



Odolnost kompozitních struktur na bázi biopolymeru s textilní výztuží při rázovém namáhání

Bakalářská práce

Studijní program:

B2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojní inženýrství

Autor práce:

Alžběta Kramsová

Vedoucí práce:

Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie





Zadání bakalářské práce

Odolnost kompozitních struktur na bázi biopolymeru s textilní výztuží při rázovém namáhání

Jméno a příjmení: **Alžběta Kramsová**
Osobní číslo: **S16000102**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Zadávající katedra: **Katedra strojírenské technologie**
Akademický rok: **2019/2020**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte literární rešerši na dané téma: biopolymerní kompozity a biopolymery.
2. Výběr kompozitních struktur: matrice a textilní výztuže.
3. Výroba kompozitů lisováním.
4. Příprava vzorků a stanovení odolnosti kompozitních struktur při rázovém namáhání v ohybu a při víceosém rázovém namáhání.
5. Diskuse výsledků, závěr.

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

tabulky, grafy
cca 30 stran
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] Jančář, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: VUT v Brně, 2003. ISBN 9788021.
- [2] Ehrenstein, G. W. *Polymerní kompozitní materiály*. Praha: Scientia, 2009. ISBN 9788086960296.
- [3] Machek, V., Sodomka, J. *Nauka o materiálu: polymery a kompozity s polymerní matricí*. Praha: ČVUT v Praze, 2008. ISBN 9788001039274.
- [4] Schwartz, M. M. *Composite materials handbook*. New York: McGraw-Hill, 1992. ISBN 0070558191.
- [5] Rosato, D. V., Rosato, D.V. *Reinforced plastics handbook*. Elsevier Science, 2004. ISBN 9781856174503.
- [6] Niaounakis, M. *Biopolymers: processing and products*. Amsterdam: Elsevier, 2015. ISBN 9780323266987.
- [7] Mezinárodní normy.

Vedoucí práce:

Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.
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

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědoma toho, že na mou bakalářskou 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 bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma 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 bakalářská 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 vědoma následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

9. července 2020

Alžběta Kramsová

Odolnost kompozitních struktur na bázi biopolymerů s textilní výztuží při rázovém namáhání

Resistance of composite structures based on biopolymers with textile reinforcement under impact stress

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá hodnocením rázového namáhání jednovrstvých kompozitních struktur PLA s bavlněnou textilní výztuží. Bavlněné textilní výztuže jsou použity ve dvou typech (pletěnina a tkanina) a ve dvou modifikacích (s a bez povrchové úpravy). V rámci bakalářské práce je analyzován a hodnocen vliv typu a modifikace bavlněné textilní výztuže na výsledné hodnoty rázové odolnosti. Kompozitní struktury jsou zkoumány na jednoosý ráz metodou Charpy dle ČSN EN ISO 179-1 a na víceosý ráz dle ČSN EN ISO 6603-2.

Klíčová slova: kompozitní struktury, kyselina polymlečná (polylaktidová), bavlněná textilní výztuž, rázové namáhání, rázová houževnatost

Annotation

This Bachelor thesis deals with the rating of an impact stress in PLA composite structures fill with a one - layer cotton fibre reinforcer. Two types (knitted fabric and woven fabric) and two modifications (with and without surface modification) are used. In this thesis, the impact of the type and modification of cotton fibre reinforcers is analyzed and rated. The impact stress in composite structures is examined using the following norms: ČSN EN ISO 179-1 and ČSN EN ISO 6603-2.

Keywords: composite structures, polylactic acid, cotton fibre reinforcer, impact stress, impact toughness

Poděkování

Ráda bych poděkovala především vedoucímu své bakalářské práce Ing. Luboši Běhálkovi, Ph.D. za ochotu, cenné rady, čas a úsilí, které mi při zpracování této bakalářské práce věnoval. Dále bych ráda poděkovala Ing. et Bc. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. za pomoc při zkoumání a hodnocení víceosého rázového namáhání, prof. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi, FEng. za poskytnuté informace k použitým textiliím a Ing. Martinu Borůvkovi, Ph.D. za pomoc při přípravě mercerovaných textilií. V neposlední řadě bych ráda poděkovala své rodině, příteli a přátelům za nesmírnou psychickou podporu během celého mého studia.

Obsah

Seznam použitých zkratek a symbolů	7
1 Úvod.....	9
2 Teoretická část.....	10
2.1 Biopolymerní kompozity	10
2.1.1 Biopolymerní matrice.....	11
2.1.2 Textilní výztuž.....	17
2.2 Rázové namáhání kompozitů.....	20
2.2.1 Jednoosé rázové namáhání	21
2.2.2 Víceosé rázové namáhání	23
3 Experimentální část.....	27
3.1 Materiálová charakteristika kompozitních struktur	27
3.2 Příprava kompozitních struktur a zkušebních těles.....	31
3.3 Mikroskopická analýza kompozitních struktur.....	37
3.4 Studium rázových vlastností kompozitních struktur	39
3.4.1 Jednoosé rázové namáhání	39
3.4.2 Víceosé rázové namáhání	41
4 Vyhodnocení a diskuze výsledků	44
4.1 Vyhodnocení jednoosého rázového namáhání	44
4.2 Vyhodnocení víceosého rázového namáhání.....	46
5 Závěr	53
Literatura.....	54
Seznam příloh	59

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

E_c	Korigovaná energie spotřebovaná při přeražení zkušebního tělesa	[J]
E_f	Modul pružnosti v ohybu	[MPa]
E_M	Energie při maximální rázové síle (víceosý ráz)	[J]
F_M	Maximální rázová síla (víceosý ráz)	[N]
I_M	Průhyb při maximální rázové síle (víceosý ráz)	[mm]
T_g	Teplota skelného přechodu	[°C]
$T_{p,C}$	Teplota primární krystalizace (určená metodou DSC)	[°C]
$T_{p,m}$	Teplota tání (určená metodou DSC)	[°C]
$T_{p,SC}$	Teplota sekundární krystalizace (určená metodou DSC)	[°C]
X_C	Hmotnostní krystalický podíl (stupeň krystalizace)	[%]
ΔE	Hodnota přírůstku energie	[J]
ΔH_C	Změna entalpie primární krystalizace	[J·g ⁻¹]
ΔH_m	Změna entalpie tání	[J·g ⁻¹]
ΔH_{m100}	Změna entalpie tání 100% krystalického polymeru	[J·g ⁻¹]
ΔH_{SC}	Změna entalpie sekundární (studené) krystalizace	[J·g ⁻¹]
a_{cU}	Rázová houževnatost Charpy	[kJ·m ⁻²]
a_{iA}	Vrubová houževnatost Izod	[J·m ⁻¹]
b	Šířka zkušebního tělesa	[mm]
h	Tloušťka zkušebního tělesa	[mm]
ε_{tb}	Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení	[%]
ρ	Hustota	[kg·m ⁻³]
σ_m	Napětí na mezi pevnosti	[MPa]
CH_3	Methyl	
CH_2CH_3	Ethyl	
$NaOH$	Hydroxid sodný (louh)	
PE	Polyethylen	
PP	Polypropylen	
PHA	Polyhydroxyalkanoát	
PHB	Polyhydroxybutyrát	

PHV	Polyhydroxyvalerát
PHBV	Polyhydroxybutyrát-velerát
PGA	Kyselina polyglykolová
PLA	Kyselina polymléčná (polylaktidová)
D-PLA	Kyselina polylaktidová se stereoizomerem D
L-PLA	Kyselina polylaktidová se stereoizomerem L
D,L-PLA	Kyselina polylaktidová se stereoizomery D a L
PLGA	Kyselina polylaktidová glykolová
DSC	Diferenční snímací kalorimetrie
SEM	Rastrovací elektronový mikroskop
SM	Světelná mikroskopie

1 ÚVOD

Polymerní materiály jsou již od poloviny 20. století jedním z nejvyužívanějších materiálů v různých průmyslových odvětvích, a to z důvodu jejich nízké hmotnosti, dobré zpracovatelnosti a relativně nízké ceny. Dalo by se říci, že dnešní civilizace je plasty přímo zahlcena, jelikož plasty se objevují prakticky všude od oblečení až po chytrá zařízení. Není tedy divu, že právě recyklace a schopnost biodegradace plastů je v současné době jedno z nejdiskutabilnějších témat. Jedno z možných řešení, jak pomoci snížit množství plastového odpadu, které zatěžuje planetu, je aplikace biopolymerů. Biopolymery jsou látky přírodního nebo syntetického původu, které mají velmi dobrou schopnost biodegradace, což je proces, při kterém dochází k rozložení biopolymeru na oxid uhličitý, vodu a zbytkovou biomasu. Díky této schopnosti jsou vhodnou alternativou ke klasickým syntetickým plastům. Za účelem rozšíření aplikovatelnosti biopolymerů (zlepšení jejich užitných vlastností) jsou na jejich bázi vyráběny kompozitní struktury s přírodními plnivy.

Uvedenou problematikou se zabývá také tato bakalářská práce, jejímž cílem je analyzovat a vyhodnotit rázové namáhání jednovrstvých kompozitních struktur s bavlněnou textilní výztuží na bázi kyseliny polymléčné (PLA). Biopolymer PLA i bavlna mají díky svým fyzikálním vlastnostem, dostupnosti a levné pořizovací ceně široké možnosti využití v různých průmyslových oblastech jako samostatný nebo kompozitní materiál. V této bakalářské práci bude hodnocen vliv typu textilní bavlněné výztuže a její povrchové modifikace na výslednou rázovou houževnatost kompozitu. Textilní výztuž bude použita ve dvou typech struktur: pleteniny a tkaniny. K povrchové modifikaci vláken, za účelem zvýšení adheze mezi vlákny a matricí, bude použita metoda mercerace vláken v silně zásadité anorganické sloučenině na bázi hydroxidu sodného (NaOH). Odolnost rázu bude hodnocena při jednoosém i víceosém rázovém namáhání na dostupných zařízeních katedry strojírenské technologie odpovídajících mezinárodním předpisům ČSN EN ISO 179-1 (neinstrumentovaná rázová zkouška metodou Charpy) a dle ČSN EN ISO 6603-2 (instrumentovaná metoda padajícího tlouku).

2 TEORETICKÁ ČÁST

Jak již bylo uvedeno v úvodu, bakalářská práce se zabývá výzkumem rázových vlastností kompozitních struktur na bázi biopolymérů s textilní výztuží při jednoosém a víceosém rázovém namáhání. Teoretická část práce je věnována struktuře biopolymerních kompozitů na bázi textilní výztuže, viz kap. 2.1, která se zabývá charakteristikou mezifáze a adheze mezi plnivem a matricí, typy biopolymerních matic a textilními výztužemi (pleteninou a tkaninou) a metodám hodnocení jejich rázových charakteristik, viz kap. 2.2.

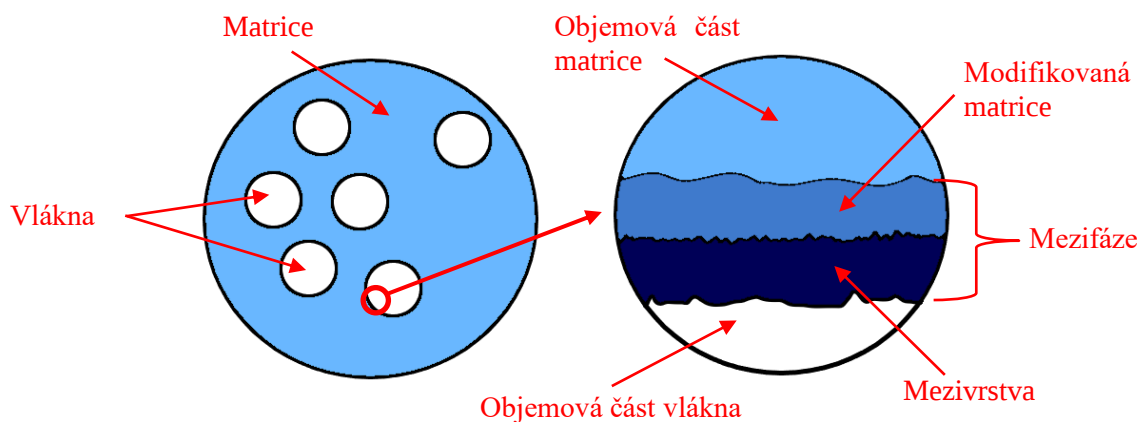
2.1 Biopolymerní kompozity

Kompozit se skládá nejméně ze dvou fází (nespojité a spojitě) a dosahuje vynikajících vlastností, kterých nelze dosáhnout prostým poměrným sečtením vlastností jednotlivých fází (synergický účinek). [1] Nespojité fáze se nazývá *výztuž* a je obvykle pevnější, tužší a odolnější než fáze spojitá, která se nazývá *matrice*. [2] Matrice v kompozitu plní funkci pojiva a ochrany výztuže, kterou chrání před mechanickým a chemickým poškozením, zatímco výztuž, která se nejčastěji vyskytuje ve formě vláken (případně částic), propůjčuje kompozitu tuhost a pevnost. [3, 4] Každá fáze disponuje odlišnou chemickou a fyzikální strukturou, což způsobuje různé interakce mezi nimi. Primární interakce jsou kovalentního charakteru, jsou vytvořeny na základě povrchových úprav a jejich vazby jsou velmi silné, zatímco sekundární interakce, které jsou převážně tvořeny Van der Waalsovými silami, mají vazebnou energii nižší. Tyto interakce mezi matricí a výztuží mají za následek tvorbu *mezifáze*. [5]

Mezifáze je oblast sestávající se z modifikované matrice, která se nachází na rozhraní matrice/mezifáze a mezivrstvy, která se vyskytuje na rozhraní výztuž/mezifáze (viz obr. 2.1). V této oblasti nastává přenos vnějších napětí přes matrici až do výztuže, kde je tento přenos zaručen v případě dostatečné adheze mezi nimi. [3, 4]

Adheze v kompozitech zajišťuje vzájemné propojení fází a tím se přímo podílí na výsledných vlastnostech kompozitu. V kompozitních materiálech se vyskytují tři druhy adheze: mechanická, fyzikální a chemická. Pro zaručení dobré mechanické adheze je výztuž povrchově upravována, např. plazmatem, peroxidy nebo vazebními činidly. Pro fyzikální adhezi je stěžejní impregnace výztuže, která zaručí dobrou smáčivost a pro zlepšení chemické adheze se využívá difúzní přeměna. V kompozitech musí být

zaručena dostatečná adheze, aby nedocházelo k dilataci jednotlivých vrstev a ke ztrátě stability stěny kompozitu. [5]

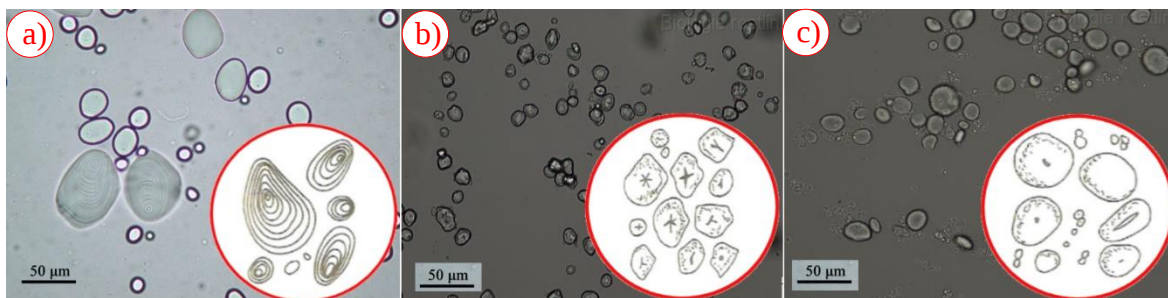


Obr. 2.1 Schématické zobrazení mezifáze kompozitu [6]

2.1.1 Biopolymerní matrice

Biopolymery jsou látky produkované živými organismy kondenzací nízkomolekulárních látek (monomerů), případně jsou syntetizovány z monomerů (biomolekul), které se nacházejí v přírodě. V prvním případě se jedná o tzv. přírodní biopolymery, jejichž základní rozdělení je: polysacharidy (škrob, celulóza), proteiny (keratin, kolagen) a polyestery produkované mikroorganismy (polyhydroxyalkanoáty), ve druhém případě se jedná o syntetické biopolymery (např. PLA, PGA). [7] Biopolymery jsou makromolekulární látky, které mají biologický původ a tím i typickou chemickou strukturu, která propůjčuje těmto látkám schopnost biodegradace. [8] Prvky v chemické struktuře, konkrétně v polymerním řetězci, které toto umožňují, jsou kyslík a dusík. Produktem biodegradace jsou za specifických podmínek oxid uhličitý, případně metan, dále voda a zbytková biomasa. Jedná se o materiály, které jsou vhodnou alternativou k syntetickým polymerům. [7] Mezi nejvíce využívané biopolymery v technickém průmyslu patří *škrob*, *PHA*, *PLA* a *PGA*.

