

Hierarchické biodegradovatelné kompozitní systémy s 3D textilní výztuží

Diplomová práce

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojírenská technologie a materiály

Autor práce:

Bc. Filip Veselka

Vedoucí práce:

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
Katedra strojírenské technologie





Zadání diplomové práce

Hierarchické biodegradovatelné kompozitní systémy s 3D textilní výztuží

Jméno a příjmení: **Bc. Filip Veselka**
Osobní číslo: S18000226
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a materiály
Zadávající katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2019/2020**

Zásady pro vypracování:

1. Rešerše kompozitních materiálů z hlediska typu plniva a matrice.
2. Problematika textilních strukturních výztuží, 3D pletenin.
3. Příprava zkušebních vzorků pro zvolenou biopolymerní matici a textilní výztuž.
4. Provedení experimentálních měření a zkoušek mechanických vlastností, mikroskopie lomových ploch.
5. Diskuze výsledků, závěr.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

grafy, obrázky, tabulky
cca 50 stran
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] LENFELD, P. *Technologie vstřikování*. www.etul.publi.cz, 2015. ISBN iOS: 978-80-88058-72-4, ISBN Android: 978-80-88058-73-1
- [2] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Praha: VŠCHT v Praze, 2011. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [3] MEISSNER, B. a ZILVAR, V. *Fyzika polymerů*. SNTL/ALFA, Praha 1987.
- [4] RITTER, Elizabeth, ed. *Thermoplastic composites: emerging technology, uses and prospects*. New York: Nova Publishers, 2017. ISBN 978-1-5361-0707-4.
- [5] THOMAS, Sabu, ed. *Polymer composites*. Volume 1, [Macro- and microcomposites]. Weinheim: Wiley-VCH, 2012. ISBN 978-3-527-32624-2.
- [6] NIAOUNAKIS, Michael. *Biopolymers: Processing and Products*. Elsevier, 2015. ISBN 978-0-323-26698-7.

Vedoucí práce:

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce:

31. října 2019

Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2021

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan



doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

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

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

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

19. května 2020

Bc. Filip Veselka



Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou hierarchických biodegradovatelných kompozitních systémů s 3D textilií. V teoretické části je popsán princip kompozitních systémů, jejich rozdělení a výroba. Dále se práce zabývá problematikou textilních struktur, zejména hybridních pletenin, použitých jako plnivo v kompozitních dílech. Další kapitoly jsou věnovány biopolymeru PLA a technologii lisování kompozitů. V poslední řadě je vysvětlen princip a vliv povrchových modifikací vlákněného plniva.

Experimentální část diplomové práce se zabývá hodnocením vlastností kompozitů s prostorovou hybridní textilií (PHT), výrobou zkušebních těles a hodnocením jejich vlastností dle norem ISO. Kompozit tvoří prostorová hybridní textilie (PHT) upletená z bavlněné příze a zalisovaná do polymerní matrice PLA Ingeo™ Biopolymer 3001D. V diskuzi je provedeno vyhodnocení získaných výsledků a doporučení pro další výzkumnou činnost.

Klíčová slova: PLA, přírodní vlákna, prostorová hybridní textilie, biokompozit, technologie lisování

Abstract

This diploma thesis deals with the issue of hierarchical biodegradable composite systems with 3D textiles. The theoretical part describes the principle of composite systems, their division and production. The thesis also deals with the issue of textile structures, especially hybrid knitworks, used as a filler in composite parts. Further chapters are devoted to PLA biopolymer and composite molding technology. In the end of this chapter the principle and influence of fibrous filler surface modifications are explained.

The experimental part of the thesis deals with the evaluation of the composites properties with three-dimensional hybrid textiles (PHT), the production of test specimens and the evaluation of their properties according to ISO standards. The composite consists of a three-dimensional hybrid fabric (3DHF) knitted from cotton yarn and pressed into a PLA Ingeo™ Biopolymer 3001D polymer matrix. In the discussion, the evaluation of the obtained results and recommendations for further research activities are performed.

Keywords: PLA, natural fiber, 3D hybrid fabric, biocomposite, press moulding

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat vedoucímu práce panu prof. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi, FEng., za odborné vedení, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích k vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat kolegům Ing. Luboši Běhálkovi, Ph.D., Ing. Martinu Borůvkovi, Ph.D., a Ing. Jiřímu Habrovi, Ph.D., za jejich výpomoc, cenné rady, trpělivost a čas, který mi věnovali při realizaci této práce.

Na závěr bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během celého studia.

Filip Veselka

Tato práce byla podpořena Studentskou grantovou soutěží Technické univerzity v Liberci v rámci projektu č. SGS-2019-5015 "Výzkum a vývoj pro inovace materiálů a výrobních technologií s aplikačním potenciálem ve strojírenství".

Obsah

1 Úvod	13
2 Teoretická část	14
2.1 Historie kompozitních materiálů	14
2.2 Definice kompozitních materiálů	15
2.3 Vlastnosti kompozitních materiálů	15
2.4 Rozdělení kompozitních materiálů	16
2.5 Matrice kompozitu	17
2.5.1 Polymerní matrice	17
2.5.2 Kyselina polymléčná	18
2.6 Plnivo kompozitu	20
2.6.1 Geometrie plniva.....	21
2.6.2 Velikost plniva	22
2.7 Vláknenné plnivo	23
2.7.1 Skelná vlákna	23
2.7.2 Uhlíková vlákna	24
2.7.3 Přírodní vlákna.....	25
2.8 Technické textilie	27
2.8.1 Pramence.....	27
2.8.2 Rohože	28
2.8.3 Tkaniny	28
2.8.4 Pleteniny.....	29
2.8.5 Vlastnosti textilií	30
2.9 Adheze	32
2.10 Technologie lisování kompozitů	33
3 Experimentální část	36
3.1 Složení kompozitního systému	36
3.1.1 Biopolymerní matrice	36
3.1.2 Prostorová hybridní textilie.....	37
3.2 Příprava textilních vzorků	39
3.3 Výroba kompozitních desek technologií lisováním	40
3.3.1 Sušení	40
3.3.2 Forma	41

3.3.3 Stroj	42
3.3.4 Optimalizace technologických parametrů.....	43
3.3.5 Výroba desek bez textilie	50
3.3.6 Výroba desek s textilií.....	53
3.4 Příprava zkušebních vzorků	55
3.5 Hodnocení adheze na mezifázovém rozhraní	56
3.6 Stanovení a vyhodnocení tahových vlastností.....	59
3.7 Stanovení a vyhodnocení ohybových vlastností	65
3.8 Stanovení a vyhodnocení rázových vlastností	69
3.9 Stanovení a vyhodnocení teplotní odolnosti	72
3.10 Diskuse získaných výsledků.....	74
4 Závěr	76
5 Použitá literatura	77

Seznam použitých zkratk a symbolů

a_{cu}	rázová houževnatost	[kJ/m ²]
b	šířka zkušebního vzorku	[mm]
h	tloušťka zkušebního vzorku	[mm]
l_p	délka příže	[m]
m	hmotnost	[g]
m_g	hmotnost granulátu	[g]
m_p	hmotnost příže	[g]
m_g	hmotnost PLA granulátu	[g]
S	plocha	[m ²]
P_s	plošná hmotnost	[g/m ²]
V_f	objem formy	[m ³]
F	příslušná zatěžující síla	[N]
ρ	hustota	[kg/m ³]
ρ_g	hustota granulátu	[kg/m ³]
H_f	hustota řádků	[m ⁻¹]
H_s	hustota sloupků	[m ⁻¹]
H_c	celková hustota	[m ⁻²]
T_g	teplota skelného přechodu	[°C]
T_m	teplota tání	[°C]
T_f	teplota viskozního toku	[°C]
T	jemnost	[tex]
E_t	modul pružnosti v tahu	[MPa]
E_f	sekantový modul	[MPa]
E_c	energie potřebná k přeražení zkušebního vzorku	[J]

σ_m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
σ_{fM}	pevnost v ohybu	[MPa]
σ_1	napětí při deformaci 0,05 %	[MPa]
σ_2	napětí při deformaci 0,25 %	[MPa]
σ_{f1}	napětí při deformaci 0,05 %	[MPa]
σ_{f2}	napětí při deformaci 0,25 %	[MPa]
ϵ_m	poměrné prodloužení na mezi pevnosti	[%]
ϵ_1	poměrné prodloužení 0,05	[%]
ϵ_2	poměrné prodloužení 0,25	[%]
ϵ_{f1}	poměrné prodloužení 0,05	[%]
ϵ_{f2}	poměrné prodloužení 0,25	[%]
α	úhel smáčení	[-]
γ_{SG}	povrchová energie mezi pevnou látkou a plynem	[J/m ²]
γ_{SL}	povrchová energie mezi pevnou látkou a kapalinou	[J/m ²]
γ_{LG}	povrchová energie mezi kapalinou a plynem	[J/m ²]
FW	filament winding – navíjení vlákna	
RTM	resin transfer moulding – přetlačování	
SMC	sheet moulding compound – tvářecí formovací hmota	
PLA	kyselina polyléčná	
LA	kyselina mléčná	
PLLA	kyselina poly-L-laktidová	
PDLLA	kyselina poly-D, L-laktidová	
UP	polyesterová pryskyřice	
FP	fenolická pryskyřice	
EP	epoxidová pryskyřice	

VE	vinilesterová pryskyřice
BR	polybutadienový kaučuk
IR	isoprenový kaučuk
PP	polypropylen
PA6	polyamid 6
PEEK	polyetherethereketon
L/D	aspektivní poměr
NF	natural fiber – přírodní vlákna
PAN	polyakrylonitril
N	methylpyrolidon
CaCl ₂	chlorid vápenatý
NaOH	hydroxid sodný
2D, 3D	dvoudimenzionální, třídimeznionální
BMC	bulk moulding compound – hromadné lisování kompozitů
DMC	dough moulding compound
TMC	thick moulding compound
LPMC	low pressuere moulding compound
PHT	prostorová hybridní textilie
PLA + PHT	biopolymer PLA s hybridní prostorovou textilií bez modifikace
PLA + PHT_L	biopolymer PLA s hybridní prostorovou textilií s chemickou modifikací
DSC	diferenční kompenzační kalorimetrie
Press act	stlačení lisovacích desek
Press set	přednastavená lisovací hodnota
Temp up act	průběh teploty vrchní lisovací desky
Temp up set	přednastavená teplota vrchní lisovací desky
Temp lower act	průběh teploty spodní lisovací desky

Temp lower set přednastavená teplota spodní lisovací desky

Melt temp teplota tání

PLA s+ kladná chybová odchylka vzorku PLA

PLA s- záporná chybová odchylka vzorku PLA

1 Úvod

V současné době mají designéři, projektanti, konstruktéři a další profese k dispozici přes 15 tisíc různých materiálů ve stovkách modifikací. Pravděpodobně nejdynamičtěji rozvíjející se skupinou nových materiálů jsou polymery včetně jejich modifikací ve formě kompozitů. Ukazuje se, že kompozitní materiály jsou schopny odolávat stále náročnějším požadavkům na strojírenské výrobky a v kombinaci s dalšími materiály umožňují dosáhnout zcela nových materiálových možností, které nachází uplatnění v různých odvětvích průmyslu.

Z tohoto důvodu byla zadána tato diplomová práce, která se zabývá biodegradovatelnými kompozitními systémy s prostorovou hybridní textilií. Cílem diplomové práce je hodnocení mechanických vlastností kompozitů s PLA maticí a 3D pleteninou. Dále jsou hodnoceny a porovnávány vlastnosti kompozitu vzhledem k povrchové modifikaci PHT a orientaci PHT v kompozitu vzhledem k neplněné PLA maticí. Na základě vyhodnocení mechanických vlastností zkušebních vzorků by mělo vzniknout doporučení pro následný výzkum.

Diplomová práce je rozdělena na dvě části. V teoretické části je literární rešerše kompozitních materiálů, technologie přípravy a výroby kompozitů. Důraz je kladen na biopolymer PLA, přírodní vlákna a jejich povrchovou modifikaci.

Experimentální část diplomové práce se zabývá hodnocením vlastností kompozitů s prostorovou hybridní textilií (PHT) dle norem ISO. Kompozit tvoří prostorová hybridní textilie (PHT) upletená z bavlněné příze, zalisovaná do polymerní matrice PLA.

2 Teoretická část

S ohledem na řešenou problematiku diplomové práce se teoretická část zabývá literární rešerší z oblasti kompozitních materiálů, technologií přípravy a výroby kompozitů, vlastnostmi biopolymeru kyseliny polymléčné (PLA) a plnivem ve formě prostorové hybridní textilie.

2.1 Historie kompozitních materiálů

Kompozitní materiály byly a jsou okolo nás již dlouhá staletí. Příroda kombinuje a vytváří různé struktury a materiály, jak svými vlastnostmi, tak stavbou. Příkladem může být samotné dřevo. Tento kompozit je složený z celulózových vláken a ligninu ve fázi pojiva. Tím vlákna dodávají stromu ohebnost a zároveň pevnost v tahu. Již od pradávna se pro stavbu obydlí používal jíl a hlína vyztužená slámou (viz obr. 1) nebo rákosem a to z důvodu zvýšení pevnosti stavebních cihel [1]. S určitou nadšákou lze říci, že využívání kompozitních materiálů je tak staré, jako je lidstvo samo.

V důsledku druhé světové války vznikla a zároveň byla realizována idea zvýšení požadavků na mechanické parametry letadel a raket. V letech 1950–1970 byly kompozity převážně využívány ve vojenské technice, letectví a kosmonautice. S postupem doby se tato technologie začala používat i v ostatních odvětvích, jako je např. automobilový průmysl, civilní letectví nebo sport [2].

V posledních desetiletích je stále více používáno kompozitních materiálů na bázi skla a uhlíku, především skelných a uhlíkových vláken, ze kterých se vyrábí velmi pevné a lehké díly. Uhlíková vlákna jsou pro oblast kompozitů z mechanického hlediska největším přínosem. Důvodem je nejširší spektrum vlastností a klesající cena. Strojírenské aplikace s mimořádnými požadavky na mechanické vlastnosti při nízké hustotě (např. rám automobilů, hnací hřídele apod.) jsou založeny na uhlíkových kompozitech. Své postavení zde nachází také kompozity na bázi skelného plniv. Zcela novým trendem v oblasti polymerních kompozitů jsou v uplynulých dvaceti letech kompozity s přírodními vlákny, které mají za cíl využít materiálů šetrných k životnímu prostředí a nahrazovat skelná vlákna. Očekává se, že biochemie pomůže enzymatickými pochody připravit přírodní vlákna s dostatečnou tuhostí. Jedním z posledních směrů výzkumu jsou kompozity s trojrozměrnou strukturou. Ty potlačují delaminační procesy, ke kterým může docházet u kompozitů s plošným plnivem. Tyto kompozity lze použít především tam, kde je potřeba vynikajících mechanických, tepelných a izolačních vlastností, nebo kde je důležitá odolnost vůči korozi [3].



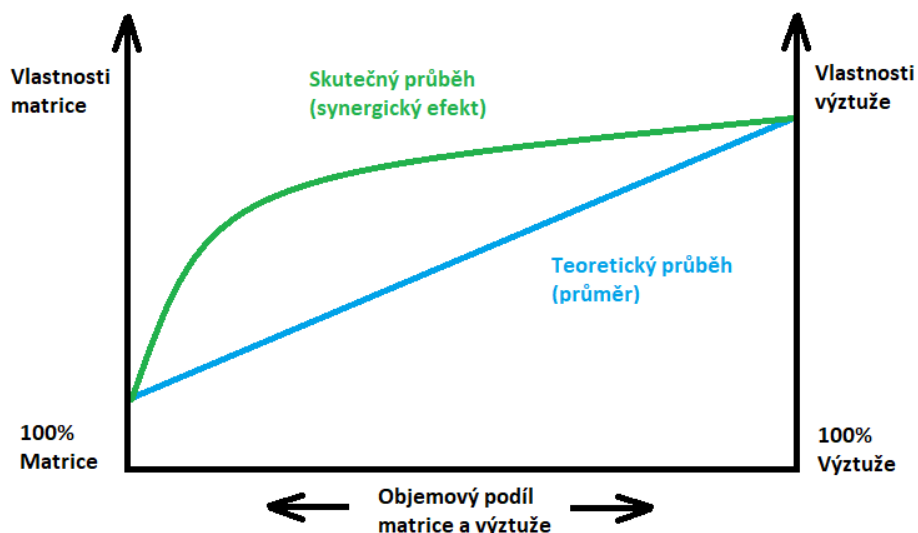
Obrázek 1: Výroba cihel ze slámy s jílu způsobem, známým od středověku [4]

2.2 Definice kompozitních materiálů

Materiálový systém, aby mohl být brán jako kompozitní, musí splňovat daná kritéria. Kompozitní materiály musí být složeny nejméně ze dvou nebo více složek. Mezi složky patří spojitá fáze: matrice a nespojitá fáze: plnivo, z nichž každá plní svojí specifickou funkci a zároveň má různé materiálové vlastnosti, většinou jsou zcela odlišné [3]. Kompozitní materiál využívá výhodné vlastnosti jednotlivých materiálových složek a zároveň potlačuje nevýhodné vlastnosti složek, ze kterých je tvořen [5]. Vznikne tak zcela nový materiál se specifickými vlastnostmi, které nemohou být dosaženy jakoukoli složkou samostatně.

2.3 Vlastnosti kompozitních materiálů

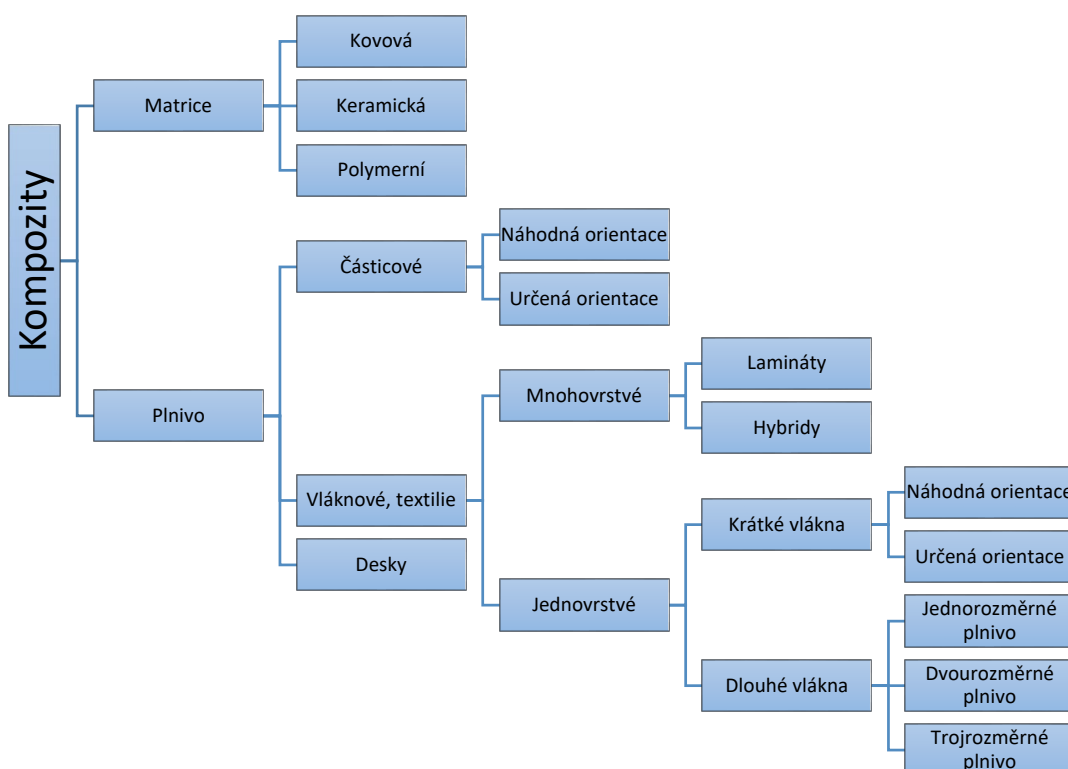
Kompozity mají významné postavení mezi konstrukčními materiály. Vzhledem ke svým vlastnostem mají špičkové konstrukční aplikace, jako je vysoká mez pevnosti, tuhosti, nízká měrná hmotnost, vysoká mez únavy, schopnost akumulovat a zároveň uvolňovat energii. Vlastnosti kompozitů jsou závislé na typu geometrie plniva, na množství plniva, na typu a druhu matrice, dále na počtu vrstev plniva, vzájemném uspořádání plniva a na technologii přípravy a zpracování. Veškeré vlastnosti kompozitních materiálů ovlivňuje synergický efekt (viz obr. 2). Je to jev, kdy je získán materiál s lepšími vlastnostmi, než mají jednotlivé složky samostatně [6].



Obrázek 2: Znárodnění synergického efektu v kompozitním materiálu [7]

2.4 Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozitní materiály lze dělit (viz obr. 3): podle typu materiálu plniva, podle matrice, podle geometrie plniva anebo podle oblastí použití.



Obrázek 3: Rozdělení kompozitů z hlediska matrice a plniva

2.5 Matrice kompozitu

Poddajnější spojitá složka kompozitu nazývaná matrice zastupuje funkci pojiva. Pod pojmem matrice se rozumí materiál, který tvoří základní „stavební kámen“ výsledného kompozitního materiálu. Jeho hlavním úkolem je přenášet namáhání na jednotlivé části plniva a zároveň plnivo chránit před okolními vlivy. Zajišťuje tvarovou stálost a geometrické uspořádání plniva. Matrici lze rozdělit dle typu materiálu na kovovou, keramickou, uhlíkovou, skelnou, polymerní nebo hybridní (např. sklokeramickou, kovokeramickou atd.). Každý typ matrice má své využití a své jedinečné vlastnosti. S ohledem na zaměření diplomové práce jsou následné kapitoly věnovány polymerním matricím [1] [8].

2.5.1 Polymerní matrice

Kompozity s polymerní matricí mohou využívat matrici na bázi termoplastů, reaktoplastů nebo elastomerů (tab. 1) [5]. Na rozdíl od kovové matrice se jedná o nevodivé materiály s dobrou korozní odolností, schopností tlumit rázy. Její velkou výhodou je nízká hustota.

Tabulka 1: Typické hodnoty základních vlastností vybraných polymerních matric [9] [10] [11] [12]

Polymerní matrice	Vlastnosti		
	Hustota [kg/m ³]	Modul Pružnosti v tahu [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]
Reaktoplasty			
Polyesterová pryskyřice (UP)	1 100–1 500	1,3–4,5	45–85
Fenolická pryskyřice (FP)	1 300	4,4	50–60
Epoxidová pryskyřice (EP)	1 100–1 400	2,1–6	35–90
Vynilesterová pryskyřice (VE)	1 300	4,4	50–60
Elastomery			
Polybutadienový kaučuk (BR)	1500	0,004–0,1	2–26
Isoprenový kaučuk (IR)	900	0,002–0,1	20–35
Termoplasty			
Polypropylen – izotaktický (PP)	900	1,1–1,5	34–38
Polyamid 6 (PA6)	1 100–1 400	1,1–3,5	70–85
Polyetheretherketon (PEEK)	1250–1350	3,6	170

Reaktoplasty zaujímají největší podíl polymerů používaný k přípravě polymerních kompozitů. Jejich výhodou je snadná zpracovatelnost, neboť jsou používány za teplot okolí v nízkém molekulárním stavu, což zajišťuje lepší prosycení plniva a nižší riziko tvorby bublin v kompozitním dílu. Pro uvedení do tuhého stavu je zapotřebí je zesíťovat účinkem tepla a síťovacího činidla [8]. Mezi nejznámější typy patří: polyesterová a epoxidová pryskyřice.

Následující polymerní matrici jsou **elastomery**. Jedná se o polymery vzniklé zesíťováním kaučuků, které v první fázi zahřívání měknou a lze je tvářet pouze omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dochází k chemické reakci, tzv. vulkanizaci, při které dojde k prostorovému zesíťování struktury [8]. Oproti kompozitům s matricí z reaktoplastu vykazují kompozity s elastomerní matricí vyšší rázovou houževnatost a dokáží lépe pohltit dopadovou energii. Toho se využívá při konstrukci a optimalizaci kompozitních dílů odolných proti nárazu [13].

V případě **termoplastické** matrice se nejčastěji používají materiály na bázi polyamidu, polykarbonátu, polypropylenu a polyetyleny [14]. Uvedené příklady reprezentují syntetické termoplasty. Patří sem např. kyselina polymléčná, polyhydroxyalkanoáty apod. Mezi výhody termoplastů patří např. houževnatost, pevnost, pružnost a nízká cena. Největší výhodou je, že je lze opakovaně zpracovávat, protože u nich neprobíhá zesíťování, jako u reaktoplastů a můžeme je opakovaně nechat roz-tavit a následně nechat ztuhnout. Naopak nevýhodou, ovlivňující kvalitu výsledného kompozitu (v závislosti na technologii výroby), je jejich vysoká viskozita taveniny. Z environmentálního hlediska jsou stále užívané také termoplasty na bázi biopolymerů.

2.5.2 Kyselina polymléčná

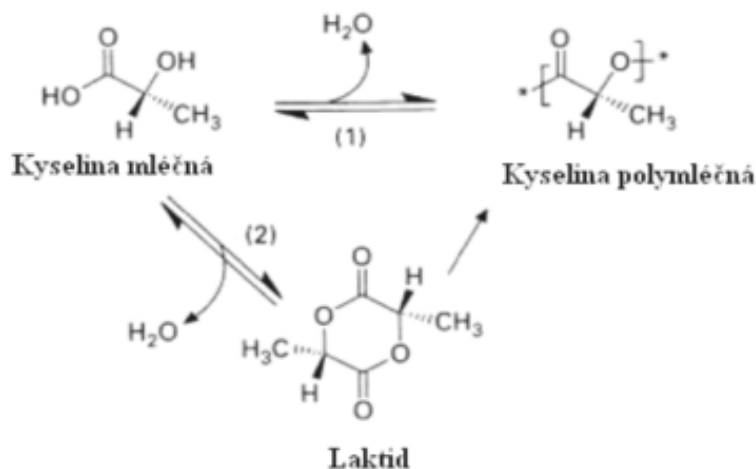
Jelikož v experimentální části této diplomové práce byla použita matrice biokompozitu PLA (Polylactic acid), budu se tomuto materiálu věnovat podrobněji.

