní materiály vyrábí slinováním nebo lisováním za vysokého tlaku (20 až 50 MPa) a vysoké teploty (1500 °C). [8]

3.3.3 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou charakteristická svou houževnatostí a odolností proti průrazu či průstřelu. To může být nevýhodou při jejich zpracování, kdy konvenční metody dělení (stříhání, řezání) nelze příliš použít. Vhodná je například metoda dělení pomocí vodního paprsku. Vynikajících rázových odolností aramidu je ale využito při jeho aplikaci. Z aramidových vláken se vyrábí neprůstřelné vesty, přilby, nádrže vrtulníků nebo formulí či kotevní lana těžebních věží. Velké uplatnění nachází v leteckém průmyslu a aramidové kordy jsou také používány v pneumatikách nebo dopravníkových pásích. [3]

Samotný název aramid je zkratkou sousloví aromatický polyamid. Vyrábí se z polyamidu s dlouhým uhlovodíkovým řetězcem navíjením vlákna z kapalného roztoku pomocí iontové reakce. Jedná se tedy o polymerní vlákno. [5]

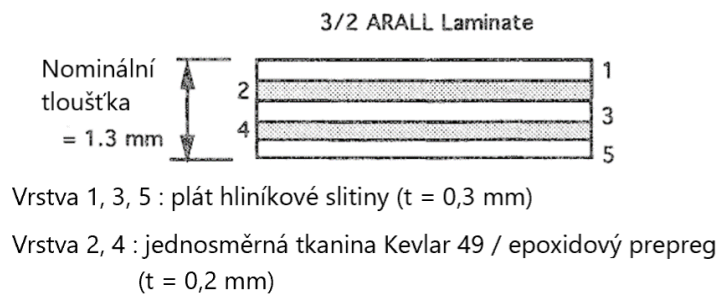


Obrázek 8: Tkanina z aramidových vláken (vlevo), kombinace aramidových a uhlíkových vláken (vpravo). [12]

Aramidová vlákna se vyrábí v několika modifikacích. Nejčastěji používané jsou tkaniny pod názvy kevlar a nomex. Kevlar je vyráběn v několika druzích (Kevlar29, Kevlar49, Kevlar100, Kevlar149 atp.) kdy se liší většinou mechanickými vlastnostmi (pevnost, modul pružnosti, tažnost, průrazuvzdornost) nebo zpracovatelskými vlastnostmi. Nomex je aramidové vlákno s vysokou odolností proti teplotám, chemikáliím, alkáliím a zářením beta

a gama. Tento materiál je využívám spíše jako samostatná tkanina, tedy bez matricové složky kompozitu. Vyrábí se z něj ochranné oděvy, rukavice nebo padáky. [10] [11]

Předimpregované tkaniny (prepregy) z aramidu se používají také v sendvičové struktuře označované ARALL – aramid aluminum laminates. Jedná se o materiál o celkové tloušťce 1 – 1,5 mm, který se skládá z několika vrstev hliníkové slitiny a aramidové tkaniny napuštěné epoxidovou pryskyřicí. Tento kompozitní materiál je o 20 % lehčí než klasické hliníkové slitiny ale se srovnatelnou tuhostí a větší odolností proti únavě. Nevýhodou oproti konvenčním hliníkovým slitinám je ale ortotropie vlastností. ARALLové kompozity nacházejí uplatnění zejména v leteckém průmyslu. [8]



Obrázek 9: ARALL – popis struktury. [8]

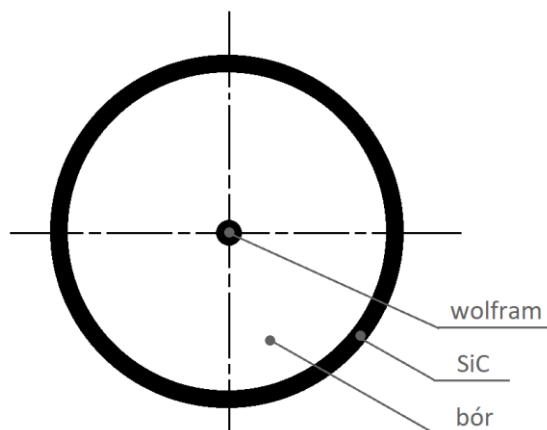
3.3.4 Další materiály vláken

Dá se říci, že vlastníkem patentu na moderní kompozitní strukturu je příroda. Vše říkajícím případem je dřevo nebo jiné již zmíněné příklady. Lidstvo ve svých kompozitních materiálech také používá i přírodní vlákna, a to bavlněná, lněná, jutová, konopná či kokosová. Výroba umělých vláken je relativně složitý proces, vyžadující patřičné zázemí a jistou průmyslovou infrastrukturu. Otázka použití přírodních vláken v kompozitech je tedy otevřena hlavně v rozvojových zemích, kde jsou přírodní suroviny právě ty nejsnáze získatelné. Základem všech přírodních vláken je celulóza a všechny přírodní materiály podléhají biodegradaci. Jejich pevnost je zlomková v porovnání s uměle vytvořenými vlákny (tabulka 1), ale například hodnoty Youngova modulu pružnosti (E) jsou srovnatelné s hodnotou skelných vláken (okolo 70 GPa). Nejnižší mechanické vlastnosti vykazují vlákna bavlněná, ty jsou ale charakteristická velkou tažností, která může dosahovat až 10 %. [1] [2]

Z polymerních materiálů se kromě aramidu používají také polypropylenová (PP) vlákna. Ta se používají například při technologii navíjení v kombinaci se skelnými vlákny.

Skupinou v kompozitech méně často používaných materiálů je keramika. Největší předností keramických materiálů jsou lepší vlastnosti v tlaku než u skla nebo uhlíku a také značná ohybová tuhost. Ta je způsobena hlavně tvarem keramických vláken – ten se spíše podobá tyčinkám či jehlicím. Mezi nejběžnější zástupce keramických materiálů patří korund Al_2O_3 a karbid křemíku SiC (karborundum). [2] [4]

Na namáhání v tlak a vzpěru jsou také odolnější kovová vlákna. Většina skelných a uhlíkových vláken se vyrábí v průměrech 5 až 40 μm . Bórová vlákna se ale vyrábí v průměru 140 μm , díky čemuž jsou charakteristická právě daleko větší odolností na vzpěr. Mezi další kovová vlákna patří vlákna z wolframu, beryllia nebo oceli. Bórová vlákna se také vyrábí jako kompozitní vlákna jejichž střed tvoří tenký wolframový drát, na který se chemickou reakcí nanáší vrstva bóru. Jako ochrana proti oxidaci je pak na povrch nanesena tenká vrstva karbidu křemíku. Tato vlákna jsou označována jako BORSIC. [2] [8]



Obrázek 10: Průřez vláknem BORSIC. [2]

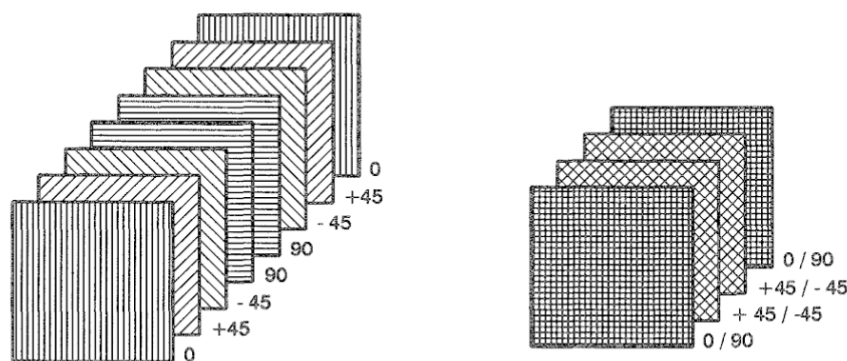
4 TECHNOLOGIE VÝROBY VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ

Při výrobě kompozitních dílů se používá mnoho technologií, které jsou svým postupem podobné i úplně rozdílné. Některé technologie vznikly jen zdokonalením technologických postupů jiných. Technologie se také liší použitou formou vlákna a matric. Ve většině postupů se také objevují tyto pojmy:

- Laminát: Je kompozitní díl, který je tvořen jednotlivými vrstvami pryskyřicí nasycených tkanin, rohoží nebo prepregů. Lamináty jsou ale obecně výrobky, které jsou tvořeny několika vrstvami odlišných materiálů. [2]
- Gelcoat: Je označení pro úpravu pohledové strany kompozitu. Může být transparentní nebo různě obarvený. Jedná se například o epoxidový gel. Ten se v tenké vrstvě natře nebo nastříká do formy. Po jeho vytvrzení je pak na něj nanášen samotný kompozitní díl. [3]

4.1 Ruční kladení

Metoda ručního kladení je jedna z nejjednodušších a nejhojněji používaných výrobních metod výrobků z vláknových kompozitů. Metoda spočívá ve střídavém nanášení vrstev pryskyřice a výztuže na odseparovaný povrch formy. Forma se separuje pomocí vosků, a to pro snadné odformování výrobku. Vlastnosti laminátu lze zlepšit pomocí vakuového dotlaku.



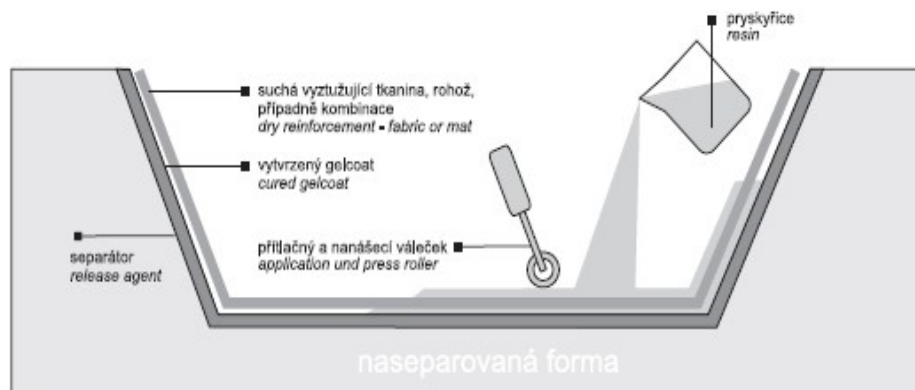
Obrázek 11: Schéma možných orientací vláken jednotlivých vrstev laminátu. [8]

Ruční laminace je proces, který se vyznačuje nízkou produktivitou a množstvím manuální práce. Při použití pryskyřic na styrenové bázi je také nutné, aby pracovníci používali ochranné prostředky dýchacích cest. Laminátový výrobek získaný touto cestou se také vyznačuje nízkou pevností v porovnání s jinými metodami. Proces je ale jednoduchý a málo

nákladný. Při různé orientaci jednotlivých vrstev laminátu lze také získat v rovině izotropní vlastnosti. [3]

4.1.1 Metoda mokré laminace

Při použití vláknových rohoží lze dosáhnout zhruba 30 hmot. % výztuže. Při použití tkaninové výztuže lze dosáhnout 40 až 50 hmot. %. [3]



Obrázek 12: Schéma metody ruční laminace. [16]

4.1.2 Ruční laminace s následným dotlakem

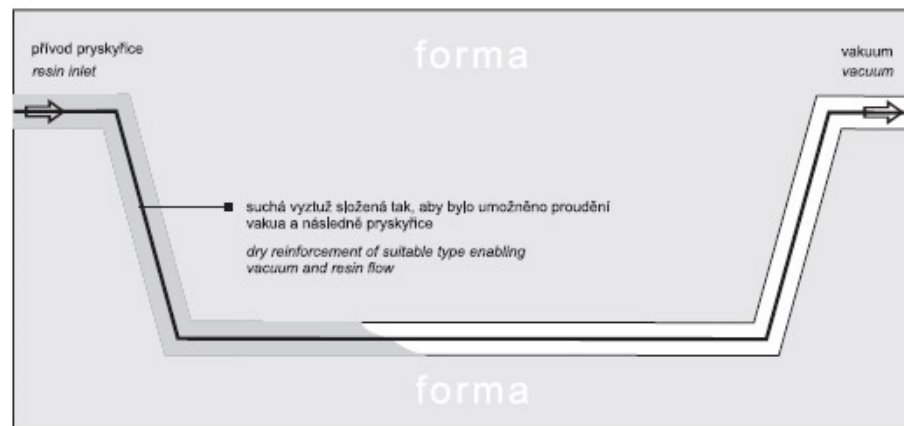
Jedná se o vylepšení předchozího postupu. K dotlaku se využívá vakuový vak, pomocí něhož je z okolí ještě nevytvrzeného laminátu odsát vzduch. Dochází pak ke stlačení jednotlivých vrstev více k sobě a tím i k vytlačení přebytečné pryskyřice z výrobku do odsávací tkaniny. Díky tomu je zajištěno rovnoměrnější tloušťky, menší pórovitosti a tím také lepší mechanické vlastnosti. Při vytvrzování se také do ovzduší dostává méně emisí. U pracovníků je ale kladen větší požadavek na odbornost. [16] [3]

4.2 Metoda vakuové infuze (vakuové prosycování)

Je metoda, kdy se do formy klade suchá výztuž. Poté je pomocí vakua přivedena pryskyřice, která nasytí výztuž. Pryskyřice se do formy přivádí v tekutém stavu distribučními hadičkami. Ve formě je na výztuži umístěna rozvodná síťka pro snazší rozvod pryskyřice.

Touto metodou je možno získat velmi kvalitní a pevné kompozitní výrobky. Lze vyrábět velkoplošné a tlustostěnné lamináty, kterých se využívá například v lodním průmyslu, při výrobě větrných elektráren a v mnoho aplikacích v dopravním průmyslu.