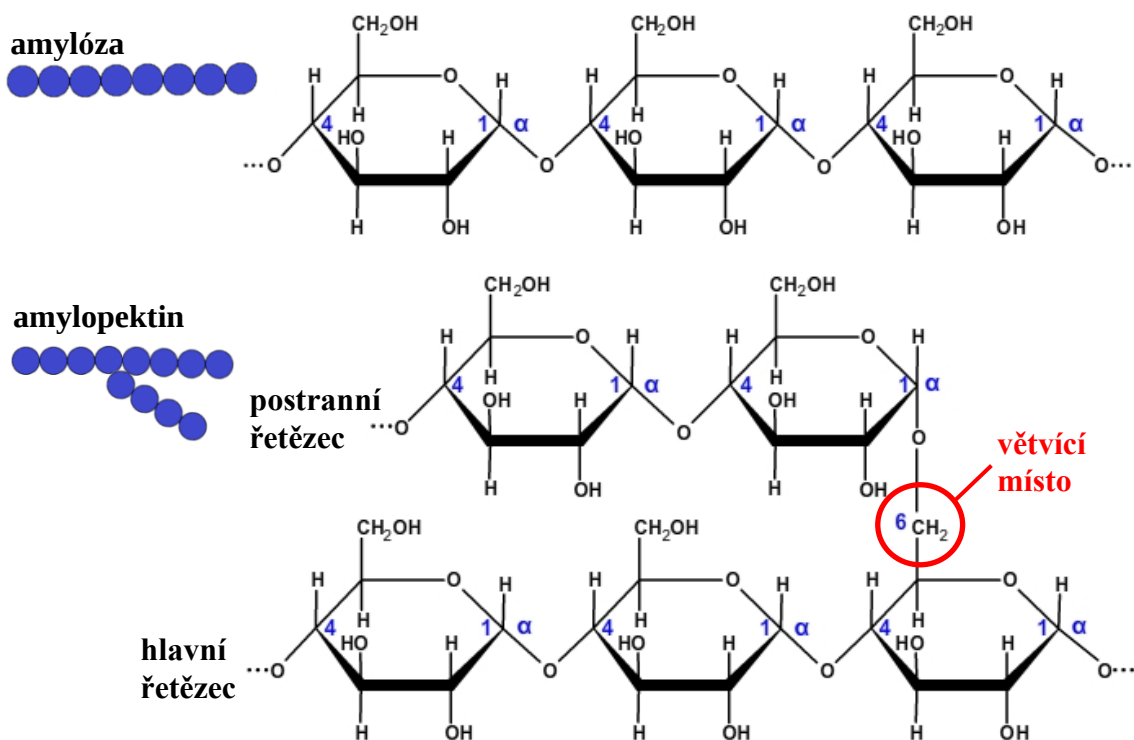
Škrob je makromolekulární sacharid, který patří do skupiny polysacharidů vykonávajících v organismu zásobní funkci. Je to bílá až nažloutlá látka, která se ve formě škrobových zrn shromažďuje v zásobních buňkách rostlin (viz obr. 2.2). [7]



Obr. 2.2 Škrubová zrna (SM)

a) bramboru [9, 12], b) kukuřice [10, 12] c) pšenice [11, 12]

Chemická struktura škrobu se skládá ze dvou glukózových polymerů: z amylozy a amylopektinu (viz obr. 2.3). Polymer amylozy má lineární strukturu, tvořenou za sebou se opakujícími se D-glukózovými jednotkami, zatímco amylopektin má strukturu rozvětvenou. Právě rozvětvená struktura amylopektinu způsobuje, že jsou škroby ve studené vodě nerozpustné. [13]



Obr. 2.3 Schéma a strukturní vzorce amylozy a amylopektinu [14]

Škrob je v průmyslu velice používaná látka. Jeho výroba je poměrně levná a snadná. Po přidání aditiv se chová jako termoplastický polymer a lze ho zpracovávat klasickými metodami, jako je vstřikování, odlévání nebo tváření za tepla. [7] Má velkou škálu použití,

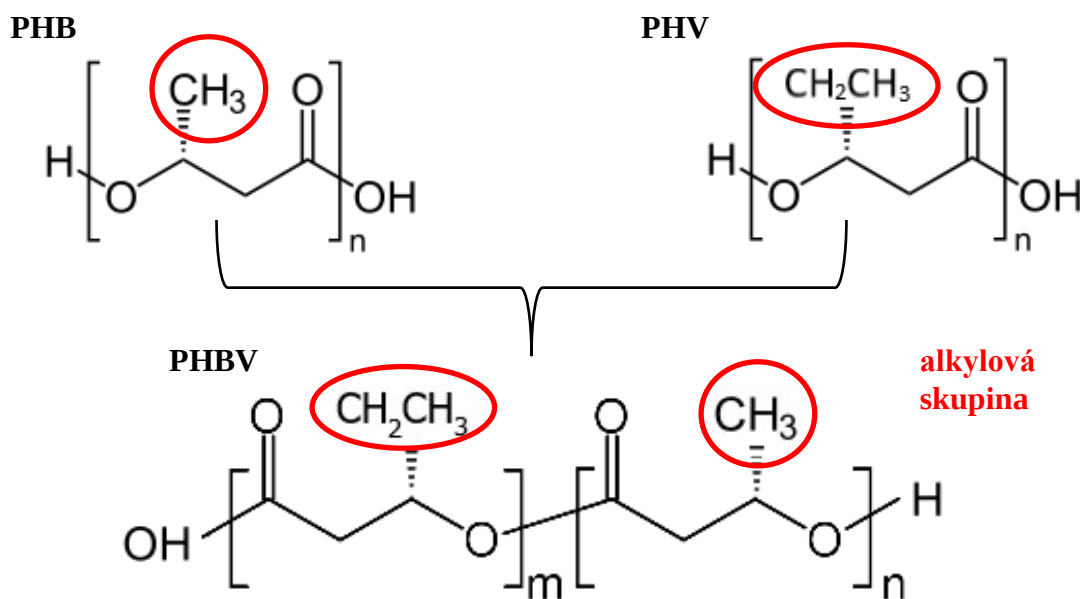
buď ve směsích nebo samostatně. Sám o sobě je škrob používán nejčastěji ve formě gelu, který je využíván např. v potravinářském průmyslu jako zahušťovadlo, v textilním průmyslu na škrobení prádla nebo ho lze použít i jako ekologické pojivo při výrobě lepenek a sádkartonů.[15] Škrob může také vytvářet směsi s různými syntetickými polymery. Nejčastěji vytváří spojení s polyethylenem (PE) a polypropylenem (PP). Za zmínku stojí směs škrobu a polyethylenu, která se vyznačuje vyšší pevností a lepší odolností vůči vodě, než má samotný škrob. Z této směsi se nejprve společnou extruzí vyrobí granulát, ze kterého jsou dále vyráběny díly nejčastěji pro obalový průmysl. [7]

Polyhydroxylalkanoáty (PHA) patří do skupiny polyesterů produkovanými jednobuněčnými mikroorganismy, nejčastěji bakteriemi. Jsou to termoplastické polymery s teplotou tání 50 °C až 180 °C [16], které jsou složeny z monomerních jednotek, kde každá z nich obsahuje alkylovou skupinu, která může být zastoupena např. methylem, ethylem apod. Jedná se o bílé až nažloutlé látky, které jsou netoxické, stabilní na vzduchu a nerozpustné ve vodě. [16]

PHA se vyskytuje v bakteriích, kde vytváří zásobní látky v podobě energie a uhlíku, které slouží jako rezervní zdroj výživy. [7] Bylo zjištěno, že více jak 30 % bakterií na Zemi obsahuje PHA. [16] Právě díky tomuto zjištění je možné PHA produkovat relativně snadno pomocí fermentace. Tento mikrobiální výrobní proces zahrnuje výběr vhodného druhu bakterie a poté jeho kultivaci v laboratořích. Mikroorganismy jsou v bioreaktorech živěny substráty, které slouží jako zdroj uhlíku, např. glukózou, sacharózou nebo kyselinu propionovou (propanovou). Bakterie je živena až do doby, kdy má dostatečné množství buněk, které v sobě osahují PHA. Konečným krokem pro získání PHA je jeho separace, ta se provádí buď za pomoci chlorovaných uhlovodíků, nebo za pomoci odstředivé síly. [8, 16]

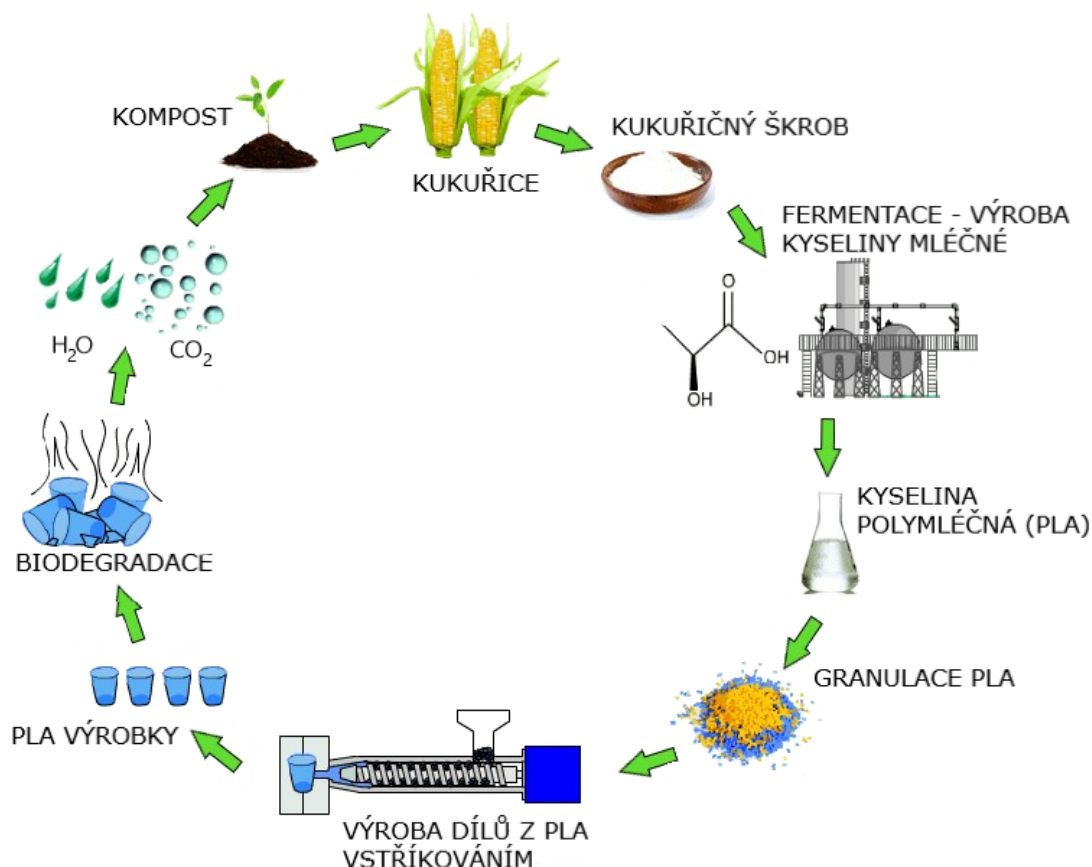
Mezi představitele PHA patří *polyhydroxybutyrát (PHB)*, který je jedním z nejrozšířenějších na Zemi. [13] Polymer PHB se v buňkách bakterií vyskytuje v amorfní formě a není tedy rozpustný ve vodě. Má větší hustotu než voda a jeho chemickou strukturu lze vidět na obr. 2.4. Je zřejmé, že alkylová skupina je v případě polymeru PHB zastoupena methylem (CH₃). Polymer PHB je křehký a hůř zpracovatelný v roztavené stavu, jelikož jeho teplota degradace je cca 200 °C. [17] Sám o sobě může být využit např. na obalové materiály nebo netkané textilie, ale ve větším množství se objevuje ve směsi s *polyhydroxyvalerátem (PHV)*, což je další polyester ze skupiny polyhydroxylalkanoátů, kde je alkylová skupina

zastoupena ethylem (CH_2CH_3), viz obr. 2.4. [13, 16] Kopolymer PHB a PHV se nazývá *polyhydroxybutyrát-valerát (PHBV)*. Tento kopolymer byl připraven z důvodu zlepšení vlastností polymeru PHB, zejména jeho tažnosti a rázové houževnatosti. [16] Kopolymer PHBV vzniká kopolymerací kyseliny 3-hydroxybutyrátové a kyseliny 3-hydroxyvalerové. Vzniklý polymer PHBV má ve své struktuře zastoupen jak methyl (CH_3) tak ethyl (CH_2CH_3), viz obr. 2.4. Tyto dva alkyly výrazně ovlivňují vlastnosti polymeru. Díky přítomnosti methylu je polymer křehčí, zatímco ethyl zaručuje jeho elasticitu a rázovou houževnatost. Kopolymer PHBV je možné zpracovávat několika způsoby, nejčastěji se využívá technologie vstřikování, ale mohou se používat i technologie odlévání, zvlákňování, vyfukování nebo i laminování. PHBV je jeden z nejvíce využívaných biopolymerů v průmyslu. Používá se především v lékařství na medicínské implantáty, chirurgické nitě nebo ortopedické pomůcky. V plastikářském průmyslu je používán zejména v obalovém průmyslu, kde plně nahrazuje syntetické polymery. [7, 18]



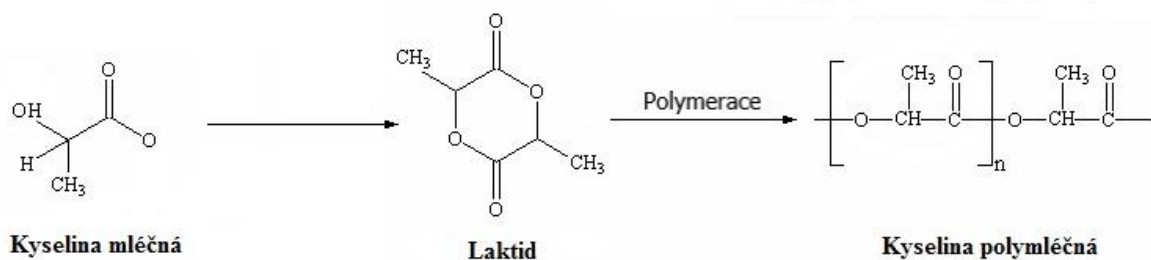
Obr. 2.4 Schéma struktury PHB, PHV, PHBV [7]

Kyselina polymléčná (PLA) patří do skupiny syntetických biopolymerů. Je vyráběna polymerací kyseliny mléčné, která se v přírodě běžně vyskytuje v živých organismech. [8] Proces vzniku, výroby a zpracování PLA je schematicky znázorněn na obr. 2.5.