Poprvé byla PLA syntetizovaná v roce 1845 kondenzací kyseliny mléčné (LA). Metoda pro polymeraci PLA byla vyvinuta v roce 1932, ale až v roce 1954 byla patentována firmou DuPont [15]. Přesto, že byla PLA známá desítky let, tak kvůli své vysoké ceně byla používána pouze zřídka a to pro biomedicínské aplikace, kde sloužila pro implantáty nebo bioresorbovatelné stehy. Vysoká cena v této době však nebyla jediným omezením, PLA bylo možné totiž vyrábět pouze s nízkou molekulovou hmotností [16] [17]. Materiál doposud považovaný za speciální biopolymer, se takto stává komoditním termoplastem. Dnes již existuje celá řada výrobců PLA.

PLA patří do skupiny biodegradabilních termoplastů. Tento lineární termoplastický polyester pochází z obnovitelných zdrojů a je považován za možnou alternativu k polymerům získávaných z ropných frakcí [18].

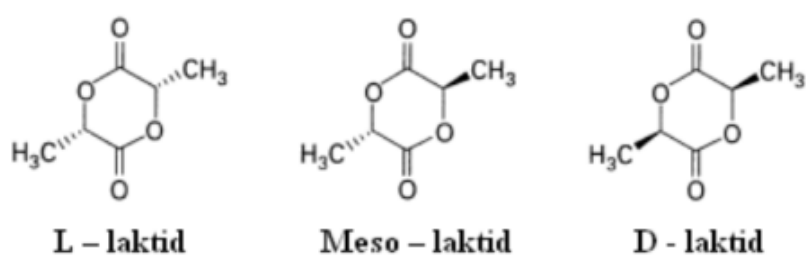
Výrobu PLA lze zajistit polykondenzací a polymerací. Polykondenzací kyseliny mléčné (LA) vzniká křehká PLA s nízkou molekulovou hmotností, což má za následek nedostatečné mechanické vlastnosti polymeru. Další alternativou je polymerace LA v roztoku xylenu. Touto metodou lze dosáhnout dostatečně vysoké molekulové hmotnosti. Nejvíce komerčně využívaným způsobem je však

metoda polymerace za otevření kruhu (viz obr. 4), založená na otevírání a řetězení laktidového kruhu LA, kdy vzniká vysokomolekulární PLA s molekulovou hmotností nad 600 000 g/mol [17].



Obrázek 4: Polymerizace kyseliny mléčné na PLA přímou kondenzací nebo otevřením okruhu přes laktid [19]

Vlastnosti PLA jsou specifické v tom, že může být jak semikrystalickým, tak zcela amorfním polymerem [18]. Tato vlastnost je závislá na technologických podmínkách přípravy a zároveň na poměru L- a D- izomeru kyseliny mléčné (viz obr. 5). Pro běžné aplikace se častěji využívá PLA s čistým L- izomerem: PLLA. Existují k tomu dva důvody, L- izomer je schopný krystalizace a zároveň kyselina L- mléčná je dostupnější. Téměř srovnatelné vlastnosti jako PLLA má PLA s čistým D- izomerem: PDLA. Využívá se ale mnohem méně. Naopak směs obou izomerů (PDLLA), se využívá zejména pro medicínské účely vzhledem k její rychlejší degradaci [16].



Obrázek 5: Tři možné formy laktidů [19]

Hustota PLA je závislá na stupni krystalinity. Amorfní stav má hustotu okolo 1250 kg/m³ a zároveň má dobré optické, mechanické a bariérové vlastnosti. PLA v krystalickém stavu má hustotu v rozmezí od 1370 do 1490 kg/m³. Pro stupeň krystalinity jsou důležité zpracovatelské podmínky: pro tvorbu krystalů je vyžadována delší doba, resp. pomalá rychlost chlazení [16] [17].

Mechanické vlastnosti PLA jsou závislé především na molekulové hmotnosti a mohou se výrazně lišit. PLA vykazuje na jedné straně dobrou pevnost a tuhost, na straně druhé nízkou tažnost a vysokou křehkost, což pro aplikaci tohoto polymeru je v určité míře limitující. Mez pevnosti v tahu se blíží k 70 MPa. Modul pružnosti v tahu dosahuje hodnot v rozmezí od 3000 do 4000 MPa [20] [21].

Tepelné i mechanické vlastnosti PLA jsou závislé na molekulové hmotnosti, stupni krystalinity nebo obsahu nečistot. Polymer je za normální teploty tuhý a křehký, a to s ohledem na jeho teplotu skelného přechodu, která se obvykle pohybuje v rozmezí od 50 do 65 °C. Podle typu PLA se liší také teplota tání u semikrystalického PLA, respektive teplota viskózního toku u amorfního PLA. U semikrystalického PLA dosahuje T_m hodnot od 130 do 230 °C. Tyto teploty klesají s rostoucím obsahem D- izomeru a dochází tak ke snížení stupně krystalinity v polymeru (viz tab. 2) [21] [20] [22].

Tabulka 2: Teploty skelného přechodu, teploty tání a teploty viskózního toku pro PLA [22]

Poměr L-/D- izomerů v PLA	Teplota skelného přechodu	Teplota tání; viskózního toku
	T_g [°C]	T_m ; T_f [°C]
100 / 0	63	178
95 / 5	59	164
90 / 10	56	150
85 / 15	56	140
80 / 20	56	125

2.6 Plnivo kompozitu

Vlastnosti kompozitních materiálů se odvíjejí nejen od druhu a typu matrice, ale z velké míry závisí také na materiálu a geometrii použitého plniva (viz obr. 6). Plnivem může být částice, vlákno, textilie apod. V praxi mají větší důležitost vláknová plniva než částicová. To je docíleno především možnostmi dosažení lepší tahové a ohybové pevnosti celého kompozitu. Čím je vlákno tenčí, tím je jeho pevnost vyšší [23]. Určení celkové vlastnosti kompozitu také závisí na vzájemném uspořádání a počtu vrstev [2]. Pokud je matrice provázána s plnivem ve větším podílu, než je 5 % plniva k matici a má odlišné mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti, lze materiál prohlásit za více fázový, tedy za kompozit [24] [23].



Obrázek 6: Rozdělení kompozitů dle částí plniva [25]

2.6.1 Geometrie plniva

Kompozitní materiály lze rozdělit podle řady parametrů. Jedním z nich je i geometrie plniva, která může být částicová, vláknenná, plošná a prostorová. Tvar a velikost jednotlivých částic závisí na druhu jejich výrobního procesu.

U částicových kompozitů předpokládáme, že jejich mechanické vlastnosti budou ve všech směrech stejné, neboť částicová plniva mají své vlastnosti nezávislé na směru. Z hlediska vlastností je nutné rovnoměrné rozmístění v matrici, což může značně omezit rozvoj plastických deformací v kompozitním díle. Částicová plniva mohou mít různé tvary, kulovité, tyčinkovité, destičkovité nebo nepravidelné. Částicová plniva se dále dělí na sférické (izometrické), které mají tvar elipsoidu nebo koule, a destičkové. Destičkové částice (anizometrické) se přibližují tvaru destiček nebo jehlic [26]. Přidáním částic zvyšujeme mez kluzu, pevnost, tvrdost, otěruvzdornost a lze ovlivnit další vlastnosti jako je například elektrická vodivost [3].

U vláknenných kompozitů jsou vlastnosti plniva dána především složením vláken tzv. anizotropie. Jedná se o odlišné mechanické vlastnosti pro různé směry zatížení. Vysoká pevnost platí jen ve směru orientace vláken. Krátká vlákna se zhotovují sekáním nebo mletím z dlouhých vláken, také je možné je vyrábět rovnou o dané délce [14] [26]. Značnou výhodou vláknenných plniv (viz tab. 3) je skutečnost, že mají o jeden až dva řády vyšší pevnost a tuhost ve srovnání s matricí (viz tab. 1 v kapitole 2.5.1 Polymerní matrice). Z hlediska nákupu vláken se v dnešní době dodávají vlákna ve dvou podobách: navinutá na válcové cívce (roving), v podobě textilií nebo sekaná krátká vlákna. Rozlišujeme vlákna, která se umísťují do kovových, keramických anebo do polymerních matric. Z pravidla se polymerní matrice nevyztužuje kovovými ani keramickými vlákny. Důvodem je vyšší cena, ale také proto, že vlákna mají větší hustotu než polymery. Naopak do kovových a keramických matric nelze použít vlákna s malou tepelnou a chemickou odolností [27].

Vzhledem k řešení tématu diplomové práce je následující literární rešerše věnována vláknennému plnivu, zejména přírodním vláknům.

Tabulka 3: Vybrané vlastnosti různých typů vláken [28] [29]

Typ vlákna	Vlastnosti		
	Hustota [kg/m ³]	Modul Pružnosti v tahu [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]
Aramid	1 400	80–185	3 400–3 800
E – sklo	2 540	72	2 000–3 500
S – sklo	2 480	88	4 900
Uhlík	1 700	180–640	2 000–6 500

Textilie jsou útvary, z nichž se různými technologiemi vyrábějí textilní výrobky, délkové textilie, např. plošné textilie např. tkaniny a pleteniny a prostorové textilie.

Délkový textilní útvar je buď hotovým produktem, nebo se dále zpracovává na plošnou textili. Existují tři technologické procesy výroby plošných textilií. Tkaní, pletení a výroba netkaných textilií, což je vpichování. Plošné textilie se rozdělují dle materiálového složení na bavlnářské, vlnářské, lnářské a hedvábnické textilie.

Dále se tímto tématem zabývá diplomová práce v kapitole 2.8 Technické textilie.

2.6.2 Velikost plniva

Vzhledem ke zvyšujícím se nárokům na materiály je nezbytné vyvíjet a připravovat tyto materiály s co nejlepšími vlastnostmi pro jejich široké spektrum využití. Toho je možno docílit přidáním vhodného plniva s předem definovanou velikostí do polymerní matrice [10].

Plniva můžeme dělit dle několika hledisek: a) dle složení na organická a anorganická b) přírodní a syntetická c) dle afinity plniva k matrici (aktivní a pasivní) a dle velikosti částic (konvenční plniva a nanoplňiva) [10].

Nanokompozity jsou materiály s polymerní matricí charakteristické velikostí částic plniva, o velikosti příčného rozměru 1–100 nm [10], většinou se jedná o nanočástice aktivních látek (tj. látky se zajímavými magnetickými, elektrickými a jinými vlastnostmi). Jejich využití je např. v lékařství, ale také v potravinářském, elektrotechnickém a v automobilovém průmyslu [30].

Mikrokompozity jsou v průmyslových odvětvích nejpoužívanějšími kompozitními materiály pro svojí nízkou hustotu v porovnání s kovy nebo jejich slitinami. Vynikají díky svému příznivému poměru pevnosti v tahu a modulem pružnosti k hustotě. Mikrokompozity obsahují plnivo o velikosti příčného rozměru 1–100 μm [10].

Makrokompozity nacházejí největší uplatnění ve stavebnictví např. železobeton (beton zpevněný ocelovými pruty), ale i v letectví či automobilovém průmyslu. Plnivo těchto materiálů dosahuje velikost příčného rozměru 1–100 mm [10].

2.7 Vlákenné plnivo

Pro plniva do kompozitních systémů se používá nespočet typů materiálů. Plniva mají buď vyztužující, nebo nevyztužující charakter. Vyztužující plniva se používají za účelem zvýšení pevnosti, pružnosti a rázové houževnatosti polymerů, především se jedná o kuličky a vlákna ze skla, uhlíku, aramidu a přírodní vlákna např. vlákna kokosu a konopí. Nevyztužující plniva jsou např. moučka, křída a kaolín používaná ve formě prášku. Přidávají se převážně kvůli snížení ceny, eliminují nežádoucí vlastnosti daného materiálu a podtrhávají jeho vizuální efekt [11].

Důležitou charakteristikou vláknových částic je poměr L/D mezi délkou a průměrem vlákna (tzv. aspektivní neboli štíhlostní poměr). Maximální pevnosti v tahu dosahují kompozity s jednosměrně orientovanými vlákny a nejvyšším aspektivním poměrem [31] [32].

2.7.1 Skelná vlákna

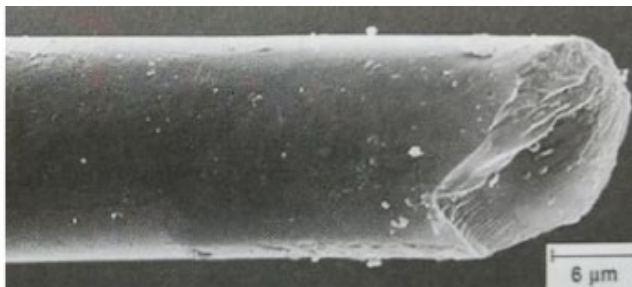
Skelná vlákna (GF – Glass Fiber) patří mezi nejrozšířenější vláknové plnivo (viz obr. 7). Vlákna jsou tenká a amorfní s pravidelným kruhovým průřezem (\varnothing 3,5 až \varnothing 24 μ m). Podle druhu skloviny se rozlišují různé druhy skelných vláken, které jsou zobrazeny v tab. 4.

Tabulka 4: Základní vlastnosti jednotlivých skelných vláken [27] [29]

Typ skloviny	Vlastnosti			
	Užití	Hustota [kg/m ³]	Modul Pružnosti v tahu [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]
A	Tepelné izolace	2 480	74	3 100
C (pyrex)	Chemické aplikace	2 490	71	3 200
D	Elektrická izolace	2 160	54	2 500
E	Elektrická izolace	2 540	72	3 500
M	Chemické aplikace	2 890	112	3 500
S, R	Pevnostní kompozity	2 480	88	4 900
Tavený křemen	Speciální typ	2 200	75	nad 6 000

Mezi výhody skelných vláken patří jejich modul pružnosti, který je srovnatelný s hliníkem (80 až 100 GPa) a svou pevností v tahu převyšuje většinu organických i anorganických vláken. Na rozdíl od vláken aramidových nebo uhlíkových jsou skelná vlákna izotropní, což znamená, že vlákno má v podélném i příčném směru stejné vlastnosti. Mezi výhody dále patří hustota pohybující se okolo

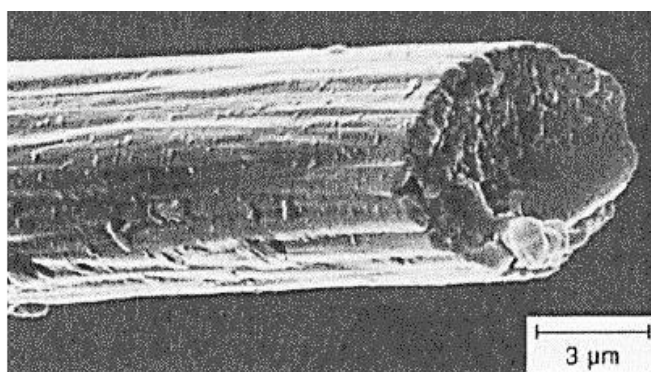
2540 kg/m³ a relativně nízká cena. Nevýhodou skelných vláken je nízká smáčivost, a především velice nízká odolnost vůči cyklickému namáhání [33].



Obrázek 7: Detailní snímek skelného vlákna [23]

2.7.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna (CF – Carbon Fiber) se především vyznačují svou vysokou pevností, tuhostí, ale nízkou tažností. Tato vlákna se řadí do skupiny technických vláken (viz obr. 8). Vlákna jsou tenká (\varnothing 5–9 μm) a křehčí než skelná vlákna [34]. Jsou krystalická a mají aromtické roviny orientovány ve směru podélné osy vlákna. Tyto aromtické roviny nejsou uspořádány v hexagonální mřížce. V porovnání se skelnými vlákny jsou uhlíková vlákna anizotropní, to znamená, že vlastnosti jsou v různých směrech různé, při použití vlákna zaleží na volbě směru. Mezi výhody patří: nízká hustota (1600–2000 kg/m³), mez pevnosti v tahu se pohybuje od 2 do 6,5 GPa, modul pružnosti (180–640 GPa), vlákno chemicky inertní, stabilní do teploty 1000 °C a jsou vysoce odolné vůči cyklickému namáhání [23]. Nevýhodou je nízká adheze k matrici, proto lze ke zvýšení adheze použít leptání kyselinou dusičnou [9].



Obrázek 8: Detailní snímek uhlíkového vlákna [23]

2.7.3 Přírodní vlákna

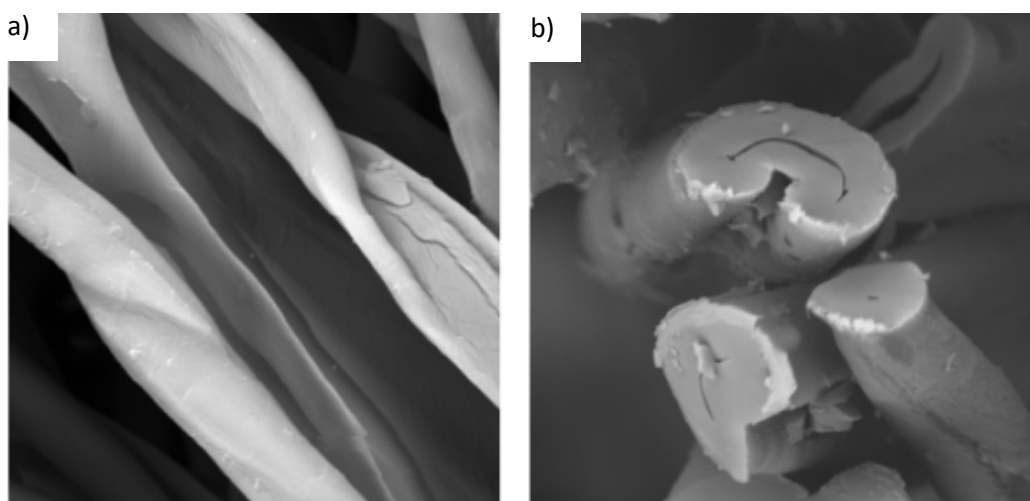
Přírodní vlákna (NF - Natural Fiber) se dělí na živočišná, jejichž základním „stavebním kamenem“ jsou proteiny, bílkoviny živočišného původu (tato vlákna lze získat ze srsti obratlovců nebo ze sekretů hmyzu) nebo vlákna rostlinná. Rostlinná vlákna se dělí podle toho, z jaké části rostliny lze vlákna získat: vlákna lýková (např. len, konopí, juta, ramie, kopřivová vlákna), vlákna listová (např. banánovník, rostlina agáve, ananasovník) a ze semen plodů (např. bavlna, kokosová vlákna). Do výhod rostlinných vláken patří odolnost proti stárnutí, nízká měrná hmotnost a pachová nezávadnost při změně klimatických podmínek [9]. Mezi nevýhody lze zařadit rychlé navlhání, nízká tažnost, při vystavení slunečnímu záření vlákna žloutnou a jsou velmi hořlavá. Do polymerní matrice jsou vhodná vlákna rostlinná, která mají jako základ celulózu a získávají se z různých částí rostlin. Svými vlastnostmi i charakterem se pro technické účely používají v podobě technických textilií, sítí, lan, lodních plachet apod. Aplikace přírodních vláken je však významnou materiálovou obměnou, která směřuje i do automobilového průmyslu, např. k výrobě výplní dveří, sloupků a dalších autodílů [35] [36].

Tabulka 5: Přehled vlastností přírodních vláken [37]

Název	Hustota [g/cm ³]	Porozita [%]	Krystalinita [%]	Polymerační stupeň	MFA [°]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Prodloužení při přetržení [%]
Len	1,42–1,52	10–11	–	2300–8000	5–10	343–1500	8–100	1,2–4,0
Konopí	1,4–1,6	–	85–90	2200–3000	2,0–6,2	310–1110	5–90	1,3–6,0
Juta	1,3–1,5	14–15	78–82	1900–3000	7–10	187–800	3–64	0,2–3,1
Ramie	1,5–1,6	7,5–8,0	–	2100–6500	7,5–12,5	290–1060	5–128	1,2–4,6
Kenaf	1,2–1,4	–	–	–	–	180–1191	22–128	1,6–6,9
Dřevo	1,5–2,0	–	–	–	–	1000–1100	35–40	2–10
Bavlna	1,5–1,6	–	–	5000–8000	20–30	220–840	4,5–12,6	2–10
Kapok	1,47–1,56	–	40–50	–	–	45–93	1,7–4,0	2–10
Kokos	1,15–1,50	–	40–45	–	30–49	95–270	2,5–6,0	15–50
Sisal	1,0–1,5	17,0	55–70	2000–3000	10–25	80–855	9–38	1,9–14
Ananas	0,8–1,6	–	55–75	–	6–18	170–1627	6,2–82,5	0,8–3,0
Abaká	1,4–1,5	17–21	–	–	–	12–980	12–72	1–12
Banán	1,3–1,35	35–53	–	–	10–12	430–914	7,7–42,5	1–10
Bambus	0,6–1,5	–	–	–	–	140–1000	11–89	–
Cukrová třtina	0,45–1,25	–	40–50	–	–	20–290	2,7–17,5	0,9–1,1

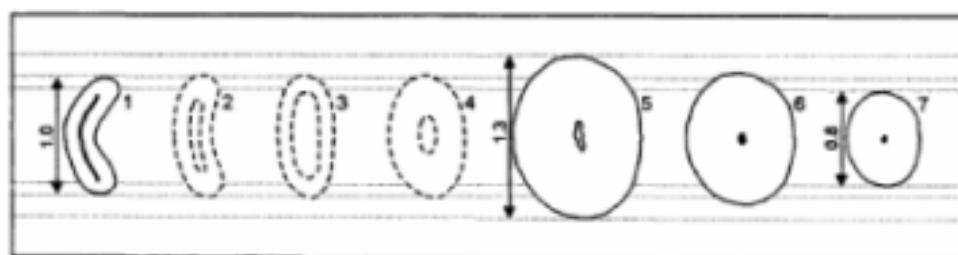
Bavlna je přírodní vlákno získané z bavlníku rostoucí v subtropickém pásmu. Materiál získaný z tohoto vlákna je měkký, jemný, poddajný, pevný a pružný. Jak bylo výše zmíněno, bavlna se díky svým vlastnostem a charakteru používá pro technické účely. Z tohoto důvodu byla bavlna vybrána pro experimentální část této diplomové práce, jako materiál k výrobě technické textilie.

Jednobuněčné vlákno získané z tobolek bavlníku, které je součástí semene může dosahovat délky od 25 do 60 mm a tloušťky 12 až 17 μm . Vlákno je po celé své délce duté, tvar průřezu je patrný z obrázku 9b. Vlákno se má tendenci stáčet do tvaru stužky. Je složeno z 90 až 94 % celulózy, zbylých 6 až 10 % jsou tuky, vosky, bílkoviny a z části voda. Bavlna má přirozenou vlastnost přijímat vlhkost, která se váže ve struktuře vlákna. Při působení teploty nad 200 °C bavlna hnědne, je hořlavá a není příliš odolná chemikáliím [38].

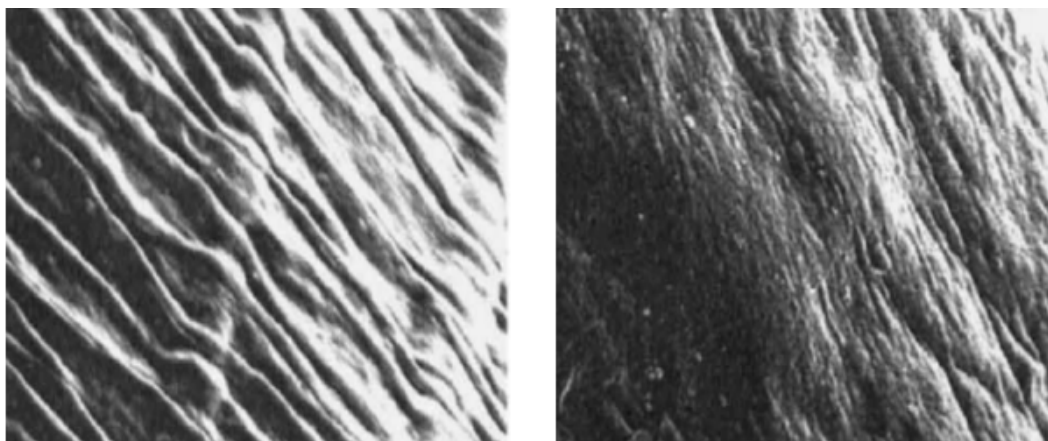


Obrázek 9: Detailní snímek: a) vlákna rezné bavlny, b) příčný řez vláknem bavlny [38]

Tvar vlákna a jeho vlastnosti lze výrazně měnit mercerizací v hydroxidu sodném, kde vlákna bobtnají (viz obr. 10). Tento proces probíhá v 15 až 25 % roztoku NaOH, kde se bavlněná příze máčí za studena a je zároveň napínána, je docíleno zakulacení průřezu vlákna a zvýšení jeho pevnosti, lesku a savosti (viz obr. 11). Zvýšení savosti lze uplatnit především u barvení vlákna [38].



Obrázek 10: Vliv mercerace na vlákno bavlny [38]



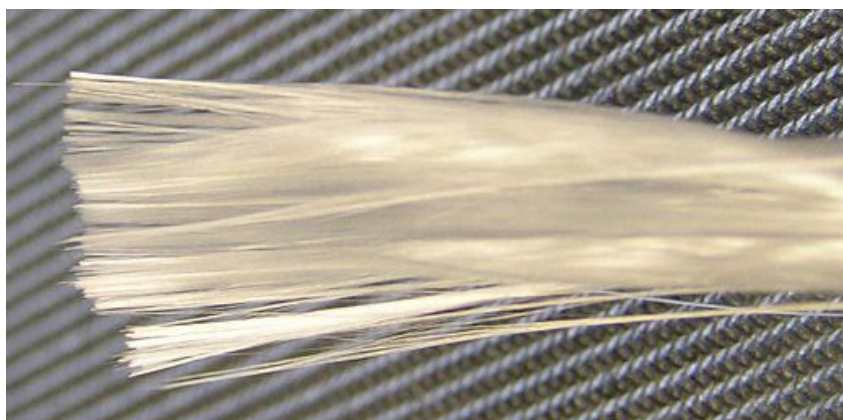
Obrázek 11: Povrch bavlněného vlákna před a po merceraci [38]

2.8 Technické textilie

V dnešní době se kromě jednosměrných plniv využívají také 2D a 3D plniva, kde jsou hlavními představiteli tkaniny, pleteniny a netkané textilie. Výhodami takto vyrobených struktur je navýšení pevnosti nejen ve směru osnovy nebo útku, ale i v ostatních směrech [39]. Technické textilie nabízejí široké spektrum využití nejen v nábytkářských dílnách, dopravě či průmyslu, např. ve formě ochranných pomůcek se zvýšenou odolností ve vysokých teplotách, pouzdra střelných zbraní nebo pro výrobu pramenců, rohoží, tkanin atd. [40] [41].