Vakuová infuze je ale jedna z technologicky nejnáročnějších technologií. Samotné výrobě předchází mnohdy zdlouhavé odladování procesu. Může totiž dojít k nedotečení pryskyřice do všech míst. [3]

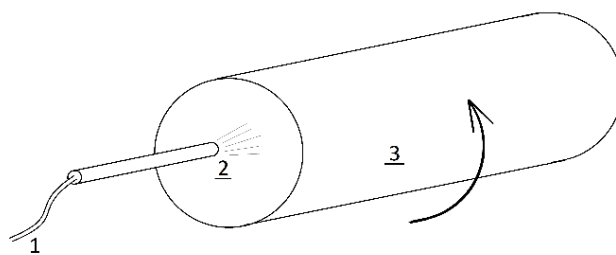


Obrázek 13: Schéma metody vakuové infuze [16]

4.3 Stříkání

Stříkání je technologie, kdy se pomocí stříkácí pistole na povrch formy zároveň nastříkuje iniciovaná pryskyřice a sekané vlákno. Místo vláken lze také použít drobné částičky termoplastu, čímž se dá dosáhnout lehčího a pevnějšího materiálu. Touto metodou se vyrábějí nepřiliš složité dílce, například vany, nádrže a jiné aplikace, které nejsou pevnostního charakteru, protože výsledný kompozit má vysoký objem matrice a nízké zastoupení vláken. [1]

Zvláštním případem stříkání je metoda odstředivého lití, kdy se vyrábějí tlustostěnné trubky o délce až 6 metrů a průměru 250 až 1500 mm. Při odstředivém lití tvoří formu rotující válec, do které se axiálně stříká směs nasekaných vláken, pryskyřice, vytvrzovadla (iniciátoru) a plniva. Plnivo je tvořeno křemičitým pískem a uhličitánem vápenatým (křída), které tvoří až 35 % stříkané směsi. [3]



1 - přívod stříkané směsi, 2 - stříkání, 3 - rotující válec

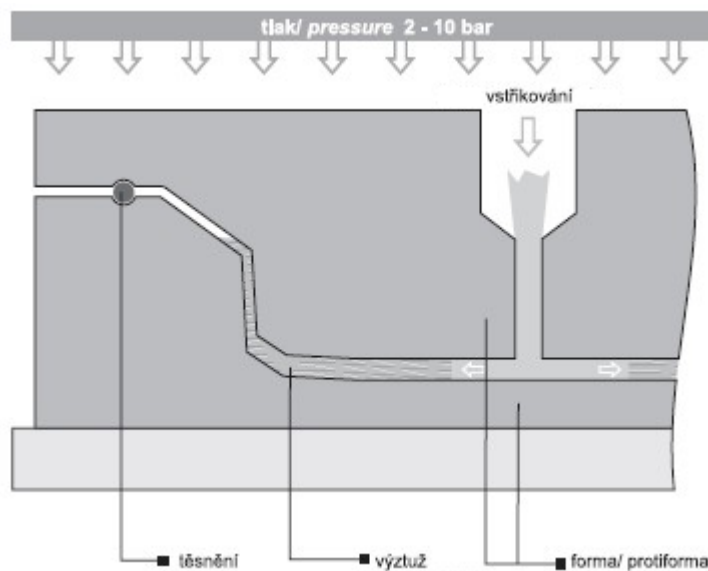
Obrázek 14: Schéma odstředivého lití za použití stříkání.

4.6 RTM

RTM (resin transfer moulding) je velmi produktivní metoda využívaná v sériových výrobách například karosářských dílů a v řadě dalších aplikací v automobilovém průmyslu. Jedná se o metodu, kdy se do formy (pokud je potřeba, tak již opatřené gelcoatem) vyskládá suchá výztuž (rohože, tkaniny) a následně je vysokým tlakem vstříknuta pryskyřice. Vytvrzování probíhá pouze chemickou exotermickou reakcí v řádu 10 až 20 minut. [3] [16]

4.6.1 Vysokotlaké RTM

Je původní formou této technologie. Na formu je při vstřikování vyvíjen velký tlak (0,2 až 1 MPa), proto je horní i spodní díl formy kovový nebo vyroben z polymerního betonu či polymerního mramoru. [16]



Obrázek 16: Schéma metody RTM. [16]

4.6.2 Lehké RTM (light RTM)

Od vysokotlakého RTM se liší především nižším vstříkovacím tlakem. K distribuci matrice se zde využívá krom vstříknutí využívá také odsávání vzduchu a vytvoření vakua obdobně jako u metody vakuové infuze (kap. 4.2). Na rozdíl od vakuového prosycování se zde ale nepoužívá odtrhové fólie a je tak možno dosáhnout oboustranně hladkého povrchu. Kvůli nižším tlakům také není nutný tak tuhý a pevný horní díl formy. U L-RTM se tedy jako hodní díl využívají různé fólie nebo kompozitní skořepiny. Proces je tedy levnější, ale dosažitelná pevnost dílce je nižší. [1] [3]

4.7 Lisování prepregů

Prepregy jsou tkaniny předem naimpregnované pryskyřicí, jejich vytvrzení tedy probíhá tím, že se zahřejí na teplotu většinou od 100 °C výše. Prepregy se nejprve nařezají na požadovaný tvar buďto ručně nebo na plotru, poté se naskládají do formy a ta je vložena do autoklávu, pece nebo vyhřívaného lisu, kde proběhne vytvrzení. Vytvrzovací cyklus se liší druhem použité pryskyřice a také podle tvaru a tloušťky kompozitního dílce a může trvat i několik hodin. [3]

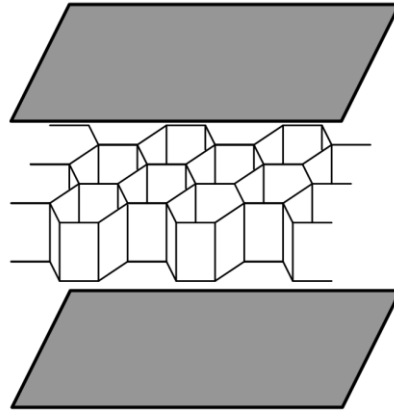
Výrobky z prepregů jsou charakteristické velmi dobrými mechanickými vlastnostmi a nízkým obsahem vzduchových dutin a dalších vad. Proces je sice relativně obtížnější ale je kontrolovatelný. Roli zde hrají i vysoké pořizovací ceny potřebného zařízení i samotného materiálu. Hojně aplikace nalezneme v leteckém, sportovním, dopravním a telekomunikačním průmyslu. [3]

4.8 Sendvičové struktury

Sendvičové struktury jsou tvořeny buďto střídajícími se tenkými vrstvami dvou nebo více materiálů, tak jako například u ARRALu (kap. 3.3.3), nebo častěji horní a spodní tenkou pevnou nosnou vrstvou mezi nimiž je umístěno lehké jádro značnější tloušťky. Nosné vrstvy bývají tvořeny lamináty, ale také tenkými plát oceli, hliníku, titanu, dřeva či termoplasty. Jádra pak mohou tvořit různé druhy voštin či polymerní pěny (PET, PUR, SAN, PVC). Voština je slovo odvozené od tvaru šestihhranného tvaru včelí plástve (anglicky honeycomb). Voštiny mohou být vyráběny z hliníkového plechu, papíru, ale také ze skelných, uhlíkových či aramidových vláken, spojených fenolickou matricí. Pevnost jádra roste s jeho hustotou, rozhodující tedy není velikost buněk ale hlavně tloušťka jejich stěn. Tvar buněk může být krom hexagonálního také obdélníkový nebo lasturový. [3]

Výhodou sendvičových kompozitů je vysoká ohybová pevnost a tuhost, únavová odolnost a odolnost proti rázům. Mají také vynikající akusticky izolační vlastnosti. Jejich uplatnění je velmi rozsáhlé. Od pultruzně vyráběných profilů, přes nosné prvky, protihlukové zábrany, lyže, pohledové prvky v dopravních prostředcích až po funkční a velmi namáhané součásti křídel a trupu letadel. [3]

Sendvičové struktury mají podobné ohybové vlastnosti jako I profil. Při zatížení je jádro sendviče namáháno na smyk a krycí vrstvy na tah a tlak. Voštiny mají obecně lepší smykové vlastnosti než polymerní pěny. [3]



Obrázek 17: Schéma sendvičového materiálu. [18]

4.9 Defekty kompozitních materiálů

Při výrobě kompozitních dílů vznikají defekty, které většinou ovlivňují hlavně mechanické vlastnosti – zvláště tedy snižují pevnost a tuhou výrobku. Mezi nejčastější defekty patří:

- Pits or pin holes: Tečky nebo jamky na povrchu, tzv. suchá místa. Vznikají nedostatečným nasycením první nebo poslední vrstvy laminátu matricí.
- Pórovitost: V celém objemu kompozitu se objevují dutiny. Ty jsou způsobeny již při míchání pryskyřice a tvrdidla, kdy se do této směsi dostane vzduch. K odstranění se používají chemické odpěňovače nebo se vzduch odstraňuje mechanicky pomocí vibrační desky.
- Resin rich: Hromadění pryskyřice v rozích formy. Vzniká, pokud je použito příliš velké množství pryskyřice, pokud je vstříknuta pod příliš vysokým tlakem, anebo také pokud jsou špatně navrženy distribuční prvky, které mají za úkol správný rozvod pryskyřice
- Bridging: Přemostění. Naopak od předešlého bodu, matrice nedoteče až do rohů formy.
- Delaminace: Odseparování jednotlivých vrstev. U sendvičů oddělení nosné vrstvy od jádra.
- Disbond: Je vada sendvičových struktur, kdy je mezi jádrem a nosnou vrstvou vzduch nebo suché místo.

5 MECHANICKÉ ZKOUŠKY KOMPOZITŮ

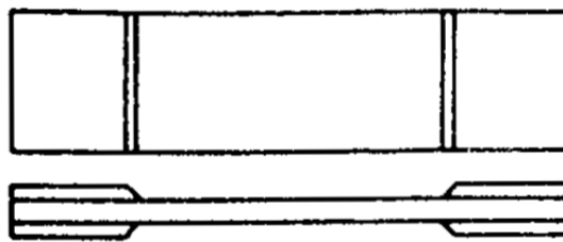
Na mechanické vlastnosti kompozitních dílů má největší vliv obsah výztuže a dále její orientace, rozložení a typ. Chování při mechanickém namáhání je také ovlivněno druhem a mírou vytvrzení matrice. Celkovému lomu kompozitního materiálu vždy předchází lokální poškození a porušení výztuže. Kompozity nejsou homogenní materiály, a proto má na mechanické vlastnosti výrazný vliv celistvost samotné soustavy výztuž-matrice. Jakékoli nepravidelnosti v uspořádání výztuže, vzduchové bubliny či nedostatky v adhezním spojení složek jsou potenciální místa vzniku trhlin, neboť jsou zde největší koncentrace napětí.

Lamináty, jejichž výztuž je orientovaná více směry, sice lze získat ortotropní a v rovině až izotropní vlastnosti, při zatížení (například prostým tahem) však v laminátu vznikají víceosá napětí. Kvůli tomu je u těchto materiálů daleko větší nebezpečí mezivláknového porušení než u jednosměrných laminátů.

Zkoušky jsou rozlišovány jako statické a dynamické. Statické zkoušky jsou obdobné jako například u kovů, kdy je zkoumáno především namáhání v tahu, tlaku a různé druhy namáhání ve smyku, popřípadě krutu. Dynamické zkoušky zkoumají především únavové a krípkové vlastnosti, ale také mezi ně radíme i zkoušky houževnatosti. Mechanické zkoušky kompozitů jsou však charakteristické mnohými modifikacemi pro různé materiály výztuží i matic a také pro různou orientaci a délku výztuže, nebo se liší provedením podle aplikace daného materiálu či součásti z něj vyrobené. Mnoho mechanických zkoušek se také řídí americkou normou ASTM. [1] [21]

5.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem pro kompozity se řídí pro ortotropní a izotropní kompozity a lamináty normou ČSN EN ISO 527-4, nebo normou ČSN EN ISO 527-5 pro jednosměrně orientované systémy. Zkouška tahem se mimo jiné provádí také podle normy ASTM D 3039. Jako zkušební tělesa jsou používána prizmatická tělesa, jež se na plochách, které budou upnuty v trhačím stroji, zpravidla zesilují. Aby byly výsledky zkoušky prokazatelné, je nutné, aby k přerušení vzorku došlo mimo upínací čelisti. Geometrie a rozměry zkušebních těles a také podmínky zkoušky jsou vždy určeny normou. [3] [20]



Obrázek 18: Jedna z možností tvaru zkušebního tělesa pro zkoušku tahem. [4]

Podle normy ASTM D 3039 se vyhodnocuje pevnost v tahu σ [MPa], modul pružnosti v tahu E [MPa], a Poissonovo číslo ν [-] podle následujících vzorců [24]:

$$\sigma = \frac{F_{max}}{S_0} \quad (1)$$

Kde: F_{max} – maximální síla [N], S_0 – původní plocha průřezu [mm²].

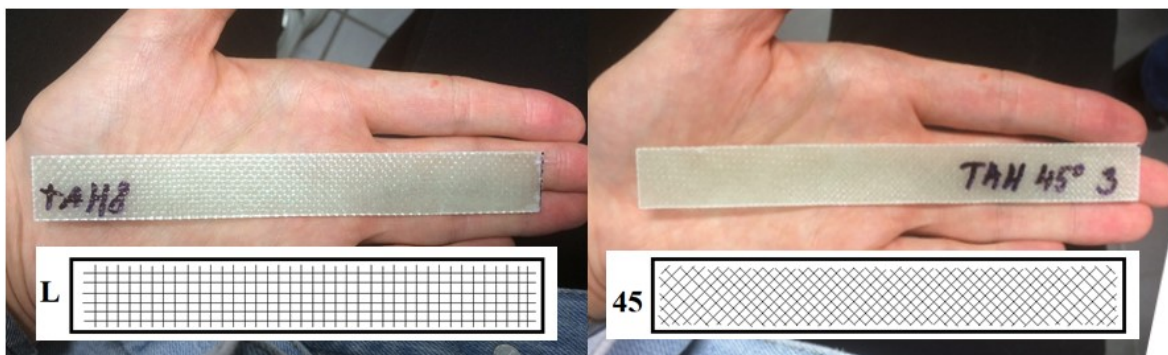
$$E = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \quad (2)$$

Kde: σ_a – napětí v tahu při 0,1 % z celkové deformace [MPa], σ_b – napětí v tahu při 0,3 % z celkové deformace [MPa], ε_a – poměrné prodloužení při 0,1 % z celkové deformace [-], ε_b – poměrné prodloužení při 0,3 % z celkové deformace [-].

$$\nu = -\frac{\Delta\varepsilon_2}{\Delta\varepsilon_1} \quad (3)$$

Kde: $\Delta\varepsilon_1$ – poměrné prodloužení ve směru osy 1 [-], $\Delta\varepsilon_2$ – poměrné prodloužení ve směru osy 2 [-].