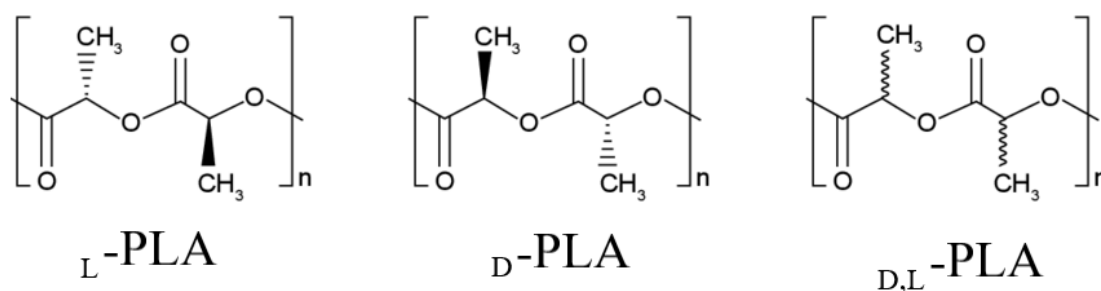
Obr. 2.5 Schéma vzniku, výroby a zpracování PLA [19]

Kyselina mléčná je produkována buď chemickými syntézami nebo fermentací cukrů a škrobů. Pro výrobu kyseliny mléčné je nejčastěji použit kukuřičný škrob. Z tohoto škrobu se musí nejdříve za pomoci vysokých teplot izolovat glukóza. Poté je fermentací z glukózy získávána kyselina mléčná, která musí být pročištěna, aby mohla být dále použita na výrobu kyseliny polymléčné (polylaktidové). Při polymeraci kyseliny mléčné je nejdříve vytvořen nízkomolekulární polymer. K tomuto polymeru je poté přidáno polymerační činidlo, které prodlouží polymerní řetězce a tím je dosaženo konečné vysokomolekulární struktury PLA (viz obr. 2.6.). [8, 20]



Obr. 2.6 Polymerace dimeru kyseliny mléčné [21]

Laktid kyseliny mléčné existuje ve dvou základních optických stereoizomerech: L a D. Rozlišení těchto dvou stereoizomerů je na základě orientace – OH skupiny na posledním stereogenním uhlíku. Znaménko (–) u stereoizomeru L (–) vyjadřuje levotočivý směr otáčení polarizovaného světla a znaménko (+) u stereoizomeru D (+) vyjadřuje směr pravotočivý. Kombinací L (–) a D (+) izomerů (v poměru 1:1) je pak způsobena optická inaktivita kyseliny mléčné a tato směs je nazývána racemát. Racemát se značí D,L (±) a má zkratku D,L -PLA. Racemát D,L -PLA se vyskytuje pouze v amorfni podobě, zatímco L-PLA a D-PLA jsou semikrystalické biopolymery. Všechny tyto tři formy PLA mají stejný chemický vzorec: $CH_3-CH(OH)-COOH$ a stejné chemické složení (viz obr. 2.7), ale liší se svými užitnými vlastnostmi (viz tab. 2.1). [22, 23]



Obr. 2.7 Struktura L -PLA, D -PLA, D,L -PLA [24]

Tab. 2.1 Vlastnosti různých typů PLA [23]

Vlastnosti	D -PLA	L -PLA	D,L -PLA
Hustota [$kg \cdot m^{-3}$]	1248	1290	1250
Teplota skelného přechodu [$^{\circ}C$]	40 - 50	55 - 80	43 - 53
Střední teplota tání [$^{\circ}C$]	120 - 150	173 - 178	/
Teplota degradace [$^{\circ}C$]	~ 200	~ 200	185 - 200

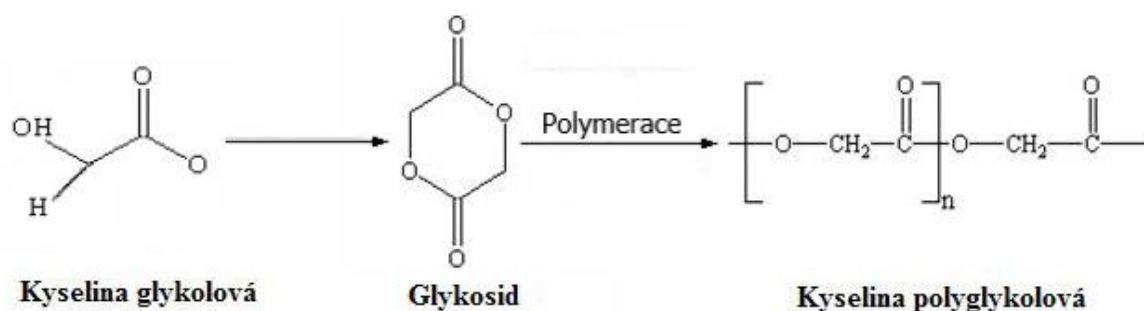
Polymery na bázi PLA lze zpracovávat stejně jako ostatní polymery. Nejvíce je využívána technologie vytlačování a vstřikování. V průmyslu jsou využívány hlavně z důvodu své odolnosti vůči vodě, vlhkosti a tukům. Používají se především v lékařství, kde jsou z nich vyráběny speciální kostní náhrady nebo vstřebatelné materiály, které mají za úkol mechanicky přidržovat kost při její regeneraci (viz obr. 2.8). Materiály z PLA se dále používají také v potravinářském průmyslu na jednorázové nádoby nebo na obalové

materiály, kde je využito jejich průhlednosti a lesku. V souhrnu lze PLA použít tam, kde je potřeba nahradit syntetické polymery za polymery, které jsou zdravotně nezávadné a lehce biologicky odbouratelné. [7, 8]



Obr. 2.8 Chirurgické fixační pomůcky z PLA [25]

Kyselina polyglykolová (PGA) je vyráběna polymerací glykosidu kyseliny glykolové (viz obr. 2.9) a s kyselinou polymléčnou může vytvářet kopolymer kyseliny polylaktidové glykolové (PLGA). [7] Biopolymery na bázi PGA jsou vysoce krystalické látky s poměrně rychlou biodegradací (kolem 2 – 4 týdnů). [25] Jsou tvárné a díky tomu jsou používány k výrobě složitějších konstrukcí. Využití nachází především v potravinářském nebo lékařském průmyslu, kde se z nich vyrábí např. chirurgické nitě, které musí být bioabsorbovatelné. [7, 25]

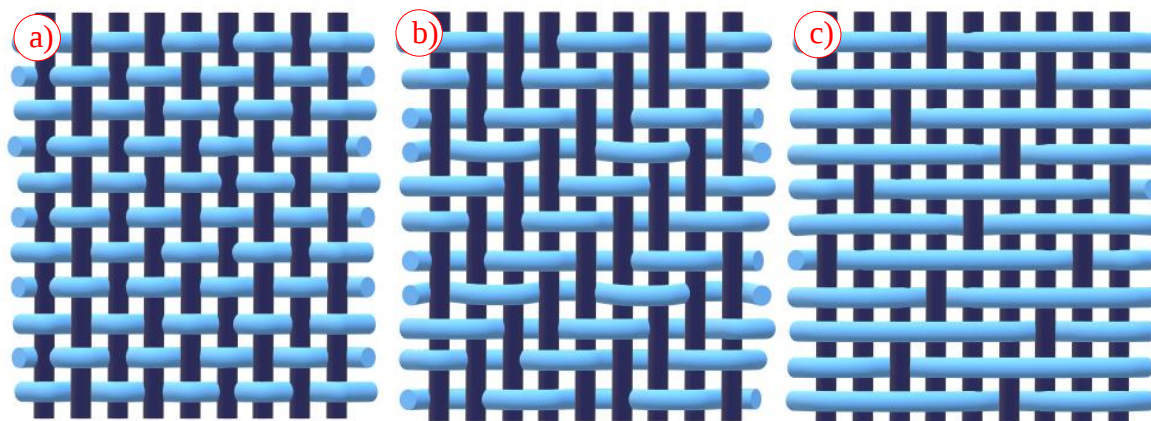


Obr. 2.9 Polymerace dimeru kyseliny glykolové [21]

2.1.2 Textilní výztuž

Textilní výztuž je část kompozitu, která je tvořena vlákny. Vlákna, oproti částicovým výplním, zajišťují vyšší tuhost a pevnost kompozitu. V dnešní době se kromě 1D – jednosměrných výztuží používají ještě 2D (dvoudimenzionální) a 3D (třídimeznionální) výztuže, kde hlavními představiteli jsou pleteniny a tkaniny. [26, 27]

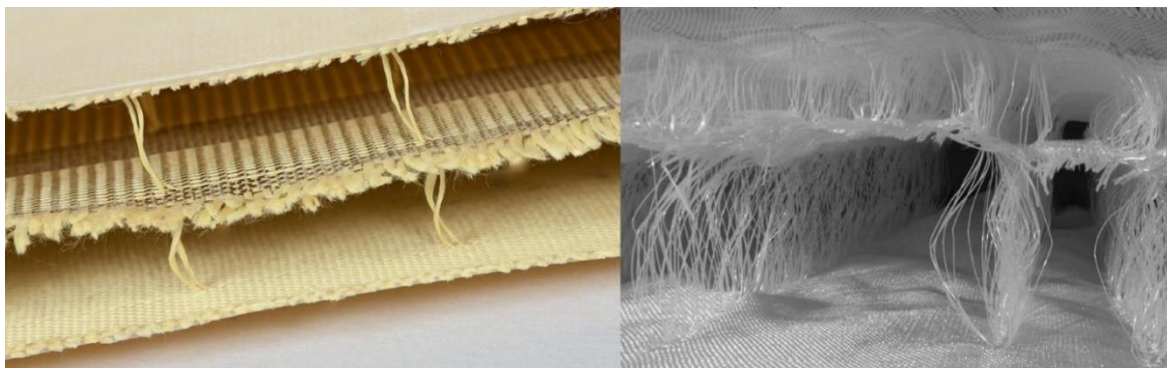
Tkaniny vznikají provázáním útkových a osnovních nití, které jsou navzájem kolmé. Podle způsobu provázání nití se rozlišují tři typy 2D vazeb: plátnová, keprová a atlasová (viz obr. 2.10). Tmavě modrou barvou jsou znázorněny nitě osnovní a světle modrou barvou nitě útkové. [26]



Obr. 2.10 Typy vazeb tkanin

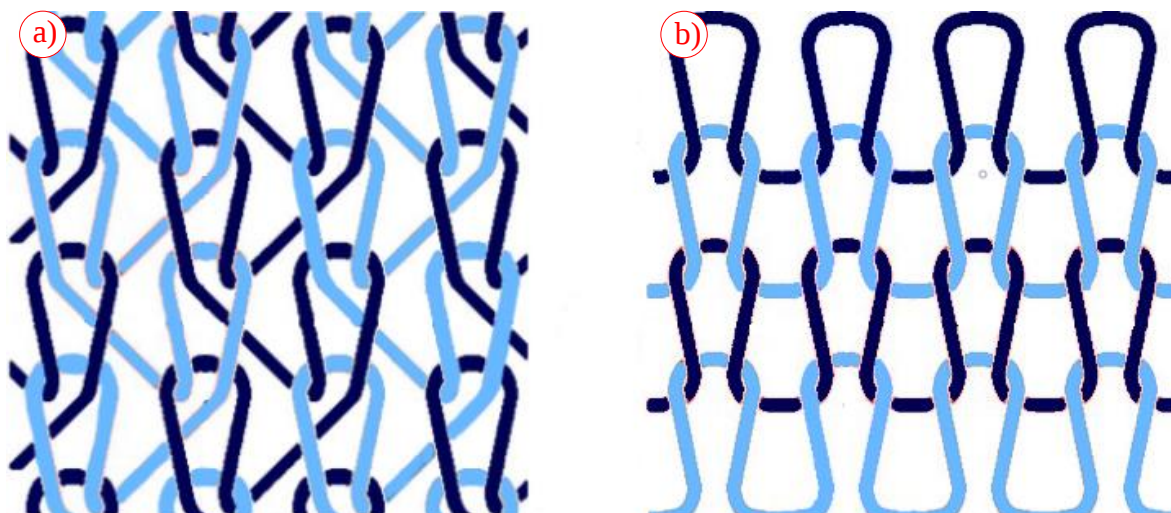
a) plátnová vazba, b) keprová vazba, c) atlasová (saténová) vazba

Tkaniny 3D se nazývají distanční a od 2D tkanin se liší multifilamenty nebo vytkanými sloupky, které propojují jednotlivé vrstvy tkaniny (viz obr. 2.11). [28, 29]



Obr. 2.11 Distanční (3D) tkanina [29, 30]

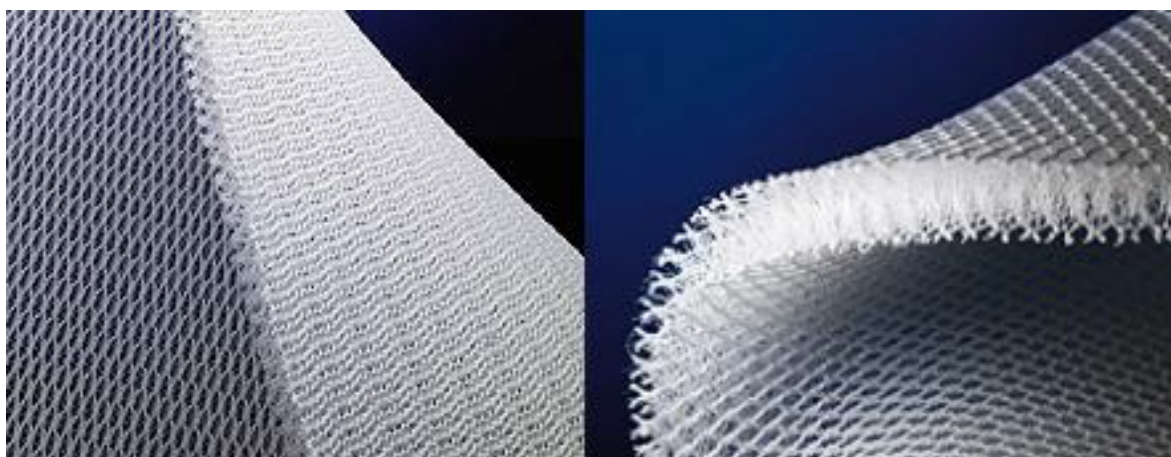
Pleteniny vznikají proplétáním oček umístěných ve sloupcích nebo v řádcích. Díky tomuto systému proplétání mají pleteniny oproti tkaninám vyšší elasticitu a prodyšnost. Podle způsobu proplétání se rozdělují na osnovní a zátažné. Osnovní pleteniny mají oka umístěna ve sloupcích, zatímco zátažné pleteniny v řádcích (viz obr. 2.12). Tmavě modrou barvou je znázorněn jeden sloupec, respektive jedna řada základních oček. V technické praxi se využívají převážně 3D zátažné pleteniny. [28, 31]



Obr. 2.12 Typy pletenin

a) osnovní, b) zátažná

Pletenina 3D, neboli distanční, se vyrábí ze dvou pletenin osnovních, zátažných nebo jejich kombinací, které jsou navzájem propojené dalšími nitěmi (viz obr. 2.13). Nejčastější osnovní pleteninové vazby, trikot, sukno a kepr, jsou propojené například polyesterovými vlákny, která se kladou zkrříženě a tím vytváří mezeru mezi jednotlivými vrstvami. [28]



Obr. 2.13 Distanční (3D) pletenina [32]

Vláknové výztuže mohou být buď anorganického nebo organického původu. Anorganické výztuže jsou v průmyslu nejvíce zastoupeny uhlíkovými a skelnými vlákny, které velice účinně zvyšují mechanické vlastnosti polymerů, jako např. tvrdost, pevnost, tuhost a dále snižují jejich hořlavost. [1] Mezi organická vlákna patří přírodní a polymerní vlákna. Zejména přírodní vlákna se stávají vhodnou alternativou k anorganickým vláknům,

a to s ohledem na jejich přírodní charakter a enviromentální požadavky, které jsou kladené na polymerní kompozity.