2.8.1 Pramence

Pramenec je nejjednoduše vytvořený útvar (viz obr. 12), který se skládá ze vzájemně nepropletených vláken. Většinou se používají vlákna o průměru od 9 do 13 μm . Využívají se pro vytvoření rohoží, tkanin a pletenin [42].



Obrázek 12: Pramence skelného vlákna [43]

2.8.2 Rohože

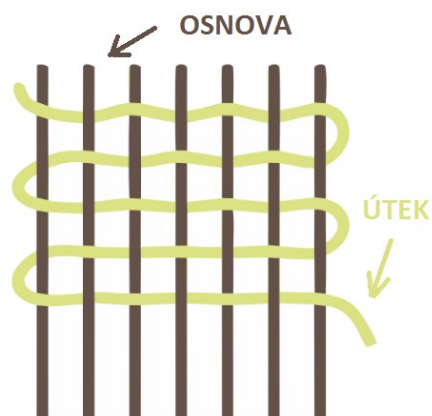
Rohož je netkaný plošný výrobek rozlišitelný na základě délky pramenců, ze kterých je vytvořen. Rohože lze dělit dle výroby na rohože z pramenců o délce 25 až 50 mm, ze sekaných nebo nekonečných pramenců, které jsou prosyceny pojivem a plošně uloženy bez orientace do vrstev. Tímto způsobem je možné dosáhnout plošné hmotnosti od 300 až po 900 g/m² [23]. Po vysušení jsou rohože dodávány v rolích (viz obr. 13).



Obrázek 13: Rohož [44]

2.8.3 Tkaniny

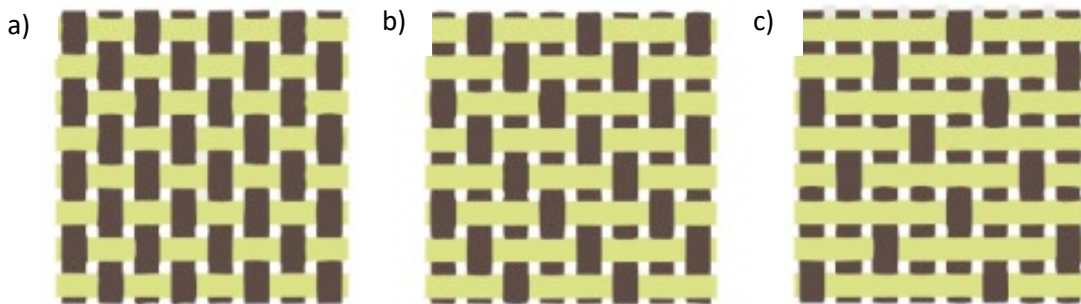
Tkanina je plošný výrobek, který vzniká provázáním útkové a osnovní nitě navzájem na sebe kolmé (viz obr. 14, hnědou barvou jsou znázorněny nitě osnovní a zelenou barvou nitě útkové).



Obrázek 14: Propletení útku a osnovy [45]

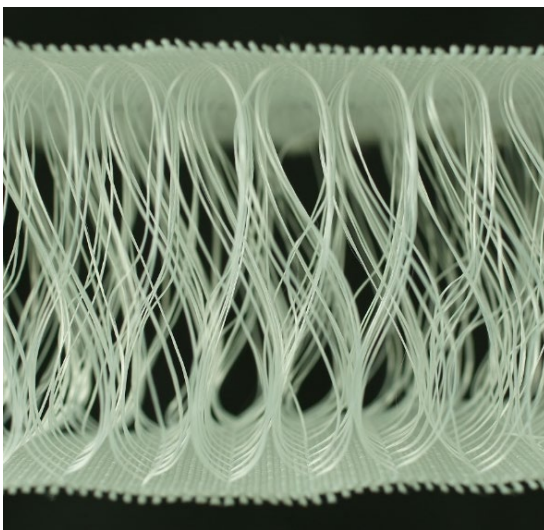
Podle způsobu provázání nití existují tři od sebe odlišné 2D vazby: plátno, kepr a satén (viz obr. 15), které jsou závislé jak na zpracování materiálu, tak následně na použití tkaniny [46]. Výběr vazby

tkaniny je velmi důležitý, nejen že tvoří vlastní tkaninu z hlediska vzhledu a hustoty, ale dodává jí určité vlastnosti (např. pevnost, tuhost, vzhled, drsnost atd.) [23].

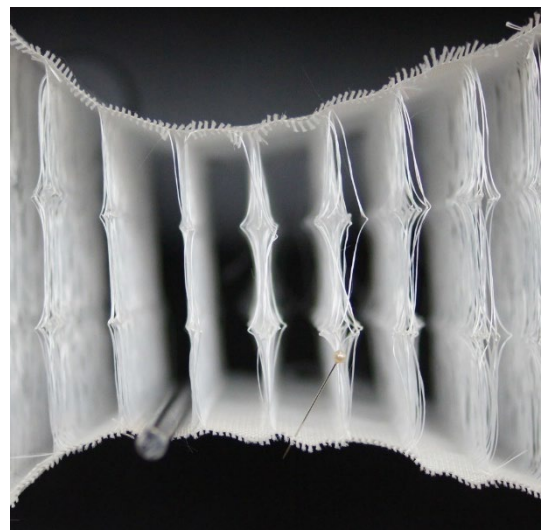


Obrázek 15: Typy vazeb tkaniny a) plátnová vazba, b) krepová vazba c) atlasová vazba (satén) [47]

Distanční tkaniny nebo také 3D tkaniny se od 2D tkanin liší multifilamenty nebo vytkanými sloupky, které propojují jednotlivé vrstvy tkaniny (viz obr. 16 a 17) [48].



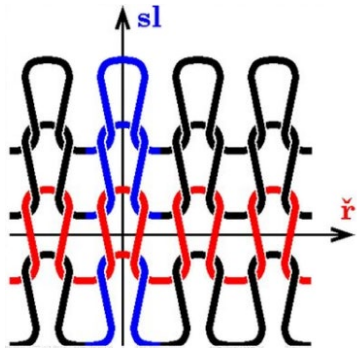
Obrázek 16: Distanční tkanina s konstantní výškou [49]



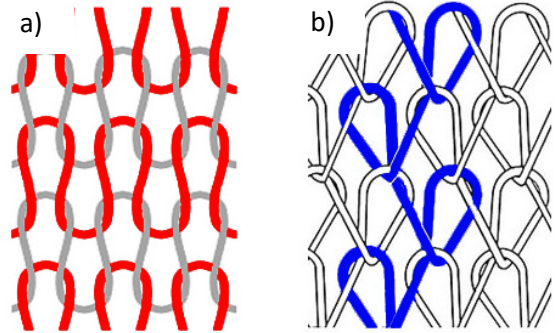
Obrázek 17: Distanční tkanina s variabilní výškou [50]

2.8.4 Pleteniny

Pleteniny vznikají vzájemným propletením oček umístěných v řádcích nebo sloupcích (viz obr. 18). Díky tomuto systému proplétání mají pleteniny oproti tkaninám vyšší elasticitu a prodyšnost. Podle způsobu proplétání se rozdělují na zátažné a osnovní. Zátažné pleteniny mají očka umístěna v řádcích, zatímco osnovní pleteniny ve sloupcích. Červenou barvou je znázorněna jedna řada, modrou barvou jeden sloupec základních oček (viz obr. 19). V technické praxi se užívají převážně 2D a 3D pleteniny [51] [38].

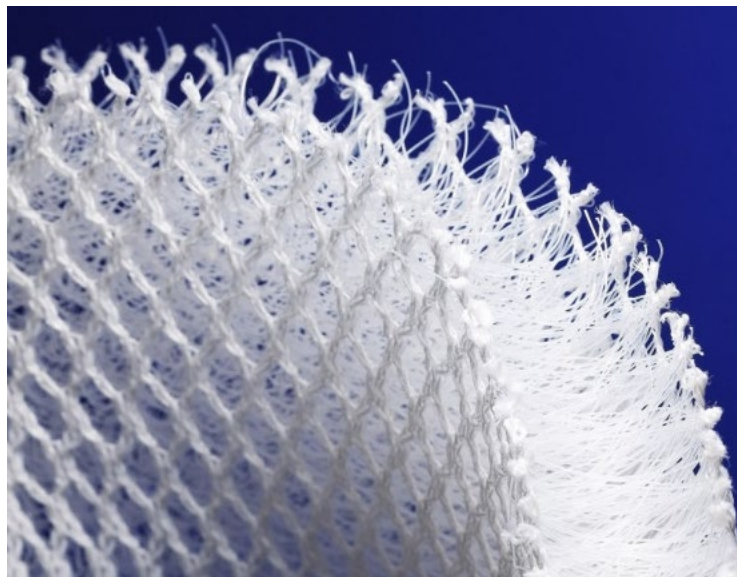


Obrázek 18: Podrobné zobrazení sloupců a řádků v pletenině [52]



Obrázek 19: Typy pletenin a) zátažná, b) osnovní [51]

Prostorová textilie neboli 3D pletenina, se vyrábí ze dvou osnovních nebo zátažných pletenin, které jsou navzájem propojené dalšími nitěmi udržující určitou mezeru mezi vrstvami (viz obr. 20). Nejpoužívanější osnovní pleteninové vazby: sukno, trikot a kepr, mohou být např. propojené polyesterovými vlákny [53]. Do větší hloubky se těmito 3D pleteninami zabývá např. Kovářová ve své bakalářské práci [54].



Obrázek 20: Distanční pletenina [55]

2.8.5 Vlastnosti textilií

V experimentální části této diplomové práce, která se věnuje lisování kompozitních desek z PLA matrice s prostorovou hybridní textilií, jsou v následujících odstavcích popsány vybrané vlastnosti a parametry tkanin a pletenin.

Jemnost je veličina představující délkovou hustotu příže (1). Jednotkou je 1 tex, který představuje přízi o délce 1 km a hmotnosti 1 g [56].

$$T = \frac{m_p}{l_p} \quad (1)$$

kde: T – jemnost [tex],
 m_p – hmotnost příže [g],
 l_p – délka příže [km].

Plošná hmotnost představuje hmotnost plošné jednotky textilie (2) [57].

$$P_s = \frac{m}{S} \quad (2)$$

kde: P_s – plošná hmotnost [g/m²],
 m – hmotnost [g],
 S – plocha [m²].

Hustota pleteniny, nebo také celková hustota (3), vyjadřuje míru zaplnění pleteniny vazebnými prvky nebo nití těchto prvků. Udává počet oček na jeden m². Hustota řádků představuje počet řádků připadajících na jednotku délky, podobně poté hustota sloupků ukazuje počet sloupků na jednotku délky [58].

$$H_c = H_r \times H_s \quad (3)$$

kde: H_c – celková hustota [m⁻²],
 H_r – hustota řádků [m⁻¹],
 H_s – hustota sloupků [m⁻¹].

2.9 Adheze

Základním předpokladem pro získání kompozitu s požadovanými mechanickými vlastnostmi je silná adheze mezi plnivem a matricí.

Adheze je fyzikální schopnost dvou rozdílných materiálů spolu přilnout. Pro zlepšení adheze je nutné, aby byl povrch materiálů změněn nebo upraven tak, aby byl smáčivý (viz obr. 21), povrchově aktivní, přičemž nesmí dojít ke změnám materiálů. Informaci o povrchové energii nám přeneseně podává tzv. úhel smáčení α (kontaktní úhel (4)). Jedná se o úhel, který spolu svírá tečna povrchu kapaliny s pevnou látkou. Je-li úhel menší, než 90° , je povrch pevné látky (plniva) dobře smáčen. Naopak pokud dosahuje velikosti větší, než 90° , obvykle nedochází k dobrému smáčení materiálu. Úhel je definován jako poměr povrchové energie na rozhraní fází [59].

$$\cos \alpha = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}} \quad (4)$$

kde: α – úhel smáčení [-],

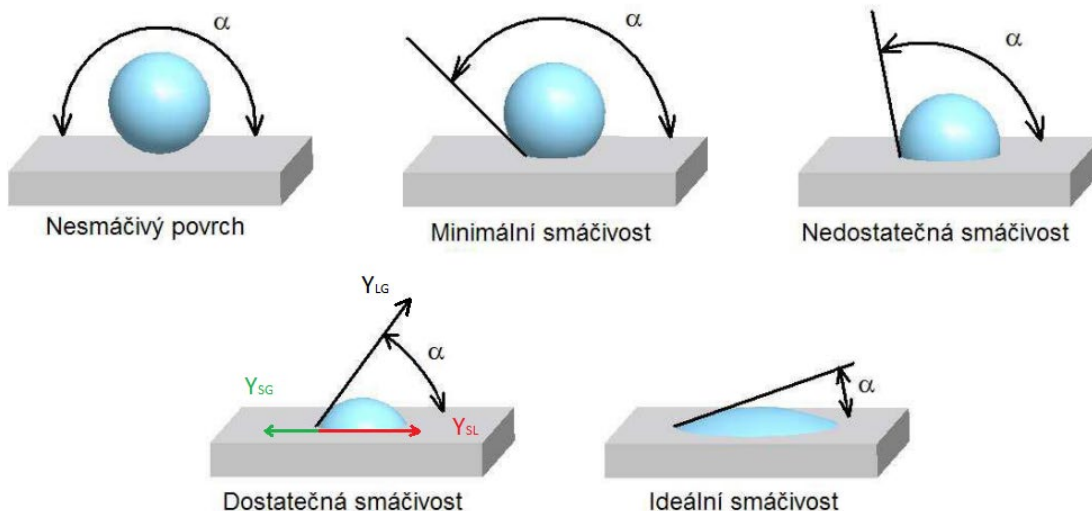
γ_{SG} – povrchová energie mezi pevnou látkou a plynem [J/m^2],

γ_{SL} – povrchová energie mezi pevnou látkou a kapalinou [J/m^2],

γ_{LG} – povrchová energie mezi kapalinou a plynem [J/m^2].

Vzhledem k tomu, že v experimentální části byla použita chemická úprava a modifikace přírodních vláken se zmíním o chemické úpravě. Úpravy vláken jsou buď mechanické, fyzikální nebo chemické. **Chemická úprava** (mercerizace) se provádí kontinuálním nebo diskontinuálním ponořením výrobku do reakční směsi (chemikálie), kde dochází k úpravě adhezních vlastností na povrchu přírodních vláken. Tato úprava je velmi účinná a homogenní, navíc dochází i k mikro čištění upravovaných povrchů tzv. bělení vláken. Při dodržení dobré adheze v kompozitu, jsou vlákna schopna nést veškeré napětí působící na kompozitní díl a deformovaná matrice je prakticky bez napětí [60] [6].

U adheze platí základní pravidlo, že pro dobré smáčení a adhezi k pevnému povrchu polymeru při jakémkoliv nanášení, musí být povrchové napětí povrchu polymeru minimálně větší, než povrchové napětí použité kapaliny, tj. rozpouštědla, barvy, smáčedla aj.

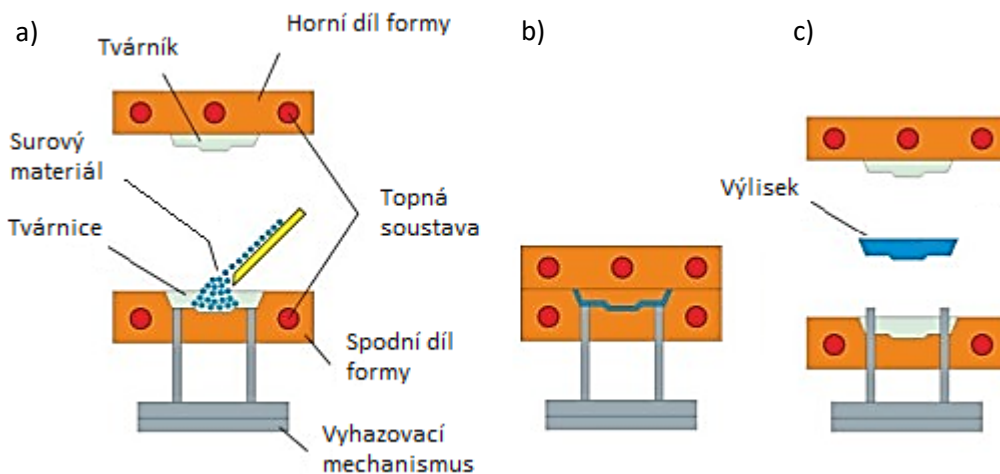


Obrázek 21: Znáznornění kontaktního úhlu a jednotlivé povrchové energie [61]

2.10 Technologie lisování kompozitů

V dnešní době existuje celé spektrum výrobních technologií a postupů, kterými lze vytvořit kompozitní materiály. Při volbě konkrétní technologie je potřeba zvážit řadu faktorů: objem výrobní produkce, velikost a geometrii dílu, zatížení konstrukce, požadovanou kvalitu povrchu, kompatibilitu matrice s plnivem, výrobní cenu apod. Mezi nejdůležitější výrobní procesy, které lze dělit dle použité formy nebo matrice, patří: ruční laminace, stříkání, lisování za působení teploty a tlaku, lisování v autoklávu, vakuové prosycení, pultuze, navíjení a vstřikování [62]. Vzhledem k tématu diplomové práce a použité technologie v experimentální části diplomové práce jsou následující odstavce věnovány literární rešerši technologie lisování za působení teploty a tlaku.

Technologie lisování je způsob tváření plastů ve vytápěné formě, nejčastěji ocelové, kdy se na materiál působí tlakem pro dosažení požadovaného tvaru (viz obr. 22). Objem plastu je větší, než je objem výrobku. Lisovací formy mají jednu dutinu, zajišťující plnění a lisovací funkci a jsou vytápěny elektrickým odporovým topením na teplotu lisování, což je teplota vytvrzování u reaktoplastů, nebo teplota vulkanizace u elastomerů anebo teplota blízká oblasti měknutí u termoplastů. Výrobky jsou jednodušších tvarů a mají přetoky z důvodu vkládání většího objemu materiálu do formy [63].



Obrázek 22: Proces lisování, a) vložení surového materiálu do otevřené formy, b) lisování, c) otevření lisu a vyjmutí vylisku z formy [64]

Jak již bylo uvedeno, nevýhodou termoplastů je velmi vysoká viskozita taveniny (zvyšuje se riziko špatného prosycení plniva a tvorby bublin v kompozitním dílu). Tu lze sice snížit zvýšením teploty materiálu, ale u řady termoplastů může dojít k jejich termickému rozkladu dříve, než je dosaženo snížení viskozity. Navíc při snaze snížit viskozitu termoplastů pomocí rozpouštědel se v praxi často naráží na skutečnost, že značná část jich je v běžných organických rozpouštědlech nerozpustných, případně dochází k jejich chemické degradaci.

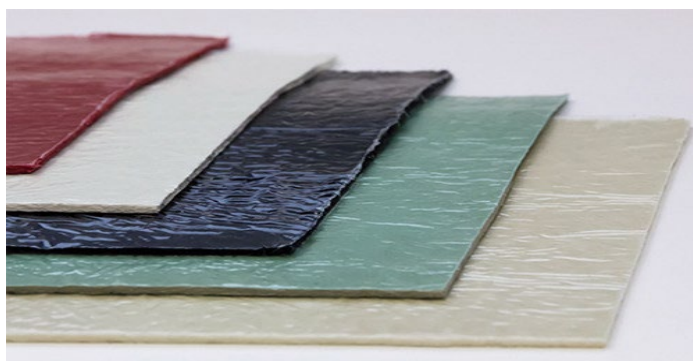
Při lisování kompozitů je nejčastější výchozí surovinou prepreg. Diskontinuální výrobní proces lisování je rozdělen do třech základních fází: kladení prepregů do otevřené formy (termoplastické prepregy postrádají lepivost, proto k jejich uchycení musí být místně nataveny jejich okraje, např. horkovzdušnou pistolí), konsolidace a formování. V první operaci jsou na sebe naskládány vrstvy prepregů tak, aby při následné konsolidaci byla vymezena požadovaná výška, v druhé fázi dochází ke konsolidaci, tedy ke spojení vrstev prepregů v monolitický laminát a v posledním kroku je tento laminát vylisován do požadovaného tvaru (viz obr. 23). Konsolidace termoplastů se skládá z ohřevu materiálu (např. infračerveným zářením, vyhříváním lisy apod.), samotné konsolidace a následného chlazení. Konsolidace je doprovázena autohezí, což je proces způsobený difuzí, kdy dochází k pohybu polymerních řetězců mezi jednotlivými vrstvami plniva a k jejich propletení [65]. K dosažení úplné konsolidace je potřeba povrchy přiblížit na takovou vzdálenost, aby byla difuze možná. Kvůli povrchovým nerovnostem a vysoké viskozitě taveniny musí být vrstvy deformovány za působení tlaku a tepla, aby byl umožněn blízký kontakt. Čím déle budou vrstvy v kontaktu, tím hustější propletení řetězců vznikne a ve výsledku vytvoří pevnější spojení vrstev. V kontinuální výrobě se často kladení prepregů stává nedílnou součástí konsolidace a v některých případech i součástí formování, což je umožněno místním působením

tlaku a tepla. Mezi metody konsolidace patří lisování mezi deskami, lisování mezi pásy a konsolidace v autoklávu. Další variantou je kladení „in-situ“, kdy je kladení a konsolidace prováděno v jedné operaci. Jednotlivé způsoby konsolidace popisuje CABBELL [65] nebo VRÁBLÍKOVÁ [66]. Výhodou prepregů je vysoký podíl vlákenného plniva, rovnoměrné rozložení polymeru a minimalizace vzduchových bublin.



Obrázek 23: Ukázka přitlačného křídla formule F1, vyrobeného z prepregu [67].

Mezi další technologie lisování kompozitů patří technologie SMC (Sheet Moulding Compound), BMC (Bulk Moulding Compound), DMC (Dough Moulding Compound), TMC (Thick Moulding Compound) a LPMC (Low Pressure Moulding Compound). U **technologie SMC** se zpracovávají přířezy prepregů (viz obr. 24) do požadovaného tvaru lisováním za působení tlaku ve dvoudílné vyhřívané formě s následným chlazením (v případě termoplastických prepregů) nebo vytvrzením (u reaktoplastických prepregů). U **technologie BMC** se používá lisovací směs tvořená práškem polymeru, sekaným vlákenným plnivem a aditivy. V **procesu DMC** je do vytápěné formy vkládána těstovitá hmota, která je vytvořená směsí polymeru, vláken a plniv. K následnému toku dojde při lisování. **Technologie TMC a LPMC** jsou analogií procesu SMC, pouze u technologie TMC je používán polotovar o větší tloušťce a u technologie LPMC speciální polymery.



Obrázek 24: SMC pláty (přířezy z prepregu) [68]

3 Experimentální část

Experimentální část diplomové práce se zabývá hodnocením vlastností kompozitů s prostorovou hybridní textilí (PHT) dle norem ISO. Kompozit tvoří prostorová hybridní textilie (PHT) upletená z bavlněné příze, zalisovaná do polymerní matrice PLA Ingeo™ Biopolymer 3001D.

V rámci experimentální části budou provedeny následující činnosti:

- popis kompozitního systému
- optimalizace lisovacích parametrů
- výroba zkušebních vzorků
- měření vybraných vlastností
- vyhodnocení a diskuse výsledků

3.1 Složení kompozitního systému

Kompozitní systém je definován jako materiál vytvořený nebo složený nejméně ze dvou nebo více částí, z nichž má každá různé materiálové vlastnosti. Pro experiment byla vybrána prostorová hybridní textilie (PHT) vyrobená z bavlněné příze (plnivo) a biopolymerní PLA matrice (pojivo).

3.1.1 Biopolymerní matrice

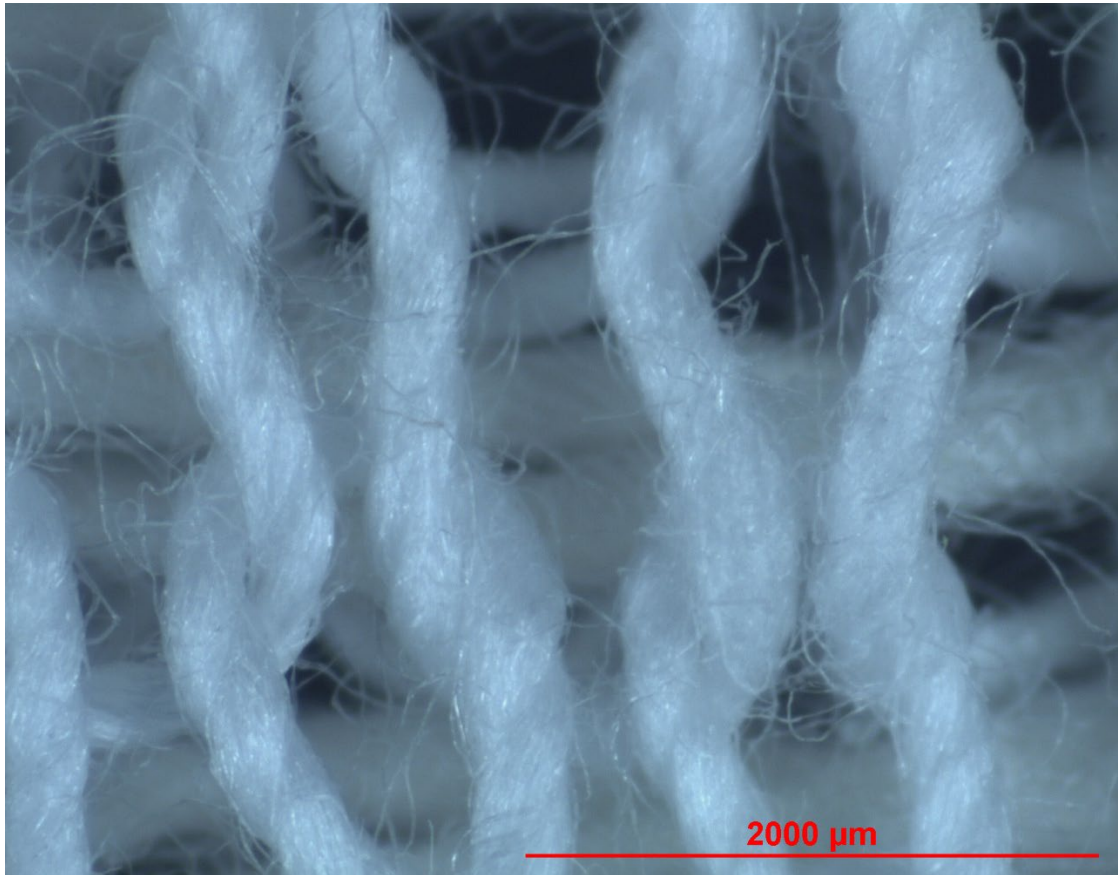
Pojivem biokompozitu byla PLA matrice s označením Ingeo™ Biopolymer 3001D od výrobce NatureWorks LLC (tab. 6). Jedná se o amorfní plast s možností krystalizace za stanovených podmínek. Materiál je určen pro vstřikování čirých dílů. Důvodem výběru tohoto materiálu byly vhodné vlastnosti, jeho nízká teplota tání (170–180 °C) a dobrá stabilita v roztaveném stavu [69].