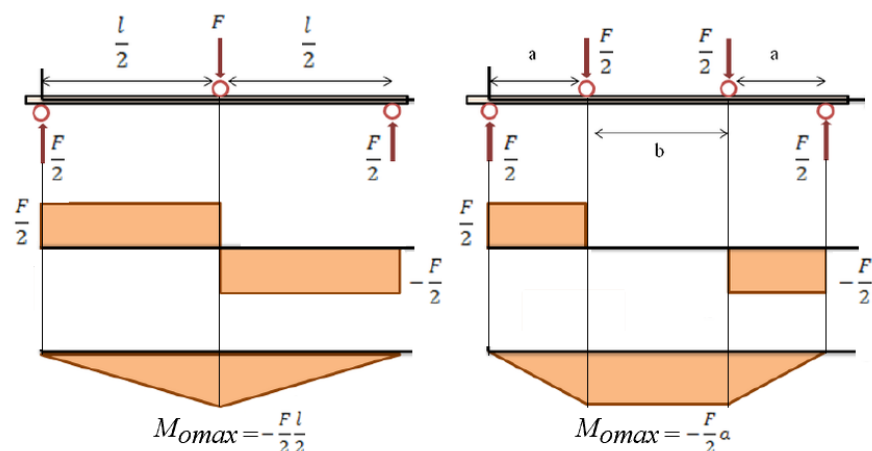
Na obrázcích níže jsou zobrazeny zkušební tělesa při tahové zkoušce, kdy nebylo použito zesílení na upínacích plochách. Zkouška byla vykonána hlavně z důvodu znázornění rozdílných vlastností laminátu při různé orientaci vláken. Vzorky s orientací vláken ve směru zatížení a kolmo na tento směr vykazují prakticky dvojnásobnou pevnost a modul pružnosti v tahu, než vzorky s orientací vláken pootočenou o 45°. Naopak vzorky s pootočenou orientací výztuže vykazují pětikrát až šestkrát větší tažnost, a u jejich tahových diagramů je také patrná výrazná mez kluzu. [3]



Obrázek 19: Orientace vláken laminátu.

5.2 Zkouška ohybem

Zkouška může být prováděna statickým trojbodovým nebo čtyřbodovým ohybem. Jak lze vidět na obrázku 20, při třibodovém ohybu vznikají v ohýbaném vzorku také smykové síly. Při čtyřbodovém ohybu tato smyková napětí, která by mohla výsledky zkoušky ovlivnit, nevznikají. To je hlavní výhodou této metody, nevýhodou je však nutnost extenzometru pro měření deformace. Při dynamickém ohybovém zatížení pak hovoříme o rázové zkoušce ohybem. [3]



Obrázek 20: Průběh posouvajících sil a ohybového momentu při tří- a čtyřbodovém ohybu. [19]

5.2.1 Statická zkouška ohybem

Tří bodový ohyb pro laminární kompozity popisuje norma ČSN EN ISO 14 125, která udává vzdálenost podpěr pro lamináty se skelným vláknem jako 20-ti násobek tloušťky (pro uhlíková vlákna pak 40-ti násobek tloušťky zkušební tělesa). Rádus tlačných trnů je podle normy rozlišován pro tloušťku vzorku menší než 3 mm R2, pro tloušťku větší než 3 mm R5. Další zkouška ohybem pak může být prováděna podle normy ASTM D 2344. [3] [21]

Při zkoušce ohybem (ať už třibodovým nebo čtyřbodovým) se vyhodnocuje pevnost v ohybu σ_o [MPa] a poměrný průhyb (pro obdélníkový průřez) ε [-] podle následujících vzorců: [24]

$$\sigma_o = \frac{M_{o \max}}{W_o} \quad (4)$$

Kde: $M_{o \max}$ – maximální ohybový moment [Nmm], W_o – modul průřezu v ohybu [mm³].

$$\varepsilon = \frac{6yh}{L^2} \quad (5)$$

Kde: y – maximální průhyb [mm], h – tloušťka profilu ve směru zatížení [mm], L – pracovní délka [mm].

5.2.2 Dynamická zkouška ohybem

Dynamická (rázová) zkouška ohybem se provádí na Charpyho kladivě a zkušební kompozitní těleso je zatíženo prudkým nárůstem napětí podle ČSN EN ISO 179-2. Veličina, která je výsledkem zkoušky, se nazývá rázová houževnatost a_U [kJ/m²]. Pokud je těleso opatřeno vrubem, pak hovoříme o vrubové houževnatosti a_N [kJ/m²]. Houževnatost se určuje jako poměr nárazové práce W [J] a plochy průřezu zkušební tělesa S_0 [m²], kdy, pokud je těleso opatřeno vrubem, se uvažuje plocha zmenšená o plochu vrubu. [3] [24]

$$W = G \cdot (H - h) \quad (6)$$

Kde: G – gravitační síla kladiva [N], H – počáteční výška kladiva [m], h – výška, do které se kladivo dostane po přeražení vzorku [m].

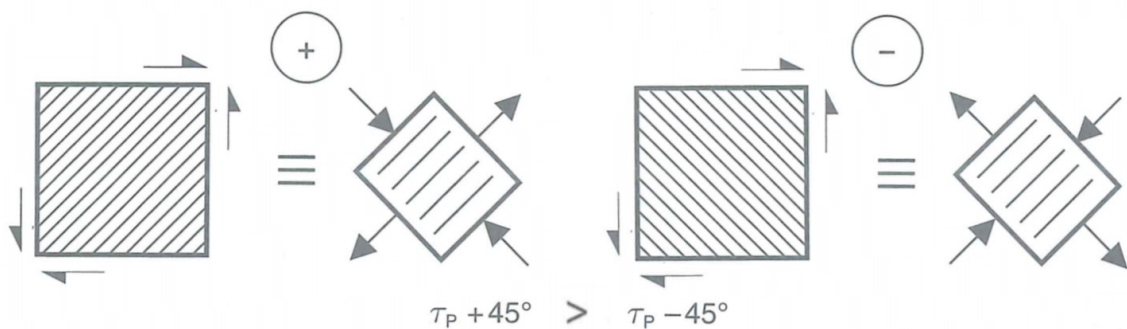
$$a = \frac{W}{S_0} \cdot 10^3 \quad (7)$$

Krom těchto veličin se také vyhodnocuje typ porušení zkušební tělesa, které může ukazovat na mezivrstevové smykové poruchy. [24]

5.3 Zkoušky smykem

Pevnost ve smyku je u vyztužených kompozitů vždy závislá na směru zatížení vůči orientaci vláken. Lamináty mají výrazně vyšší pevnost v tahu ve směru orientace vláken než kolmo na tento směr. Pevnost v tlaku je na tom opačně – lamináty vykazují větší tlakovou pevnost kolmo na směr orientace, než ve směru orientace vláken. [1] [4]

Pokud tedy jednosměrně orientovaný laminát zatížíme smykem tak, že podélně na něj bude působit tah a příčně tlak, bude mít tento laminát vyšší pevnost ve smyku, než stejný laminát, který by byl zatížen podélně tlakem a příčně tahem. [1]



Obrázek 21: Rozdíl smykových napětí při podélném tahu a příčném tlaku a při podélném tlaku a příčném tahu. [1]

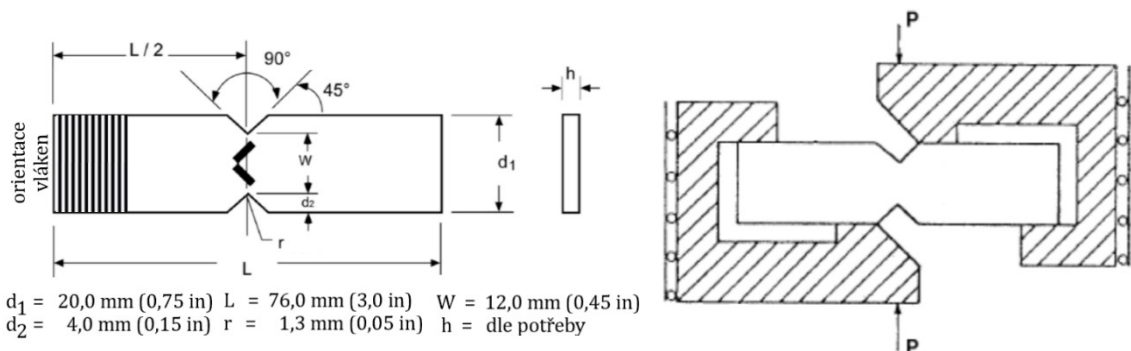
Pro laminátové struktury s výztuží pootočenou o 45° ku směrem zatěžování také platí, že velikost smykového napětí se rovná polovině napětí normálového. [3]

$$\tau_s = \frac{1}{2} \cdot \sigma = \frac{F}{2 \cdot S_0} \quad (8)$$

Z definice smykových vlastností kompozitů je zřejmé, že zjištění smykového napětí v laminátu není úplně jednoduché. Vhodnou metodou je například zkouška krutem pro zkušební tělesa tvaru trubky. Modul pružnosti ve smyku G je pak dán kroutícím momentem, úhlem zkroucení a rozměrovými charakteristikami trubky. Lamináty jsou však materiály, které jsou v jejich aplikacích používány spíše jako rovinné celky (najdou se však i aplikace laminátových trubek). Proto existuje několik dalších metod pro určování smykových napětí, které využívají upnutí vzorků do speciálních přípravků. [1] [21]

5.3.1 Zkouška smykem dle ASTM D 5379 (Iosipescu shear test)

Tato metoda podle americké normy ASTM (American Society for Testing Materials) je vhodná pro měření meze pevnosti pro jednoosé lamináty vyztužené vlákny s vysokým modulem pružnosti. Vzorky jsou obdélníkového tvaru s dvěma V vruby ve směru zatížení. Také orientace vláken je použita ve směru zatížení. Zkouška je zakončena buďto přetrhnutím vzorku, nebo překročením jeho povolené deformace tak, aby nedošlo k poškození tenzometrů umístěných na zkušebním tělese. [21]



Obrázek 22: Rozměry vzorku pro ASTM D 5379 a schéma jeho upnutí. [21]

Pro vyhodnocení zkoušky se zjišťuje celkové smykové napětí τ_{max} [MPa] a smykové napětí v *i*-tém bodě dat τ_i [MPa], podle vzorců: [24]

$$\tau_{max} = \frac{F_{max}}{wh} \quad (9)$$

$$\tau_i = \frac{F_i}{wh} \quad (10)$$

Kde: F_{max} – maximální síla [N], F_i – síla v *i*-tém bodě dat [N], h – tloušťka vzorku [mm], w – rozměr vzorku mezi vruby [mm] (viz obrázek 22).

Poměrná smyková deformace γ [-] podle vzorce: [24]

$$\gamma = |\varepsilon_{+45^\circ}| - |\varepsilon_{-45^\circ}| \quad (11)$$

Kde: ε_{+45° – poměrná deformace ve směru $+45^\circ$ [-], ε_{-45° – poměrná def. ve směru -45° [-].

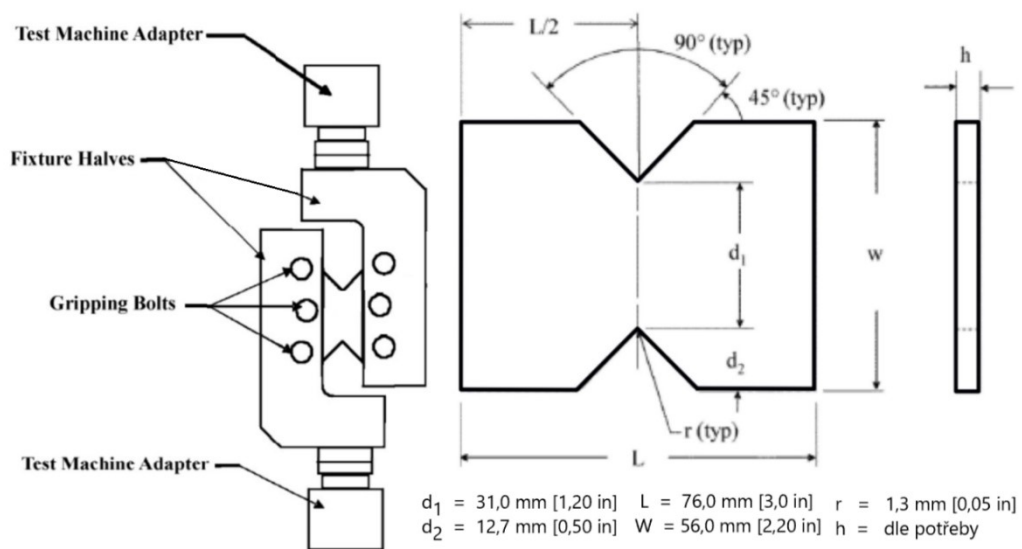
A modul pružnosti ve smyku G [MPa] podle vzorce: [24]

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (12)$$

5.3.2 Zkouška smykem dle ASTM D 7078 (V-notched rail shear test)

Tvar tělesa je podobný jako při předešlé zkoušce (5.3.1), včetně dvou V vrubů. Vzorky jsou po zkoušce vždy nějakým způsobem porušeny, ale existuje zde celá řada možných defektů, kdy některé z nich jsou považovány za vyhovující a jiné za nevyhovující. [21]

Při této zkoušce určujeme smykové napětí τ , poměrnou smykovou deformaci γ a smykový modul pružnosti G , které se počítají podle vzorců (9), (10), (11) a (12), stejně jako u předešlé zkoušky. Podstatný rozdíl ale je, že metodu D 7078 je možno použít i pro lamináty s orientací výztuže v různých materiálových osách a je tak možno zjišťovat smykové napětí právě ve směru orientace výztuže. [24]



Obrázek 23: Schéma upnutí vzorku a jeho rozměry dle ASTM 7078 [21]

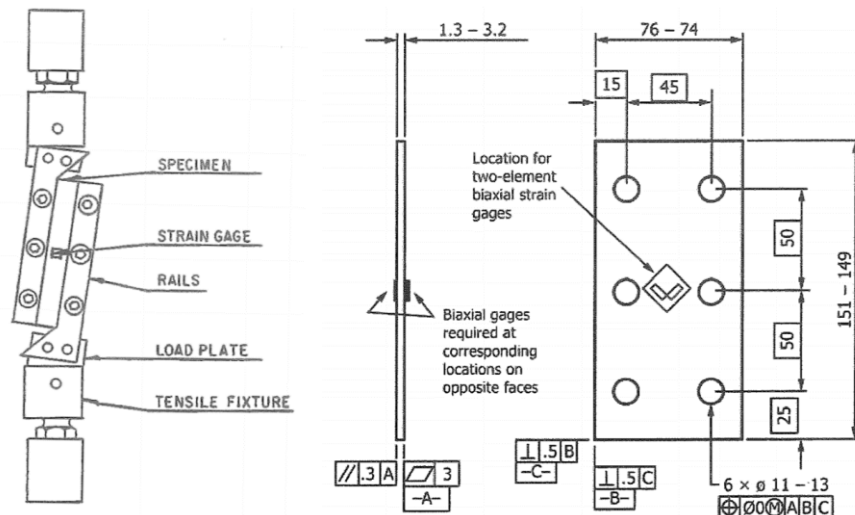
5.3.3 Zkouška smykem dle ASTM D 4255 (Rail shear method)

Hlavní cíl praktické části je právě konstrukční návrh přípravku pro tuto metodu měření smykových vlastností kompozitních materiálů. Vyhodnocování a přesnější terminologie normy jsou tedy popsány níže (kapitola 6).