Přírodní vlákna se podle svého původu dají rozdělit do tří skupin: na vlákna rostlinná, živočišná a minerální. *Živočišná vlákna* jsou vlákna, jejichž základním stavebním kamenem je bílkovina. Získávají se buď ze srsti zvířat (vlákna na bázi keratinu) nebo z výměšků žláz hmyzu (vlákna na bázi fibroinu). Další skupinou jsou *minerální vlákna*, mezi které se řadí azbest a *rostlinná vlákna*, která jsou získávána z částí rostlin, ze stonků, listů, kořenů nebo plodů. U rostlinných vláken je základní stavební složkou celulóza, proto bývají rostlinná vlákna označována také jako celulózová. Mezi nejvíce používaná vlákna v průmyslu patří: bavlněná, konopná, lněná nebo kokosová vlákna. [33, 34] Každé rostlinné vlákno má své specifické vlastnosti. Vždy záleží nejen na typu rostliny a na části ze které je vlákno získáno, ale také na stáří rostliny, ročním období, kdy je rostlina sklizena a na způsobu získávání vlákna. Svazek vláken je z rostlin získáván mechanicky a poté musí projít chemickými nebo enzymatickými procesy, aby bylo získáno samotné vlákno. Tato vlákna se vyznačují nízkou hustotou, zdravotní nezávadností, dobrou pevností a tuhostí v poměru k jejich hmotnosti, a hlavně vysokým stupněm plnivosti (60 obj.% - 80 obj.%) [35], díky čemuž může být ušetřen podíl polymerní matrice. Rostlinná vlákna mají také řadu nevýhod, mezi které patří zejména nízká tepelná stabilita, díky které může dojít k rychlejší tepelné degradaci kompozitu, nízká odolnost proti navlhání (vlhkost má za následek poréznost kompozitu) a polární charakter, který s nepolární maticí negativně ovlivňuje jejich kompatibilitu. K řešení těchto problémů a ke zvýšení adheze mezi vlákny a maticí se využívají fyzikální a chemické modifikace, které pozitivně ovlivňují vlastnosti vláken, jedná se např. o úpravu povrchu vláken acetylací nebo pomocí působením výbojů, o úpravu povrchu vláken leptáním a napínáním, nebo o alkalickou úpravu struktury vláken za pomoci hydroxidu sodného apod. [33, 34]

2.2 Rázové namáhání kompozitů

Rázové zkoušky slouží ke zjištění houževnatosti materiálu, jejímž měřítkem je spotřebovaná energie k porušení zkušebního tělesa. Mohou se provádět při jednoosém i víceosém rázovém namáhání.

2.2.1 Jednoosé rázové namáhání

Stejně jako zkoušky statické se může rázové namáhání provádět v tahu, ohybu, tlaku a krutu. Mezi nepoužívanější patří rázová zkouška v ohybu. Pro stanovení jednoosé rázové houževnatosti plastů a kompozitů se využívá dvou metod dle mezinárodního předpisu ČSN EN ISO 179 a ČSN EN ISO 180. Jsou to metody Charpy a Izod. [36, 37]

Metoda Charpy

Tato metoda se využívá pro stanovení rázových vlastností plastů a kompozitů za určitých podmínek dle mezinárodního předpisu ČSN EN ISO 179.

Tato norma se skládá ze dvou samostatných částí:

- Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška (ČSN EN ISO 179-1)
- Část 2: Instrumentovaná rázová zkouška (ČSN EN ISO 179-2). [36]

Neinstrumentovaná rázová zkouška

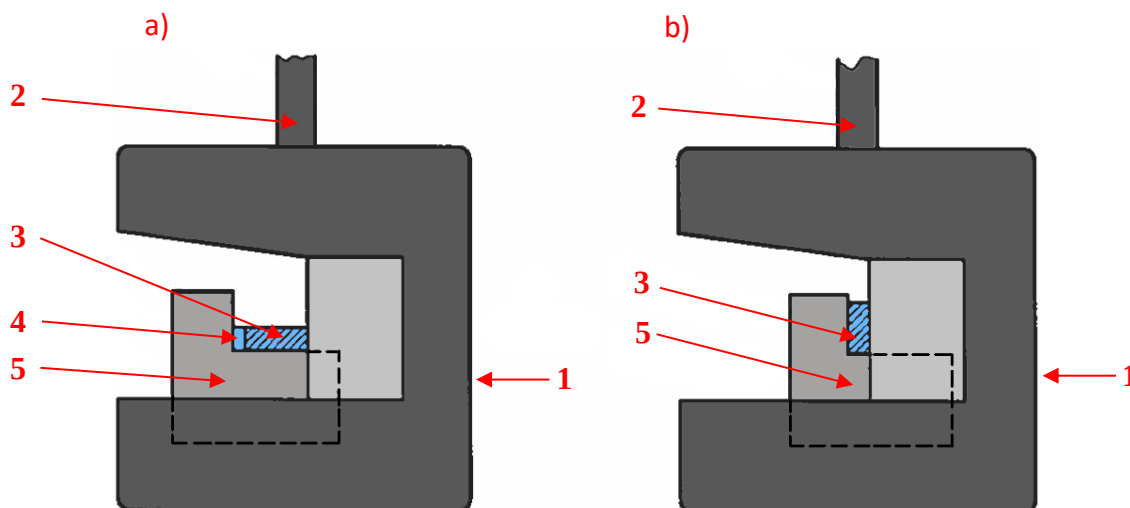
Tato rázová zkouška se využívá pro zkoumání rázového chování plastů a kompozitů za definovaných podmínek. „*Posuzuje křehkost nebo houževnatost zkušebních těles v mezích daných podmínkami zkoušky.*“ [38]

Metoda je vhodná zejména pro tyto materiály:

- tuhé termoplasty pro tváření,
- tuhé reaktoplasty pro tváření,
- kompozity plněné vlákny na bázi reaktoplastů a termoplastů,
- termotropní polymery na bázi tekutých krystalů. [38]

Metoda Charpy je také na rozdíl od metody Izod vhodná pro materiály vykazující mezivrstvý smykový lom a vykazující povrchové vlivy způsobené okolním prostředím. [38]

Zkušební tělesa mohou a nemusí být opatřena vrubem. Vytvoření vrubu se nepoužívá zejména u tvrdých lehčených materiálů, kompozitů nebo u termotropních polymerů na bázi tekutých krystalů. Zkušební těleso se umístí na podpěry stroje tak, aby břit rázového kyvadla dopadl do středu zkušebního tělesa. Používají se dva typy umístění, na užší stranu zkušebního tělesa (ráz „edgewise“) nebo na širší stranu zkušebního tělesa (ráz „flatwise“). U zkušebních těles s vrubem musí být těleso umístěno tak, aby břit kyvadla dopadl na opačnou stranu ke straně vrubu (viz obr. 2.14). [38]



Obr. 2.14 Břit a bloky podpěr pro zkušební těleso v okamžiku rázu [38]

a) ráz „edgewise“, b) ráz „flatwise“

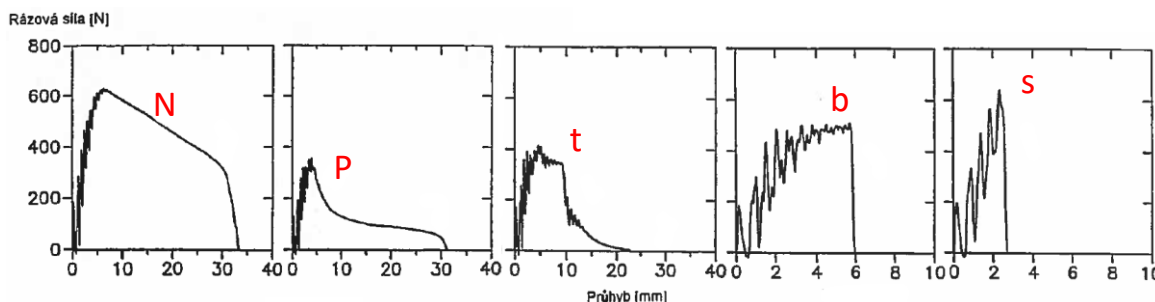
1 – směr rázu, 2 – tyč rázového kyvadla, 3 – zkušební těleso, 4 – vrub, 5 – podpěra

Rázová energie je hodnocena z korigované energie spotřebované při přeražení zkušebního tělesa daného průřezu. Při vyhodnocování zkušebních těles mohou nastat čtyři typy přeražení, které jsou označovány příslušnými písmeny: C – úplné přeražení, H – kloubové přeražení, P – částečné přeražení, N – nepřeraženo. Rázová houževnatost zkušebních těles se poté vyjadřuje jako poměr energie spotřebované k jejich přeražení ku jejich průřezu. [38]

Instrumentovaná rázová zkouška

Tato rázová zkouška se využívá pro stanovení rázového chování plastů a kompozitů na základě záznamů závislosti síla – průhyb nebo síla – čas. [39]

Postup zkoušky je shodný jako u neinstrumentované rázové zkoušky. Rázové kyvadlo se umístí do požadované výšky a zkušební těleso vodorovně na podpěry stroje. Poté se kyvadlo uvolní a zaznamenávají se hodnoty rázové síly během rázu. Rázovou sílu lze měřit přímo příslušným zařízením umístěným na břitu kyvadla, např. tenzometrem, popřípadě piezoelektrickým snímačem, nebo nepřímo pomocí výpočtů uvedených v příslušném mezinárodním předpisu. „Získaná křivka síla – průhyb popisuje chování zkušebního tělesa při rázovém ohybovém namáhání“ [39] Podle získaných křivek lze rozlišit pět typů přeražení, které jsou označovány příslušnými písmeny: N – nepřeraženo, P – částečné přeražení, t – tvárné přeražení, b – křehké přeražení a s – tříštivé přeražení (viz obr. 2.15). [39]



Obr. 2.15 Typické křivky rázová síla – průhyb [39]

N = nepřeraženo, P = částečné přeražení, t = tvárné přeražení, b = křehké přeražení, s = tříštivé přeražení

Metoda Izod

Tato metoda se používá pro zkoumání rázového chování plastů a kompozitů za definovaných podmínek. Používá se pro stejnou škálu materiálů jako metoda Charpy, mimo tvrdé lehčené materiály a sendvičové struktury obsahující lehčené materiály. [37]

Podstata zkoušky je taková, že se zkušební těleso umístí do upínacího přípravku jako svislý vetknutý nosník. U zkušebních těles s vrubem musí být těleso umístěno tak, aby břit kyvadla dopadl na stranu s vrubem. Na takto umístěné zkušební těleso poté dopadá rázové kyvadlo z předepsané výšky. Vyhodnocování zkušebních těles probíhá stejně jako u metody Charpy. Při vyhodnocování mohou nastat čtyři typy přeražení, které jsou označovány příslušnými písmeny: C – úplné přeražení, H – kloubové přeražení, P – částečné přeražení, N – nepřeraženo. Rázová houževnatost zkušebních těles se poté vyjadřuje opět jako poměr korigované energie spotřebované k jejich přeražení ku jejich průřezu. [37]

2.2.2 Víceosé rázové namáhání

Pro stanovení chování plastů a kompozitů při víceosém rázovém namáhání se používá rázových zkoušek dle mezinárodního předpisu ČSN EN ISO 6603.

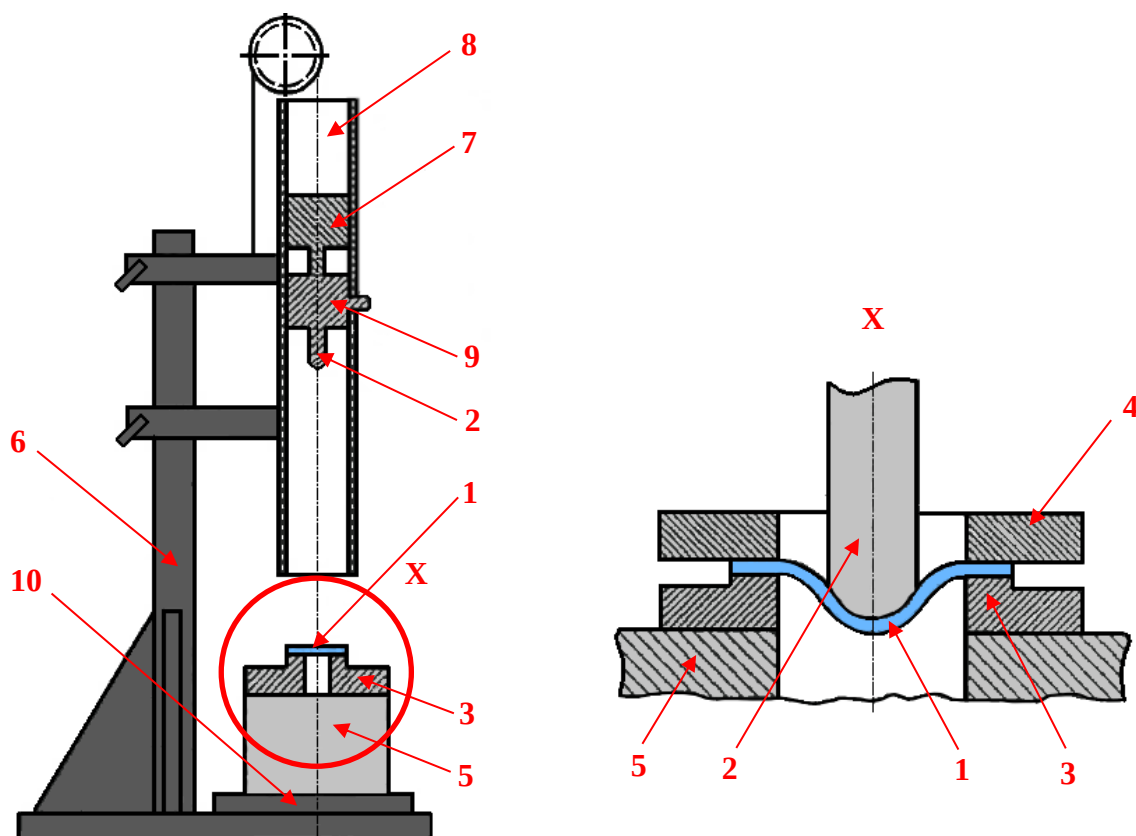
Tato norma se skládá ze dvou samostatných částí:

- Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška (ČSN EN ISO 6603-1)
- Část 2: Instrumentovaná rázová zkouška (ČSN EN ISO 6603-2). [40]

Neinstrumentovaná rázová zkouška

„Tato rázová zkouška se využívá v případech, kdy k charakterizaci rázového chování plastů postačuje prahová hodnota rázové energie, potřebná k porušení zkušebního tělesa, která vychází z výsledků získaných na mnoha zkušebních tělesech.“ [41]

Tato rázová zkouška probíhá na padostroji, který je určen pro víceový ráz (viz obr. 2.16). Obecně se tato zkouška provádí na zkušebních tělesech o tloušťce 1 mm – 4 mm. Zkušební těleso se umístí na podpěrný kroužek a upne se do upínacího zařízení v určité poloze. K tlouku, jehož polokulová nárazová plocha musí být vždy namazaná olejem nebo tuhým mazivem, se přidá potřebné závaží, a pak se tlouk nastaví do předepsané polohy. Celý proces probíhá následně tak, že tlouk se uvolní a dopadne na zkušební těleso, kde se zjišťuje, zda došlo k porušení tělesa a zda je viditelný lom. [41]



Obr. 2.16 Systém padajícího tlouku [41]

1 – zkušební těleso, 2 – polokulová nárazová plocha, 3 – podpěra pro zkušební těleso, 4 – upínací kroužek, 5 – základna, 6 – držák tlouku, 7 – systém pro přidržení a uvolnění tlouku, 8 – vodící lišta tlouku, 9 – tlouk, 10 – akustická izolace

Podle počtu zkušebních těles lze tuto zkoušku provést dvěma metodami: metodou stupňovitou, kde je za potřebí alespoň 30 zkušebních těles, nebo metodou skupinovou, kde je potřeba alespoň 40 zkušebních těles. [41]

Metoda stupňovitá je metoda, u které je nejdříve nutné zjistit předběžnou počáteční energii potřebnou k porušení zkušebního tělesa. Z 30 zkušebních těles se proto prvních 10

zkouší s proměnnou hodnotou energie, aby se poté určila předběžná energie, která by hodnotou měla odpovídat energii, při které došlo k porušení 50 % zkušebních těles. Když je tato hodnota energie zjištěna, zvolí se ještě hodnota přírůstku energie ΔE (= 5 % z předběžně určené hodnoty energie). Poté už nastává samotné zkoušení, kde se zaznamenává, zda došlo či nedošlo k porušení zkušebního tělesa. Pokud k porušení dojde, sníží se energie o hodnotu ΔE a v případě, že naopak k porušení nedojde, zvýší se energie o stejnou hodnotu ΔE . [41]