Tabulka 6: Vybrané vlastnosti Ingeo™ Biopolymer 3001D [69]

Vlastnosti PLA 3001D	Hodnota	Jednotky	Zkušební metoda
Hustota	1253	kg/m ³	D792
MFR (210 °C; 2,16 kg)	22	g/10 min	D1238
Pevnost v tahu	62	MPa	D638
Poměrné prodloužení v tahu	3,5	%	D638
Rázová houževnatost (Izod)	16	J/m ²	D256
Pevnost v ohybu	108	MPa	D790
Modul pružnosti v ohybu	3 600	MPa	D790
Teplotní tvarová stálost	55	°C	E2092

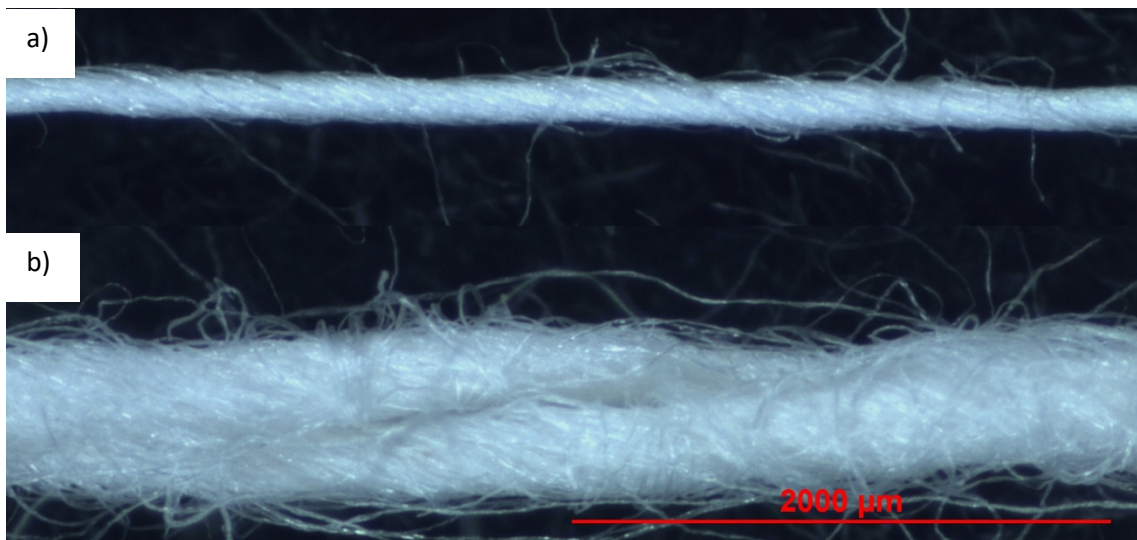
3.1.2 Prostorová hybridní textilie

Pro experiment byla použita bavlněná zátažná oboulícni pletenina s vkládaným útkem – prostorová textilie (viz obr. 25), nebo také 3D pletenina.

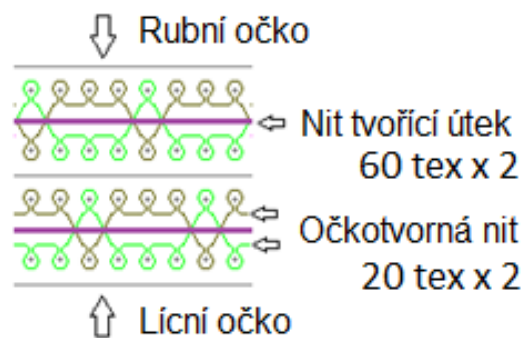


Obrázek 25: Prostorová pletenina. Na obr. jsou vidět lícní očka a za nimi útek a vespod jsou očka rubní

Prostorová pletenina se skládala ze dvou druhů příze, z tohoto důvodu je v dalším textu uváděna jako hybridní textilie. Očkovatelné a útkové nitě, jsou skané česané příze s rozměrem 20 tex x 2 (obr. 26a). Nit tvořící útek je skaná rotorová příze s rozměrem 60 tex x 2 (obr. 26b). Útek je v pletenině fixován pouze křížením nití platinových oblouků lícních oček s rubními dle schématu na obr. 27. Výsledkem procesu pletení a použitím dvou rozdílných přízí byla prostorová hybridní textilie (PHT), jejichž parametry jsou uvedeny v tab. 7.



Obrázek 26: a) Očkovatelná příze o velikosti 20 tex, b) rotorová příze o velikosti 60 tex

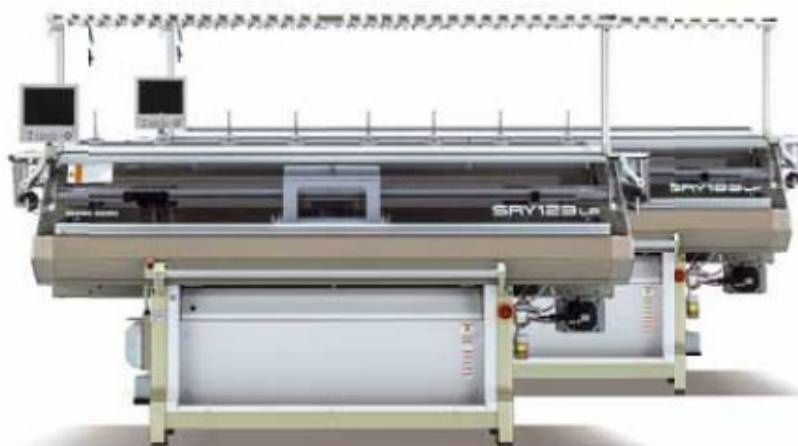


Obrázek 27: Schéma křížení lícních oček s rubními

Tabulka 7: Konstrukční parametry PHT

Vlastnosti	Hodnota	Jednotka
Rozměr česané příze	20	tex
Skací zákrut česané příze	1 200	m ⁻¹
Rozměr rotorové příze	60	tex
Skací zákrut rotorové příze	110	m ⁻¹
Hustota sloupků	575	m ⁻¹
Hustota řádků	629,5	m ⁻¹
Rozteč sloupků	1,74	mm
Rozteč řádků	1,59	mm
Plošná hmotnost vzorku	287	g/m ²
Zapletená délka útku v 1m ²	629,5	m
Délka útku na 1 očko	1,74	mm

Zátěžné oboulící pleteniny s vkládaným útkem byly vyrobeny na plochem pletacím stroji Shima Seiki, SRY, 14E s individuální volbou jehel (viz obr. 28).



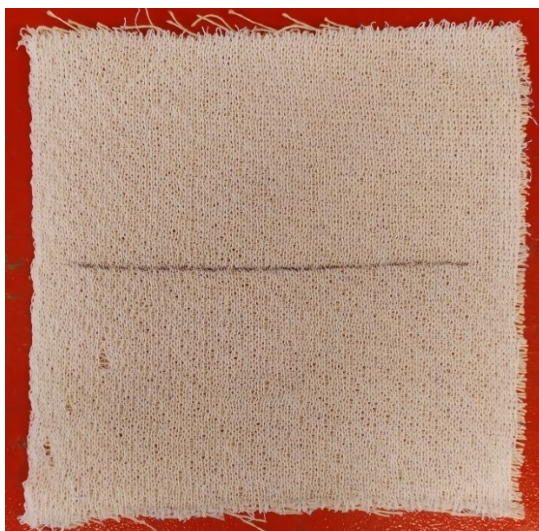
Obrázek 28: Pletací stroj Shima Seiki [70]

Počítačově řízený pletací stroj SRY183LP má dvě přítlačná lůžka se smyčkovou vložkou, díky kterým je možné vytvářet hybridní pleteniny. Použitím lože s přítlačnou smyčkou je dosaženo lepšího a stabilního přidržování smyček, což umožňuje plnou kontrolu pletení. Výplňová textilie (vložka) se vyrábí vložením příze do existující pleteniny, čímž vznikne textilie, kterou nelze vyrobit klasickým tkaním nebo pletením. Vytvořená vložka potlačuje protahovací vlastnosti úpletu a na její výrobu je možné použít stejný, nebo i jiný materiál [70].

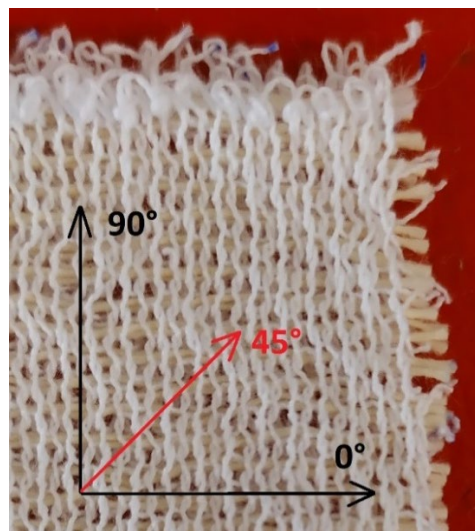
3.2 Příprava textilních vzorků

Prostorová hybridní textilie (PHT) byla dodána z pletacího stroje SRY183LP v rolích (1600 x 500 mm). Pro řešení cílů diplomové práce byla rozdělena na dvě části. Z první části PHT byly vytvořeny přístřihy o rozměrech 140 x 140 mm (viz obr. 29), aby bylo možné textilii následně založit do lisovacího rámečku. Druhá část PHT byla vložena do 10 % roztoku NaOH o teplotě 60 °C, ve kterém byla macerovaná 9 hodin. Po vyjmutí z lázně byla textilie propraná čistou vodou a nechána po odkapání volně vyschnout při pokojové teplotě. Následně byly vytvořeny stejné přístřihy jako u první části textilie.

Pro následnou výrobu kompozitních vzorků a hodnocení jejich vlastností bylo nutné určit orientaci textilie (PHT) při lisování. Orientace PHT ve směru 0° byla zvolena přístřihy ve směru příze hnědé barvy, která tvoří útek o velikosti 60 tex (viz obr. 30). Útek o velikosti 20 tex tvořící očka (bílá barva) byl ve směru 90°.



Obrázek 29: Ukázka vystřižené PHT s orientací 0°



Obrázek 30: Znárodnění orientace PHT

3.3 Výroba kompozitních desek technologií lisováním

Pro hodnocení vlastností kompozitního materiálu s PLA matricí a PHT bylo nutné v dalším kroku vyrobit kompozitní destičky, ze kterých byly následně připraveny zkušební vzorky. Destičky byly vyrobeny ve třech variantách:

- 1) biopolymer PLA (PLA)
- 2) biopolymer PLA s hybridní prostorovou textilií bez povrchové modifikace přírodních vláken (PLA + PHT)
- 3) biopolymer PLA s hybridní prostorovou textilií s chemickou modifikací přírodních vláken (PLA + PHT_L)

Nejprve byly vyrobeny destičky z PLA matrice bez přidání PHT. Dále byly vyrobeny destičky s přidáním „čisté“ textilie bez povrchové modifikace vláken bavlny, a nakonec byly vyrobeny destičky s PHT_L, která byla předem mercerizovaná v louhu.

3.3.1 Sušení

Z důvodu navlhavosti PLA a navlhavosti bavlněné příze, bylo nutné před vlastním lisováním granulát PLA a PHT vysušit. Sušení granulátu i nastříhané PHT probíhalo ve vakuové sušárně Binder při $80\text{--}90^\circ\text{C}$ po dobu 12–16 hodin (viz obr. 31).

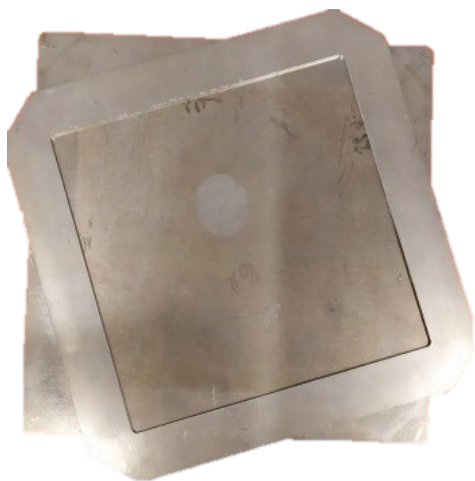


Obrázek 31: Pohled do vakuové sušárny Binder

3.3.2 Forma

Forma, ve které se lisovaly zkušební destičky, se skládala ze tří samostatných částí, dvou plných desek a rámečku, které byly vyřezány na laseru z nerezového plechu o tloušťce 2 mm. Vnější rozměry formy, desek a rámečku byly 200 x 200 mm a byly definovány maximálními rozměry lisovací plochy lisu. Spodní a vrchní deska byla tvarově a rozměrově stejná. Mezi těmito deskami byl vložen rámeček s vnějšími rozměry 200 x 200 mm a vnitřními rozměry 150 x 150 mm (viz obr. 32).

Aby nedocházelo při lisování k přichycení granulátu a taveniny biopolymeru k formě, bylo nutné destičky i rámeček důkladně separovat voskem. Pro separaci byl použit vosk Miracle Gloss™ No. 87 od firmy Stoner Molding (viz obr. 33). Používá se pro výrobu kompozitů za vysokých teplot a je schopný vytvořit odolný povrch i pro více cyklů [71]. Při nanášení vosku byl dodržen postup, uvedený v technickém listu vosku (viz Příloha A). Postup byl následující: nejprve byly desky i rámeček odmaštěny technickým benzínem. Na čistý a suchý povrch byl nanesen houbičkou vosk a po zaschnutí přibližně po 15–30 minut byl následně rozleštěn utěrkou z mikrovlákna. Tento proces nanášení vosku se opakoval dvakrát až třikrát a znovu po šesti až osmi cyklech lisování, kdy se matrice začala přichytávat k formě.



Obrázek 32: Spodní část formy s rámečkem



Obrázek 33: Separální vosk Miracle Gloss™ No. 87 [71]

3.3.3 Stroj

Výroba destiček se prováděla na hydraulickém laboratorním lisu řady LP 3000 od společnosti MonTech (viz obr. 34). Technické parametry lisu jsou uvedeny v tab. 8.



Obrázek 34: Lisovací stroj MonTech [72]

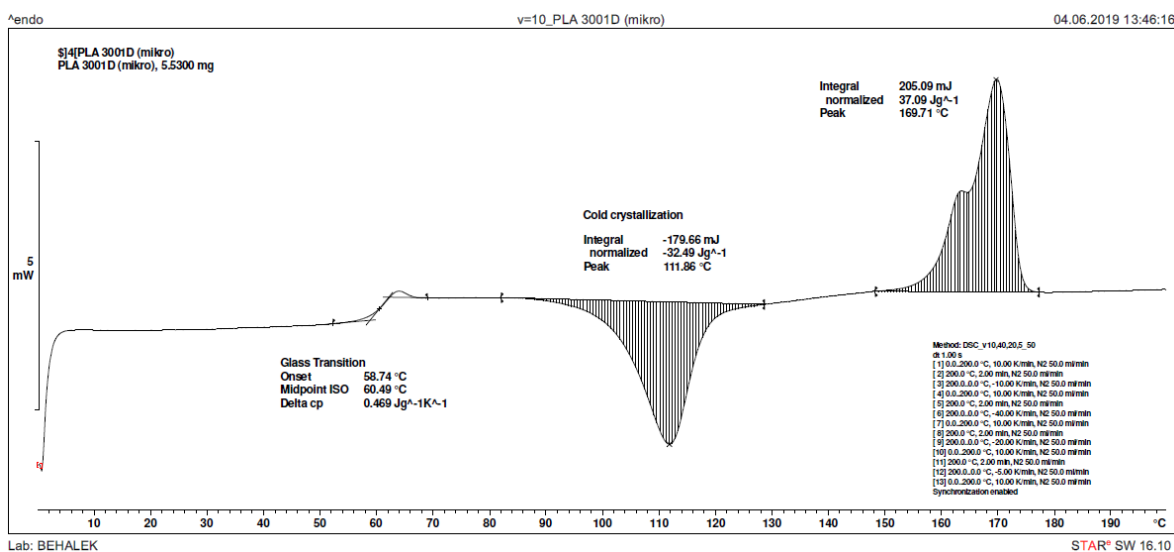
Tabulka 8: Parametry stroje [72]

Název stroje	MonTech LP 3000
Pohon	Hydraulický
Uzavírací síla	200 kN
Zdvih válce	100 mm
Pracovní plocha	196 x 196 mm
Typ vyhřívání	elektrické
Chlazení	vodní
Max pracovní teplota	250 °C
Teplotní odchylka	± 1,0 °C

3.3.4 Optimalizace technologických parametrů

Pro vlastní proces lisování bylo nutné nalézt a odladit technologické parametry lisování. Postup odladění technologických parametrů lisování destiček probíhal následovně:

- 1) Výpočet objemu dutiny rámečku formy: 150 x 150 x 2 mm → $V = 45 \text{ cm}^3$.
- 2) Z data listu materiálu byla zjištěna hustota granulátu PLA, $\rho_g = 1253 \text{ kg/m}^3$.
- 3) Pomocí rovnice pro výpočet hmotnosti byla vypočtena minimální potřebná hmotnost granulátu na jednu destičku: $m_g = 56,4 \text{ g} + 10 \% (5,6 \text{ g}) \Rightarrow 62 \text{ g}$.
- 4) Na základě předložené termické analýzy byla zvolena teplota tání $170 \text{ }^\circ\text{C}$ (viz obr. 35).



Obrázek 35: Termická analýza DSC materiálu PLA ve fázi ohřevu

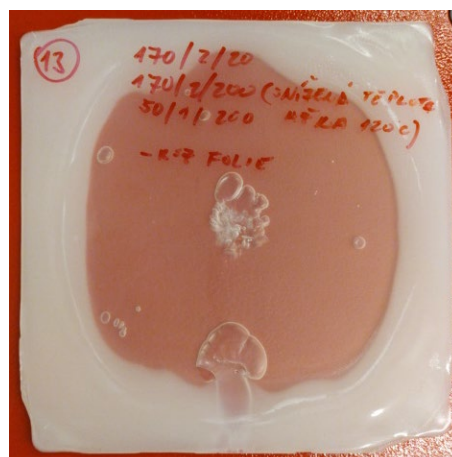
- 5) Pro první zkušební lisovací cyklus byly navrženy následující hodnoty, znázorněné v tab. 9.

Tabulka 9: Navržené hodnoty lisování

Vzorek	Hm. granulátu [g]	Proces	Teplota lisovacích desek [°C]	Uzavírací síla [kN]	Čas kroku [s]
1.	62	Předeheřev	170	20	120
		Lisování	170	200	120
		Chlazení	-> 40	200	60

Hodnocení zvolených parametrů lisování pro cyklus:

Vzorek neměl dolisované okraje a byl bez přetoků (viz obr. 36). Ve středu destičky se granulát při lisování stihl roztavit oproti krajům destičky, kde předpokládám, že došlo pouze ke slisování granulátu. Zakalená část naznačuje dokrystalizaci granulátu (nedošlo k plošnému roztavení) z následujících důvodů: krátký čas přehřevu nebo nízká teplota přehřevu. Vytvořili se bubliny, které jsou nežádoucí.



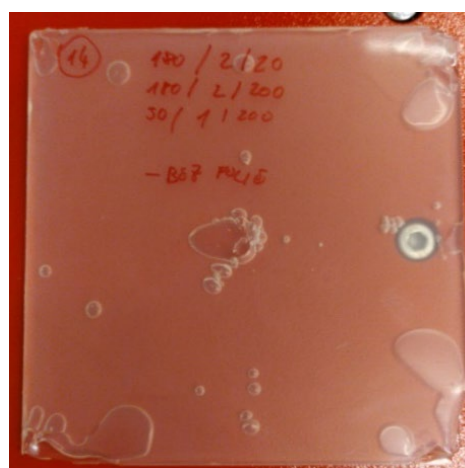
Obrázek 36: Nedolisovaná PLA destička

- 6) Pro druhý lisovací cyklus byly hodnoty upraveny dle tab. 10. Došlo ke zvýšení hmotnosti navážky granulátu, abychom docílili dotečení do krajů rámečku formy a ke zvýšení teploty lisovacích desek.

Tabulka 10: Upravené hodnoty pro druhý lisovací cyklus

Vzorek	Hm. granulátu [g]	Proces	Teplota lisovacích desek [°C]	Uzavírací síla [kN]	Čas kroku [s]
2.	75	Přehřev	180	20	120
		Lisování	180	200	120
		Chlazení	-> 40	200	60

Zvýšení navážky vedlo k lepšímu dotečení plastu do krajů destičky v rámečku formy. Zvýšení teploty vedlo k lepšímu roztavení granulátu a k odstranění mléčné části ve vzorku 2 (viz obr. 37)



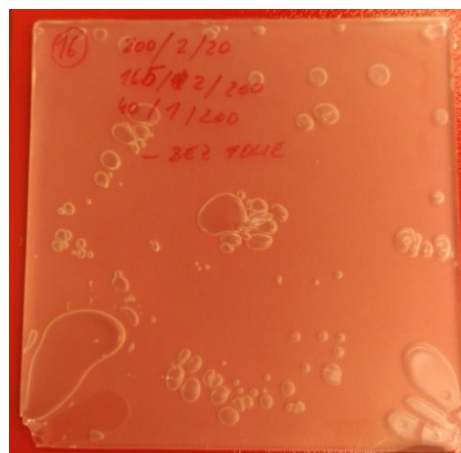
Obrázek 37: Nedolisovaná PLA destička s bublinami

7) Pro třetí lisovací cyklus byla zvýšena teplota na 200 °C z předešlých 180 °C (viz tab. 11).

Tabulka 11: Upravené hodnoty pro třetí lisovací cyklus

Vzorek	Hm. granulátu [g]	Proces	Teplota lisovacích desek [°C]	Uzavírací síla [kN]	Čas kroku [s]
3.	75	Přehřev	200	20	120
		Lisování	200	200	120
		Chlazení	-> 40	200	60

Zvýšení teploty lisovacích desek vedlo nepatrně k lepšímu dolisování krajů destičky, velikost a počet bublin se nezměnil (viz obr. 38).



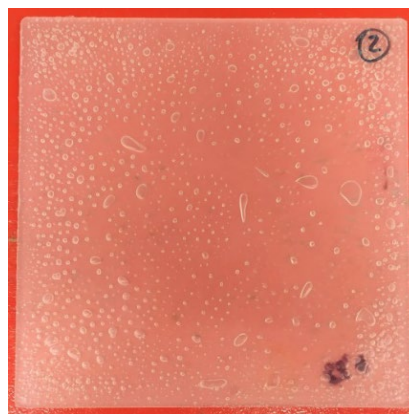
Obrázek 38: PLA destička s velkými bublinami

8) Po uzavření lisu s formou docházelo ke kolísání teplot lisovacích desek při přehřevu. Z tohoto důvodu došlo ke snížení přítlačné síly a ke zvýšení času přehřevu, aby se spodní a vrchní část formy dostatečně prohřála (4. lisovací cyklus). Zároveň byla snížena doba cyklu lisování, protože z předešlých lisování, bylo patrné, že 60 s bude dostatečujících (viz tab. 12).

Tabulka 12: Upravené hodnoty pro čtvrtý lisovací cyklus

Vzorek	Hm. granulátu [g]	Proces	Teplota lisovacích desek [°C]	Uzavírací síla [kN]	Čas kroku [s]
4.	75	Přehřev	200	10	180
		Lisování	200	200	60
		Chlazení	-> 40	200	60

Snížení přítlačné síly a zvýšení času pro přehřev vedlo k dotečení krajů destičky a došlo ke zjemnění bublin v destičce. Bubliny mají tendenci „utíkat“ ze středu destičky ven (viz obr. 39).



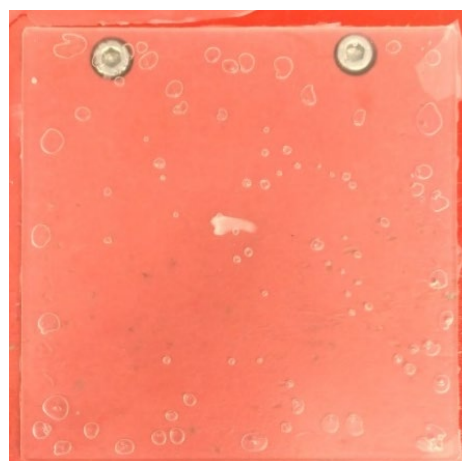
Obrázek 39: PLA destička s jemnými bublinkami

- 9) Pro pátý lisovací cyklus byla zvýšena hmotnost vstupní navážky granulátu za účelem eliminovat bublin ze středu destičky směrem ven. Pro přehřev byla snížena přítlačná síla na nulu, aby se mohl granulát ve formě roztaven pouze za působení tepla a hmotnosti vrchní desky formy. V důsledku snížení síly při přehřevu byla prodloužena doba pro přehřev na 260 s (viz tab. 13).

Tabulka 13: Upravené hodnoty pro pátý lisovací cyklus

Vzorek	Hm. granulátu [g]	Proces	Teplota lisovacích desek [°C]	Uzavírací síla [kN]	Čas kroku [s]
5.	85	Přehřev	200	0	260
		Lisování	200	200	60
		Chlazení	-> 40	200	60

Výsledkem bylo snížení počtu bublin a bubliny mají tendenci unikat směrem ze středu destičky ven (viz obr. 40).



Obrázek 40: PLA destička s bublinkami převážně po krajích

- 10) Z předešlých lisování bylo vyzorováno, že delší doba předehřevu vede k iniciaci bublin ve vylisované současné destičce, proto byla doba předehřevu snížena na 200 s bez působení uzavírací síly. Byla zvýšena doba chlazení na 250 s, aby se eliminovalo případné vnitřní napětí v destičce (viz tab. 14).