Metoda popsána normou ASTM D 4255 je určena pro lamináty vyztužené vlákny s vysokým modulem pružnosti, a to pro jednosměrné vláknové systémy nebo tkaninové systémy s orientací vláken paralelně nebo kolmo k upínacím konzolám a dále také pro kompozity vyztužené krátkými vlákny s nahodilou orientací. Norma popisuje dvě možnosti provedení zkoušky – metodu A a metodu B. [22]

Metoda A:

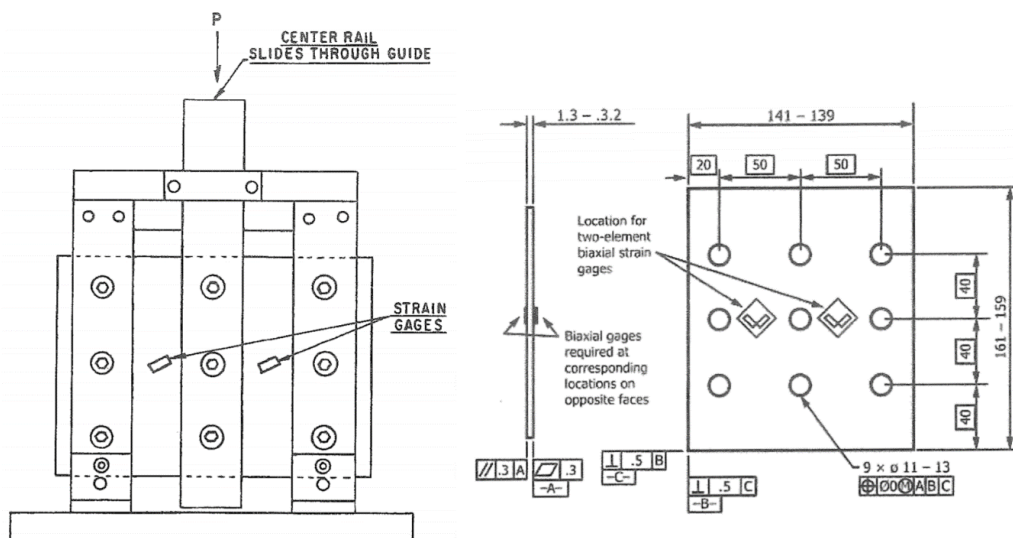
Testované vzorky laminátu jsou upnuty mezi dva páry konzol. Při zatížení tahem pak přípravek přenáší do vzorku smykové síly, které způsobují smykové napětí. Zatížení je aplikováno až do porušení vzorku. Vzorek je laminátová deska o normou daných rozměrech, na jejím středu jsou z obou stran umístěny tenzometry. [22]



Obrázek 24: Schéma zkušební aparatury a rozměry vzorků pro metodu A. [22]

Metoda B:

Při metodě B jsou zkoušené vzorky upnuty ve třech párech konzol. Krajní konzoly jsou pevné, prostřední pár konzol je pak pohyblivý a působí na něj tlaková síla, která pak ve vzorku vyvolává smykové napětí. Vzorky jsou opět laminátové desky, tentokrát však opatřeny dvěma páry tenzometrů. Síla je aplikována až do porušení vzorků. [22]

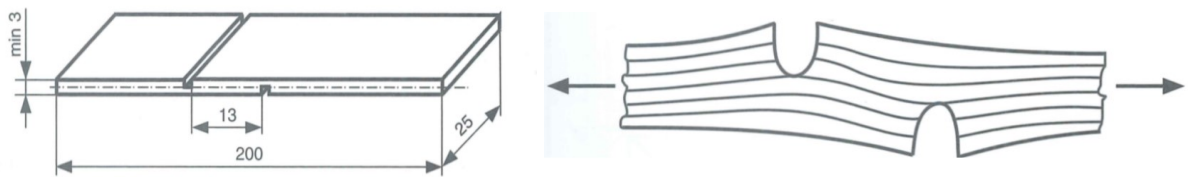


Obrázek 25: Schéma zkušební aparatury a rozměry vzorků pro metodu B. [22]

5.4 Zkoušky interlaminární smykové pevnosti

Interlaminární, neboli mezivrstevová, pevnost ve smyku je jednou z charakteristik kvality laminátových kompozitů. ILSS (interlaminar shear strength) závisí na vlastnostech matrice, adhezi mezi výztuží a maticí a také na typu a orientaci výztuže. Používají se hlavní dva typy této zkoušky (které opět existují v několika modifikacích). [1] [21]

První spočívá v namáhání vzorku předem opatřeného vruby (obr. 26) tahem, kdy při přetvoření tělesa dochází ke smykovému napětí mezi jednotlivými vrstvami laminátu. Tuto zkoušku popisují normy ASTM D 2730 nebo ČSN 64 0662. [1]

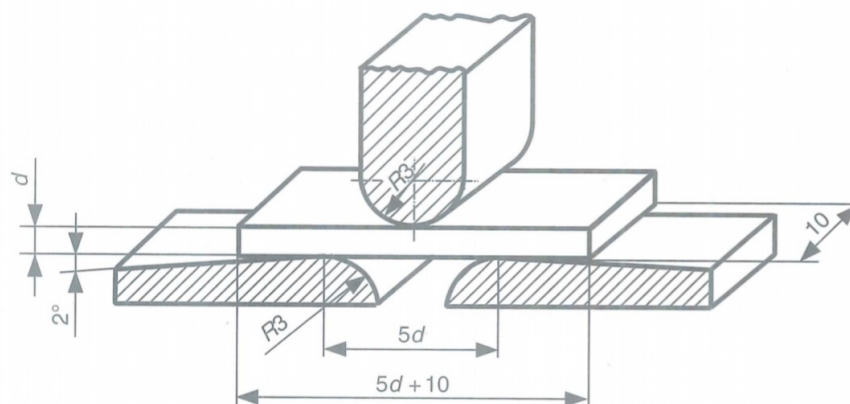


Obrázek 26: Schéma zkušebního vzorku a jeho přetvoření při zkoušce interlaminární smykové pevnosti [1]

Druhým způsobem je pak ohyb na krátkém nosníku (*Shear of Short-Beam*). Tato zkouška je velmi efektivní jako kontrola kvality laminátu. O výsledcích však hovoříme jako o zdánlivé interlaminární smykové pevnosti τ_{SBS} [MPa], neboť při tomto zatížení mohou vznikat i jiné módy porušení, než vyvolané smykovým napětím a je počítána podle vzorce (13). [21] [24]

$$\tau_{SBS} = 0,75 \cdot \frac{F_{max}}{S} \quad (13)$$

Kde: F_{max} – maximální zatěžující síla [N], S – plocha průřezu zkušebního vzorku [mm].



Obrázek 27: Schéma zkoušky ohybem na krátkém nosníku [1]

5.5 Dlouhodobé statické zkoušky

Vyztužené polymerní systémy jsou materiály, u kterých je předpokládána dlouhodobá životnost, a to především kvůli jejich odolnosti vůči okolnímu prostředí. Mimo to je ale podmínkou dlouhodobého používání, také udržení neměnných mechanických vlastností vlivem dlouhodobého zatížení. Jinými slovy, očekáváme od materiálu, že jeho tuhost, pevnost, či jiné vlastnosti, budou stále konstantní, nebo se alespoň nezmění natolik, aby byl již výrobek dále nepoužitelný, a to ani v řádech několika let či až desítek let. [1]

Z důvodu ověření těchto vlastností jsou tedy prováděny dlouhodobé statické mechanické zkoušky, a to hlavně zkoušky kríповých vlastností – tedy zvětšování deformace při konstantním dlouhodobém zatížení (tzv. tečení materiálu) a dále zkoušky relaxace, kdy je naopak materiál vystaven dlouhodobému působení konstantní deformace a je zjišťována změna napětí.

Statické zkoušky se provádí zejména při zatížení tahem (ČSN EN ISO 899-1), ale využívá se také namáhání tlakem, ohybem, krutem nebo kombinací, a to při jednoosém nebo víceosém namáhání. Kríповé vlastnosti se také zkoumají při teplotním zatížení nebo za vlivu okolního prostředí.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 NORMA ASTM D 4255

Jak již bylo několikrát zmíněno v kapitolách výše, chování kompozitních dílů při zatížení je velmi specifické. Norma ASTM D 4255 jež je náplní této práce se určena pro měření smykových vlastností laminátových struktur s vláknovou výztuží, a to jak dlouhovláknovou, krátkovláknovou, orientovanou i neorientovanou. Průběh a výsledky zkoušky mohou být ovlivněny použitým materiálem zkušebních těles, výrobní metodou zkušebních těles, podmínkami při výrobě i při měření (teplota, tlak, vlhkost), rychlostí zkoušky, nedostatky a poruchami zkušebních těles a také hmotnostním zastoupením výztuže v matrici. Rozměry zkušebních těles pro obě metody jsou znázorněny v kapitole 5.3.3., obrázky 24 a 25. [22]

6.1 Terminologie

Kvůli správnému vyhodnocení naměřených dat udává norma několik přesně definovaných pojmů.

In-plane shear stress – smykové napětí v rovině: je svázáno se smykovými silami působícími na okraj laminátu tak, že výsledné smykové deformace nastávají spíše v rovině laminátu, než přes jeho tloušťku.

Offset shear stress – posunuté smykové napětí: smykové napětí svázané s posunutím smykového modulu pružnosti podél osy napětí.

Shear strength – pevnost ve smyku: smykové napětí přenášené materiálem při porušení při zatížení čistým smykem.

Transition region – přechodná oblast: oblast křivky závislosti deformace na napětí, kdy při malém rozsahu napětí dochází k významné změně sklonu křivky. Tedy skokově nastávají velké změny deformace při malé změně napětí. To je způsobeno již podstatou vlastností kompozitních struktur, kdy existuje patrný rozdíl mezi napětím v podélném a napětím v příčném směru. Tento jev ale může být také zapříčiněn praskáním matrice nebo delaminací jednotlivých vrstev při zatěžování. [22]

6.2 Průběh a vyhodnocení zkoušky

Zkouška probíhá většinou do porušení zkušební tělesa. Zkušební tělesa pro metodu A jsou opatřena dvěma tenzometry, které jsou umístěny na středu zkušební tělesa z obou stran. Pro metodu B jsou použity tenzometry čtyři (viz obrázek 24, 25). Pro výpočet a určení materiálových vlastností a konstant jsou použita jak data z tenzometrů, tak i data ze zkušební stroje. [22]

6.2.1 Ohyb zkušební tělesa

První vyhodnocovanou veličinou je ohýbání zkušební tělesa (*bending*). To může způsobit rozdíly ve sklonu křivek v grafech závislosti napětí na deformaci pro obě strany vzorku. Aby byla tedy data z měření použitelná, musí být ohyb zkušební tělesa menší než 10 %. [22]

$$B_y = \frac{|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|}{|\varepsilon_1 + \varepsilon_2|} \cdot 100 \leq 10 \% \quad (14)$$

kde:

B_y – procentuální ohyb zkušební tělesa [%]

ε_1 – poměrná deformace z tenzometru 1 [-]

ε_2 – poměrná deformace z tenzometru 2 [-]

6.2.2 Smykové napětí

Smykové napětí je možno získat jak celkové (konečné) nebo v jakémkoli bodu zatěžování. Uvedené vzorce (15) a (16) platí pro metodu A – dvou konzolový systém. Při metodě B se za plochu S dosazuje hodnota $2S$. [22]

$$\tau_{max} = \frac{F_{max}}{S} \quad (15)$$

$$\tau_i = \frac{F_i}{S} \quad (16)$$

kde:

τ_{max} – konečné (celkové) smykové napětí [MPa]

F_{max} – síla přenášená zkušebním vzorkem, která je menší než síla při přetržení; nebo síla při 5% inženýrské (smluvní) smykové deformaci; nebo síla při limitu ohybu zkušební tělesa [N]

τ_i – smykové napětí v i -tém bodě dat [MPa]

F_i – síla v i -tém bodě dat [N]

S – plocha průřezu vypočtena jako součin průměrné délky a průměrné tloušťky [mm²]

6.2.3 Poměrná smyková deformace

Pokud je nutno vypočítat smykový modul pružnosti, určí se nejprve poměrná smyková deformace pro každý i -tý datový bod z hodnot poměrných normálových deformací v pootočených směrech $+45^\circ$ a -45° . Výsledky se pak zaokrouhlují na tři platné číslice. [22]

$$\gamma_i = |\varepsilon_{+45^\circ}|_i + |\varepsilon_{-45^\circ}|_i \quad (17)$$

kde:

γ_i – poměrná smyková deformace v i -tém bodě dat [-]

$\varepsilon_{+45^\circ i}$ – poměrná deformace ve směru $+45^\circ$ [-]

$\varepsilon_{-45^\circ i}$ – poměrná deformace ve směru -45° [-]

6.2.4 Modul pružnosti ve smyku

Smykový modul pružnosti pak lze určit z následujícího vztahu (6). [22]

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (18)$$

kde:

G – modul pružnosti ve smyku [MPa]

τ – smykové napětí [MPa]

γ – poměrná smyková deformace [-]

7 ZKUŠEBNÍ STROJE PRO ZKOUŠKU ASTM D 4255

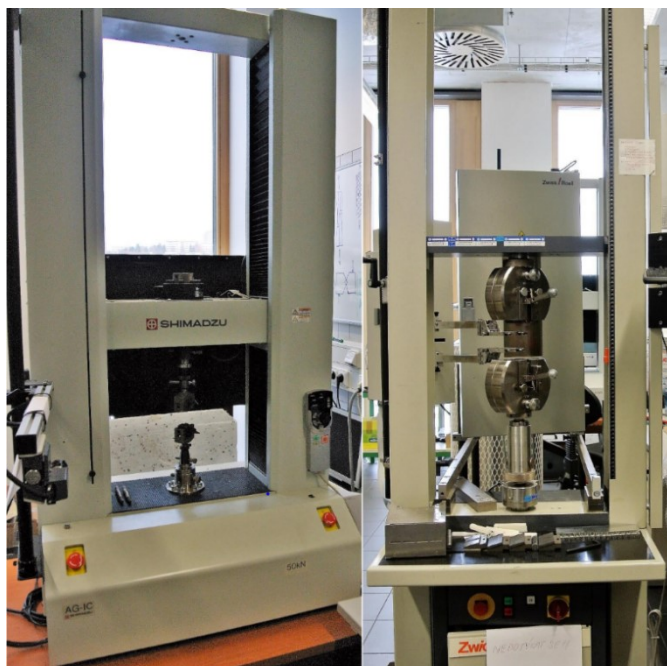
Přípravek, jehož návrh je cílem praktické části této práce, by bylo možno používat v laboratoři Ústavu výrobního inženýrství v budově Fakulty technologické UTB U15. Konkrétně se jedná o stroje Shimadzu AG-IC a Zwick 1456. Maximální síla obou strojů je 20 kN.