Metoda skupinová je metoda, u které se zkušební tělesa rozdělí do tzv. skupin (alespoň po 10 zkušebních tělesech) a po těchto skupinách jsou prováděny zkoušky. Každá skupina zkušebních těles má určenou hodnotu energie, která se u každé skupiny liší o určitý přírůstek. Tato zkouška se provádí až do doby, kdy je dosaženo alespoň pěti výsledků s následujícími procenty porušení: 1 výsledek s 0 % porušení, 1 výsledek s 100 % porušení a alespoň 3 výsledky s porušením mezi 0 – 100 %. [41]

Obě tyto metody mají svůj specifický systém výpočtů a vyhodnocování rázových vlastností zkušebních těles, které jsou uvedeny v příslušném mezinárodním předpisu. [41]

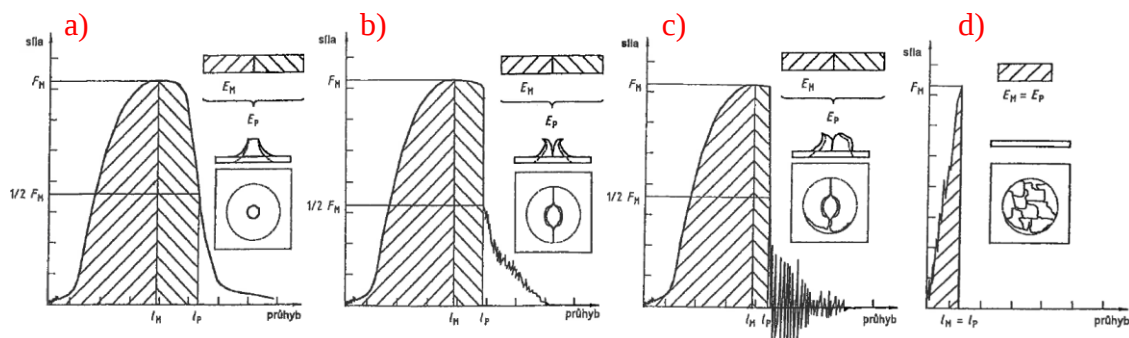
Instrumentovaná rázová zkouška

„Tato rázová zkouška se využívá v případech, kdy je pro podrobnou charakterizaci rázového chování zapotřebí záznam křivky síla – průhyb nebo síla – čas pro nominálně konstantní rychlost tlouku.“ [42]

Zkouška probíhá tak, že je zkušební těleso umístěno na podpěrný kroužek, kde se podle potřeby upne. Poté je na zkušební těleso spuštěn tlouk s namazanou nárazovou plochou o určité rychlosti. U klasických kompozitů se uvádí rychlost $4,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a u křehkých materiálů se doporučuje tuto rychlost snížit až na $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Vždy je důležité, aby se rychlost nárazu neměnila o více než 20 %, a aby ráz byl veden kolmo na povrch zkušebního tělesa. [42]

Zkoušky víceosého rázového namáhání jsou založeny tedy na tom, že na zkušební těleso působí volně padající tlouk s různě volenou kinetickou energií, jejíž velikost je dána hmotností zkušebního tělesa a rychlost závisí na výšce pádu. Energie spotřebovaná k přeražení vzorků je složena z několika příspěvků. Vytvoří se nové lomové plochy, značná část energie tlouku se může spotřebovat na viskoelastickou nebo plastickou deformaci (u části materiálu obklopující lomovou plochu), případně na ohybovou deformaci celého zkušebního tělesa. Další část energie se změní na kinetickou energii odlétajících úlomků, akustickou emisi nebo se pohltí v zatížení. [42]

Výsledkem této zkoušky je buď křivka zaznamenaná na grafu síla – čas, kdy je tlouk vybaven snímačem síly, který udává potřebné hodnoty, nebo křivka zaznamenaná na grafu síla – průhyb, kdy je deformace zkušebního tělesa měřena přímo. Na základě těchto křivek pak probíhají výpočty ke zjištění energie při maximální rázové síle a rázové energie při průrazu. Hodnocen je také charakter porušení, tj. mechanické porušení zkoušeného materiálu, které může být s mezí kluzu (a, b, c) nebo bez meze kluzu (d) (viz obr. 2.17). [42]



Obr. 2.17 Křivka rázová síla – průhyb a typický vzhled zkušebního tělesa po zkoušce [42]

a) s mezí kluzu a s následným hlubokým protažením, b) s mezí kluzu a s následným růstem stabilní trhliny, c) s mezí kluzu a s následným růstem nestabilní trhliny, d) bez meze kluzu a s následným růstem nestabilní trhliny

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část bakalářské práce se zabývá výzkumem rázové houževnatosti kompozitů na bázi PLA s bavlněnou textilní výztuží. Tyto kompozitní struktury jsou zkoušeny na jednoosý a víceosý ráz dle ČSN EN ISO 179-1 a ČSN EN ISO 6603-2. Při jednoosém rázovém namáhání je měřena korigovaná energie spotřebovaná k přeražení zkušebních těles, z níž je stanovena rázová houževnatost, při víceosém rázovém namáhání je měřena maximální hodnota rázové síly při iniciaci trhliny, resp. energie spotřebovaná k deformaci zkušebního tělesa do průhybu při maximální rázové síle. Cílem experimentálního měření je charakterizovat, jak se budou lišit rázové vlastnosti polymeru PLA a jeho jednovrstvých kompozitních struktur s textilní bavlněnou výztuží.

3.1 Materiálová charakteristika kompozitních struktur

V rámci experimentálního výzkumu bylo připraveno několik kompozitních struktur, které se lišily typem textilní výztuže a její povrchovou úpravou. Ve všech strukturách byla použita biopolymerní termoplastická matrice v podobě granulátu kyseliny polymléčné (PLA) od firmy Natureworks LLC s obchodním označením Ingeo 3001D, viz příloha 1. Biopolymer PLA Ingeo 3001D je semikrystalický termoplast, který je určen zejména pro proces vstřikování, vytlačování nebo lisování a používá se nejčastěji na výrobu dílů pro obalový průmysl. Jeho typické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 3.1. [43]

Tab. 3.1 Typické vlastnosti biopolymeru PLA Ingeo 3001D dle ASTM [43]

Materiál	ρ [kg·m ⁻³]	T_g [°C]	σ_m [MPa]	E_f [MPa]	ε_{tb} [%]	a_{iA} [J·m ⁻¹]
PLA Ingeo 3001D	1240	55	62	3600	3,5	16

K určení charakteristických teplotních a strukturních vlastností použitého biopolymeru PLA bylo využito DSC metody dle ČSN EN ISO 11357. Měření bylo realizováno na zařízení DSC1/700 METTLER TOLEDO a záznamy DSC křivek jsou uvedeny v přílohách 2 a 3. Polymer PLA byl zalisován do hliníkové misky s víčkem a společně s referenčním vzorkem zahříván a následně chlazen dle nastaveného teplotního programu, který je uveden v tab. 3.2. Referenčním vzorkem byl vzduch, který je teplotně inertní (resp. prázdná hliníková miska). Měření bylo provedeno v inertní atmosféře dusíku, aby se zamezilo předčasné degradaci materiálu.

Tab. 3.2 DSC teplotní program

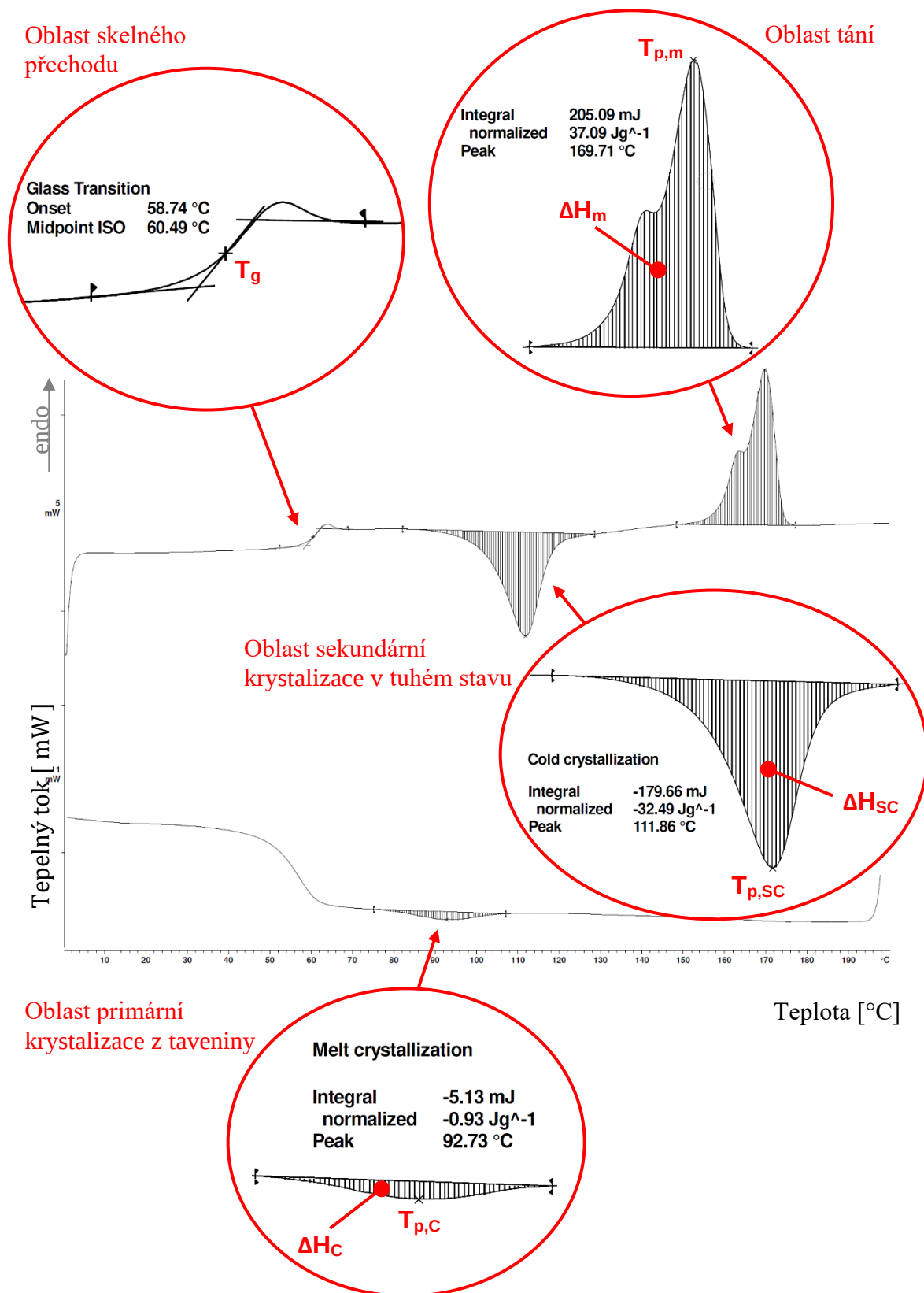
DSC PROGRAM			
OHŘEV	Počáteční teplota	0	[°C]
	Konečná teplota	200	[°C]
	Rychlost	10	[°C·min ⁻¹]
CHLAZENÍ	Počáteční teplota	200	[°C]
	Konečná teplota	0	[°C]
	Rychlost	10	[°C·min ⁻¹]
Proplachovací plyn		dusík	-
Rychlost proudění proplachovacího plynu		50	[ml·min ⁻¹]

Z naměřených DSC křivek polymeru PLA (při rychlosti ohřevu a chlazení 10 °C·min⁻¹) lze po odstranění tepelné historie materiálu (viz obr. 3.1) vidět průběh skelného přechodu se střední teplotou $T_g = 60,5$ °C, dále primární a sekundární krystalizaci polymeru a oblast tání. V případě primární a sekundární krystalizace se jedná o exotermické přeměny. K sekundární krystalizaci materiálu se střední hodnotou teploty $T_{p,SC} = 111,9$ °C (nazývané také jako dodatečná nebo studená krystalizace) dochází během jeho ohřevu v důsledku předchozí nedostatečné (omezené) primární krystalizace z taveniny, která nastává při střední teplotě $T_{p,C} = 92,7$ °C. Z DSC křivky lze vyčíst změnu entalpie primární krystalizace z taveniny $\Delta H_C = 0,93$ J·g⁻¹ a změnu entalpie sekundární krystalizace $\Delta H_{SC} = 32,49$ J·g⁻¹. Dále lze v DSC záznamu pozorovat endotermní oblast tání PLA s teplotou $T_{p,m} = 169,7$ °C a změnou entalpie tání $\Delta H_m = 37,09$ J·g⁻¹. Na základě naměřených hodnot změny entalpie tání a změny sekundární krystalizace lze dle rovnice (3.1) stanovit stupeň krystalinity, jehož hodnota odpovídá cca 5 %. U biopolymeru PLA Ingeo 3001D tak ve struktuře převládá amorfni fáze nad fází krystalickou.

$$X_C = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{SC}}{\Delta H_{m100}} \cdot 100 \quad (3.1)$$

kde je:

X_C	hmotnostní krystalický podíl (stupeň krystalinity) [%]
ΔH_m	změna entalpie tání [J·g ⁻¹]
ΔH_{SC}	změna entalpie sekundární krystalizace [J·g ⁻¹]
ΔH_{m100}	změna entalpie tání 100 % krystalického PLA = 93 J·g ⁻¹ [44]



Obr. 3.1 DSC křivka PLA ve fázi ohřevu (po odstranění tepelné historie materiálu) a chlazení s detailem oblasti skelného přechodu, tání, primární a sekundární krystalizace

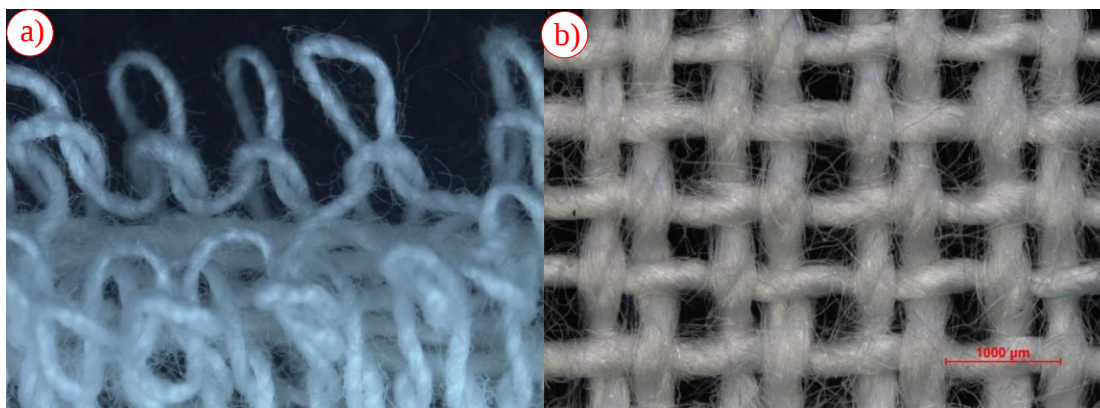
Při přípravě kompozitních struktur byla použita 100% bavlněná rotorová skaná příze. Tato příze byla použita ve dvou formách: 3D zátažné oboulicní pleteniny a 3D dvojnásobné spojkové tkaniny s plátňovou vazbou (viz obr. 3.2). Zátažná oboulicní pletenina s vkládaným útkem, tzv. hybridní pletená textilie, byla vyrobena ve spolupráci s katedrou technologií a struktur na pletacím stroji Shima Seiki, SRY, 14E s individuální volbou jehel a dvojnásobná spojková tkanina s plátňovou vazbou byla vyrobena na jehlovém tkacím bezčlunkovém stroji CCI. Detailní strukturu těchto textilií lze vidět na obr. 3.3.

V rámci experimentálního výzkumu byly zkoumány rázové charakteristiky kompozitů s textilní výztuží s a bez povrchové alkalické úpravy v roztoku hydroxidu sodného (tzv. mercerace). Mercerace textilní výztuže bylo použito za účelem zvýšení povrchové energie, resp. adheze vláken k polymerní matrici.