Tabulka 14: Upravené hodnoty pro šestý lisovací cyklus

Vzorek	Hm. granulátu [g]	Proces	Teplota lisovacích desek [°C]	Uzavírací síla [kN]	Čas kroku [s]
6.	85	Předehřev	200	0	200
		Lisování	200	200	60
		Chlazení	-> 40	200	250

Změna parametrů procesu vedla k odstranění bublin z destičky. Na obr. 41. jsou modrou barvou zvýrazněné hranice propadlin, které vznikly na krajích destičky směrem z destičky ven. Předpokladem pro nerovnoměrné vylisování cele plochy destičky může být nerovnoměrné působení uzavírací síly, nedostatek materiálu nebo velká teplota či dlouhá doba při předehřevu a materiál je moc „tekutý“ a stihne „utéct“ ven ve formě přetoků.



Obrázek 41: PLA destička bez bublin, po krajích destičky jsou zřejmé propadliny

- 11) Pro sedmý lisovací proces byla zvýšena navážka granulátu na 100 g a snížena doba předehřevu s cílem snížení tekutosti taveniny a odstranění nedolisovaných okrajů destičky. Zároveň byla snížena doba cyklu lisování, protože z předešlých cyklů lisování, bylo patrné, že 12 s bude dostačujících ke slisování roztaveného granulátu. Byla zvýšena doba chlazení, aby mohlo dojít k rovnoměrnému ochlazení obou ploch lisovacích desek.

Tabulka 15: Upravené hodnoty pro sedmý lisovací cyklus

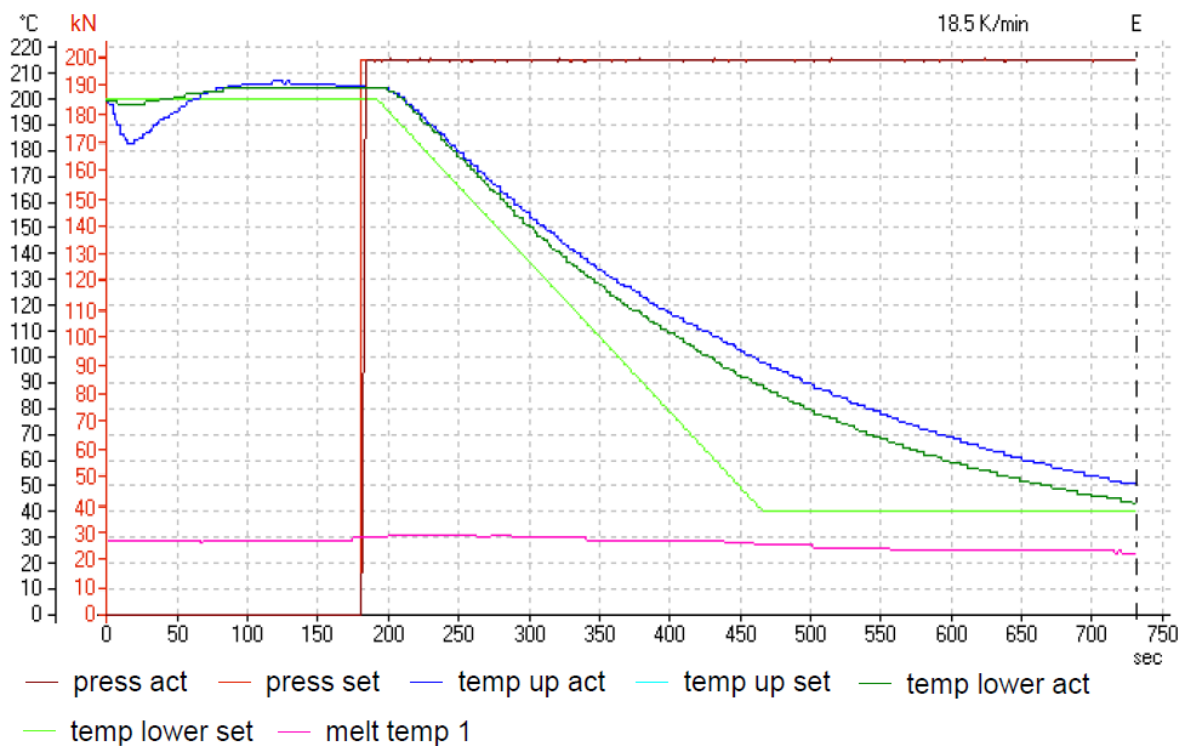
Vzorek	Hm. granulátu [g]	Proces	Teplota lisovacích desek [°C]	Uzavírací síla [kN]	Čas kroku [s]
7.	100	Předehřev	200	0	180
		Lisování	200	200	12
		Chlazení	-> 35	200	540

Zvýšení navážky vstupního granulátu vedlo k velkým přetokům, hmotnost vylisované destičky a hmotnost přetoku byla přibližně 1:1. Z ekonomického pohledu je takto velký přetok nežádoucí, ale toto navýšení hmotnosti vedlo k vylisování destičky bez propadlin nebo bublin (viz obr. 42). Proto parametry z tab. 15 jsou odladěné parametry lisovacího procesu.



Obrázek 42: PLA destička bez bublin a propadlin v krajích destičky

Výsledek procesu optimalizace nastavení technologických parametrů lisování je ukázán na obr. 43.



Obrázek 43: Technologický proces lisování

Při výrobě zkušebních destiček by proces následující: v zahřátém lisu ponechána spodní a vrchní lisovací deska kvůli rovnoměrnému vytemperování na teplotu 200 °C. Do formy bylo následně vloženo odvážené množství granulátu, pro destičky bez PHT byla navážka 100 g a 75 g pro destičky s PHT. Po uzavření byla forma vložena na spodní lisovací desku. Po uzavření lisu a spuštění programu nastal předehřev (viz obr. 44) po dobu 180 s bez působení síly.



Obrázek 44: Ukázka měknutí PLA granulátu v době předehřevu

Modrá křivka v obr. 43 znázorňuje průběh teploty horní lisovací desky. Z průběhu je zřejmé, že po dotyku formy s horní lisovací deskou dojde k poklesu předehřáté desky přibližně o 20 °C. V případě spodní lisovací desky (tmavě zelená křivka), není pokles teploty tak výrazný. Eliminací těchto poklesů teplot by bylo možné snížit čas předehřevu. V okamžiku, kdy se teploty spodní i horní lisovací desky vyrovnají, nastává vlastní lisování (viz obr. 45) s uzavírací silou 200 kN po dobu 12 s (průběh hnědé křivky). Uzavírací síla působí po celou dobu, než se lis opět otevře a lisovací desky se ochladí na teplotu 35 °C.



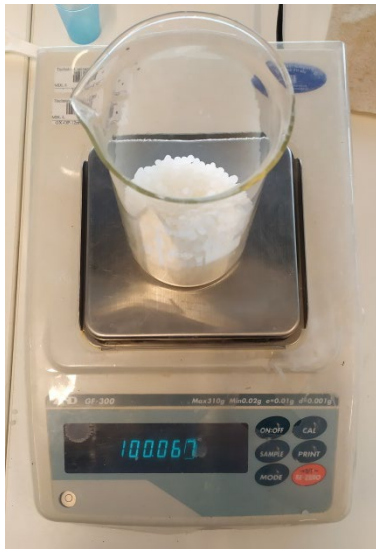
Obrázek 45: Proces lisování - dochází k vytvoření přetoku PLA ven z formy

Chlazení probíhá 540 s a je znázorněno poklesem modré a tmavě zelené křivky. Po skončení celého cyklu se lis otevře, vyjme se forma z lisu a celý cyklus se opakuje.

V průběhu experimentální části při výrobě destiček jsem došel k poznatku, že tvorba a počet bublin ustupoval s počtem provedených cyklů v průběhu dne. Vyrobění destiček bez bublin bylo vždy možné až po důkladném prohřátí celé soustavy lisu, do té doby se tvořili bubliny i za stejného procesu.

3.3.5 Výroba desek bez textilie

Po zapnutí laboratorního lisu bylo nutné nechat lisovací desky vytemperovat na teplotu 220 °C a nechat hřát alespoň po dobu 2 – 3 hodiny, aby se docílilo prohřátí celého lisu. Než se lis prohřál, byl prostor pro separaci formy. Po důkladném vyleštění formy od separačního vosku bylo potřeba předebrát formu na teplotu okolo 35 °C, k tomu stačilo formu položit na konstrukci zahřátého lisu. Na laboratorní váze jsme odvážili 100 g předsušeného granulátu (viz obr. 46) a následně ho pečlivě rozprostřeli v předebraté formě s rámečkem (viz obr. 47). Uzavřenou formu jsme vložili na spodní lisovací desku předebrátou na 200 °C (viz obr. 48). Spustili jsme přednastavený program pro lisování a vyčkali jsme, až jednotlivé cykly proběhnou a lis se znovu otevře, lisovací parametry jsou uvedeny v tab. 16. Po vyjmutí formy z lisu bylo potřeba otevřít formu a z vylisované desky ořezat přetoky (viz obr. 49 a 50).



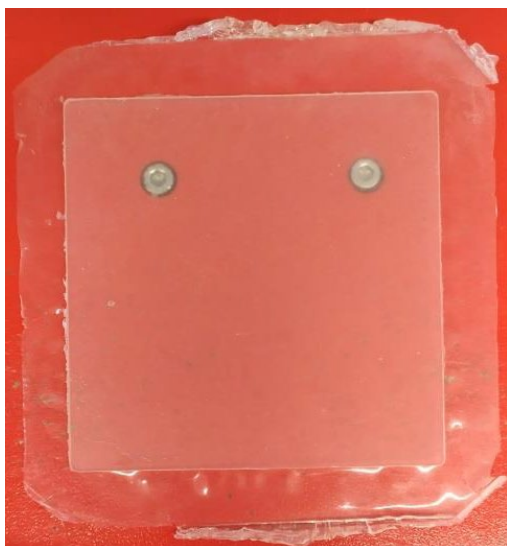
Obrázek 46: Laboratorní váha s várkou granulátu



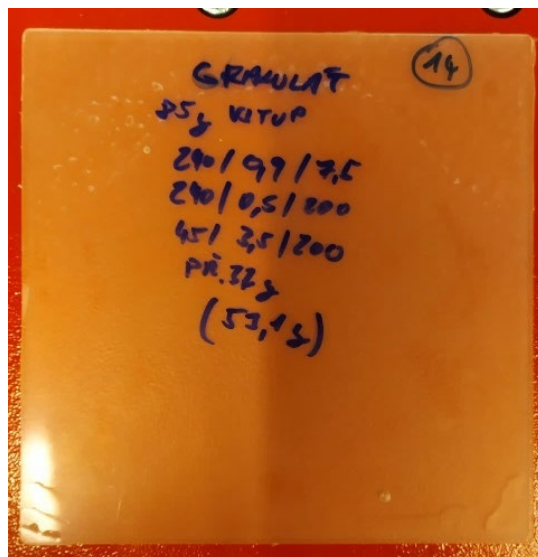
Obrázek 47: Rozprostřený granulát ve formě



Obrázek 48: Forma vložena do lisu



Obrázek 49: Vylisovaná destička s přetokem



Obrázek 50: Destička bez přetoků

Tabulka 16: Parametry lisování desek bez textilie

Parametry lisování desek bez textilie			
Vstup:			
Materiál	PLA 3001D		
Hmotnost granulátu [g]	100		
Hmotnost textilie [g]	-		
Procesní parametry:			
Cyklus	předehřev	lisování	chlazení
Činnost lisovacích desek	ohřev	ohřev	chlazení
Teplota lisovacích desek [°C]	200	200	35
Čas kroku [s]	180	12	540
Uzavírací síla [kN]	0	200	200
Výstup:			
Rozměry destičky [mm]	150 x 150		
Tloušťka destičky [mm]	2		
Hmotnost přetoku [g]	47,7		
Hmotnost destičky [g]	52,3		

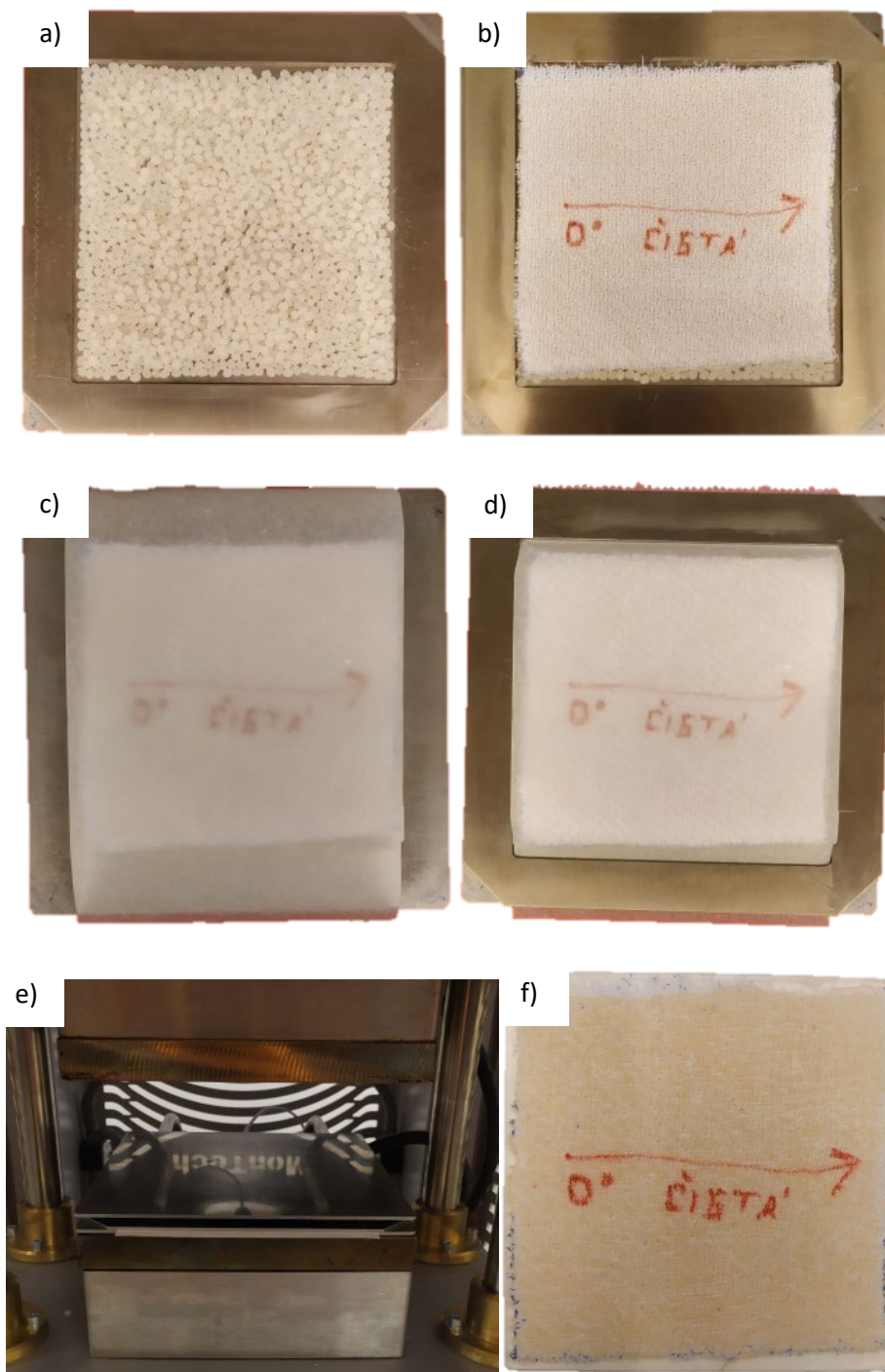
3.3.6 Výroba desek s textilií

Po optimalizaci parametrů lisování a výrobě PLA desek byly vyráběny kompozitní desky, s připravenou PHT, která plnila funkci výztuže. Matrice zůstala zachována jako v předešlém případě lisování čistých destiček z PLA matrice. Parametry jako v předchozím případě byly shodné (viz tab. 17) kromě hmotnosti vstupního granulátu, který se snížil ze 100 g na 75 g.

Do předehřáté formy s rámečkem byl kromě PLA granulátu vložen připravený přístřih pleteniny s označením směru orientace pleteniny (0°, 45°, 90°) a to jak bez modifikace povrchu bavlněné příze, tak i povrchově modifikované prostorové hybridní textilie (PHT, PHT_L). Třetí vrstvu tvořil pečící papír, který byl přistřižený do tvaru obdélníku a byl položen na PHT. Pečící papír byl použit z důvodu zpomalení vytékání přebytečného materiálu z formy, takto vytvořenou „bariérou“ bylo docíleno kvalitnějšího vylisování destiček, jak z pohledu vizualizace, tak získání většího objemu materiálu v destičce. Před uzavřením formy vrchní destičkou a vložením formy do lisu byl rámeček položen přes pečící papír tak, že granulát i pletenina byly tímto pečícím papírem uzavřeny (viz obr. 51).

Tabulka 17: Parametry lisování desek s textilií

Parametry lisování desek s textilií			
Vstup:			
Materiál	PLA 3001D + PHT		
Hmotnost granulátu [g]	75		
Hmotnost textilie [g]	10		
Proces:			
Cyklus	předehřev	lisování	chlazení
Činnost lisovacích desek	ohřev	ohřev	chlazení
Teplota lisovacích desek [°C]	200	200	35
Čas kroku [s]	180	12	540
Uzavírací síla [kN]	0	200	200
Výstup:			
Rozměry destičky [mm]	150 x 150		
Tloušťka destičky [mm]	2		
Hmotnost přetoku [g]	28,6		
Hmotnost destičky [g]	56,4		



Obrázek 51: Ukázka postupu výroby PLA destičky s PHT: a) rovnoměrné rozprostření PLA granulátu v rámečku formy, b) vložení PHT do rámečku formy, c) rámeček byl odebrán a granulát s PHT byly překryty pečícím papírem, d) rámeček formy, byl položen na pečící papír tak, aby uzavřel granulát s PHT směrem ze shora, e) uzavření formy vrchní deskou a vložení formy do lisu, f) ukázka vylisované kompozitní destičky s PHT

3.4 Příprava zkušebních vzorků

Zkušební vzorky byly z vylisovaných destiček připraveny stříháním na hydraulických nůžkách DURMA MS 2504 (viz obr. 52).

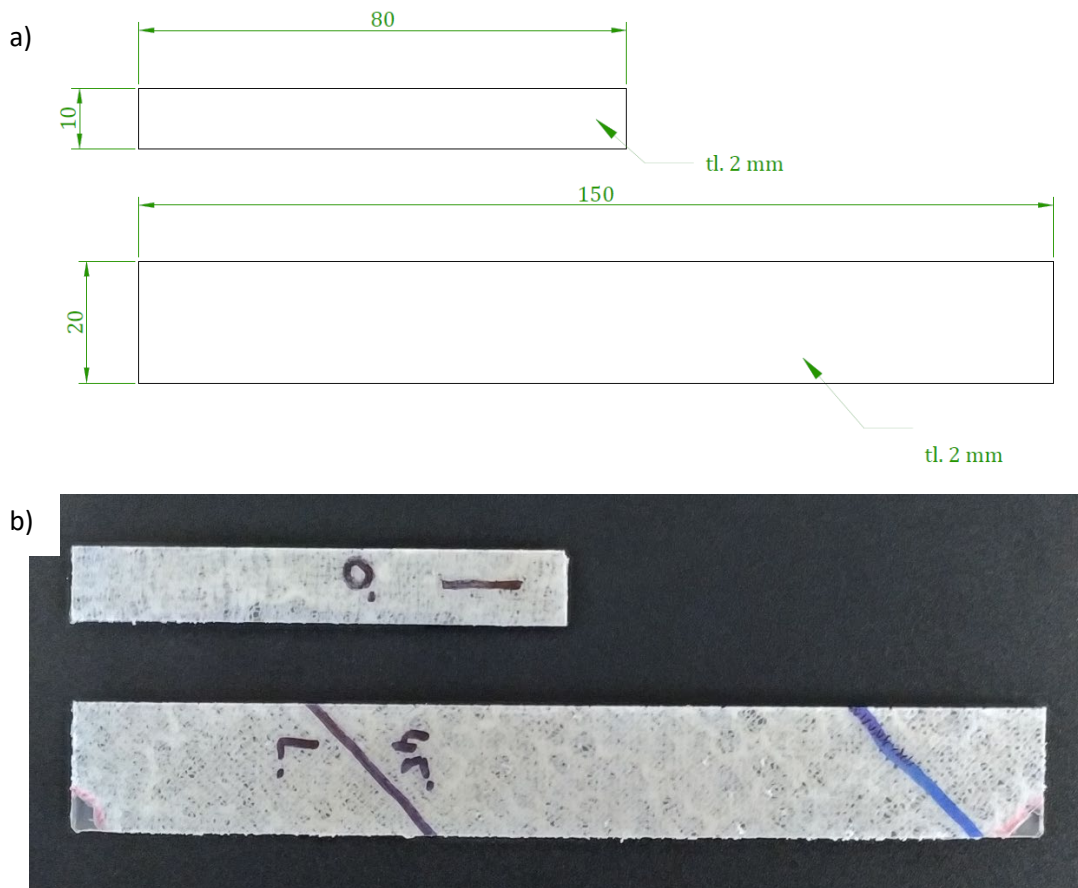


Obrázek 52: Hydraulické nůžky DURMA MS 2504 [73]

Z nalisovaných destiček byla nastříhána tělíska dvou různých rozměrů (viz obr. 53). Velikosti tělísek se lišily dle typu zkoušky (tah, ohyb, ráz, teplotní odolnost HDT), pro kterou byly určeny. Vzhledem k rozdílným vlastnostem kompozitních materiálů, (destiček s výztuží) v důsledku orientace PHT v destičce, byly z destiček vystříženy vzorky jak s orientací 0°, 45° a 90°. Konfigurace tělísek byla dle tab. 18. Pro tahovou zkoušku byla připravena zkušební tělíska typu 3 dle normy ČSN EN ISO 527-4. Z důvodu velikosti nalisovaných destiček, které měly rozměry 150 x 150 mm, byla z destiček vystřížena zkušební tělíska 150 x 20 mm. Tělíska pro zkoušku rázové houževnatosti, zkoušku ohybem a zkoušku teplotní odolnosti byly vyrobeny dle ČSN EN ISO 179-1, ČSN EN ISO 178 a ČSN EN ISO 75 o rozměrech 80 x 10 mm.

Tabulka 18: Popis jednotlivých konfigurací zkušebních vzorků

Označení	Orientace pleteniny	Modifikace
PLA	-	-
PLA + PHT_0°	0°	-
PLA + PHT_45°	45°	-
PLA + PHT_90°	90°	-
PLA + PHT_L_0°	0°	Louh
PLA + PHT_L_45°	45°	Louh
PLA + PHT_L_90°	90°	Louh



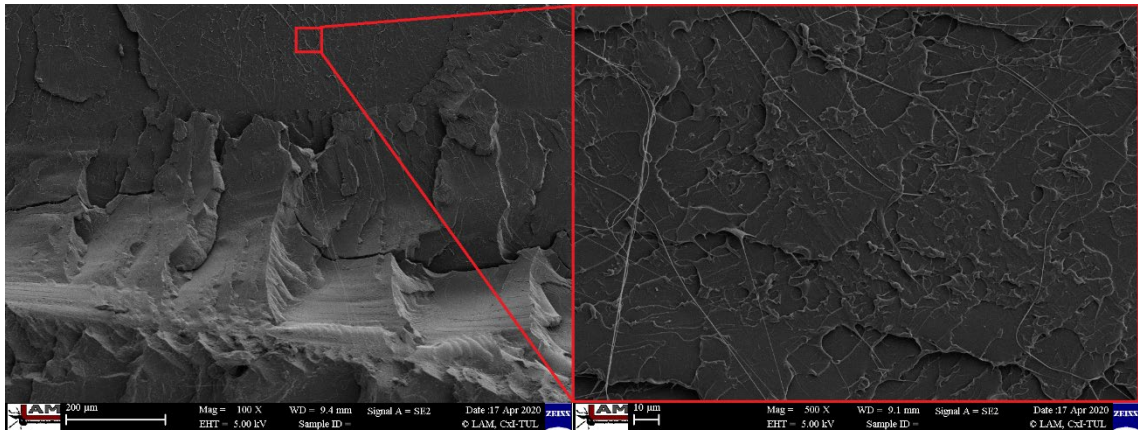
Obrázek 53: Tvary a rozměry vzorků a) rozměry vzorků, b) vystřižené vzorky

3.5 Hodnocení adheze na mezifázovém rozhraní

Na zhotovených zkušebních vzorcích bylo v prvním kroku provedeno hodnocení kvality adhezního spojení na mezifázovém rozhraní matrice – plnivo. Cílem hodnocení kvality adheze bylo jednak vyhodnocení možností spojení polární matrice a polární přírodní bavlněné přize a také vlivu mercerizace na kvalitu adhezního spojení. V neposlední řadě hodnocení a studium lomových ploch umožňuje vyhodnotit získané výsledky z normovaných zkoušek.

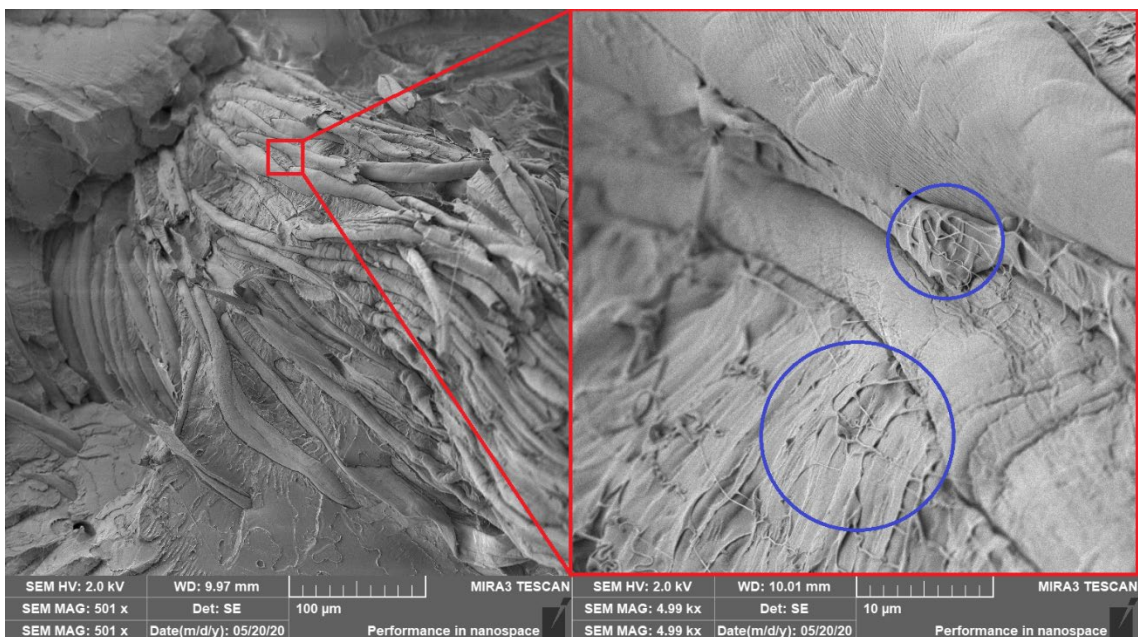
Hodnocení kvality adhezního spojení proběhlo na příčných lomových plochách pomocí rastrovacího (skenovacího) elektronového mikroskopu (SEM) Carl Zeiss ULTRA Plus s mikroanalytickým systémem OXFORD Instruments.