7.1 Zkušební stroj Shimadzu AG-IC

Je univerzální zkušební stroj pro měření mechanických vlastností materiálů při namáhání v tahu, tlaku či ohybu. Na rozdíl od druhého zkušebního stroje, je na tomto stroji možno vzorky namáhat i nízkocyklovým zatížením. Dalším rozdílem je také možnost využití video extenzometru. Měření s ním je totiž přesnější, protože při klasickém měření pomocí posunu příčnicku vznikají chyby dané vůli jednotlivých částí stroje. Videoextenzometr ale není vhodné používat při malých deformacích.

7.2 Zkušební stroj Zwick 1456

Také se jedná o univerzální zkušební stroj pro měření vlastností při tahovém, tlakovém a ohybovém namáhání. Měření deformace zde probíhá pomocí příčnicku, popřípadě mohou být také použity extenzometry umístěny přímo na zkušebním tělese.



Obrázek 28: Shimadzu AG-IC (vlevo), Zwick 1456 (vpravo). [23]

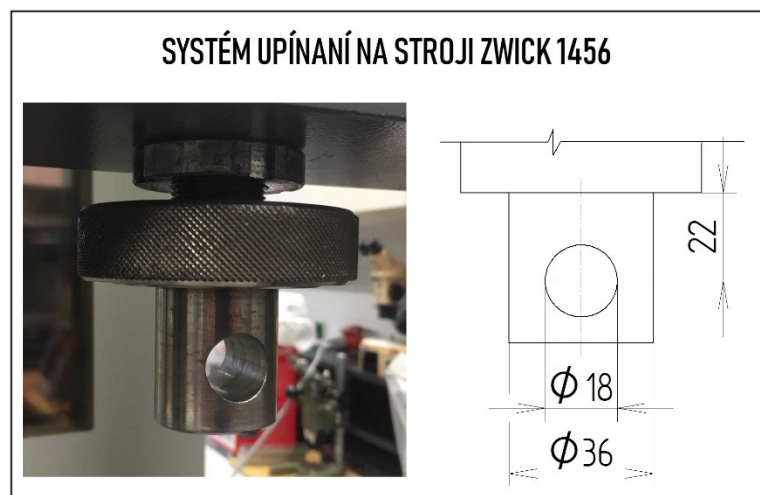
7.3 Upnutí přípravků na zkušebních strojích

Na zkušební stroj Shimadzu se přípravky upínají přes trubku o vnitřním průměru 35 mm, zajištění pak probíhá pomocí válcového kolíku o průměru 12 mm. Na stroj Zwick se přípravky upínají pomocí válcového čepu o průměru 36 mm a kolíkem o průměru 18 mm.

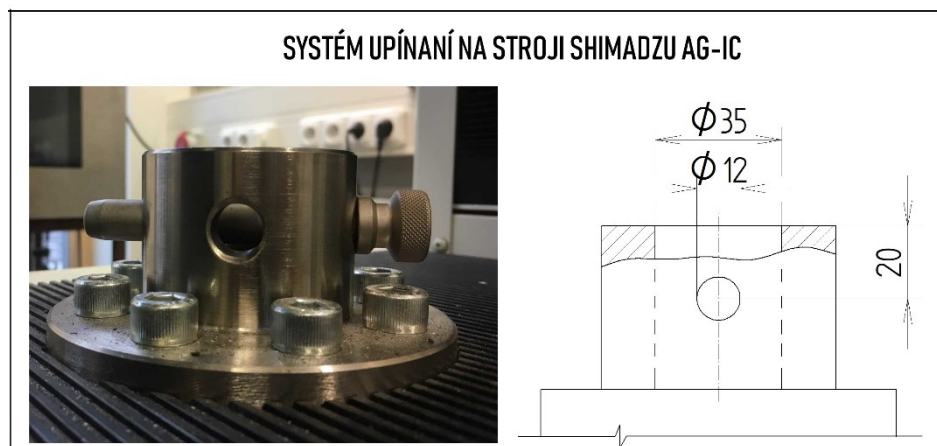
Přípravek metody B není nutno do strojů upínat, *podstava* se postaví na spodní část stroje, a na součást *střední konzola nosná* (viz kapitola 8.2) se tlačí přímo horní částí stroje.

Naopak přípravek A (kapitola 8.1) je konstruován pro posuv příčnicku směrem nahoru, musí být tedy upnut. Upnutí probíhá za součást *upínač*, která má válcovou část o průměru 35 mm s otvorem průměru 12 mm, tak aby šla upnout přímo na stroj Shimadzu. Pro upnutí na stroj Zwick se pak využije redukce, která je již vyrobena a v laboratoři se běžně používá.

Na obrázcích níže jsou pak fotky upínacích mechanismů obou strojů a schematicky znázorněny rozměry důležité pro konstrukci přípravku.



Obrázek 29: Upínání na stroji Zwick



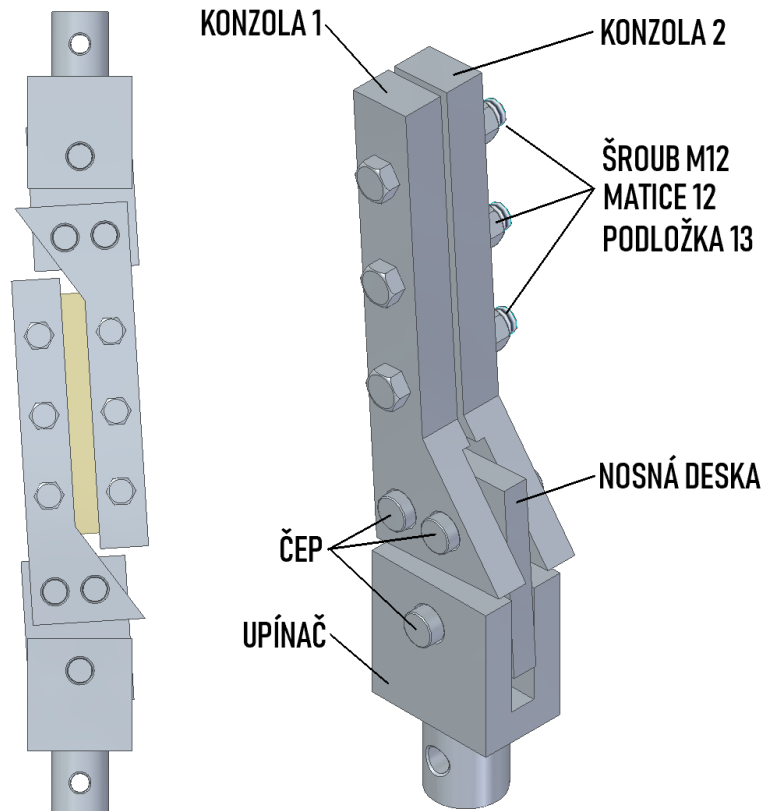
Obrázek 30: Upínání na stroji Shimadzu

8 KONSTRUKČNÍ NÁVRH PŘÍPRAVKŮ

Jak již bylo zmíněno v kapitole 5.3.3, měření smykových vlastností kompozitů podle normy ASTM D 4255 je možno provádět podle dvou metod. Metoda A využívá vedení ve dvou párech konzol (rail), kdy je přípravek namáhán silou ve směru tahu a v samotném vzorku pak vznikají smyková napětí. Při metodě B je využito tří-konzolového systému upnutí vzorku a přípravek je pak namáhám silou tlakovou. Ke konstrukčnímu návrhu obou přípravků byl použit program Solid Edge 2019, verze pro studijní účely.

8.1 Přípravek pro metodu A

Horní a dolní část přípravku jsou připojeny k univerzálnímu zkušebnímu stroji. Obě podstavy jsou totožné a skládají se pak ze dvou zrcadlově podobných konzol, které jsou pomocí čepů spojeny s nosnou deskou. Ta je dalším čepem spojena s upínačem, který je pak připojen na trhací stroj. Vzhledem k tomu, že se přípravek nebude zatím vyrábět, nebylo konstruováno spojení upínače a zkušebního stroje. To by ale bylo řešeno pomocí redukce. Vzorek je mezi konzoly upevněn třemi šrouby M12 na obou párech konzol (celkem tedy šest šroubů).



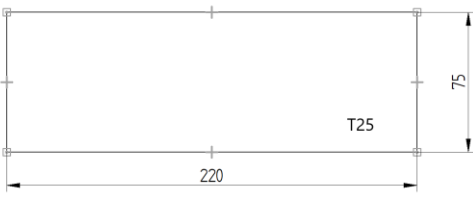
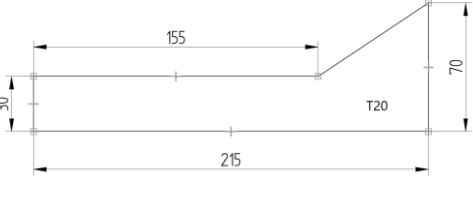
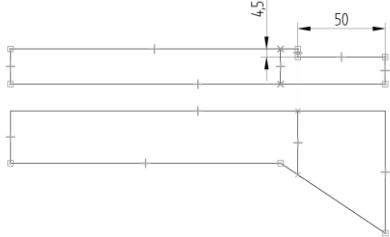
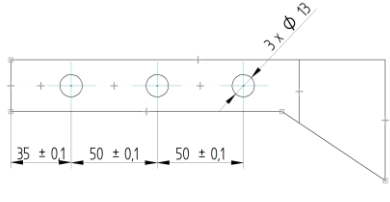
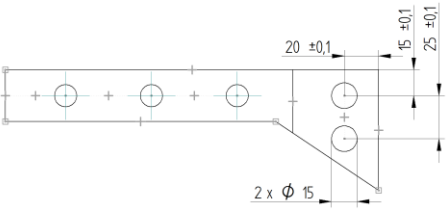
Obrázek 31: Celková sestava přípravku (vlevo), podstava spodní části přípravku (vpravo).

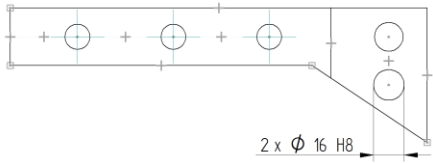
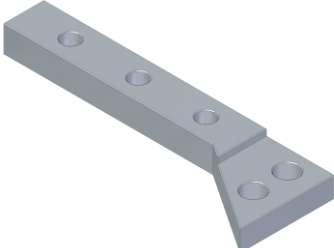
8.1.1 Technologický postup výroby – Konzola 1, Konzola 2

Pro obě součásti volím stejný materiál i polotovar. Součásti jsou zrcadlové kopie, a proto zde uvádím technologický postup pouze pro jednu součást.

Materiál 1.0060 (11 600), polotovar PLO 75 x 25 – 220 ČSN 42 5522.

Tabulka 2: Technologický postup – Konzola 1, Konzola 2.

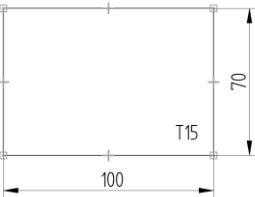
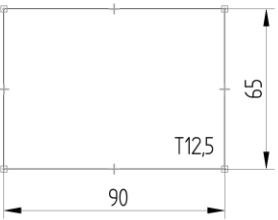
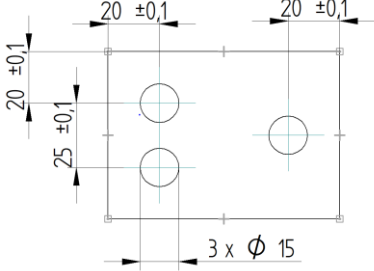
Číslo op.	Popis operace	Schéma	Stroj	Nástroj
1	Řezat polotovar		Pásová pila	Pilový list
2	Frézovat konturu, horní plochu, otočit, frézovat spodní plochu		CNC obráběcí centrum	Fréza válcová čelní Ø10 mm
3	Frézovat vybrání		CNC obráběcí centrum	Fréza válcová čelní Ø18 mm
4	Vrtat díru, 3x Ø13 mm, srazit hrany 1 x 45°		CNC obráběcí centrum	Vrták Ø13 mm
5	Vrtat díru 2x Ø15 mm		CNC obráběcí centrum	Vrták Ø15 mm

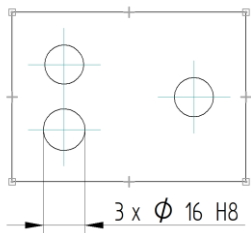
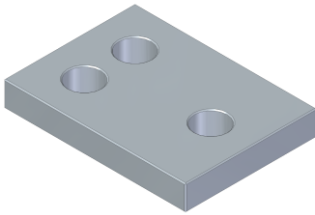
6	Dokončit díru 2x Ø16H8, srazit hrany děr 1 x 45°		CNC ob- ráběcí centrum	Výhrub- ník, vý- stružník 16H8
7	Odjehlit, srazit hrany 0,5 x 45°		Ručně	Odjehlo- vací nůž

8.1.2 Technologický postup výroby – Nosná deska

Volím materiál 1.0060 (11 600), polotovar PLO 70 x 15 – 100 ČSN 42 5522.

Tabulka 3: Technologický postup – Nosná deska.