Obr. 3.2 Typy bavlněné textilní výztuže

a) 3D zátažná oboulicní pletenina, b) 3D dvojnásobná spojková tkanina s plátňovou vazbou

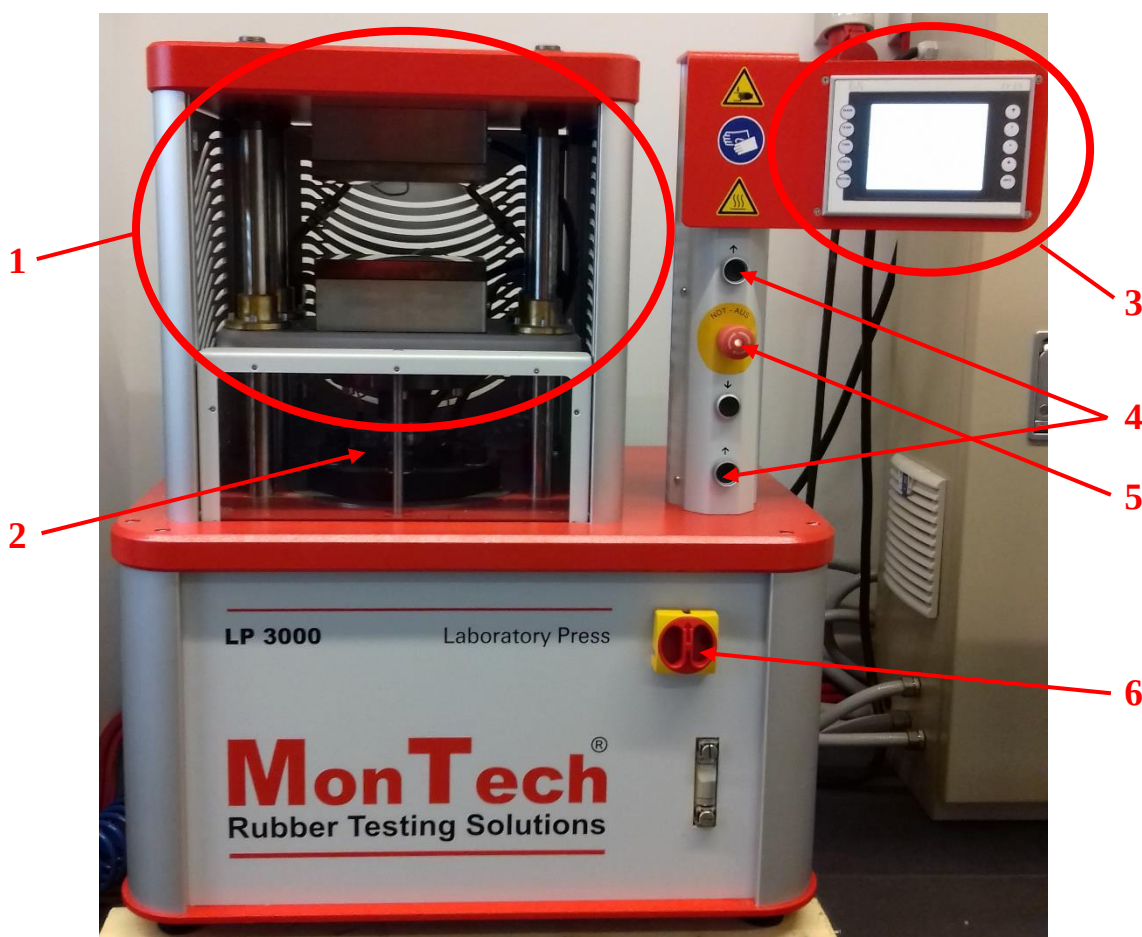


Obr. 3.3 Detail struktury textilní bavlněné výztuže (SM)

a) 3D zátažná oboulicní pletenina, b) 3D dvojnásobná spojková tkanina s plátňovou vazbou

3.2 Příprava kompozitních struktur a zkušebních těles

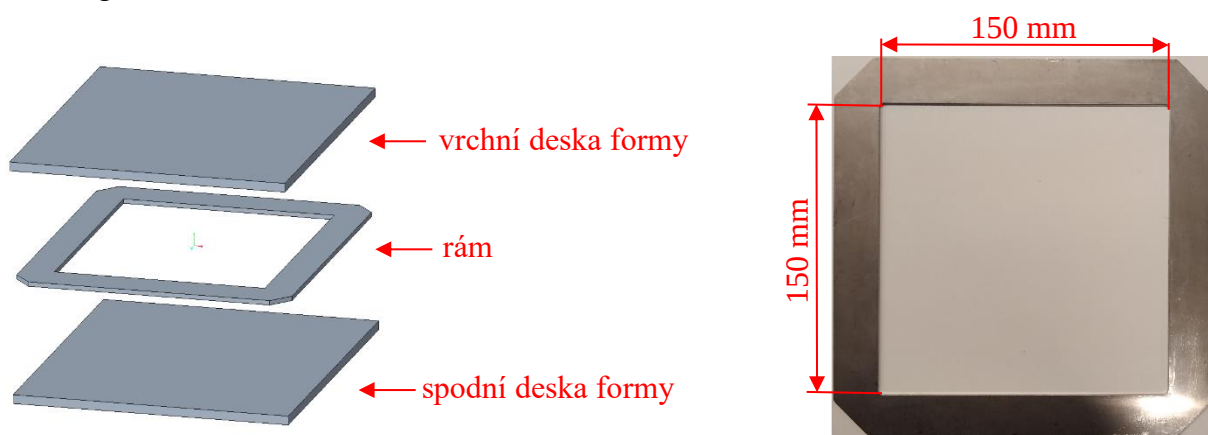
Všechna zkušební tělesa byla vyrobena lisováním na hydraulickém laboratorním lisu LP 3000 od firmy MonTech (viz obr. 3.4). Tento typ hydraulického lisu se řadí velikostně do střední třídy s uzavírací silou 200 kN, má čtyř-sloupový lisovací rám z korozi-vzdorné oceli s lisovací plochou (196 x 196) mm, který se uzavírá pneumatickým ochranným štítem. U lisu LP 3000 je elektrické vytápění, které je regulované digitálním PID regulátorem. Součástí lisu je i integrovaný displej, který slouží k nastavení příslušných parametrů potřebných k lisování, jako např.: teploty, tlaku, doby lisování nebo příslušného počtu cyklů. Z bezpečnostních důvodů je tento lis vybaven dvouručním ovládáním, které zprostředkovávají tlačítka na řídícím sloupu lisu.



Obr. 3.4 Hydraulický laboratorní lis MonTech LP 3000

- 1) čtyřsloupový lisovací rám s lisovací plochou, 2) pneumatický přední štít, 3) integrovaný displej,
4) dvouruční bezpečnostní tlačítka spuštění programu, 5) nouzový vypínač programu,
6) hlavní zapínač/vypínač

Před samotným lisováním bylo potřeba zhotovit formu, ve které budou lisovány kompozitní struktury. Forma byla vyřezána laserem z plechu o tloušťce 2 mm. Velikost formy byla volena podle pracovní (lisovací) plochy lisu, tzn. (196 x 196) mm a vnitřní rozměry formy byly zvoleny (150 x 150) mm, což jsou vlastně i rozměry výsledné vylisované desky. Tvarovou a rozměrovou strukturu formy lze vidět na obr. 3.5. Tuto formu bylo potřeba před použitím odmastit a nanést na ni separátor, který měl za úkol zabránit přilepení materiálu k povrchu formy a zajistit lepší odformování výsledné desky kompozitu. K odmaštění povrchu formy byl použit čistič Sealine cleaner a jako separátor vosk Meguiars mirror glazé.

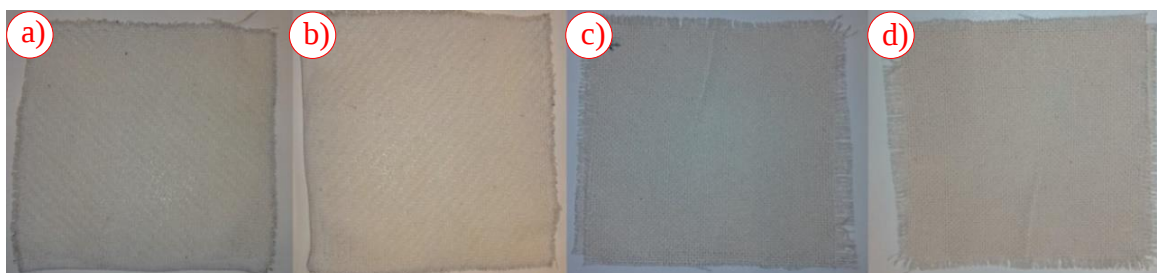


Obr. 3.5 Rozměry formy pro přípravu kompozitních struktur

Výrobě kompozitních struktur předcházely přípravné operace. Biopolymer PLA v podobě granulátu byl před svým použitím sušen ve vakuové sušárně Binder VD53 při teplotě 90 °C po dobu 16 hodin. Proces sušení se prováděl za účelem snížení obsahu absorbovatelné vlhkosti, která by mohla mít za následek zhoršení kvality povrchu výrobku (bubliny, šmouhy).

Dále bylo potřeba připravit příslušné textilie: 3D zátažnou obouliční pleteninu a 3D dvojnásobnou spojkovou tkaninu s plátňovou vazbou. Tyto textilie jsou v experimentální části použity ve dvou modifikacích, a to bez povrchové úpravy a s povrchovou úpravou, tzv. mercerací, kde byla tato textilie vložena do 10% roztoku NaOH o teplotě 60 °C, ve kterém se propírala po dobu 9 hodin a po vyjmutí z tohoto roztoku se nechala volně uschnout při pokojové teplotě. Následně byly obě tyto textilie nastříhány na rozměry (150 x 150) mm a vloženy do sušícího zařízení, kde se sušily při teplotě 90 °C po dobu 24 hodin (jelikož textilie z přírodních vláken mají vysokou absorpci vody). Tímto krokem se zabránilo možné poréznosti kompozitu.

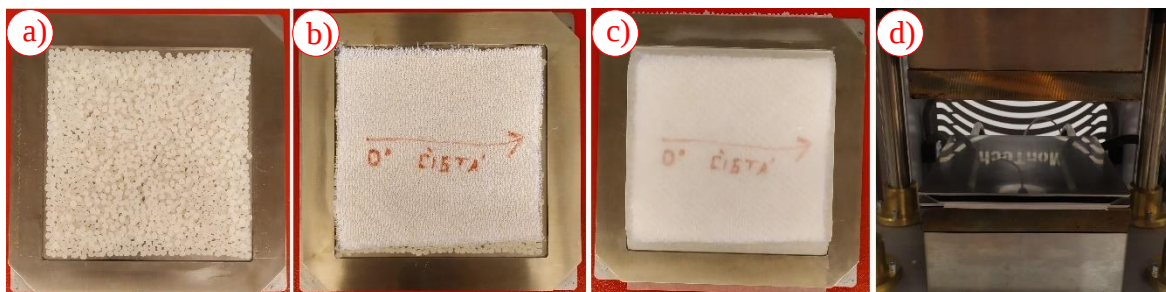
Rozdíl v čisté textilii a v textilii mercerované v NaOH je patrný už pouhým okem a dotykem. Vlákná bavlny během procesu mercerace nabobtnají a mění svůj tvar i délku. Původní plochý (ledvinovitý) průřez se změní na pravidelný kruh. Díky tomu získává výztuž také zpravidla vyšší pevnost. Textilie mercerované v NaOH jsou světlejší a na dotek jemnější (viz obr. 3.6).



Obr. 3.6 Porovnání optických vlastností bavlněné textilie

- a) 3D zátažná pletenina, b) 3D zátažná pletenina mercerovaná v NaOH,
 c) 3D tkanina s plátňovou vazbou, d) 3D tkanina s plátňovou vazbou mercerovaná v NaOH

Samotná příprava kompozitních struktur probíhala následovně. Nejdříve se odvážílo stanovené množství granulátu PLA: pro kompozitní desky 75 g a pro přípravu čistých desek PLA 100 g. Toto množství granulátu se rovnoměrně rozprostřelo na spodní desku formy, přes tuto „vrstvu“ granulátu se kladla textilie a následně se přikryla pečícím papírem, který zajistil lepší prosycení textilie, homogenní rozložení matrice a lepší odformování výsledné kompozitní desky. Okraje pečícího papíru se zatížily rámem formy a přiložila se horní deska formy. Takto připravená forma se vložila do lisu, kde podle nastaveného teplotního programu byl zahájen proces lisování a následné tuhnutí kompozitu. Tento proces přípravy kompozitních struktur lze vidět na obr. 3.7.



Obr. 3.7 Postup přípravy kompozitních struktur

- a) granulát PLA v rámu formy, b) kladení bavlněné textilie, c) kladení pečícího papíru,
 d) přiložení horní desky formy a vložení do lisovací komory

Teplotní program lisování (viz obr. 3.8) byl nastaven dle teplotních charakteristik biopolymeru PLA, které byly stanoveny metodou DSC. Jelikož se teploty během lisování pohybovaly vždy s minimální odchylkou 30 °C, byla teplota během lisování nastavena na hodnotu 230 °C. V prvním kroku docházelo k mírnému stlačení (7,5 kN) a především k zahřátí připravené struktury nad teplotu tání PLA po dobu 1 minuty. V dalším kroku začal působit lisovací tlak (200 kN) po dobu 0,5 minuty, který měl zajistit dobré rozložení taveniny polymeru ve formě a dostatečné prosycení textilní výztuže. Ve třetím kroku docházelo během 3,5 minut k postupnému ochlazování kompozitní struktury až na teplotu odformování 30 °C.

a) Previous Step: 1 Next

Layers			Parameters	
L1	230.00	230.00 °C	1.00	Minutes
L2	0.00	0.00 °C	7.50	kN
L3	0.00	0.00 °C	No cooling	

b) Previous Step: 2 Next

Layers			Parameters	
L1	220.00	220.00 °C	0.50	Minutes
L2	0.00	0.00 °C	200.00	kN
L3	0.00	0.00 °C	No cooling	

c) Previous Step: 3 Next

Layers			Parameters	
L1	30.00	30.00 °C	3.50	Minutes
L2	0.00	0.00 °C	200.00	kN
L3	0.00	0.00 °C	Cooling	

Obr. 3.8 Program lisování na lisu MonTech LP 3000

a) krok 1: $T=230\text{ °C}$, $t=1\text{ min}$, $F=7,5\text{ kN}$, b) krok 2: $T=220\text{ °C}$, $t=0,5\text{ min}$, $F=200\text{ kN}$,

c) krok 3: $T=30\text{ °C}$, $t=3,5\text{ min}$, $F=200\text{ kN}$

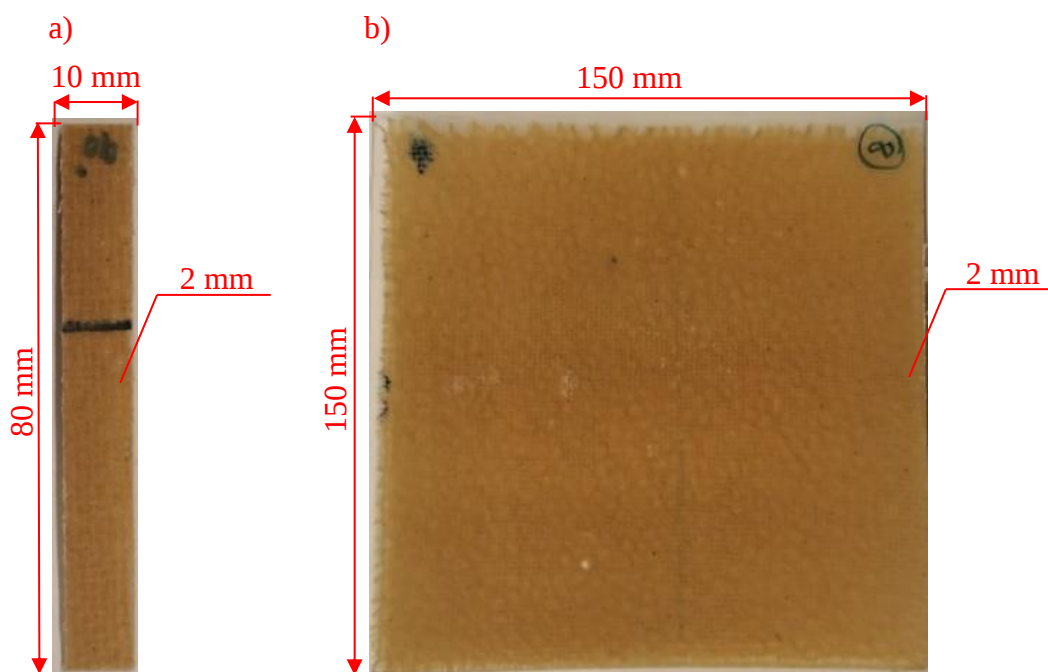
Výsledkem lisování byla kompozitní struktura ve tvaru desky, která byla vytvořena v 5 provedeních: deska pouze z čistého PLA (označena PLA), PLA deska s 3D zátažnou pleteninou (PLA/P), PLA deska s 3D zátažnou pleteninou mercerovanou v NaOH (PLA/P_{NaOH}), PLA deska s 3D tkaninou s plátňovou vazbou (PLA/T) a PLA deska s 3D tkaninou s plátňovou vazbou mercerovanou v NaOH (PLA/T_{NaOH}), viz obr 3.9.