Na obrázku 54 je zobrazena lomová plocha a detail lomové plochy neplněné PLA matrice. Z lomových ploch je patrné, že se jedná o křehký lom, který je charakteristický pro zvolenou PLA matrici.

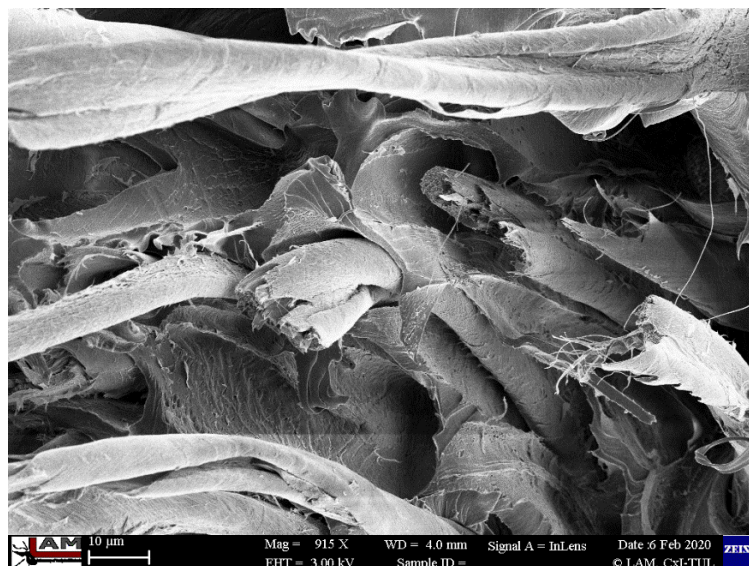


Obrázek 54: SEM snímek lomové plochy neplněné PLA matrice

Z mikroskopického snímku lomové plochy kompozitu s PLA matricí a povrchově nemodifikovanou prostorou pleteninou (viz obr. 55) je možné učinit následující závěry: bavlněná příze je proycena biopolymerní matricí (viz obr. 56), plastická deformace biopolymerní matrice vedla k vytvoření můstků, což se projevilo vytahováním fibril PLA matrice a adheze na mezifázovém rozhraní je nedostatečná (viz obr. 56).

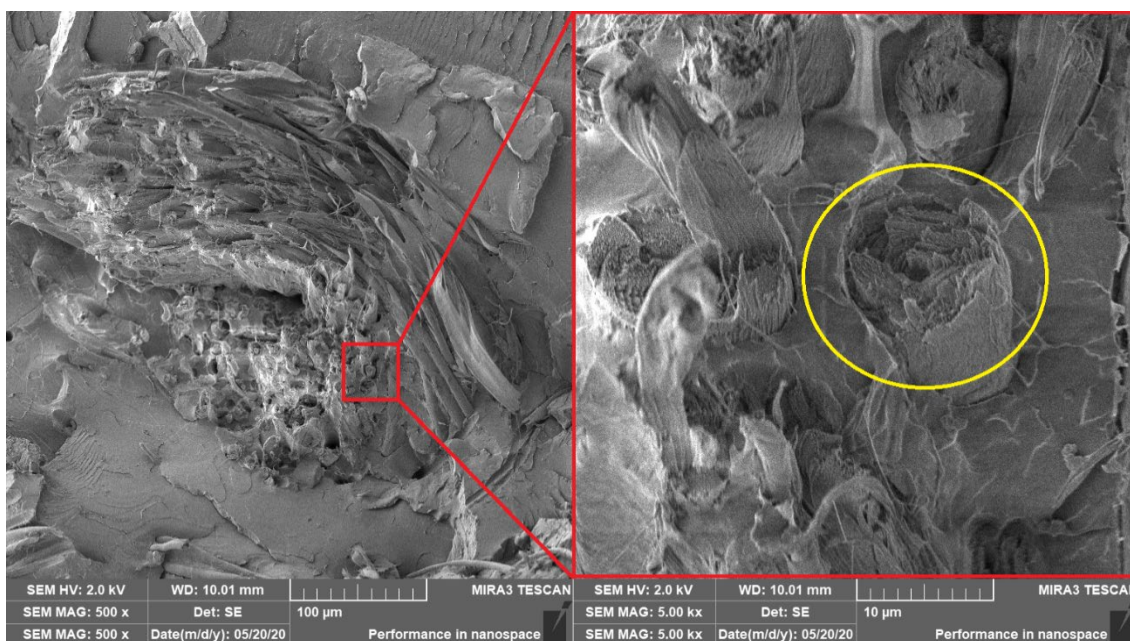


Obrázek 55: SEM snímek lomové plochy kompozitu s matricí PLA a nemodifikovanou PHT



Obrázek 56: SEM snímek prosycené bavlněné přize PLA matricí

Z mikroskopického snímku lomové plochy kompozitu s PLA matricí a povrchově modifikovanou prostorou pleteninou (viz obr. 57) lze učinit obdobné závěry, jako u předchozího obrázku. Tedy že je bavlněná přize dostatečně prosycena biopolymerní matricí a že adheze na mezifázovém rozhraní je nedostatečná. Současně je ze snímků patrné, že díky mercerizaci (působení louhu) dochází ke změně geometrie průřezu bavlněného vlákna, což se projevuje tím, že došlo ke změně původního průřezu na průřez kruhový (stejně závěry uvádí Kryštůfek [74]), což vede ke snížení měrného povrchu vlákna.

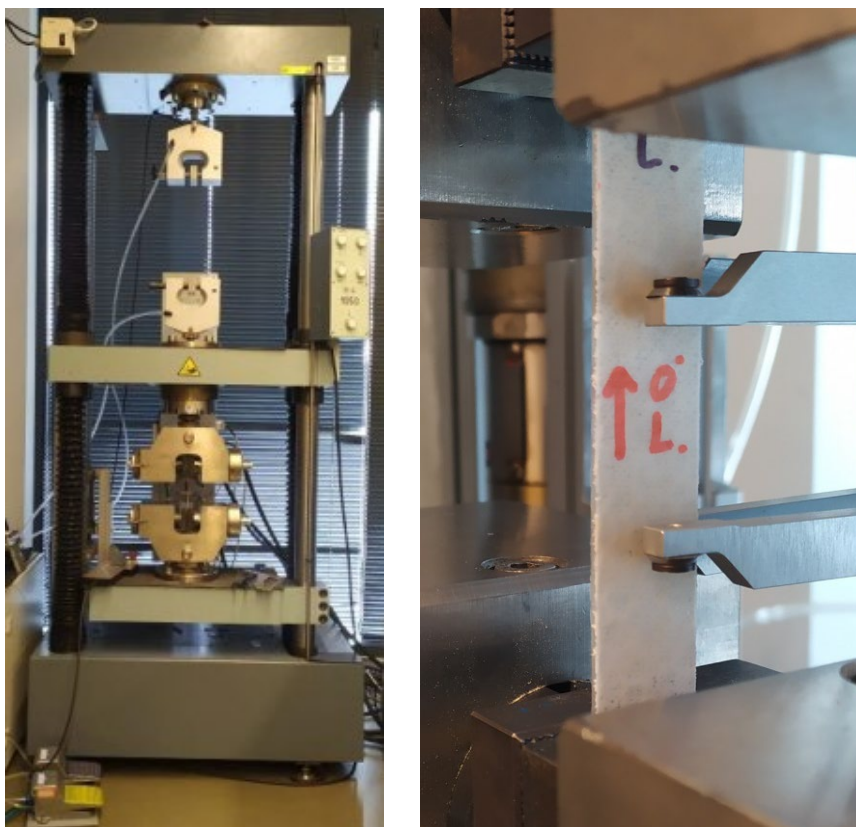


Obrázek 57: SEM snímek lomové plochy kompozitu s matricí PLA a modifikovanou PHT_L

3.6 Stanovení a vyhodnocení tahových vlastností

Zkouška v tahu probíhala dle normy ČSN EN ISO 527-4, která je určena pro izotropní a ortotropní plastové kompozity vyztužené vláknitým plnivem. Zaznamenávaným a hodnoceným výsledkem zkoušky byl modul pružnosti v tahu E_t , mez pevnosti v tahu σ_m a poměrné prodloužení na mezi pevnosti ε_m .

Měření probíhalo na trhacím stroji TiraTest 2300 (viz obr. 58 vlevo) při rychlostí 5 mm/min, respektive 2 mm/min do dosažení přepětí 2 N. Pro měření byla použita 100 kN snímací hlava s počáteční vzdáleností čelistí 100 mm. Pro hodnocení prodloužení byl použit průtahoměr MFL-300B (viz obr. 58 vpravo). Vyhodnocení naměřených hodnot bylo provedeno pomocí programu LabNet, který zaznamenával celý průběh tahové zkoušky (viz obr. 59)



Obrázek 58: Trhací stroj TiraTest 2300 (vlevo) a detail upnutí zkušebního tělesa s nainstalovaným průtahoměrem (vpravo)

U každého zkušebního vzorku o rozměrech 150 x 20 mm (délka x šířka) byla před upnutím do čelistí změřena jeho tloušťka, která byla zapsána do programu LabNet. Přístroj v průběhu testu zaznamenával závislost zatěžující síly na prodloužení (viz obr. 59). Hodnoty napětí byly následně

vypočítávají dle rovnice (5) a modul pružnosti v tahu byl vyhodnocen pomocí sečných křivek napětí k poměrnému prodloužení při hodnotách deformace 0,05 % a 0,25 % (6).

$$\sigma_m = \frac{F}{bh} \quad (5)$$

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (6)$$

kde: σ_m – pevnost v tahu [MPa]

kde: E_t – modul pružnosti v tahu [MPa]

F – příslušná zatěžující síla [N]

σ_1 – napětí při deformaci 0,05 % [MPa]

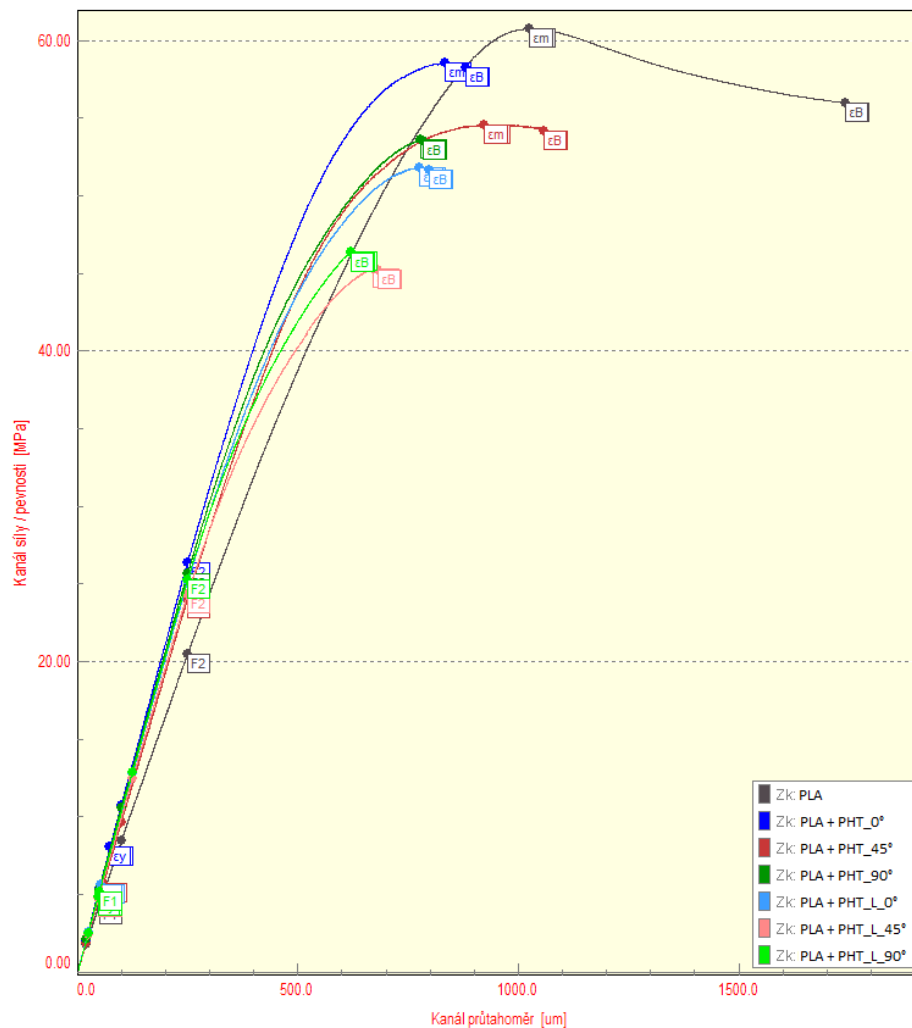
b – šířka zkušební vzorku [mm]

σ_2 – napětí při deformaci 0,25 % [MPa]

h – tloušťka zkušební vzorku [mm]

ε_1 – poměrné prodloužení 0,05 [%]

ε_2 – poměrné prodloužení 0,25 [%]



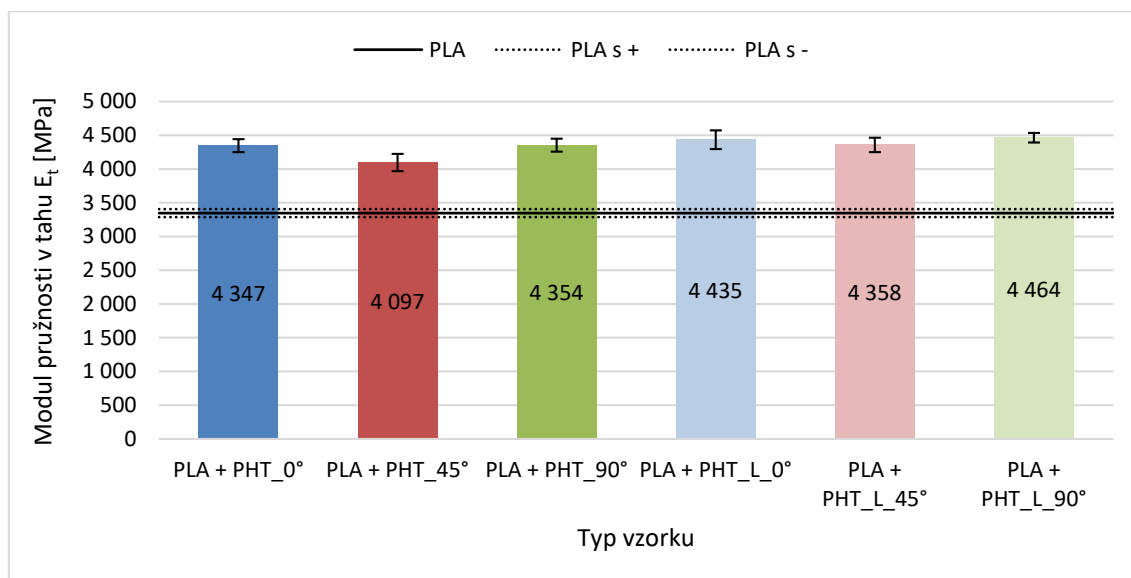
Obrázek 59: Příklad záznamu průběhů tahové zkoušky programem LabNet

Pro každý kompozitní materiál (viz tab. 18) resp. neplněnou matici bylo zkoušeno deset vzorků. Statisticky vyhodnocené naměřené hodnoty (průměrné hodnoty se směrodatnými odchylkami) modulu pružnosti v tahu, meze pevnosti v tahu a poměrného prodloužení na mezi pevnosti jsou uvedeny v tab. 19.

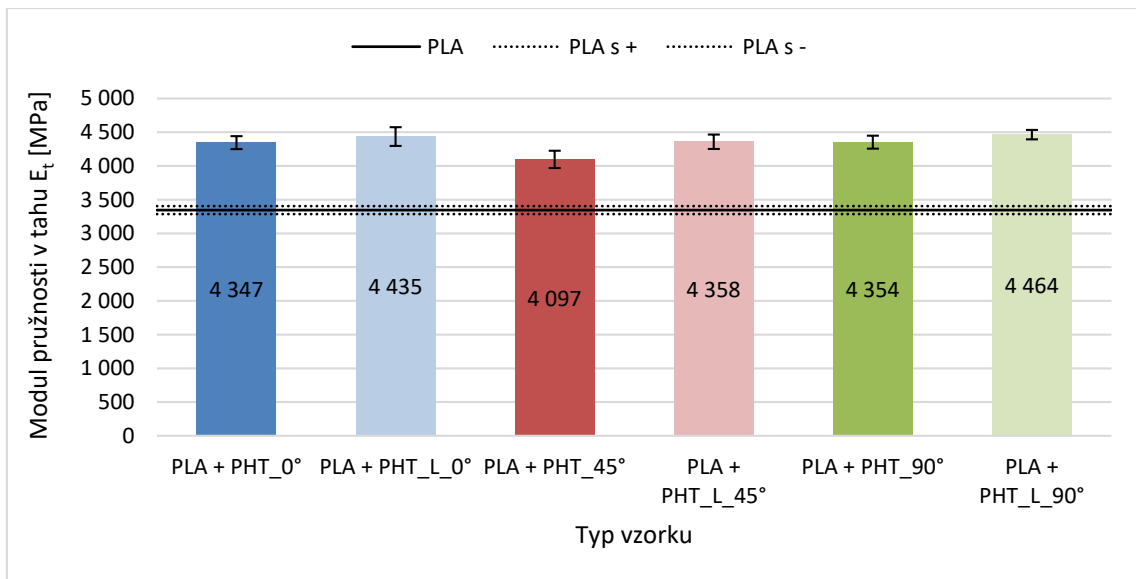
Tabulka 19: Průměrné hodnoty tahových charakteristik kompozitů PLA s prostorovou hybridní textilií

Konfigurace	Modul pružnosti v tahu E_t [MPa]	Pevnost v tahu σ_m [MPa]	Poměrné prodloužení ϵ_m [%]
PLA	3346 ± 59	60,1 ± 1,4	2,5 ± 0,1
PLA+PHT_0°	4347 ± 96	57,5 ± 2,1	2,0 ± 0,2
PLA+PHT_45°	4097 ± 128	54,9 ± 2,6	2,1 ± 0,3
PLA+PHT_90°	4354 ± 96	54,6 ± 2,1	1,9 ± 0,1
PLA+PHT_L_0°	4435 ± 139	55,2 ± 1,1	2,0 ± 0,1
PLA+PHT_L_45°	4358 ± 107	51,1 ± 2,3	1,7 ± 0,1
PLA+PHT_L_90°	4464 ± 71	50,6 ± 2,9	1,7 ± 0,2

Naměřené a statisticky vypočtené hodnoty modulu pružnosti v tahu s porovnáním a vyhodnocením vlivu povrchové modifikace PHT a vlivu orientace PHT v kompozitu vzhledem k neplněné PLA matici jsou uvedeny na obr. 60 a 61.



Obrázek 60: Vliv povrchové modifikace PHT na modul pružnosti v tahu



Obrázek 61: Vliv orientace PHT na modul pružnosti v tahu

Z naměřených hodnot modulu pružnosti v tahu lze učinit následující závěry:

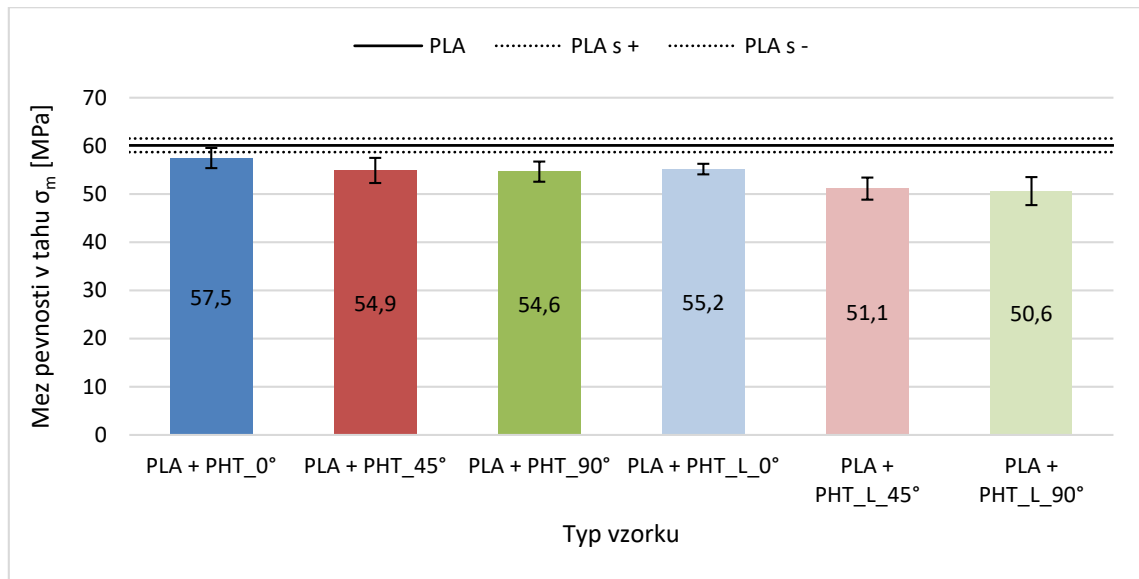
- Aplikací PHT do PLA matrice došlo ke zvýšení modulu pružnosti v tahu v průměru o 1000 MPa, což je zvýšení cca o 30 %.
- Aplikace povrchové modifikace bavlněné příze louhem vedla k nepatrnému navýšení modulu pružnosti v tahu (zhruba o 2,5 %).
- Vliv orientace PHT ve zkušebním vzorku je srovnatelná ve všech třech směrech u kompozitů s povrchově modifikovanou PHT. U PLA kompozitů bez povrchové modifikace je ve směru 45° hodnota modulu pružnosti v tahu nižší o cca 250 MPa, což je rozdíl asi 5 %.
- Nejvyšší hodnoty modulu pružnosti v tahu dosáhl kompozit PLA s povrchově modifikovanou PHT a orientací vzorku 0°. Modul pružnosti v tahu se oproti neplněné PLA matrici zvýšil o 1100 MPa, což je nárůst více jak 30 %.

Obdobně jako u modulu pružnosti v tahu lze vyhodnotit naměřené hodnoty meze pevnosti v tahu s vyhodnocením vlivu povrchové modifikace PHT a vlivu orientace PHT v kompozitu vůči neplněné PLA matrici jsou uvedeny na obr. 62 a 63.

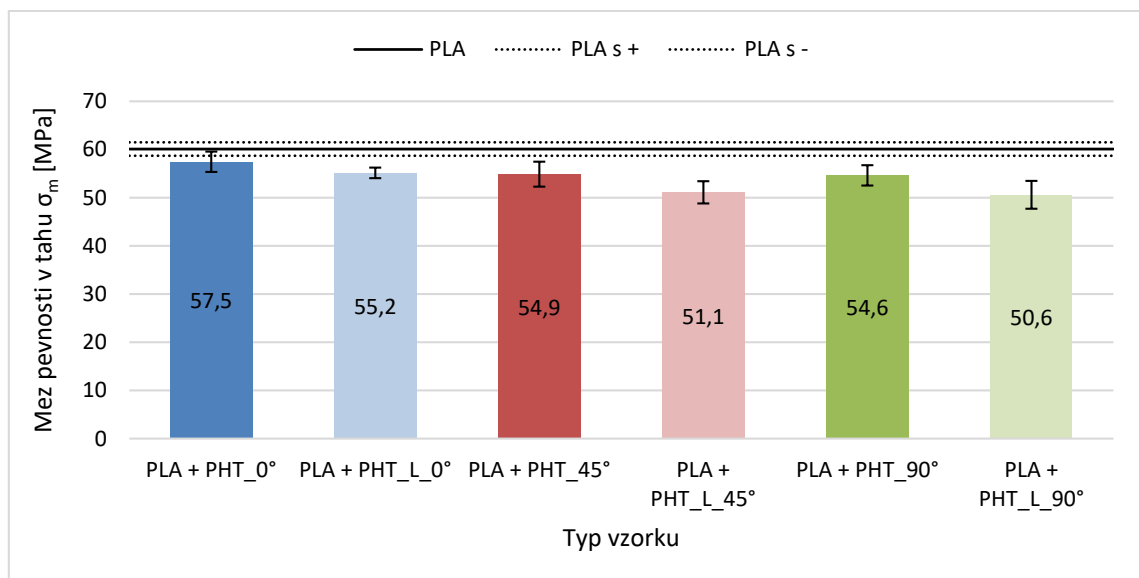
Z naměřených hodnot meze pevnosti v tahu lze zkonstatovat, že:

- Aplikací ať už nemodifikované nebo povrchově modifikované PHT do PLA matrice nedošlo ke zvýšení meze pevnosti v tahu.

- Neplněná PLA matrice dosahuje vyšších hodnot meze pevnosti v tahu než vzorky s přidáním PHT. U nemodifikované PHT je pokles v průměru 7,5 %. U povrchově modifikované PHT je pokles ještě vyšší, cca 12,5 %.
- Vyšších hodnot meze pevnosti při aplikaci PHT do kompozitu bylo dosaženo u povrchově nemodifikované PHT.
- Nejvyšších hodnot meze pevnosti v tahu z hlediska orientace PHT ve zkušebním vzorku je ve směru 0°. A to jak u povrchově modifikované, tak i nemodifikované PHT.