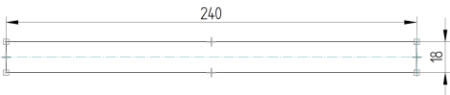
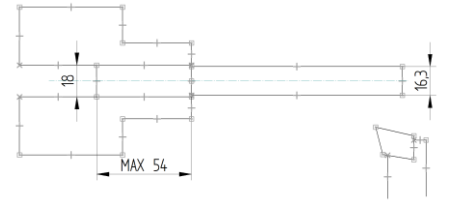
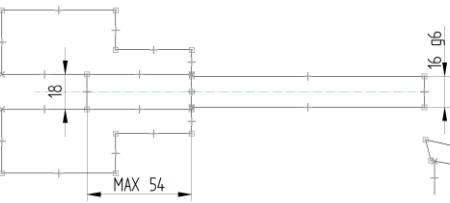
Číslo op.	Popis operace	Schéma	Stroj	Nástroj
1	Řezat poloto- var		Pásová pila	Pilový list
2	Frézovat konturu, horní plochu, otočit, dru- hou plochu		CNC ob- ráběcí centrum	Fréza vál- cová čelní Ø18 mm
3	Vrtat díry, 3x Ø15 mm, srazit hrany děr 1 x 45°		CNC ob- ráběcí centrum	Vrták Ø15 mm

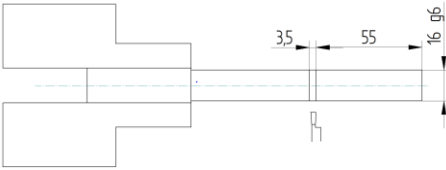
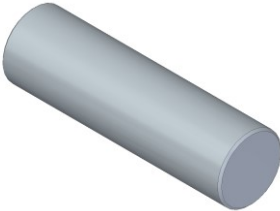
4	Dokončit díry, 3x Ø16H8, srazit hrany děr 1 x 45°		CNC obráběcí centrum	Výhrubník, výstružník 16H8
5	Odjehlit, srazit hrany 0,5 x 45°		Ručně	Odjehlovací nůž

8.1.3 Technologický postup výroby – Čep

Čep je v každé podsestavě třikrát, celkem je tedy potřeba šest kusů. Kvůli snadné montáži přípravku je nutno zaručit vůli mezi čepem a dírou, do které bude vložen. Uložení bylo tedy zvoleno 16 H8/g6. Jako materiál volím 1.0038 (11 373), který je běžně sehnatelný jako tyčovina v malých průměrech. Polotovar volím tyč Ø18 – 240 ČSN 42 5510. Z polotovaru se vyrobí tři čepy, které se osoustruží a poté upíchnou zapichovacím nožem. Zároveň ale vznikne odpad v podobě nevyužitého materiálu, který bude upnut ve sklícidle.

Tabulka 4: Technologický postup – Čep.

Číslo op.	Popis operace	Schéma	Stroj	Nástroj
1	Řezat polotovar		Pásová pila	Pilový list
2	Upnout za Ø18, hrubovat na Ø16,5 mm		CNC obráběcí centrum (soustruh)	Ubírací nůž pravý
3	Dokončit Ø16g6		CNC obráběcí centrum (soustruh)	Ubírací nůž pravý

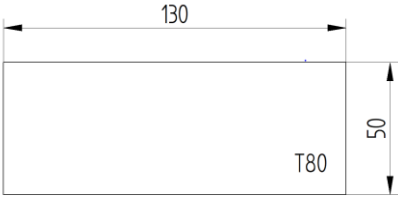
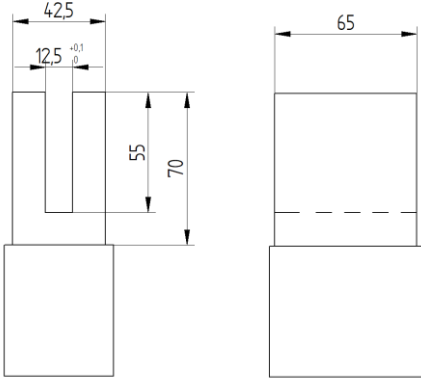
4	Upíchnout 3x po délce 55 mm (šířka zápi- chu 3,5 mm)		CNC ob- ráběcí centrum (soustruh)	Zapicho- vací nůž pravý
5	Odjehlit		Ručně	Ojehlo- vací nůž

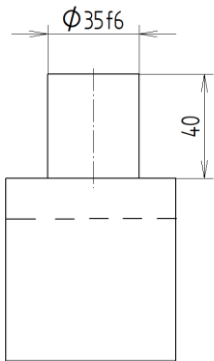
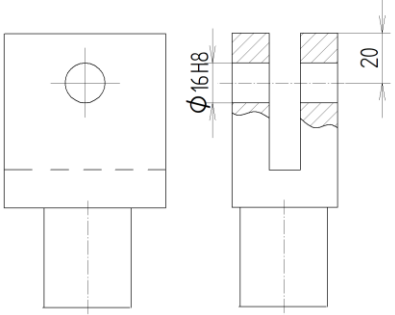
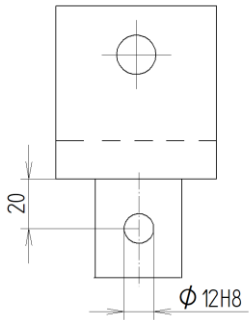
8.1.4 Technologický postup výroby – Upínač

Volím materiál 1.0060 (11 600), polotovar PLO 80 x 50 – 115 ČSN 42 5522.

Pro operaci číslo 4 (vrtání, vyhrubování a vystružování díry 16H8) jsem volil přeupnutí na sloupovou vrtačku. Tato operace by ale byla také proveditelná na frézovacím centru, stejně jako u dalších součástí, kde bylo takto voleno.

Tabulka 5: Technologický postup – Upínač.

Číslo op.	Popis operace	Schéma	Stroj	Nástroj
1	Řezat poloto- var		Pásová pila	Pilový list
2	Upnout do svěráku za délku 40 mm a) frézovat konturu b) frézovat drážku		CNC ob- ráběcí centrum (frézka)	a) Fréza válcová čelní Ø18 mm b) fréza válcová Ø8 R1

3	Otočit, upnout za délku 65 mm, a) hrubovat $\text{Ø}35,5 \text{ mm}$ b) dokončit $\text{Ø} 35 \text{ f6}$		CNC obráběcí centrum (frézka)	a) Fréza válcová čelní $\text{Ø} 18 \text{ mm}$ b) fréza válcová $\text{Ø} 10 \text{ mm}$
4	a) Vrtat díru $\text{Ø}15 \text{ mm}$ b) dokončit díru $\text{Ø}16\text{H}8$, srazit hrany otvorů $1 \times 45^\circ$		Sloupová vrtačka	a) Vrták $\text{Ø}15 \text{ mm}$ b) výhrubník, výstružník 16H8
5	a) Vrtat díru $\text{Ø}11,25 \text{ mm}$ b) dokončit díru $\text{Ø}12\text{H}8$, srazit hrany otvorů $1 \times 45^\circ$		Sloupová vrtačka	a) Vrták $\text{Ø}11,25 \text{ mm}$ b) výhrubník, výstružník 12H8

8.1.5 Normalizované součásti

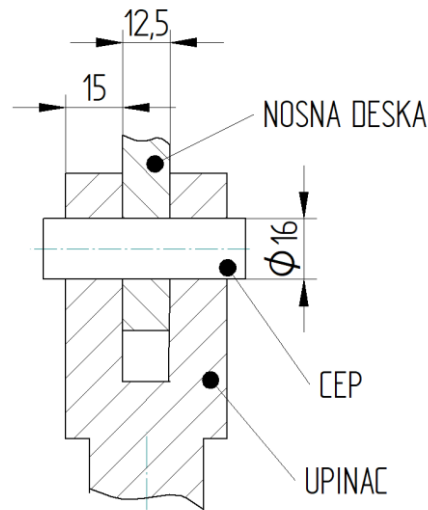
Pro sestavení přípravku podle metody A je také nutno šest šroubů, matic a podložek. Jedná se o normalizované součásti, které tedy není nutno vyrábět.

Tabulka 6: Normalizované součásti pro přípravek metody A

Součást	Norma ČSN	Norma ISO	Počet kusů
Šroub M12 – 65	02 1103	4017	6
Matice M12	02 1491	10 511	6
Podložka 13	02 1703	7092	6

8.1.6 Pevnostní výpočet

Maximální síla, kterou jsou schopny zkušební stroje v laboratoři ÚVI vyvinout je 20 kN. Jako kritické místo bylo zvoleno spojení nosné desky a upínače přes válcový čep.



Obrázek 32: Schéma pro pevnostní výpočet pro metodu A

Dovolené napětí ve smyku volím $\tau_{DS} = 80 \text{ MPa}$, Dovolené otažení volím $p_D = 120 \text{ MPa}$.
Kontrolovaný průměr čepu $d = 16 \text{ mm}$, délka uložení v nosné desce $l = 12,5 \text{ mm}$.

Kontrola čepu na smyk/střih:

$$\tau_s = \frac{F}{S} \leq \tau_{DS} \quad (19)$$

$$\tau_s = \frac{F}{2 \cdot \frac{\pi d^2}{4}} \leq \tau_{DS}$$

$$\tau_s = \frac{20\,000}{2 \cdot \frac{\pi \cdot 16^2}{4}} = 49,7 \text{ MPa} \rightarrow \text{vyhovuje}$$

Kontrola čepu na otažení:

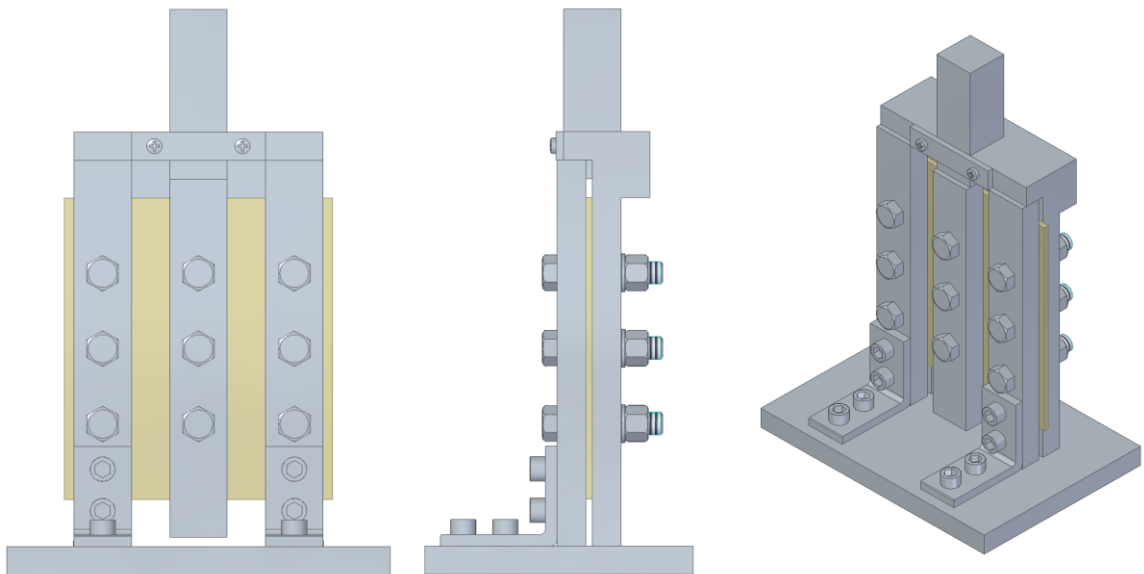
$$p = \frac{F}{S} \leq p_D \quad (20)$$

$$p = \frac{F}{d \cdot l} \leq p_D$$

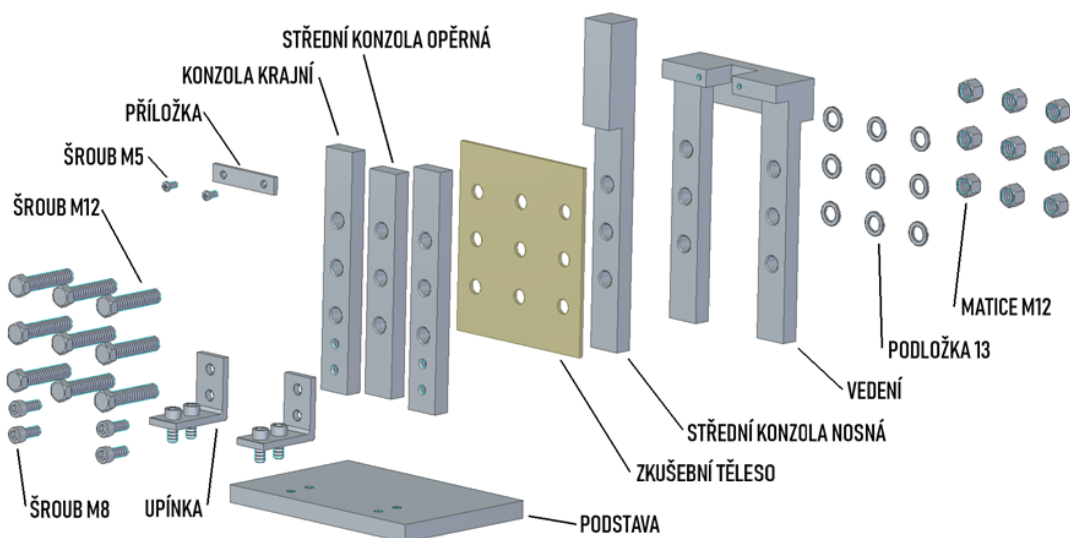
$$p = \frac{20\,000}{16 \cdot 12,5} = 100 \text{ MPa} \rightarrow \text{vyhovuje}$$

8.2 Přípravek pro metodu B

Při metodě B (*Three-Rail Shear Test*) je vzorek upnut mezi tři páry konzol pomocí devíti šroubů M12. Přípravek se skládá z podstavy, které je připevněna k trhačím stroji. Krajní konzoly jsou pomocí upínek a šroubů M8 spojeny s podstavou. Zadní stranu krajních konzol tvoří součást vedení. Střední konzola je také tvořena ze dvou částí, mezi kterými je umístěn vzorek. Střední konzola je vedena ve vedení, kde je její poloha zabezpečena pomocí příložky, a je připevněna k horní čelisti trhačího stroje. Celková sestava a jednotlivé součásti jsou vyobrazeny na obrázcích 31 a 32.



Obrázek 33: Sestava přípravku pro zkoušku ASTM 4255 metoda B

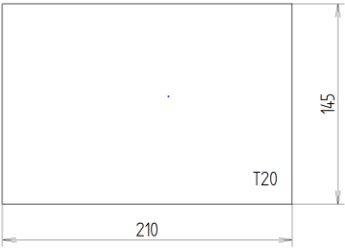
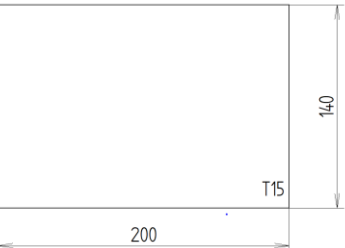
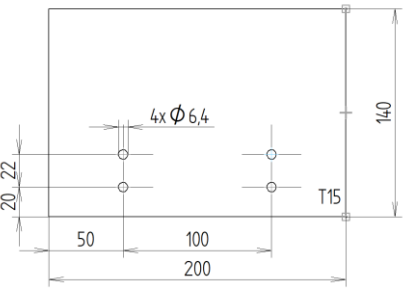
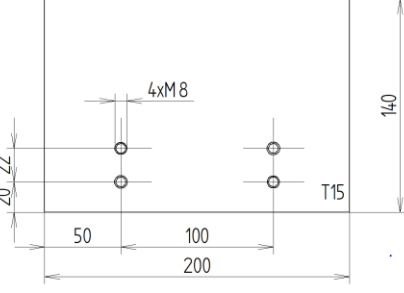


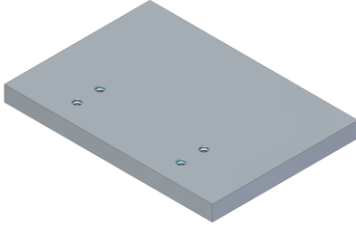
Obrázek 34: Komponenty sestavy přípravku pro metodu B.