Obr. 3.9 Typy vylisovaných kompozitních desek

a) PLA, b) PLA/P, c) PLA/P_{NaOH}, d) PLA/T, e) PLA/T_{NaOH}

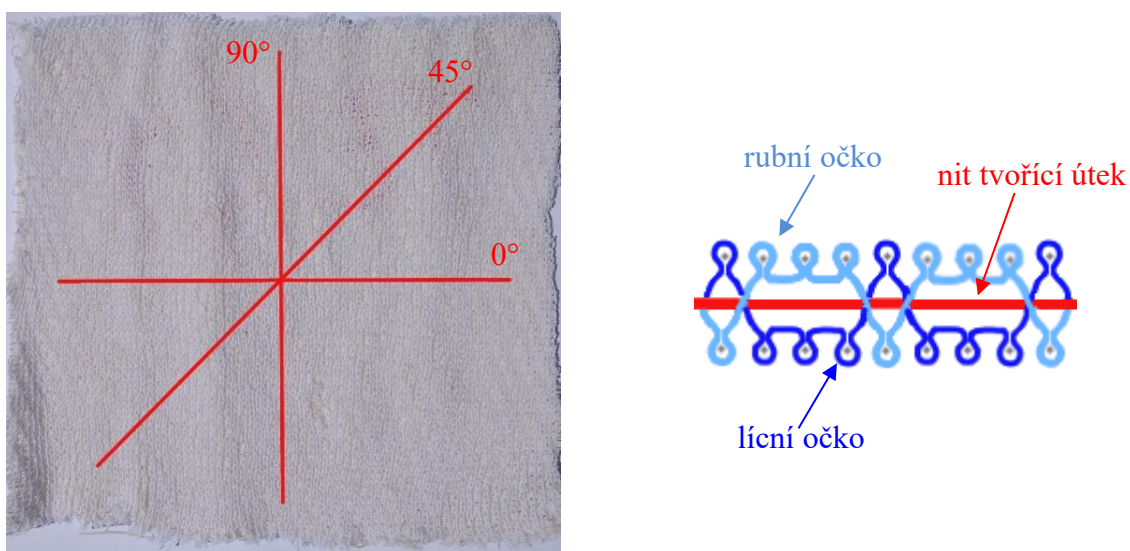
Z takto vylisovaných kompozitních desek byla následně na tabulových nůžkách MS2004 připravena zkušební tělesa pro hodnocení rázových vlastností kompozitních struktur (viz obr. 3.10). Pro rázovou zkoušku metodou Charpy byla zhotovena zkušební tělesa o rozměrech (80 x 10 x 2) mm. Pro zkoušení víceosého rázového namáhání byl zanechán rozměr vylisované desky v nezměněném stavu (150 x 150 x 2) mm.



Obr. 3.10 Rozměry zkušebních těles

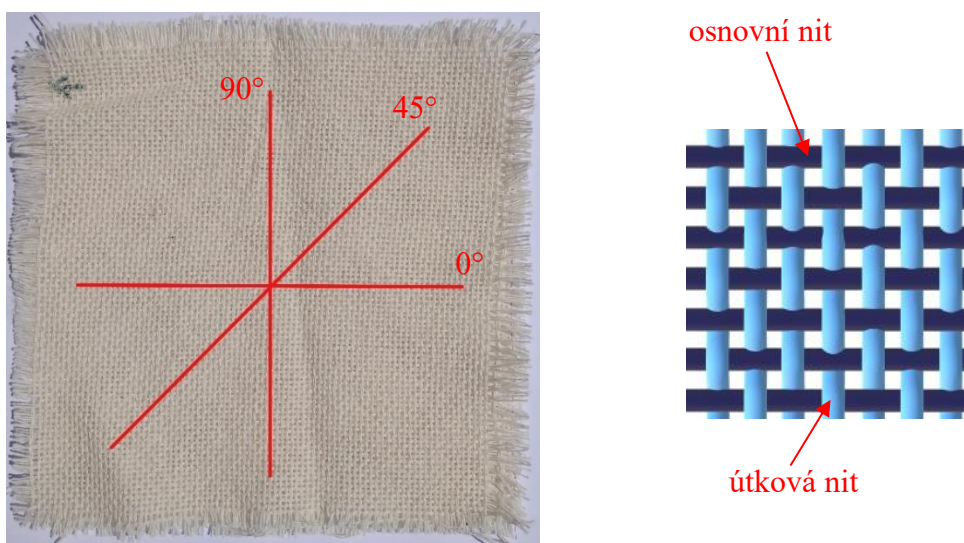
a) pro jednoosou rázovou houževnatost Charpy, b) pro víceosé rázové namáhání

Pro rázovou zkoušku metodou Charpy byla připravena zkušební tělesa s různou orientací vláken: 0° , 45° a 90° umožňující zhodnocení anizotropie rázových vlastností kompozitních struktur. U 3D obouliční zátažné pleteniny odpovídá 0° orientace vláken směru nití tvořící útek (červená) a 45° a 90° orientace je následně od stanovené 0° orientace odvozena, viz obr. 3.11.



Obr. 3.11 Orientace vláken 3D obouliční zátažné pleteniny

V případě 3D dvojnásobné spojkové tkaniny s plátňovou vazbou byla orientace vláken zvolena obdobně jako u 3D obouliční zátažné pleteniny. Jako 0° orientace vláken byl zvolen směr osnovních nití (tmavě modrá) a 45° a 90° orientace vláken byla následně od této 0° orientace odvozena, viz obr. 3.12.



Obr. 3.12 Orientace vláken 3D dvojnásobné spojkové tkaniny s plátňovou vazbou

3.3 Mikroskopická analýza kompozitních struktur

Pro analýzu vnitřní struktury kompozitních systémů, která byla provedena na jejich lomových plochách po přeražení za teploty $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, byl použit skenovací elektronový mikroskop Carl Zeiss Ultra Plus (viz obr. 3.13b). Příslušné vzorky se upevnilly na terčíky (držáky) a pro docílení lepší odrazivosti elektronů byly pokoveny platinou o tloušťce 3 nm. K pokování zkoumaných vzorků byl použit přístroj Quorum Q150R ES (viz obr. 3.13a). Následně byly vzorky vloženy do komory elektronového mikroskopu, kde na ně dopadal svazek elektronů. Výsledný obraz vnitřní struktury zkoumaných vzorků byl vytvořen v důsledku interakcí mezi elektronovými svazky a zkoumanými vzorky.

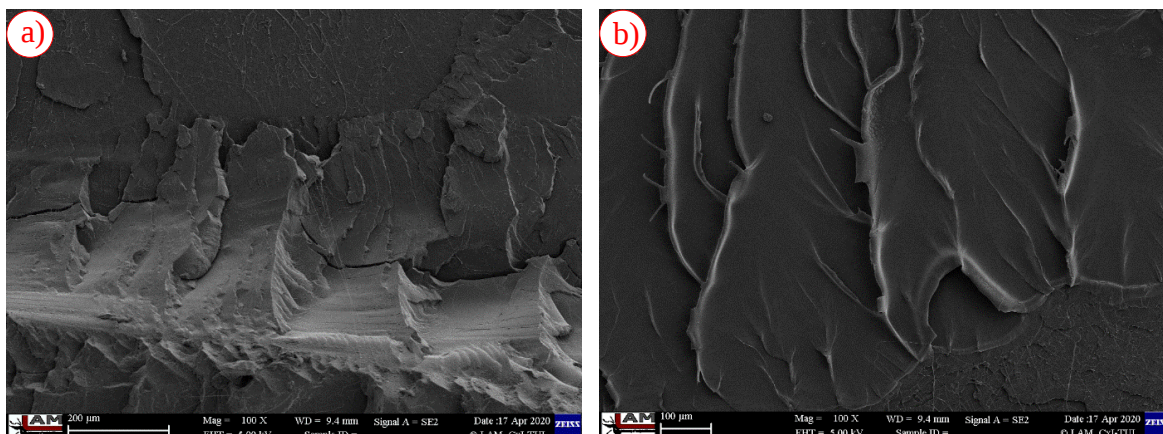


Obr. 3.13 Zařízení pro mikroskopickou analýzu kompozitních systémů

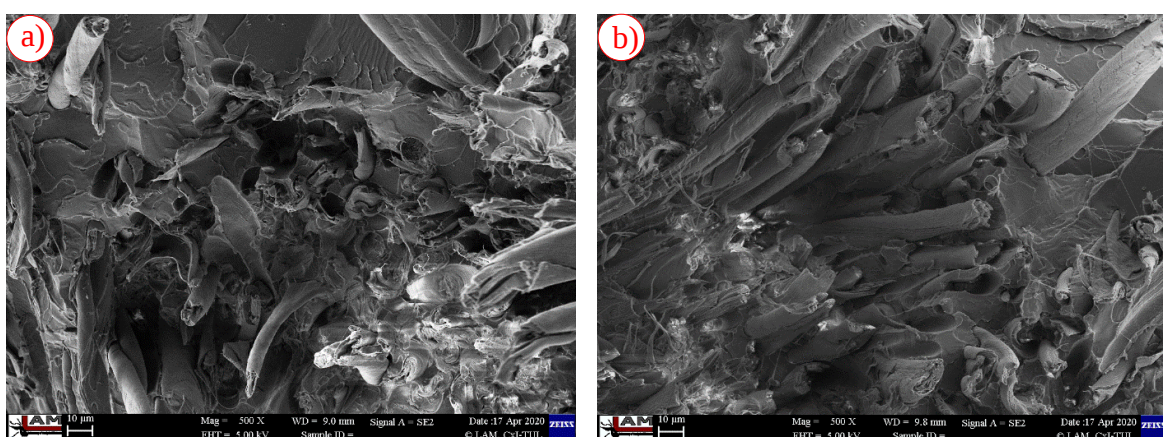
a) přístroj pro povlakování vzorků Quorum Q150R ES,

b) skenovací elektronový mikroskop Carl Zeiss Ultra Plus [45, 46]

Na obr. 3.14 až obr. 3.16 lze vidět výsledné mikroskopické struktury jednotlivých kompozitů. Z SEM snímků PLA matrice je zřejmé, že charakter lomu vypovídá o křehkém materiálu. Z mikroskopických snímků kompozitních struktur s textilní výztuží bez modifikace jejich povrchu je patrné, že mezi vlákny a matricí není dostatečná adheze (mezi vlákny a matricí jsou volné prostory). U kompozitů s textilní výztuží mercerovanou v NaOH se zdá, že nedošlo k výraznému zlepšení adheze vláken k polymerní matrici. Ve všech případech se podařilo vlákna textilní výztuže dostatečně prosytit polymerní matricí.

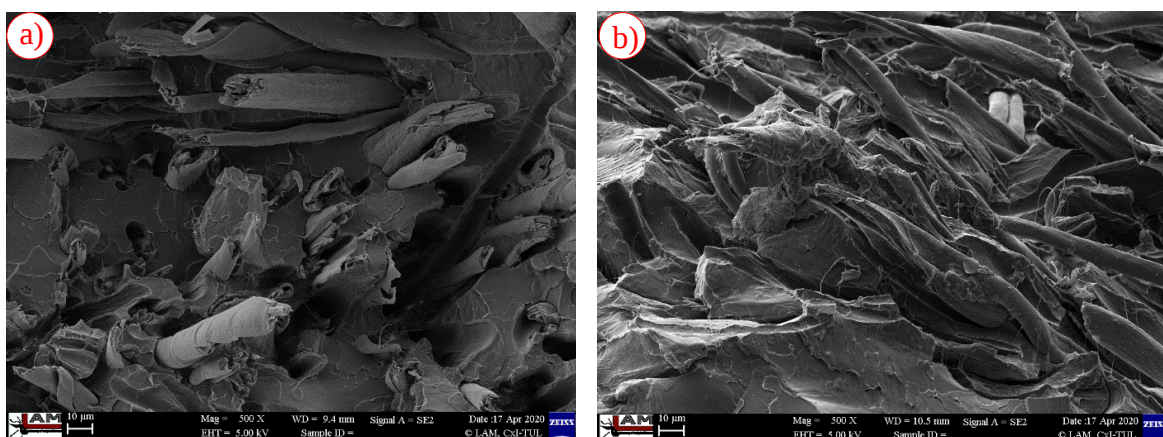


Obr. 3.14 Lomová plocha biopolymeru PLA (SEM)



Obr. 3.15 Lomová plocha biokompozitu PLA (SEM)

a) s 3D zátažnou pleteninou, b) s 3D zátažnou pleteninou mercerovanou v NaOH



Obr. 3.16 Lomová plocha biokompozitu PLA (SEM)

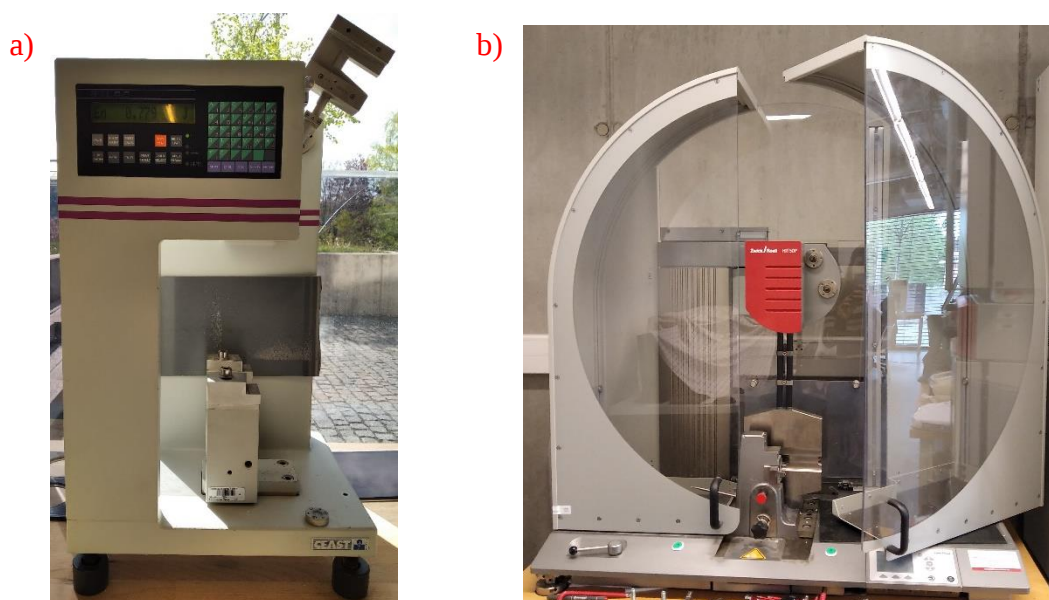
a) s 3D tkaninou s plátňovou vazbou,
b) s 3D tkaninou s plátňovou vazbou mercerovanou v NaOH

3.4 Studium rázových vlastností kompozitních struktur

Rázové vlastnosti kompozitních struktur byly zkoumány z hlediska jednoosého a víceosého rázového namáhání. Pro stanovení jednoosé rázové houževnatosti byla zvolena metoda Charpy dle mezinárodního předpisu ČSN EN ISO 179-1 a pro stanovení víceosé rázové houževnatosti instrumentovaná rázová zkouška v souladu s mezinárodním předpisem ČSN EN ISO 6603-2.