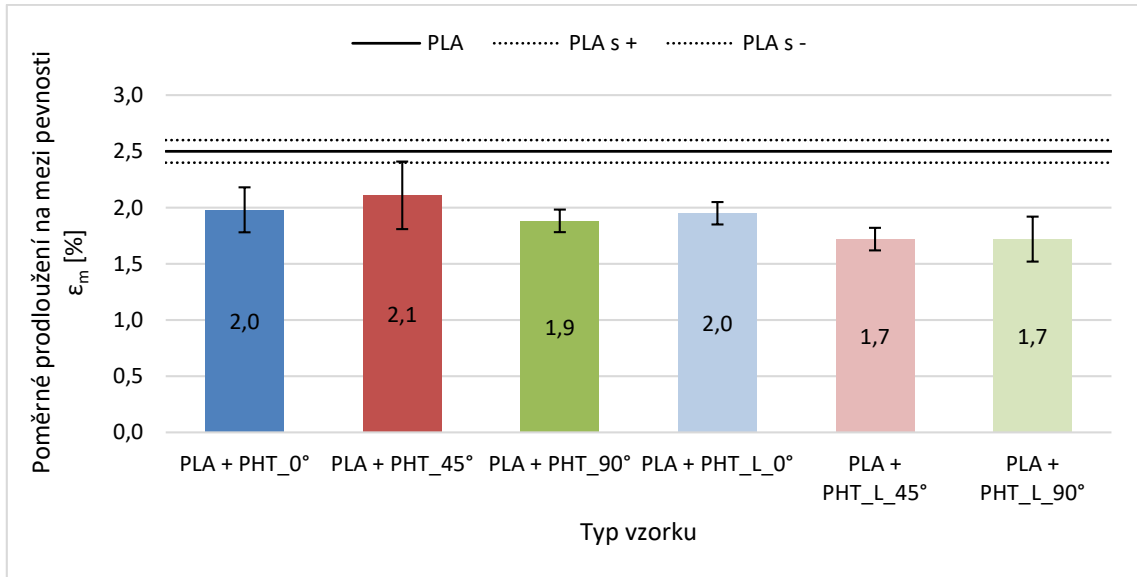


Obrázek 62: Vliv povrchové modifikace PHT na mez pevnosti v tahu

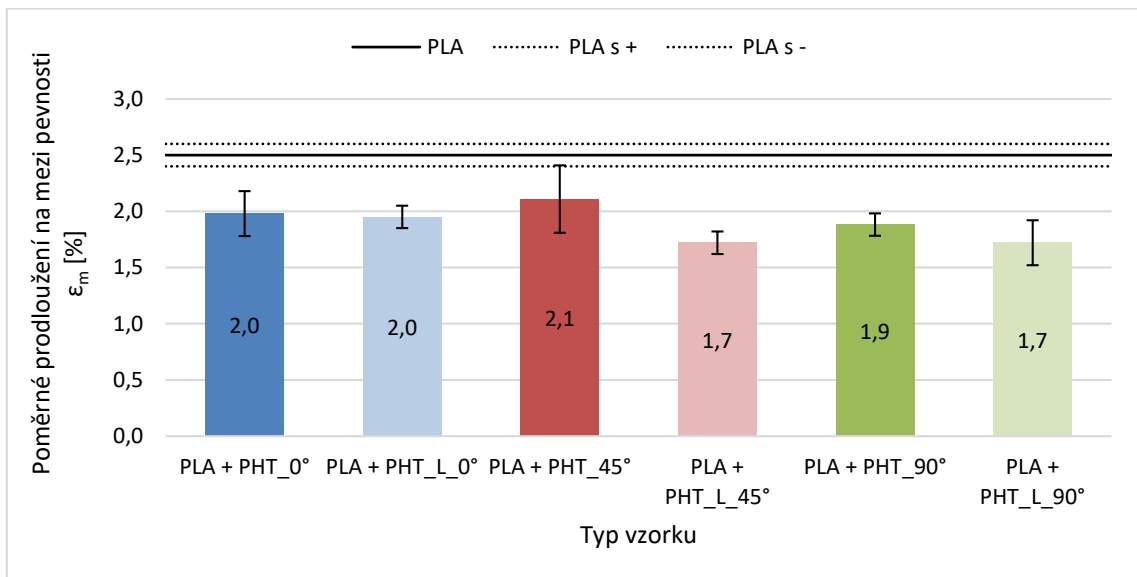


Obrázek 63: Vliv orientace PHT na mez pevnosti v tahu

Posledním měřeným a hodnoceným parametrem ze zkoušky tahem bylo poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu. A to jak s vyhodnocením vlivu povrchové modifikace PHT tak i vlivu orientace PHT v kompozitu vůči neupravené PLA matrici (viz obr. 64 a 65). Z naměřených hodnot poměrného prodloužení na mezi pevnosti v tahu lze učinit stejné závěry, jako pro mez pevnosti v tahu.



Obrázek 64: Vliv povrchové modifikace PHT na poměrné prodloužení



Obrázek 65: Vliv orientace PHT na poměrné prodloužení

3.7 Stanovení a vyhodnocení ohybových vlastností

Zkouška ohybem (tříbodový ohyb) probíhala dle normy ČSN EN ISO 178. Ke zkoušce byl použit stroj Hounsfield H10 KT (viz obr. 66) se snímací hlavou HTE-500N a průtahoměrem 100RC. Výsledkem zkoušky bylo stanovení modulu pružnosti v ohybu E_f a meze pevnosti v ohybu σ_{fM} .



Obrázek 66: Zkušební stroj Hounsfield H10 KT

Před vlastním měřením byla u každého zkušebního vzorku o rozměrech 80 x 10 mm (délka x šířka) změřena jeho tloušťka a následně byl vzorek volně uložen na dvě válečkové podpěry s rozpětím mezi válečky 32 mm. Vzorky po vytvoření předpětí byly následně prohýbány trnem, který působil konstantní rychlostí 1 mm/min uprostřed podpěr do okamžiku porušení vzorku nebo do hodnoty meze pevnosti. Průběh celé zkoušky zaznamenával program Qmat, ze kterého byly získány hodnoty napětí σ_{f1} a σ_{f2} při poměrných prodlouženích $\varepsilon_{f1} = 0,05 \%$ a $\varepsilon_{f2} = 0,25 \%$. Sekantový modul neboli modul pružností v ohybu byl následně vypočítán dle vztahu (7).

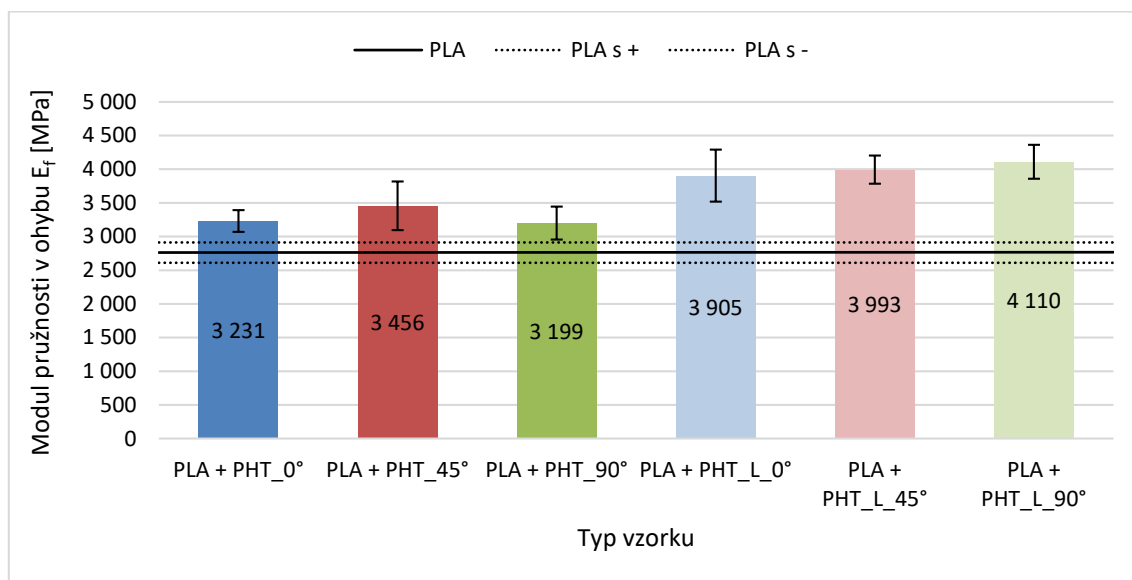
$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \quad (7)$$

- kde: E_f – sekantový modul [MPa],
 σ_{f1} – napětí při deformaci 0,05 % [MPa],
 σ_{f2} – napětí při deformaci 0,25 % [MPa],
 ε_{f1} – poměrné prodloužení 0,05 [%],
 ε_{f2} – poměrné prodloužení 0,25 [%].

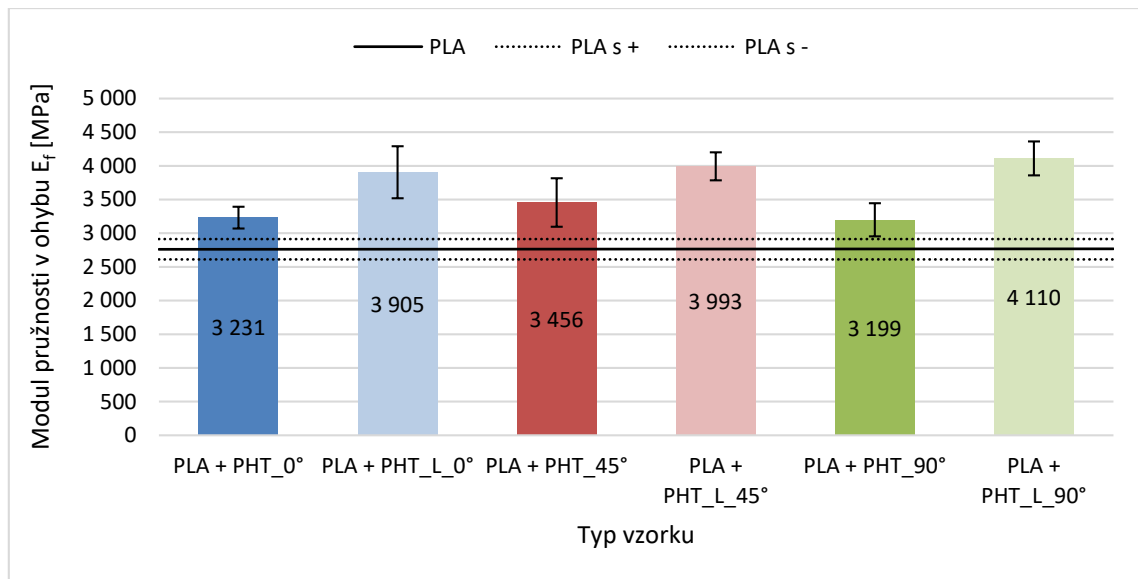
Pro každý kompozitní materiál (tab. 18) resp. neplněnou matici bylo zkoušeno deset vzorků. Statisticky vyhodnocené naměřené hodnoty (průměrné hodnoty se směrodatnými odchylkami) modulu pružnosti v ohybu a meze pevnosti v ohybu jsou uvedeny v tab. 20. Naměřené a statisticky vypočtené hodnoty modulu pružnosti v ohybu a meze pevnosti v ohybu s porovnáním a vyhodnocením vlivu povrchové modifikace PHT a orientace modifikace PHT v kompozitu vzhledem k neplněné PLA matici jsou uvedeny na obr. 67 až 70.

Tabulka 20: Průměrné hodnoty ohybových charakteristik PLA kompozitů s prostorovou hybridní textilií

Konfigurace	Modul pružnosti v ohybu E_f [MPa]	Pevnost v ohybu σ_{fM} [MPa]
PLA	2762 ± 151	98,8 ± 1,2
PLA+PHT_0°	3231 ± 162	104,8 ± 3,4
PLA+PHT_45°	3456 ± 361	103,9 ± 7,3
PLA+PHT_90°	3199 ± 245	100,8 ± 2,9
PLA+PHT_L_0°	3905 ± 386	102,7 ± 7,1
PLA+PHT_L_45°	3993 ± 209	104,9 ± 5,8
PLA+PHT_L_90°	4110 ± 252	97,6 ± 11,8



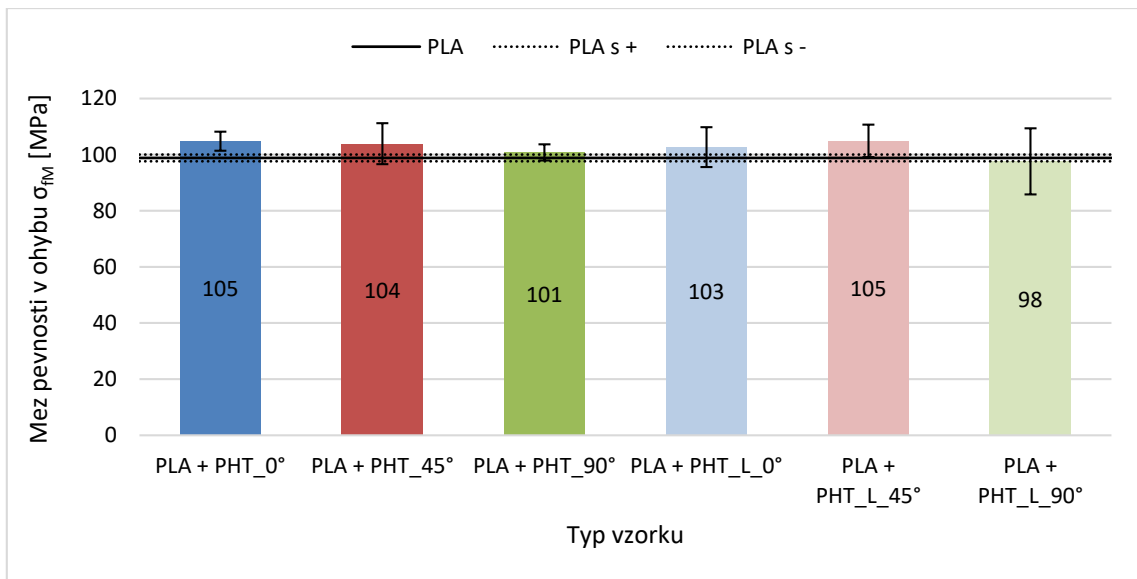
Obrázek 67: Vliv povrchové modifikace PHT na modul pružnosti v ohybu



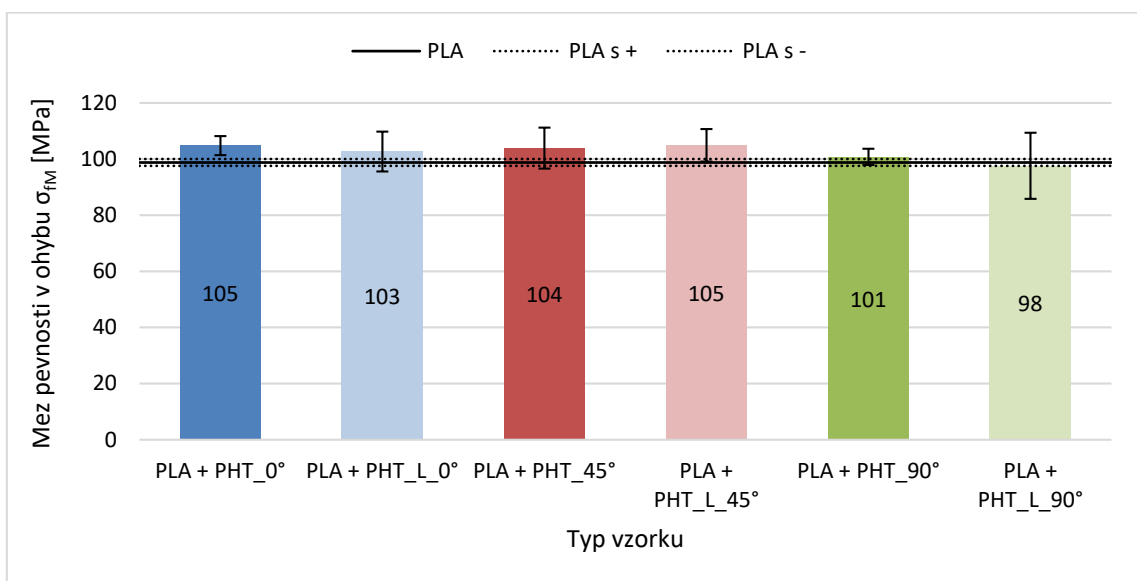
Obrázek 68: Vliv orientace PHT na modul pružnosti v ohybu

Z naměřených hodnot modulu pružnosti v ohybu lze učinit následující závěry:

- Aplikací povrchově nemodifikované PHT do PLA matrice došlo ke zvýšení modulu pružnosti v ohybu v průměru o 500 MPa, což je zvýšení cca o 20 %.
- Aplikací povrchově modifikované PHT mercerizací do PLA matrice došlo ke zvýšení modulu pružnosti v ohybu v průměru o 1250 MPa, což je zvýšení o více jak 45 %.
- Aplikace povrchové modifikace bavlněné příze louhem vedla k více jak dvojnásobnému zvýšení hodnot modulu pružnosti v ohybu oproti povrchově nemodifikované PHT.
- Nejvyšších hodnot modulu pružnosti v ohybu u kompozitů s nemodifikovanou PHT měly zkušební vzorky s orientací pleteniny 45°.
- Naopak u kompozitů s povrchově modifikovanou PHT jsou naměřené hodnoty ve všech směrech téměř shodné a nejvyšší modul pružnosti byl naměřen pro orientaci pleteniny 90°.
- Nejvyšší hodnoty modulu pružnosti v ohybu dosáhl kompozit PLA s povrchově modifikovanou PHT a orientací vzorku 90°. Modul pružnosti v ohybu se oproti neupravené PLA matici zvýšil o 1350 MPa, což je nárůst téměř 50 %.



Obrázek 69: Vliv povrchové modifikace PHT na mez pevnosti v ohybu



Obrázek 70: Vliv orientace PHT na mez pevnosti v ohybu

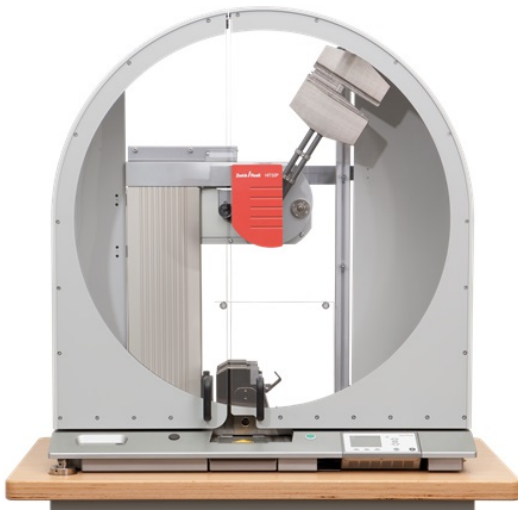
Z naměřených hodnot meze pevnosti v ohybu lze zkonstatovat, že:

- Aplikací ať už nemodifikované nebo povrchově modifikované bavlněné PHT do PLA matrice došlo k nepatrnému zvýšení hodnot meze pevnosti v ohybu. Vyšších hodnot meze pevnosti v ohybu při aplikaci PHT do kompozitu bylo dosaženo u povrchově nemodifikované PHT.

- U nemodifikované PHT je nárůst v průměru 5 %. U povrchově modifikované PHT je nárůst cca 2 %. Pokud budeme uvažovat průměrné hodnoty a směrodatnou odchylku, tak jsou naměřené hodnoty víceméně srovnatelné.
- Nejnižších hodnot meze pevnosti v ohybu z hlediska orientace PHT ve zkušební vzorku dosahují vzorky s orientací 90°. A to jak u povrchově modifikované, tak i nemodifikované PHT.

3.8 Stanovení a vyhodnocení rázových vlastností

Stanovení rázové houževnatosti probíhalo dle normy ČSN EN ISO 179-1 a doplňku ISO 179-1/1fU metodou Charpy. Pro neplněné vzorky bylo použito zkušební zařízení Zwick HIT50P s kyvadlem Charpy a nominální energií kladiva 50 J (viz obr. 71). Vzorky s prostorovou hybridní textilí byly testovány na zařízení Resil Ceast 5.5 S.p.A. (viz obr. 72) s nominální energií kladiva 5 J. Výsledkem zkoušky bylo stanovení rázové houževnatosti a_{CU} .



Obrázek 71: Rázové kladivo Zwick HIT50P [75]



Obrázek 72: Rázové kladivo Resil Ceast 5.5 S.p.A.

Jako u předešlých zkoušek, tak i u této zkoušky byla před vlastním měřením změřena tloušťka každého zkušební vzorku. Ostatní rozměry vzorků byly stejné, jako u zkoušky ohybem (80 x 10 mm). Před samotným měřením byla provedena kalibraci přístroje, kdy kyvadlo bylo spuštěno „naprázdno“, aby se odstranily mechanické odpory a odpor vzduchu. Ke zkoušce rázové houževnatosti PLA kompozitů bylo použito kyvadlo s nominální energií 5 J. U vzorků s neplněnou PLA maticí nedošlo k přeražení zkušebních těles, proto bylo následně použito 50 J kyvadlo na zařízení Zwick HIT50P a zkouška se opakovala. Z důvodu hodnocení vlivu PHT na vlastnosti kompozitu, probíhala zkouška rázem na širší stranu vzorku. Během zkoušky byly zapisovány naměřené hodnoty energie potřebné k přeražení a typ přeražení. Pro dokončení zkoušky byla vypočítána rázová houževnatost a_{cU} dle vztahu (8).

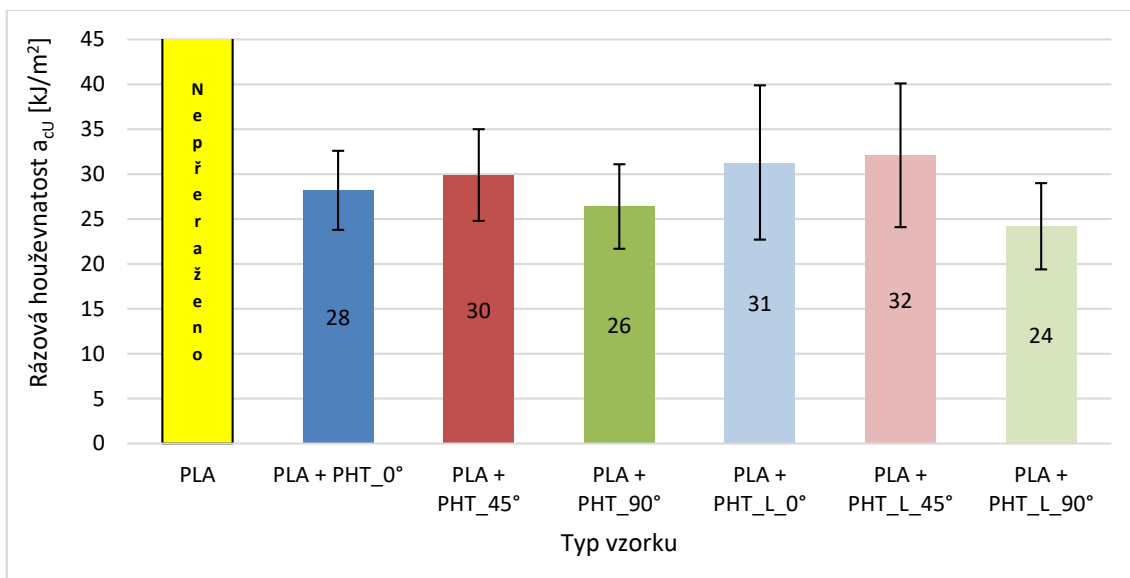
$$a_{cU} = \frac{E_c \times 10^3}{hb} \quad (8)$$

- kde: a_{cU} – rázová houževnatost [kJ/m²],
 E_c – energie potřebná k přeražení zkušební vzorku [J],
 h – tloušťka zkušebního vzorku [mm],
 b – šířka zkušební vzorku [mm],

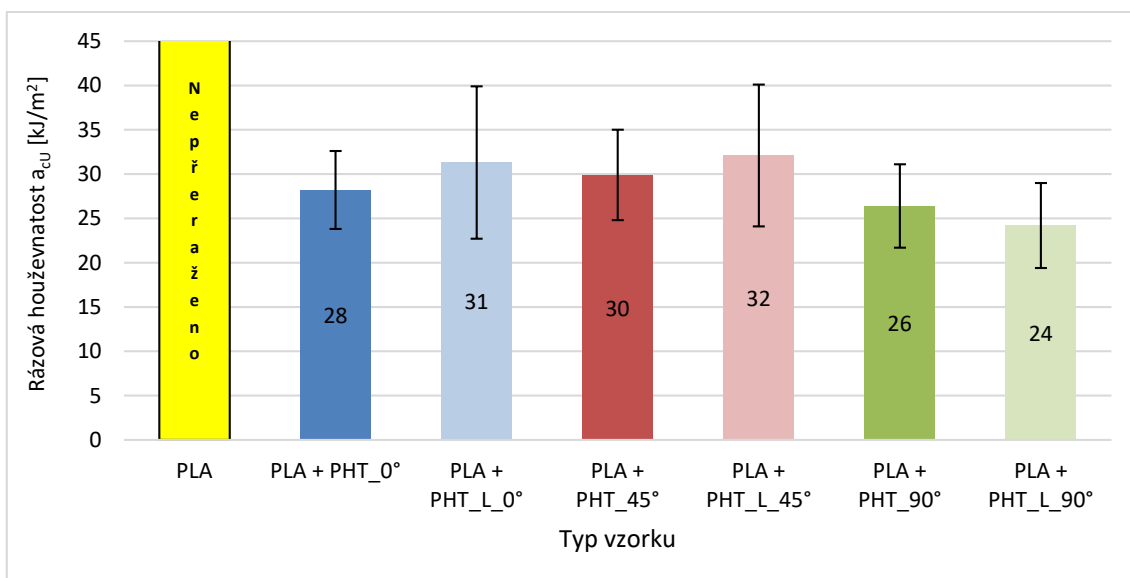
Tabulka 21: Průměrné hodnoty rázové houževnatosti PLA kompozitů s prostorovou hybridní textilií

Konfigurace	Rázová houževnatost a_{cU} [kJ/m ²]
PLA	N - nepřeraženo
PLA + PHT_0°	28,2 ± 4,4
PLA + PHT_45°	29,9 ± 5,1
PLA + PHT_90°	26,4 ± 4,7
PLA + PHT_L_0°	31,3 ± 8,6
PLA + PHT_L_45°	32,1 ± 8,0
PLA + PHT_L_90°	24,2 ± 4,8

Pro každý kompozitní materiál (viz tab. 18) resp. neplněnou maticí bylo zkoušeno deset vzorků. Statisticky vyhodnocené naměřené hodnoty (průměrné hodnoty se směrodatnými odchylkami) rázové houževnatosti jsou uvedeny v tab. 21. Naměřené a statisticky vypočtené hodnoty rázové houževnatosti s porovnáním a vyhodnocením vlivu povrchové modifikace PHT a vlivu orientace PHT v kompozitu vzhledem k neplněné PLA maticí jsou uvedeny na obr. 73 a 74.