8.2.1 Technologický postup výroby – Podstava

Volím materiál 1.0060 (11 600), polotovar P20 - 210 x 145 ČSN 42 5301. Součást podstava je spojena s trhacím strojem. Protože se přípravek prozatím vyrábět nebude, nebyl řešen způsob spojení s trhacím strojem. Pro tento účel by ale byla vytvořena redukce pro čelist trhacího stroje.

Tabulka 7: Technologický postup výroby – Podstava.

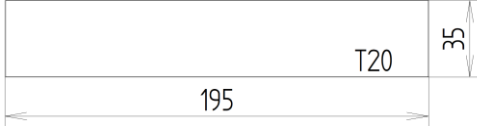
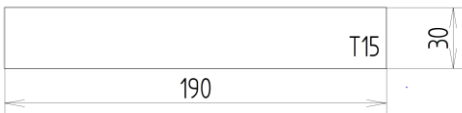
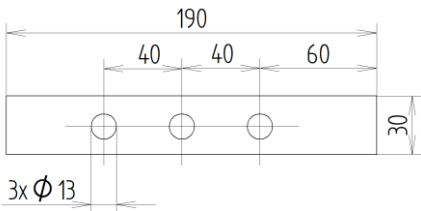
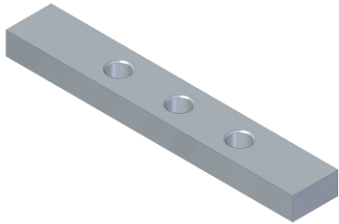
Číslo op.	Popis operace	Schéma	Stroj	Nástroj
1	Řezat polotovar		Pásová pila	Pilový list
2	Frézovat konturu, plochu, otočit, frézovat druhou plochu		CNC obráběcí centrum (frézka)	Fréza válcová čelní Ø18 mm
3	Vrtat díry 4x Ø6,4 mm, skrz celou tloušťku		Sloupová vrtačka	Vrták Ø6,4 mm
4	Řezat závit 4x M8 po celé hloubce díry		Sloupová vrtačka	Závitník M8

5	Odjehlít, srazit hrany děr 0,5 x 45°		Ručně	Odjehlovací nůž
---	--------------------------------------	--	-------	-----------------

8.2.2 Technologický postup výroby – Střední konzola opěrná

Volím materiál 1.0060 (11 600), polotovar PLO 35 x 20 - 200 ČSN 42 5522.


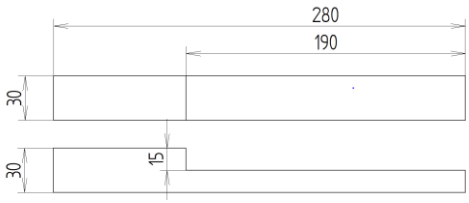
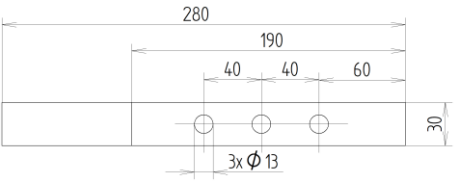
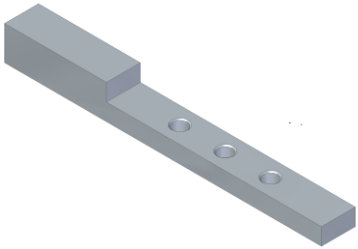
Tabulka 8: Technologický postup – Střední konzola opěrná

Číslo op.	Popis operace	Schéma	Stroj	Nástroj
1	Řezat polotovar		Pásová pila	Pilový list
2	Frézovat konturu a plochy		CNC obráběcí centrum (frézka)	Fréza válcová čelní Ø10 mm
3	Vrtat díry 3x Ø13 mm		Sloupová vrtačka	Vrták Ø13 mm
4	Odjehlít, srazit hrany děr		Ručně	Odjehlovací nůž

8.2.3 Technologický postup výroby – Střední konzola nosná

Materiál volím 1.0060 (11 600), polotovar pak PLO 35x35 – 285 ČSN 42 5522. Horní část součásti by se při použití přípravku pro měření připojila k horní čelisti trhacího stroje.



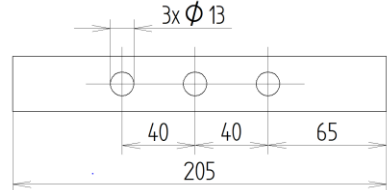
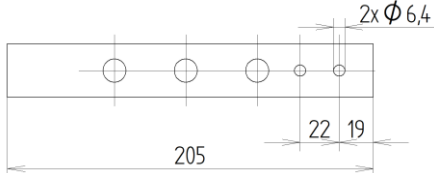
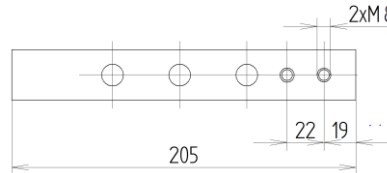
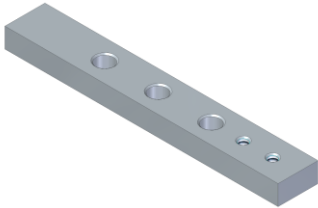
Tabulka 9: Technologický postup – Střední konzola nosná.

Číslo op.	Popis operace	Schéma	Stroj	Nástroj
1	Řezat polotovar		Pásová pila	Pilový list
2	Frézovat konturu, vybrání a plochy		CNC obráběcí centrum (frézka)	Fréza válcová čelní Ø10 mm
3	Vrtat díry 3x Ø13 mm, skrz		Sloupová vrtačka	Vrták Ø13 mm
4	Odjehlit, srazit hrany děr		Ručně	Odjehlovací nůž

8.2.4 Technologický postup výroby – Konzola krajní

Použitý materiál volím 1.0060 (11 600), polotovar PLO 35 x 20 - 210 ČSN 42 5522. V sestavě je tato položka dvakrát.

Tabulka 10: Technologický postup – Konzola krajní.

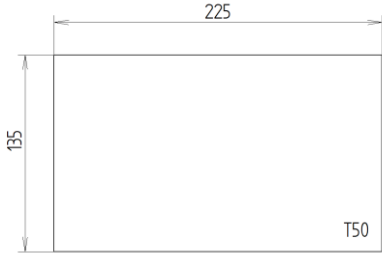
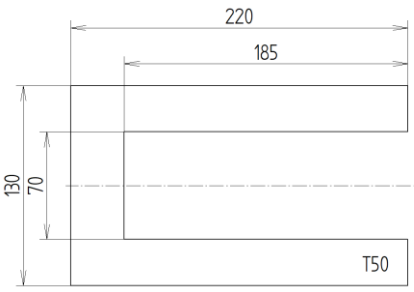
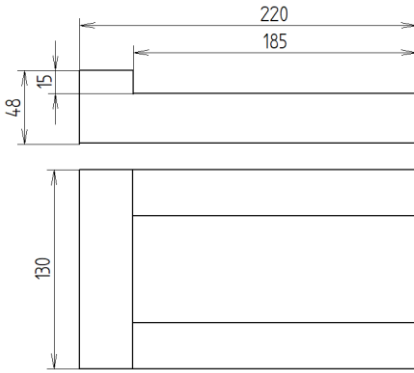
Číslo op.	Popis operace	Schéma	Stroj	Nástroj
1	Řezat polotovar		Pásová pila	Pilový list
2	Frézovat konturu a plochy		CNC obráběcí centrum (frézka)	Fréza válcová čelní Ø10 mm
3	Vrtat díry 3x Ø13 mm		Sloupová vrtačka	Vrták Ø13 mm
4	Vrtat díry 2x Ø6,4 mm		Sloupová vrtačka	Vrták Ø6,4 mm
5	Řezat závit 2x M8 po celé hloubce díry		Sloupová vrtačka	Závitník M8
6	Odjehlit, srazit hrany děr		Ručně	Odjehlovací nůž

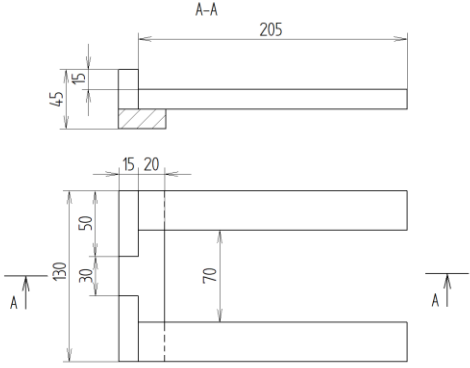
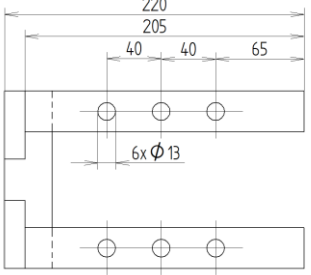
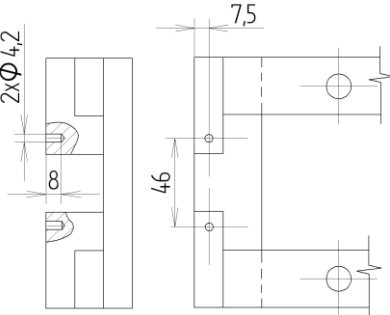
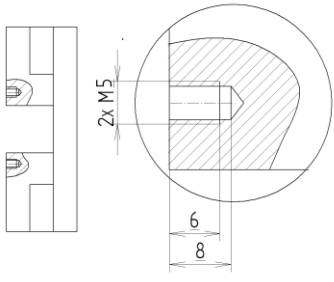
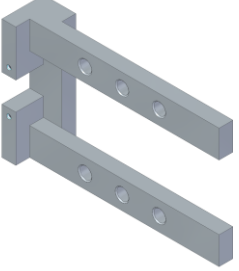
8.2.5 Technologický postup výroby – Vedení

Pro výrobu této součásti je možné zvolit hned několik strategií. Tvar U, který výsledná součást připomíná, by se mohl vyrobit ze tří samostatných částí, které by se poté spojili pomocí šroubového spojení nebo svaru. V takovém případě by však mohla být otázkou tuhost celé sestavy. Při svařování by musel být použit svařitelný materiál a muselo by být zajištěno dodržení geometrického tvaru součásti.

Pro výrobu součásti vedení byla zvolena technologie obrábění (frézování), kdy velký kus odpadu, který vznikne při vyfrézování střední části, může být použit jako polotovar pro další součásti. Materiál volím 1.0060, polotovar PLO 135 x 50 – 225 ČSN 42 5522.

Tabulka 11: Technologický postup výroby – Vedení.

Číslo op.	Popis operace	Schéma	Stroj	Nástroj
1	Řezat polotovar		Pásová pila	Pilový list
2	Frézovat konturu		CNC obráběcí centrum (frézka)	Fréza válcová čelní Ø10 mm
3	Frézovat vybrání, plochu		CNC obráběcí centrum (frézka)	Fréza válcová čelní Ø10 mm


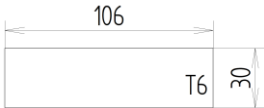
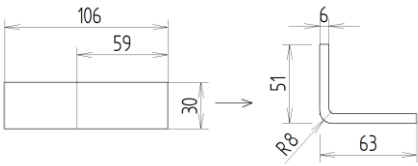
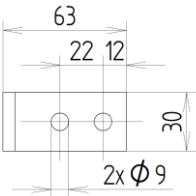
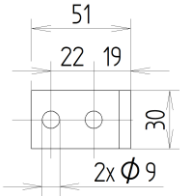
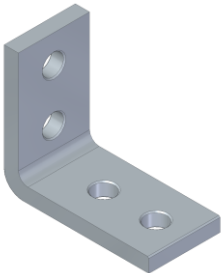
4	Otočit, frézovat vybrání		CNC obráběcí centrum (frézka)	Fréza válcová čelní Ø10 mm
5	Vrtat díry 6x Ø13 mm, skrz		Sloupová vrtačka	Vrták Ø13 mm
6	Vrtat díry 2x Ø4,2 mm		Sloupová vrtačka	Vrták Ø4,2 mm
7	Řezat závit 2x M5		Sloupová vrtačka	Závitník M5
8	Odjehlít, srazit hrany děr		Ručně	Odjehlovací nůž

8.2.6 Technologický postup výroby – Upínka

V sestavě jsou upínky dvě – jedná se ohnuté plechové součásti, které spojují podstavu s krajními konzolami a to za pomoci šroubů M8 s vnitřním šestihranným vybráním (inbus).

Materiál volím 1.0025 (11 375), polotovar P6 - 32 x 108 ČSN 42 5301.

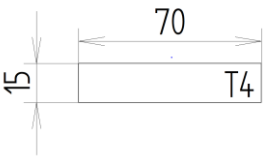
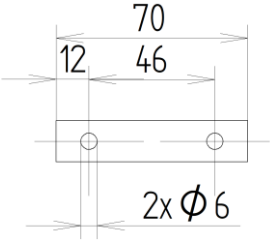
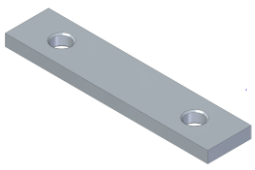
Tabulka 12: Technologický postup výroby – Upínka

Číslo op.	Popis operace	Schéma	Stroj	Nástroj
1	Řezat polotovar		Pásová pila	Pilový list
2	Frézovat konturu		CNC obráběcí centrum	Fréza válcová čelní Ø10 mm
3	Ohnout		Univerzální ohýbací stroj	Ohýbadlo
4	Vrtat 2x díru Ø 9 mm		Sloupová vrtačka	Vrták Ø 9 mm
5	Vrtat 2x díru Ø 9 mm		Sloupová vrtačka	Vrták Ø 9 mm
6	Odjehlít, srazit hrany děr		Ručně	Odjehlňovací nůž

8.2.7 Technologický postup výroby – Příložka

Příložka je pomocí dvou šroubů M5 připevněna k vedení a slouží k udržení střední konzoly ve správné pozici. Materiál 1.0025 (11 375), polotovar P4 - 15 x 70 ČSN 5301.

Tabulka 13: Technologický postup výroby – Příložka.

Číslo op.	Popis operace	Schéma	Stroj	Nástroj
1	Řezat polotovar		Pásová pila	Pilový list
2	Vrtat díru 2x Ø6 mm		Sloupová vrtačka	Vrták Ø 6 mm
3	Odjehlít, srazit hrany		Ručně	Odjehlovací nůž

8.2.8 Normalizované součásti

V následující tabulce je seznam normalizovaných součástí pro sestavu přípravku pro měření smykových vlastností kompozitů metodou B.

Tabulka 14: Normalizované součásti pro přípravek metody B.

Součást	Norma ČSN	Norma ISO	Počet kusů
Šroub M12 - 55	02 1103	4017	9
Matice M12	02 1491	10 511	9
Podložka 13	02 1703	7092	9
Šroub M8 - 20	02 1143	4762	8
Šroub M5 - 10	02 1138	7045	2

ZÁVĚR

Teoretická část této bakalářské práce se zabývá literární rešerší v oblasti kompozitních materiálů. Jsou zde popsány vlastnosti, jež jsou důvodem pro využívání kompozitů v nejrůznějších aplikacích. Jedná se hlavně o relativně nízké náklady na výrobu, prakticky žádné náklady na dlouhodobou údržbu, a nízkou hmotnost, které je ale doprovázena velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. V teoretické části jsou také popsány materiály, tvary a druhy výztuží i matric, technologie výroby a vady kompozitních materiálů. Na tyto informace pak navazuje kapitola o mechanických zkouškách kompozitních materiálů. Jsou prováděny jak zkoušky běžně používané pro všechny druhy materiálů, tak i zkoušky navrhnuté speciálně pro problematiku kompozitních, nejčastěji laminátových, struktur.

Praktická část se pak týká navrhnutí dvou přípravků pro měření smykových vlastností kompozitů podle normy ASTM D 4255 a také popsaní průběhu a vyhodnocení zkoušky. Přípravek pro metodu A (Two-Rail Shear Test) využívá upnutí zkušební tělesa mezi dva páry konzol. Při použití metody B (Three-Rail Shear Test) se zkušební těleso upíná mezi tři páry konzol. Rozměry přípravku byly navrženy tak, aby přípravek vydržel maximální sílu, kterou jsou schopny vyvinout trhací stroje v laboratořích ÚVI a to 20 kN. Ke všem součástem obou sestav byly vypracovány technologické postupy, kdy byla snaha navrhnout výrobu na takových strojích, které jsou ve vlastnictví Ústavu výrobního inženýrství, FT UTB. Výkresová dokumentace všech součástí, včetně výkresů sestavení, je součástí přílohy. Pokud by se přípravky vyrobily, bylo by je možno používat při výuce nebo pro účely výzkumu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [3] ŽALUDEK, Milan. *Přednášky - Zpracovatelské inženýrství kompozitů*. UTB - Zlín, 2018.
- [4] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. *Vláknové kompozity: celostátní vysokoškolská příručka pro vysoké školy technické*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [5] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [6] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-7080-568-4.
- [7] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-7043-273-X.
- [8] MALLICK, P. K. *Composites engineering handbook*. New York: M. Dekker, c1997. Materials engineering (Marcel Dekker, Inc.), 11. ISBN 0824793048.
- [9] ISLAM KIRON, Mazharul. *Introduction of Glass Fiber* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: http://textilelearner.blogspot.com/2011/08/glass-fiber-types-of-glass-fiber_3834.html
- [10] *Nomex®* [online]. 2014 [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: http://www2.dupont.com/Czech_Republic_Country_Site/cs_CZ/Products_and_Services/Products/nomex.html
- [11] *Kevlar®* [online]. 2014 [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: http://www2.dupont.com/Czech_Republic_Country_Site/cs_CZ/Products_and_Services/Products/kevlar.html

- [12] TALIKOTI, Rajashekhar Siddappa a Sachin Balkrishna KANDEKAR. *Strength and Durability Study of Concrete Structures Using Aramid-Fiber-Reinforced Polymer* [online]. Sandip Institute of Engineering and Management, Nashik 422213, MS, India, 2019 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2079-6439/7/2/11>
- [13] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Strojírenské materiály*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02798-8.
- [14] *Carbon fiber rc aircraft wing* [online]. In: . [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://www.rcgroups.com/forums/attachment.php?attachmentid=5330629>
- [15] *5 Most Significant Applications of Carbon Fiber Components Across Industries* [online]. 2018, , 1 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://cacomposites.blogspot.com/2018/10/5-most-significant-applications-of-carbon-fiber-components-across-industries.html>
- [16] Technologie, jejich popis a schémata. *Havel Composites* [online]. [cit. 2019-01-20]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>
- [17] VOJTĚCH, D. *Kompozitní materiály* [online]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2005 [cit. 2019-02-16]. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-568-4/pdf/170.pdf
- [18] *Composite Sandwich* [online]. In: . [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Vo%C5%A1tina_\(konstrukce\)#/media/File:CompositeSandwich.png](https://cs.wikipedia.org/wiki/Vo%C5%A1tina_(konstrukce)#/media/File:CompositeSandwich.png)
- [19] AMIRI, Ali. *Transverse force and moment diagrams for three point and four point bending setups* [online]. In: . [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Transverse-force-and-moment-diagrams-for-three-point-and-four-point-bending-setups-48_fig3_276207310
- [20] *Mechanical Testing of Composites* [online]. , 47 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: https://nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IISc-BANG/Composite%20Materials/pdf/Lecture_Notes/LNm10.pdf

- [21] CABRNOCH, Bohuslav. *Porovnání zkušebních metod pro měření interlaminárnímýkové pevnosti laminátů: Mechanické charakteristiky z hlediska návrhu kompozitních konstrukcí* [online]. 21. 12. 2012, , 25 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: http://www.csm-kompozity.wz.cz/ILSS_Cabrnoch_2010.pdf
- [22] *Standard Test Method For In-Plane Shear Properties of Polymer Matrix Composite Materials by the Rail Shear Method*. 2. vyd. West Conshohocken, PA, United States: ASTM International, 2015.
- [23] *Katalog: strojní, přístrojové a laboratorní vybavení ÚVI: Stroj zkušební univerzální (trhací)*. FT UTB Zlín, 2019.
- [24] DOUBRAVA, Karel. *Methods and standards for testing of composite materials*. Praha: Faculty of Mechanical Engineering, CTU in Prague, 2016.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

a_N	Vrubová houževnatost
ARALL	Aramid aluminium laminates (aramidovo-hliníkové lamináty)
ASTM	American society of testing materials (Americká společnost pro testování materiálů)
a_U	Rázová houževnatost
BORSIC	Borovo-karborundová vlákna
By	Procentuální ohyb zkušebního tělesa
C-C	Kompozit typu Carbon-Carbon (uhlík-uhlík)
CNC	Computer numerical control (číslicově řízený počítačem)
ČSN	Česká technická norma
d	Průměr
E	Modul pružnosti v tahu
EN	Mezinárodní evropská norma
F	Síla
F_i	Síla v i-tém bodě dat
F_{max}	Síla přenášená zkušebním vzorkem, která je menší než síla při přetržení; nebo síla při 5% inženýrské (smluvní) smykové deformaci; nebo síla při limitu ohybu zkušebního tělesa
G	Modul pružnosti ve smyku
G	Gravitační síla kladiva
GMT	Glass reinforced thermoplastics matrix composites (sklem vyztužené termoplastické kompozity)
h	Tloušťka profilu ve směru zatížení
H	Počáteční výška kladiva
h	Výška, do které se kladivo dostane po přeražení vzorku

h	Tloušťka vzorku
ILSS	Interlaminare shear strength (mezivrstevová pevnost ve smyku)
ISO	Mezinárodní světová norma
kN	Kilonewton
l	Délka
L	Pracovní délka
M_{omax}	Maximální ohybový moment
p	Otlačení
PA6	Polyamid 6
PA66	Polyamid 66
PAN	Polyakrylnitril
PBT	Polybutylentereftalát
PC	Polykarbonát
p_D	Dovolené otlačení
PET	Polyethylentereftalát
POM	Polyoxymethylen
PUR	Polyuretan
PVC	Polyvinylchlorid
RTM	Resin transfer moulding (vstřikování pryskyřice do formy)
S	Plocha průřezu
S_0	Počáteční plocha průřezu
SAN	Styren-akrylonitril
ÚVI	Ústav výrobního inženýrství
W	Nárazová práce
w	Rozměr vzorku mezi vruby
W_0	Modul průřezu v ohybu

y	Maximální průhyb
γ	Poměrná smyková deformace
γ_i	Poměrná smyková deformace v i-tém bodě dat
ε_1	Poměrná deformace z tenzometru 1
ε_2	Poměrná deformace z tenzometru 2
ε_a	Poměrné prodloužení při 0,1 % z celkové deformace
ε_b	Poměrné prodloužení při 0,3 % z celkové deformace
ν	Poissonovo číslo
ρ	Hustota
σ	Napětí v tahu
σ_a	Napětí v tahu při 0,1 % z celkové deformace
σ_b	Napětí v tahu při 0,3 % z celkové deformace
σ_p	Mez pevnosti v tahu
τ_{DS}	Dovolené napětí ve smyku
τ_i	Smykové napětí v i-tém bodě dat
τ_{max}	Konečné (celkové) smykové napětí
τ_S	Napětí ve smyku
τ_{SBS}	Zdánlivá interlaminární smyková pevnost

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Využití kompozitních materiálů v leteckém průmyslu. [8]	12
Obrázek 2: Vlastnosti vláknových kompozitů v závislosti na objemovém zastoupení vláken [5].....	14
Obrázek 3: Synergické chování složek kompozitu [17]	15
Obrázek 4: Rozdělení kompozitních materiálů podle druhu výztuže. [7]	19
Obrázek 5: Vlákna v jednotlivých formách polotovarů pro další zpracování v kompozitech: a) pramence, b) rohož, c) tkanina z pramenců, d) tkanina z vláken, e) sekaná krátká vlákna (0,22 mm) f) krátká vlákna (cca 5 mm). [1]	21
Obrázek 6: Schéma výroby skelných vláken. [1]	23
Obrázek 7: Příklady aplikací uhlíkových kompozitů. [14] [15]	24
Obrázek 8: Tkanina z aramivových vláken (vlevo), kombinace aramivových a uhlíkových vláken (vpravo). [12]	25
Obrázek 9: ARRAL – popis struktury. [8]	26
Obrázek 10: Průřez vláknem BORSIC. [2]	27
Obrázek 11: Schéma možných orientací vláken jednotlivých vrstev laminátu. [8] ...	28
Obrázek 12: Schéma metody ruční laminace. [16].....	29
Obrázek 13: Schéma metody vakuové infuze [16].....	30
Obrázek 14: Schéma odstředivého lití za použití stříkání.	30
Obrázek 15: Schéma technologie pultruze. [16].....	31
Obrázek 16: Schéma metody RTM. [16].....	32
Obrázek 17: Schéma sendvičového materiálu. [18]	34
Obrázek 18: Jedna z možností tvaru zkušební tělesa pro zkoušku tahem. [4].....	36
Obrázek 19: Orientace vláken laminátu.....	37
Obrázek 20: Průběh posouvajících sil a ohybového momentu při tří a čtyřbodovém ohybu. [19]	37
Obrázek 21: Rozdíl smykových napětí při podélném tahu a příčném tlaku a při podélném tlaku a příčném tahu. [1].....	39
Obrázek 22: Rozměry vzorku pro ASTM D 5379 a schéma jeho upnutí. [21]	40
Obrázek 23: Schéma upnutí vzorku a jeho rozměry dle ASTM 7078 [21]	41
Obrázek 24: Schéma zkušební aparatury a rozměry vzorků pro metodu A. [22].....	42
Obrázek 25: Schéma zkušební aparatury a rozměry vzorků pro metodu B. [22].....	42

Obrázek 26: Schéma zkušebního vzorku a jeho přetvoření při zkoušce interlaminární smykové pevnosti [1]	43
Obrázek 27: Schéma zkoušky ohybem na krátkém nosníku [1].....	43
Obrázek 28: Shimadzu AG-IC (vlevo), Zwick 1456 (vpravo). [23]	49
Obrázek 29: Upínání na stroji Zwick.....	50
Obrázek 30: Upínání na stroji Shimadzu.....	50
Obrázek 31: Celková sestava přípravku (vlevo), podsestava spodní části přípravku (vpravo).	51
Obrázek 32: Schéma pro pevnostní výpočet pro metodu A	57
Obrázek 33: Sestava přípravku pro zkoušku ASTM 4255 metoda B.....	58
Obrázek 34: Komponenty sestavy přípravku pro metodu B.....	58

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Porovnání vlastností vybraných materiálů. [2] [4] [8]	22
Tabulka 2: Technologický postup – Konzola 1, Konzola 2.	52
Tabulka 3: Technologický postup – Nosná deska.	53
Tabulka 4: Technologický postup – Čep.	54
Tabulka 5: Technologický postup – Upínač.	55
Tabulka 6: Normalizované součásti pro přípravek metody A	56
Tabulka 7: Technologický postup výroby – Podstava.	59
Tabulka 8: Technologický postup – Střední konzola opěrná	60
Tabulka 9: Technologický postup – Střední konzola nosná.	61
Tabulka 10: Technologický postup – Konzola krajní.	62
Tabulka 11: Technologický postup výroby – Vedení.	63
Tabulka 12: Technologický postup výroby – Upínka	65
Tabulka 13: Technologický postup výroby – Příložka.	66
Tabulka 14: Normalizované součásti pro přípravek metody B.	66

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Výrobní výkres BP-MA-0101 – upínač

Příloha P II: Výrobní výkres BP-MA-0102 – nosná deska

Příloha P III: Výrobní výkres BP-MA-0103 – konzola 1

Příloha P IV: Výrobní výkres BP-MA-0104 – konzola 2

Příloha P V: Výrobní výkres BP-MA-0105 – čep

Příloha P VI: Výkres sestavení BP-MA-0100 – sestava přípravek A

Příloha P VII: Výrobní výkres BP-MB-0101 – podstava

Příloha P VIII: Výrobní výkres BP-MB-0102 – upínka

Příloha P IX: Výrobní výkres BP-MB-0103 – konzola krajní

Příloha P X: Výrobní výkres BP-MB-0104 – střední konzola opěrná

Příloha P XI: Výrobní výkres BP-MB-0105 – střední konzola nosná

Příloha P XII: Výrobní výkres BP-MB-0106 – vedení

Příloha P XIII: Výrobní výkres BP-MB-0107 – příložka

Příloha P XIV: Výkres sestavení BP-MB-0100 – sestava přípravek B

Příloha P XV: CD-ROM