Obrázek 73: Vliv povrchové modifikace PHT na rázovou houževnatost



Obrázek 74: Vliv orientace PHT na rázovou houževnatost

Z naměřených hodnot rázové houževnatosti lze učinit následující závěry:

- Zkušební vzorky z PLA matrice nebyly přeraženy.
- Vyšších hodnot rázové houževnatosti bylo dosaženo u vzorků s povrchově modifikovanou PHT (zvýšení v průměru o 5 % oproti povrchově nemodifikované PHT).
- Nejvyšších hodnot rázové houževnatosti u PLA kompozitů ať už s nemodifikovanou nebo povrchově modifikovanou PHT měly zkušební vzorky s orientací pleteniny 45°.

- Naopak nejnižších hodnot rázové houževnatosti u PLA kompozitů ať už s nemodifikovanou nebo povrchově modifikovanou PHT měly zkušební vzorky s orientací pleteniny 90°, kde byl pokles významný.
- Nejvyšší hodnoty rázové houževnatosti dosáhl kompozit PLA s povrchově modifikovanou PHT a orientací vzorku 45°.

3.9 Stanovení a vyhodnocení teplotní odolnosti

Zkouška teplotní odolnosti HDT probíhala dle normy ČSN EN ISO 75-1/2 na přístroji Zwick / Roell (viz obr. 75). Cílem zkoušky bylo stanovení teploty průhybu vzorků při zatížení.



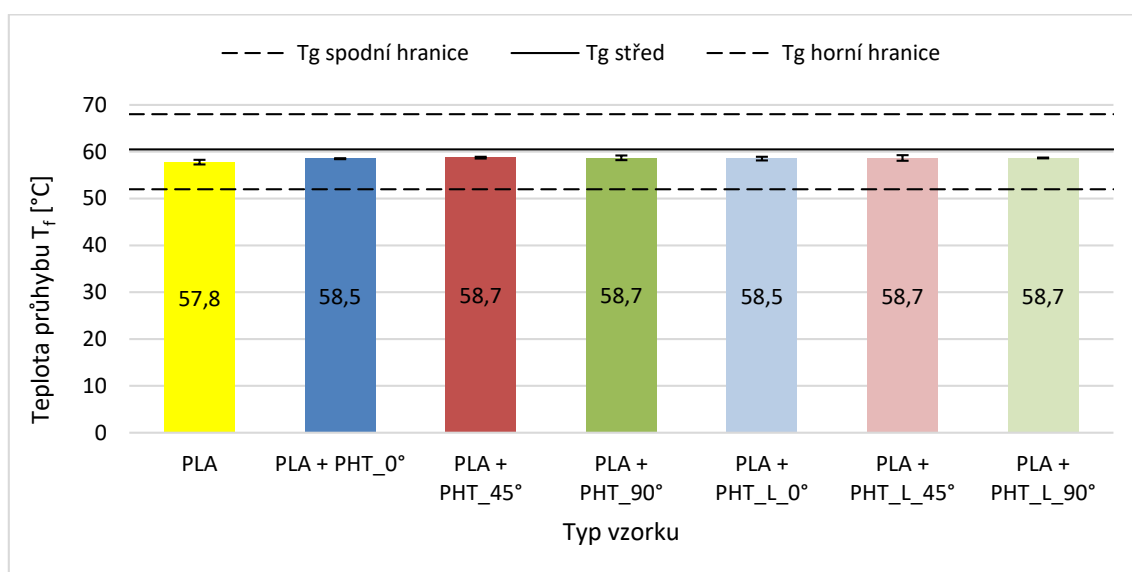
Obrázek 75: Přístroj Zwick/Roell, HDT/Vicat A

Teplota průhybu při zatížení byla stanovena metodou A, kdy na vzorek působilo zatížení, které vyvolalo napětí 1,8 MPa. Vzhledem k nestandardní tloušťce zkušební vzorku bylo nutné upravit zatížení tak, aby bylo dosaženo napětí 1,8 MPa. Pro vzorek s tloušťkou 2 mm, šířkou 10 mm, délkou 80 mm a pro vzdálenost podpěr 64 mm bylo použito zatížení 76,5 gramů (vodící tyčka 68 g + 8,5 g).

Obdobně jako u předchozích zkoušek, tak i při zkoušce teplotní odolnosti bylo pro každý kompozitní materiál (viz tab. 18) resp. neplněnou matici zkoušeno deset vzorků. Statisticky vyhodnocené naměřené hodnoty (průměrné hodnoty se směrodatnými odchylkami) teploty průhybu jsou uvedeny v tab. 22. Naměřené a statisticky vypočtené hodnoty teploty průhybu s vyhodnocením vlivu povrchové modifikace PHT a vlivu orientace PHT v kompozitu vzhledem k neplněné PLA matici jsou uvedeny na obr. 76.

Tabulka 22: Průměrné hodnoty teploty průhybu PLA kompozitů s prostorovou hybridní textilií

Konfigurace	Teplota průhybu T_f [°C]
PLA	57,8 ± 0,5
PLA+PHT_0°	58,5 ± 0,1
PLA+PHT_45°	58,7 ± 0,2
PLA+PHT_90°	58,7 ± 0,5
PLA+PHT_L_0°	58,5 ± 0,4
PLA+PHT_L_45°	58,7 ± 0,6
PLA+PHT_L_90°	58,7 ± 0,1



Obrázek 76: Teplotní odolnost HDT PLA kompozitů

Z naměřených hodnot teploty průhybu, která je v obrázku porovnávána s teplotou zeskelnění, lze učinit následující závěry:

- Teplota průhybu, naměřená pro všechny vzorky, je srovnatelná s průměrnou teplotou zeskelnění, která je u amorfního PLA od 52 do 68 °C (viz obr. 35 na str. 40).
- Naměřené hodnoty teploty průhybu jsou téměř srovnatelné. Vliv na hodnoty teploty průhybu nemá orientace PHT v PLA matrici, tak ani přidání PHT do matrice a modifikace bavlněné příze.

3.10 Diskuse získaných výsledků

Na základě provedených zkoušek a vyhodnocení naměřených hodnot je patrné, že:

- 1) Použití PHT do PLA matrice vedlo ke zvýšení modulu pružnosti v tahu o 30 %. Na základě znalostí a již prezentovaných výsledků v odborné literatuře jsem očekával, že zvýšení modulu pružnosti bude výraznější. Na druhé straně použitá PHT je vyrobena z „měkké“ bavlněné příze, která nemá tak významný tuhostní efekt, jako třeba vlákna konopí nebo bambusu.
- 2) Vliv aplikace povrchové modifikace bavlněné příze (mercerizace) nevedla k výrazné změně tahových vlastností. Jak zmiňuje Dembický [76] ve svých skriptech, modifikace louhem by měla zvýšit pevnost v tahu. Dle mého názoru to je způsobeno tím, že adheze na mezifázovém rozhraní vlákno-matrice není dostatečná, což potvrzují i mikroskopické snímky (viz obr. 56 a 57). Doporučuji proto zvýšit jednak koncentraci louhu nebo prodloužit dobu mercerizace.
- 3) Nejvyšší modul pružnosti v tahu byl naměřen u povrchově modifikované PHT s orientací 0°, kdy se zvýšil o více jak 30 % oproti neupravené PLA matrici. Dle mého názoru je to způsobeno jednak tím, že PHT je ve směru 0° méně tvárná, než ve směru 90° a také tím, že se zde pozitivně projevil synergický efekt PHT jako plniva a částečně i efekt mercerizace.
- 4) Vložením ať už povrchově modifikované nebo nemodifikované PHT do PLA matrice nedošlo ke zvýšení meze pevnosti v tahu. Dle mého názoru je to způsobeno tím, že pro rozměrově stejnou zkušební destičku při aplikaci PHT došlo ke snížení objemu PLA matrice a její nahrazení poddajnou bavlněnou přízí.
- 5) Aplikací povrchově nemodifikované PHT do PLA matrice došlo k navýšení modulu pružnosti v ohybu o cca 20 %. Výsledek je obdobný jako u modulu pružnosti v tahu i se stejnými závěry.
- 6) Aplikací povrchově modifikované PHT do PLA matrice došlo k navýšení modulu pružnosti v ohybu o 45 %, což je zhruba dvojnásobek oproti nemodifikované PHT. Za tento nárůst může pravděpodobně změna tvaru bavlněného vlákna po mercerizaci. Změna tvaru vlákna (viz obr. 57) vedla k lepšímu přenášení namáhání, než vlákno bez modifikace (viz obr. 56), který má spíše plochý tvar.
- 7) PLA kompozity povrchově modifikovanou PHT při orientaci 90° dosáhly oproti neupravené PLA matrici nárůst modulu pružnosti téměř o 50 %, resp. pokles meze pevnosti v ohybu. Dle mého názoru je to jednak vliv nitě bavlněné příze v pletenině, kdy ve směru 0°

je mnohem větší problém z hlediska rozvinutí vlákna (vytažení) z textilie a také změna způsobu zatěžování, kdy z jednoosého namáhání dochází k tahovému, resp. tlakovému namáhání zkušebního vzorku.

- 8) Nejvyšší hodnoty rázové houževnatosti u PLA kompozitů měly vzorky s orientací PHT 45° ať už s povrchově modifikovanou nebo nemodifikovanou bavlněnou přízí. Dle mého názoru je to způsobeno tím, že v okamžiku deformace je vzorek vystaven nejenom rázovému namáhání, ale PHT se snaží eliminovat ráz a její orientace pod úhlem 45° eliminuje rázové namáhání nejlépe.

Pokud by se zkoušené PLA kompozity s prostorovou hybridní textilií měly používat na průmyslové aplikace, tak doporučuji následující:

- 1) Aplikace PHT do PLA matrice vedla ke zvýšení tahových a ohybových vlastností o cca 30 až 50 %.
- 2) Pokud bude díl vystaven jednoosému tahovému namáhání, tak doporučuji orientaci PHT 0°.
- 3) Pokud bude díl vystaven ohybovému namáhání, tak doporučuji orientaci PHT v PLA matrici naopak pod úhlem 90°.
- 4) Pro rázové namáhání nejlépe vycházela orientace 45°.
- 5) Povrchová modifikace má výrazný dopad na zlepšení vlastností pouze u ohybového namáhání.

4 Závěr

Cílem diplomové práce bylo hodnocení mechanických vlastností kompozitů s PLA matricí a prostorovou hybridní textilií ve formě plniva. Dále byly hodnoceny a porovnávány vlastnosti kompozitu s povrchovou modifikací PHT a rozdílnou orientací PHT v kompozitu vzhledem k neplněné PLA matrici. Tato diplomová práce, která byla vypracována na téma Hierarchické biodegradovatelné kompozitní systémy s 3D textilní výztuží, se skládá ze dvou hlavních částí, teoretické a experimentální.

Teoretická část popisuje základní vlastnosti kompozitních materiálů, jejich rozdělení a způsob jejich výroby. Dále jsou rozebrány textilní struktury, zejména prostorové hybridní pleteniny, které jsou použity jako plnivo v kompozitních dílech. Další kapitoly jsou věnovány biopolymeru kyseliny polymléčné (PLA) a technologii lisování kompozitů. Na závěr teoretické části je popsán princip a vliv povrchových modifikací vlákenného plniva.

Experimentální část zahrnuje popis použitých materiálů, strojů a forem, odladění procesu lisování, výrobu kompozitních destiček technologií lisováním, přípravu zkušebních vzorků, laboratorní měření a hodnocení vlastností z naměřených hodnot. Kompozit tvoří prostorová hybridní textilie (PHT) upletená z bavlněné příze a zalisovaná do polymerní matrice PLA Ingeo™ Biopolymer 3001D. V diskuzi je provedeno vyhodnocení získaných výsledků a doporučení pro další činnost.

Závěrem diplomové práce bych chtěl doporučit možnosti dalšího výzkumu, který by se v návaznosti na experimentální část diplomové práce mohl zabývat modifikací PLA matrice tak, aby se snížila teplota zeskenění k teplotě 25 °C pro získání houževnatější matrice, např. přidáním změkčovadel nebo pomocí „blendování“ směsi s jiným houževnatějším polymerem. Další možností pro výzkumné činnosti je impregnace PHT před vlastním lisováním, např. nanesení rozpuštěné PLA matrice na bavlněnou přízi PHT s následným vysušením. Důvodem je, že by mohlo docházet při lisování k menším deformacím textilie při kontaktu s nepředehřátým granulátem, který měl tendenci při předehřevu roztahovat očka textilie. V neposlední řadě by mohla být vyzkoušena jiná příprava vzorků z vylisovaných destiček, např. řezání vodním paprskem nebo laserem.

5 Použitá literatura

- [1] BAREŠ, Richard A. *Kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988, 325 s. Dostupné z:
http://aleph.lib.cas.cz/F/?func=direct&doc_number=000232821&local_base=AV
- [2] ROSICKÝ, Jiří a Josef KLEMENT. *Úvod do problematiky kompozitních materiálů* [online]. VUT FSI Brno: FOPTO - Federace ortopedických protetiků technických oborů [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <http://www.ortotikaprotetika.cz/oldweb/Wc4a791405f74c.htm>
- [3] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů*. Brno, 2008.. Publikace. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky.
- [4] BILGILER, Faydali. Kerpiç Nedir?. In: *Reitix* [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.reitix.com/Makaleler/Kerpice-Nedir/ID=2007>
- [5] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály: definice a rozdělení*. Technická univerzita v Liberci, 2008. Dostupné z:
http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defroz.pdf
- [6] Kompozity - vyztužené plasty. [Http://www.gdpkoral.cz](http://www.gdpkoral.cz) [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <http://www.gdpkoral.cz/co-jsou-kompozitni-materialy/w6>
- [7] *Synergický efekt* [online]. In: . [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcS0q89cwMK4cnvTDuQ29GdJHvosw1HJfBLc-vz-DvP-91AZNu0gf&usqp=CAU>
- [8] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití* [online]. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006 [cit. 2020-05-22]. ISBN 80-708-0617-6.
- [9] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [10] MÍŠEK, Bohumil. *Kompozity*. Brno: Technický dozorčí spolek - Sekce materiálů a svařování, 2003. ISBN 80-903-3860-7.

- [11] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. Liberec, 2015. ISBN 978-80-88058-68-7.
- [12] HULL, D. a T.W CLYNE. *An introduction to composite materials*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1996. Cambridge solid state science series. ISBN 05-213-8855-4.
- [13] *ANTEC 2000 Plastics: The Magical Solution, Volume 2: Materials* [online]. knovel: Society of Plastics Engineers, 2001 [cit. 2020-05-22]. ISBN 978-1-59124-012-9. Dostupné z: <https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpANTECP01/viewerType:toc/>
- [14] MÍŠEK, Bohumil. *Polymery, keramika, kompozity* [online]. Brno: Vysoké učení technické, 1993 [cit. 2020-05-22]. ISBN 80-214-0521-X.
- [15] VROMAN, Isabelle a Lan TIGHZERT. *Biodegradable Polymers*. Francie, 2009, , 307-344. ISSN 1996 – 1944.
- [16] REN, Jie. *Biodegradable Poly(Lactic Acid): Synthesis, Modification, Processing and Applications* [online]. 2010. Springer Berlin Heidelberg, 353 s. [cit. 2020-06-10]. ISBN 978-3-642-17596-1.
- [17] ŠNEJDROVÁ, Eva a Milan DITTRICH. *POLY(α -HYDROXYKyseliny) Jako nosiče léčiv: Chem. Listy 105, 27-33 (2011)* [online]. Hradec Králové, 2010 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2011_01_27-33.pdf. Referát. Univerzita Karlova v Praze, Farmaceutická fakulta v Hradci Králové, Katedra farmaceutické technologie.
- [18] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymeri 1: Díl druhý: Základní přehled polymerů, vlastnosti a aplikace* [online]. 2. Liberec, 2020 [cit. 2020-05-22]. ISBN 978-80-7494-515-1.
- [19] BLACKBURN, Richard. [online]. 1. Woodhead Publishing, 2005, 464 s. [cit. 2020-05-22]. ISBN 9781855739161. Dostupné z: <https://www.elsevier.com/books/biodegradable-and-sustainable-fibres/blackburn/978-1-85573-916-1>
- [20] AURAS, Rafael, Loong-Tak LIM, Susan SELKE a Hideto TSUJI. *Poly(lactic acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications* [online]. 15.4.2011. Wiley, 528 s. [cit. 2020-05-22]. ISBN 978-1-118-08813-5.
- [21] ENGELBERG, Israel a Joachim KOHN. Biomaterials: Physico-mechanical properties of degradable polymers used in medical applications: A comparative study. *Sciencedirect*. 3. 1991, , 292-304. DOI: 10,016 / 0142-9612 (91) 90037-b.

- [22] HENTON, David, Patrick GRUBER, Jim LUNT a Jed RANDALL. *Polylactic Acid Technology* [online]. 2005, 52 s. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z:
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.476.9328&rep=rep1&type=pdf>
- [23] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [24] MACHÁŇ, Ladislav. *Využití elektrických vlastností kompozitních materiálů s modifikovanou cementovou matricí* [online]. Brno, 2015 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=111135.
Zkrácena verze disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Pavel Šteffan.
- [25] Kompozit. In: *Docplayer* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z:
<https://docplayer.cz/docs-images/56/38914368/images/13-0.png>
- [26] *Kompozitní materiály: Kompozity s plastovou matricí*. Liberec. Dostupné z:
https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/3594/mod_resource/content/1/PMC.pdf
- [27] *Kompozitní materiály* [online]. In: . 2014 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z:
http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf
- [28] STOJANOV NENOV, Stanislav. *Technologie výroby sklolaminátového dílu*. Brno, 2017, 52 s.. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. Bohumil Kandus.
- [29] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu* [online]. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008 [cit. 2020-05-25]. ISBN 978-80-01-03927-4.
- [30] Bezpečnost potravin. *Bezpecnostpotravin.cz* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z:
<https://www.bezpecnostpotravin.cz/az/termin/92360.aspx>
- [31] GAY, Daniel. *Les Materiaux Composites*. 3. Paříž: Hermes, 1991. ISBN 2866012682.
- [32] *Vláknové kompozitní materiály, jejich vlastnosti a výroba*. 26.října 2007. Praha, 2007.
Dostupné z:
http://www.kompozity.info/seminar/2_seminar/1_materialy_technologie.pdf

- [33] TRČKA, Radim. *Obrábění součásti z kompozitního materiálu*. Brno, 2014.. Bakalářská. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Milan Kalivoda.
- [34] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007 [cit. 2020-05-25]. ISBN 978-807-3722-791.
- [35] IDNES.CZ, ČTK. Liberecká univerzita testuje využití přírodních vláken v autech. *Idnes.cz* [online]. 2012 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/auto/zpravodajstvi/liberecka-univerzita-testuje-vyuziti-prirodnich-vlaken-v-autech.A120117_121609_automoto_fdv
- [36] STEIDL, Josef. Plasty a kompozity naplňují materiálové požadavky moderního strojírenství. *MM Science Journal* [online]. 2005, **2005**(1), 35 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/plasty-a-kompozity-naplnuji-materialove-pozadavky-moderniho-strojirens.html>
- [37] ČERNÝ, Jan. *Kompozitní materiály s textilní hierarchickou struktúrní výztuží*. Liberec, 2019.. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní. Vedoucí práce Petr Lenfeld.
- [38] PAKOSTOVÁ, Věra. *Textilní vlákna*. Masarykova univerzita, 2010. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/jaro2017/C5985/um/Textilni_vlakna-text_k_prednasce.pdf. Seminář. Masarykova univerzita.
- [39] *Technické textilie* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <http://www.veba.cz/cs/technicky-textil>
- [40] *Technické tkaniny* [online]. <https://www.calounickymaterial.cz/> [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.calounickymaterial.cz/kategoria/technicke-tkaniny-0>
- [41] *Tepelné izolace* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://alpax.cz/>
- [42] AGARWAL, Bhagwan, Lawrence BROUTMAN a K. CHANDRASHEKHARA. *Analysis and performance of fiber composites* [online]. Fourth edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2018 [cit. 2020-06-09]. ISBN 978-1-119-38998-9.
- [43] Skelný pramenec. In: *Info.bwfiberglass.com* [online]. [cit. 2020-06-09]. Dostupné z: <http://info.bwfiberglass.com/blog/product-spotlight-fiberglass-roving>

- [44] Rohož. In: <https://www.composites4c.cz> [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.composites4c.cz/images/rohoze2.jpg>
- [45] Tkanina - osnova - útek. In: [Caramilla.cz](http://www.caramilla.cz) [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.caramilla.cz/wp-content/uploads/2019/03/tkanina-osnova-utek.png>
- [46] DOSTALOVÁ, Mirka a Mária KŘIVÁNKOVÁ. *Základy textilní a oděvní výroby* [online]. Vyd. 3., upr. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2004 [cit. 2020-05-22]. ISBN 80-708-3831-0.
- [47] Druhy vazeb. In: [Caramilla.cz](http://www.caramilla.cz) [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.caramilla.cz/wp-content/uploads/2019/03/tkane-textilie-tri-druhy-vazeb-caramilla-kepr-platno-atlasova.png>
- [48] HRUŠKA, Blahoslav. *S tkaninou do třetí dimenze* [online]. , 1 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.export.cz/nazory-a-analyzy/s-tkaninou-do-treti-dimenze/>
- [49] Distanční tkaniny s konstantní výškou. In: <https://www.3dweaving.com> [online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.3dweaving.com/en/products/distance-fabrics/constant-height>
- [50] Distanční tkanina s variabilní výškou. In: <https://www.3dweaving.com> [online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.3dweaving.com/en/products/distance-fabrics/variable-height>
- [51] *Pleteniny* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <http://www.n-i-s.cz/cz/pleteniny/page/456/>
- [52] *Zobrazení řádků a sloupců: Základní pojmy* [online]. In: . [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: https://player.slideplayer.cz/79/13241993/slides/slide_10.jpg
- [53] *Distanční pletenina* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: https://cs.dbpedia.org/page/Distan%C4%8Dn%C3%AD_pletenina
- [54] KOVÁŘOVÁ, Aneta. *Struktury osnovní pleteniny*. Liberec, 2016, 25 s. Dostupné z: [Stag.tul.cz](http://stag.tul.cz). Bakalářská. Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní. Vedoucí práce Renata Štorová.

- [55] Tylex - technické textilie. In: *Cdn.myshoptet.com* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://cdn.myshoptet.com/usr/www.xstyleshop.cz/user/documents/upload/tylex-technicke-textilie.jpg>
- [56] MILITKÝ, Jiří. *Textilní vlákna: klasická a speciální* [online]. V Liberci: Technická univerzita, 2012 [cit. 2020-06-10]. ISBN 978-80-7372-844-1.
- [57] ILDZHIEVA, Svetlana. *Porovnání teoretického zakrytí tkaniny se zakrytím získaným z obrazové analýzy*. Liberec, 2015.. Bakalářská. Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní. Vedoucí práce Vladimír Bajžík.
- [58] ŠKOPOVÁ, Adéla. *Vliv podložených klíčků na mechanické vlastnosti pletenin*. Liberec, 2017.. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní. Vedoucí práce Jana Špánková.
- [59] HOLUB, Jiří. *Smáčivost povrchu vůči kapalinám a druhá viskozita kapalin*. Brno, 2010.. Bakalářská. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Simona Fialová.
- [60] KIM, Jang-Kyo a Yiu-Wing MAY. *Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites* [online]. 21.10.1998. Oxford: Elsevier Science, 416 s. [cit. 2020-05-22]. ISBN 0-08-042695-6. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=qrjC9Yt8y6kC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Kim,+J-K.+and+Mai,+Y-W.,+Engineered+Interfaces+in+Fibre+Reinforced+Composites,+Amsterdam,+Elsevier,+1998&ots=G5TCiJ-Lf1&sig=dOpHuaUPLYRuBs-BPy4XnhAjtjQ&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [61] Adhezní síly v kompozitních materiálech. *Nanoed.tul.cz* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/5317/mod_resource/content/3/adheze.pdf
- [62] *Handbuch Faserverbundkunststoffe / Composites: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*. 4. Vieweg+Teubner, 601 s. ISBN 978-3-658-02754-4. 74683731.
- [63] LENFELD, Petr. Katedra tváření kovů a plastů - skripta: Technologie II. *Ksp.tul.cz* [online]. Technická univerzita v Liberci [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/09.htm

- [64] Lisování. In: *Lh3.googleusercontent.com* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: https://lh3.googleusercontent.com/4qQwCQk6-LrJKpS4Giifx2RV0cAEBT7JSY-mvPd6gEX2Fhar_k7HHwHWUd3vhc0JgwICdA=s170
- [65] CAMPBELL, Flake. *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials* [online]. 1. Elsevier Science, 2006, 616 s. [cit. 2020-05-22]. ISBN 978-1-85-617495-4. Dostupné z: <https://www.elsevier.com/books/manufacturing-technology-for-aerospace-structural-materials/campbell-jr/978-1-85617-495-4>
- [66] *Termoplastické kompozitní materiály a jejich použití na leteckých konstrukcích*. Brno, 2018, 51 s. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=173069. Bakalářská. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Doc. Ing. Josef Klement, CSc.
- [67] McLaren. *Es.motorsport.com* [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://es.motorsport.com/f1/news/presentacion-mclaren-mcl33-naranja-alonso-1007957/1644269/#gal-1644269-m0-mclaren-mcl33-front-wing-detail-15917010>
- [68] SMC přířezy. *Prefa-kompozity.cz* [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/smc/>
- [69] *Nature Works: 3 Series for Injection Molding* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.natureworkslc.com/Products/3-series-for-injection-molding>
- [70] *Shima Seiki* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.shimaseiki.com/product/knit/feature/#b3>
- [71] *Miracle Gloss™ NO. 87* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: https://www.stonermolding.com/store/shop-online/composites/product/M8711CSXXX1/cp_/composites
- [72] *MonTech* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.playsotec.com/17154955/lp-3000-%E2%80%93200kn,4>
- [73] *Durma MS* [online]. In: . [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://proingas.cl/wp-content/uploads/2017/12/Guillotina-Durma-serie-MS.jpg>

- [74] KRYŠTŮFEK, Jiří. *Technologie zušlechťování* [online]. Liberec: Technická univerzita, 2002 [cit. 2020-06-08]. ISBN 80-708-3560-5.
- [75] Rázové kladivo Zwick HIT50P. In: *Http://www.ksp.tul.cz* [online]. [cit. 2020-05-22].
Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/content/files/images/PAGES/charpy-original.jpg>
- [76] DEMBICKÝ, Josef. *Zušlechťování textilií* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008 [cit. 2020-06-09]. ISBN 978-80-7372-321-7.