3.4.1 Jednoosé rázové namáhání

Zkouška rázové houževnatosti Charpy byla provedena přednostně na zařízení Resil Ceast 5.5 s rázovým kyvadlem o nominální energii 5 J (viz obr. 3.17a). Pro kompozity, u nichž na tomto zařízení nedošlo k přeražení zkušebních těles, bylo použito rázové kyvadlo Zwick HIT50P s nominální energií kyvadla 50 J (viz obr. 3.17b). Zkouška probíhala v souladu s mezinárodním předpisem ČSN EN ISO 179-1, kdy byl ráz veden na širší stranu zkušebního tělesa o rozměrech (80 x 10 x 2) mm rychlostí $2,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Před samotným měřením byla provedena kalibrace zařízení a byl proveden ráz na prázdko, ze kterého byla zjištěna ztrátová energie třením. Výsledná rázová energie absorbovaná zkušebním tělesem při přeražení je korigovanou energií, v níž jsou zahrnuty nezbytné korekce na ztráty třením.



Obr. 3.17 Zařízení pro hodnocení rázové houževnatosti Charpy

a) Resil Ceast 5.5 s rázovým kyvadlem, b) Zwick HIT50P s rázovým kyvadlem

Při zkoušení kompozitních struktur se objevily dva základní typy přeražení: C a N. Označení „C“ značí úplné přeražení. Z hodnoty korigované energie potřebné k přeražení tělesa byla následně stanovena rázová houževnatost Charpy dle rovnice (3.2). Označení „N“ značí stav, kdy k přeražení zkušebního vzorku nedojde. V rámci experimentálního měření bylo proto u těchto materiálů použito rázové kyvadlo s vyšší nominální energií (až 50 J), avšak ani v tomto případě k přeražení zkušebních těles nedošlo. Z tohoto důvodu nemohla být naměřena žádná energie potřebná k jejich přeražení, ze které by se následně mohla vypočítat hodnota rázové houževnatosti.

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h \cdot b} \cdot 10^3 \quad (3.2)$$

kde je:

a_{cU}	rázová houževnatost Charpy [$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$]
E_c	korigovaná energie spotřebovaná při přeražení zkušebního tělesa [J]
h	tloušťka zkušebního tělesa [mm]
b	šířka zkušebního tělesa [mm]

V tab. 3.3 jsou zaznamenány výsledné typy přeražení (C a N) a průměrné hodnoty rázové houževnatosti Charpy pro nejčastější typ přeražení, kromě typu N (nepřeraženo). V závorkách je uveden druhý nejčastější typ přeražení, avšak pouze tehdy, pokud se objevil ve více než 1/3 všech případů. Pokud toto nenastalo, je zde v souladu s ČSN EN ISO 179-1 uvedena hvězdička.

Tab. 3.3 Výsledné typy přeražení a průměrné hodnoty rázové houževnatosti Charpy kompozitních struktur

Materiál	Rázová houževnatost Charpy [$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$]		
	Orientace vláken		
	0°	45°	90°
PLA	N*		
PLA/P	28,2 ± 4,4 C*	29,9 ± 5,1 C*	26,4 ± 4,7 C*
PLA/P _{NaOH}	31,3 ± 8,6 C*	32,1 ± 8,0 C*	24,2 ± 4,8 C*
PLA/T	41,5 ± 5,2 C(N)	N*	N*
PLA/T _{NaOH}	N(C)	N*	N(C)

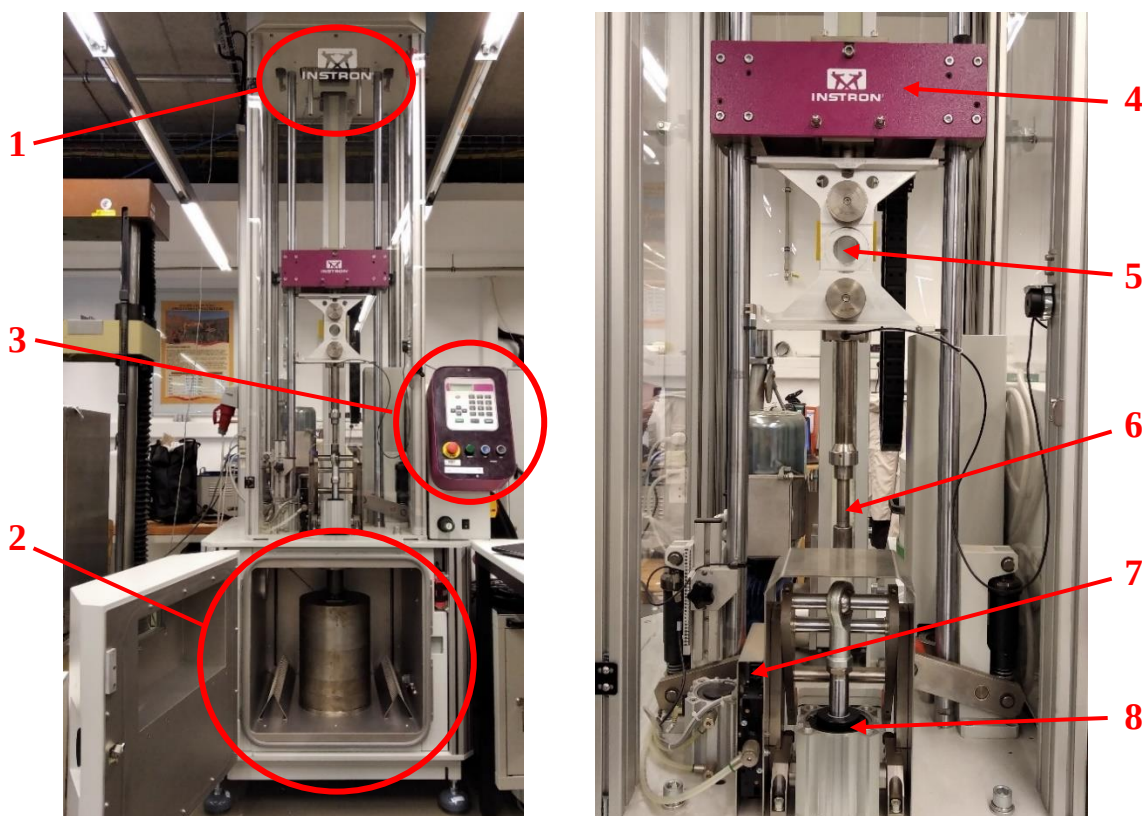
Pro každou kompozitní strukturu a každou orientaci vláken bylo zkoušeno minimálně deset vzorků, viz příloha 4. Z výsledků je patrné, že v případě PLA kompozitů s 3D zátažnou pleteninou docházelo ve všech případech k úplnému přeražení zkušebních vzorků a v případě kompozitů s 3D tkaninou s plátňovou vazbou převažovaly vzorky, u nichž k přeražení nedošlo. Již z těchto poznatků lze tvrdit, že rázová houževnatost kompozitních struktur s textilní výztuží v podobě 3D tkaniny s plátňovou vazbou je lepší než u kompozitů s textilní výztuží v podobě 3D zátažné pleteniny.

3.4.2 Víceosé rázové namáhání

Víceosé rázové namáhání kompozitních struktur bylo provedeno na padostroji Instron Ceast 9350 (viz obr. 3.18). Toto zařízení je opatřeno ovládacím panelem, snímací hlavou pro měření síly a optickým čidlem pro měření dráhy, které jsou propojeny s programem CeastVIEW 6.41 2B. V tomto programu se nejdříve nastaví příslušné parametry potřebné pro provedení zkoušky, zejména rázová rychlost a poté se zahájí vlastní měření. Po skončení zkoušky se v programu zobrazí příslušné grafické závislosti rázové síly na čase, případně velikosti průhybu a vyhodnotí se rázová energie při maximální síle, případně při průrazu.

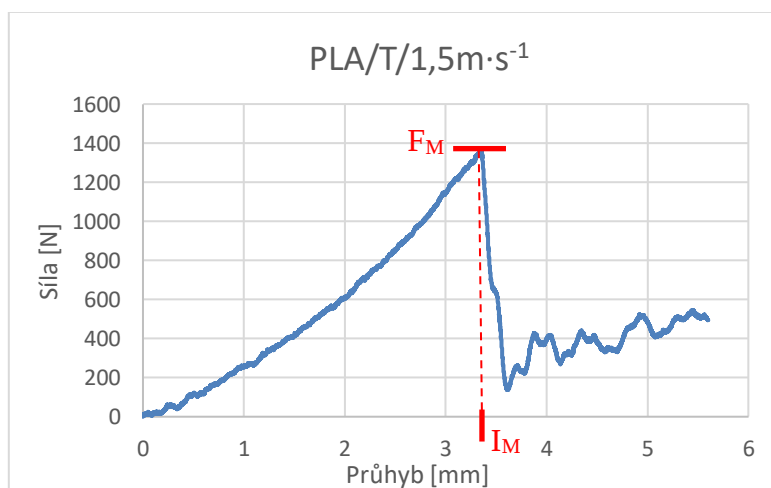
Zkouška probíhala na vzorcích o rozměrech (150 x 150 x 2) mm v souladu s mezinárodním předpisem ČSN EN ISO 6603-2. Zkušební vzorek byl umístěn na podpěrný kroužek, přidržen upínacím zařízením a podroben nárazu tloučkem o průměru 30 mm s namazanou nárazovou plochou, aby se snížilo tření mezi tloučkem a zkušebním tělesem. Ráz byl realizován nominálně stálou rychlostí kolmo na povrch zkušebního tělesa. Pro měření PLA kompozitních struktur byly zvoleny dvě hodnoty rychlosti nárazu: $4,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, která je pro tento typ zkoušky využívána přednostně a $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, která byla zvolena za účelem snížení hladiny šumu a vibrací, jež jsou typické pro křehké materiály, mezi které patří i PLA a jeho kompozitní struktury. Pro každou kompozitní strukturu a nárazovou rychlost bylo zkoušeno minimálně pět vzorků, viz příloha 5, příloha 6 a příloha 7.

Vyhodnocení víceosé rázové houževnatosti zkušebních vzorků probíhalo na základě zaznamenané síly působící na zkušební těleso ve směru rázu v závislosti na průhybu zkušebního tělesa a také na základě typu trhliny, případně průrazu (viz příklad na obr. 3.19). Ze získaných křivek síla – průhyb jsou v tab. 3.4 a tab. 3.5 uvedeny hodnoty maximální rázové síly (prvního maxima) vyvinuté tloučkem na zkušební těleso ve směru rázu (F_M), průhyb (I_M) a energie při maximální rázové síle (E_M).



Obr. 3.18 Zkušební zařízení Instron Ceast 9350

- 1) pružiny pro zvýšení dopadové energie, 2) termostatická komora pro vkládání zkušebních vzorků,
3) ovládací panel, 4) zařízení pro automatické vyvážení, 5) závaží pro zvýšení dopadové energie,
6) nástroj (tlouk), 7) optické čidlo, 8) zařízení zamezující odrazu nástroje



Obr. 3.19 Grafický záznam síla – průhyb a tvar trhliny pro PLA kompozitní strukturu s 3D tkaninou při rychlosti rázu $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Tab. 3.4 Výsledné hodnoty maximální rázové síly, průhybu a energie při maximální rázové síle pro rychlost rázu $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Rychlost rázu	$1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$		
Materiál	$F_M [\text{N}]$	$I_M [\text{mm}]$	$E_M [\text{J}]$
PLA	$996,5 \pm 116,4$	$3,07 \pm 0,26$	$1,3 \pm 0,3$
PLA/P	$1055,6 \pm 124,1$	$3,18 \pm 0,32$	$1,6 \pm 0,4$
PLA/P _{NaOH}	$1090,0 \pm 96,2$	$2,81 \pm 0,51$	$1,9 \pm 0,5$
PLA/T	$1433,3 \pm 97,4$	$3,53 \pm 0,18$	$2,2 \pm 0,3$
PLA/T _{NaOH}	$1258,7 \pm 77,7$	$3,56 \pm 0,25$	$2,0 \pm 0,2$

Tab. 3.5 Výsledné hodnoty maximální rázové síly, průhybu a energie při maximální rázové síle pro rychlost rázu $4,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

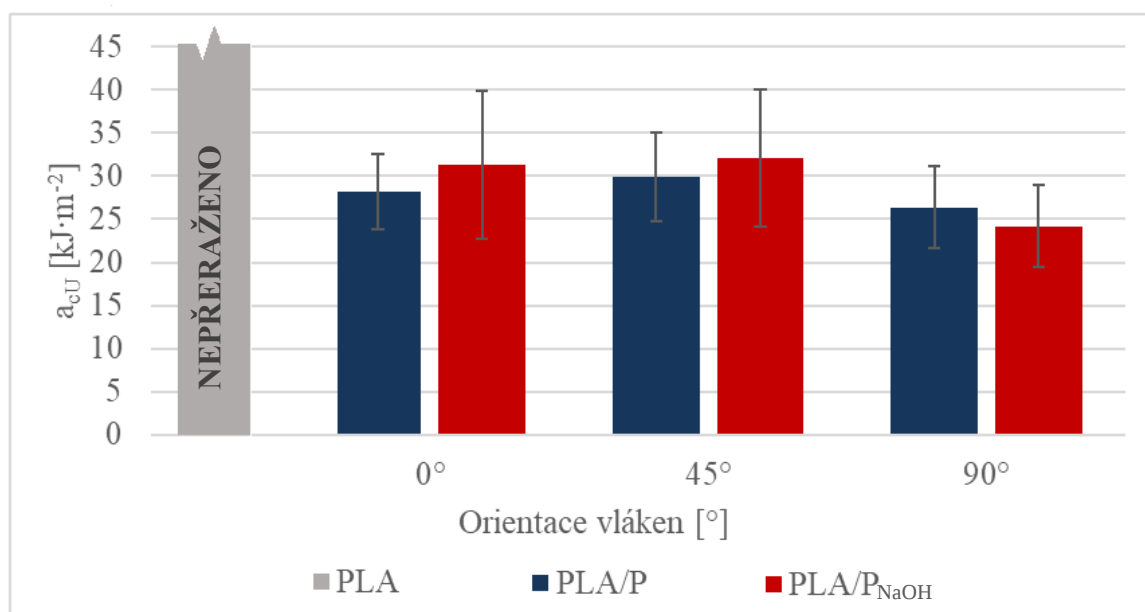
Rychlost rázu	$4,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$		
Materiál	$F_M [\text{N}]$	$I_M [\text{mm}]$	$E_M [\text{J}]$
PLA	$615,6 \pm 38,2$	$2,38 \pm 0,17$	$0,6 \pm 0,1$
PLA/P	$1026,1 \pm 209,9$	$5,30 \pm 1,86$	$2,7 \pm 1,2$
PLA/P _{NaOH}	$1254,5 \pm 191,4$	$3,78 \pm 1,72$	$2,5 \pm 1,5$
PLA/T	$1202,9 \pm 41,7$	$3,11 \pm 0,10$	$1,5 \pm 0,1$
PLA/T _{NaOH}	$1114,8 \pm 38,6$	$3,43 \pm 0,37$	$1,9 \pm 0,4$

4 VYHODNOCENÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ

V rámci této části bakalářské práce jsou hodnoceny rázové vlastnosti biopolymerních kompozitů s PLA matricí a s textilní výztuží na bázi bavlny v podobě 3D zátažné pleteniny a 3D tkaniny s plátňovou vazbou s a bez chemické úpravy jejich povrchu. Kompozitní struktury jsou hodnoceny z hlediska jednoosého a víceosého rázového namáhání. Pro jednoosý ráz (metoda Charpy) byly z naměřených hodnot (viz příloha 4) vytvořeny grafické závislosti rázové houževnatosti Charpy na typu výztuže, povrchové úpravě a orientaci vláken. U víceosého rázu byly porovnávány naměřené hodnoty maximální rázové síly (prvního maxima) vyvinuté tloučkem na zkušební těleso ve směru rázu (F_M), průhyb (I_M) a energie při maximální rázové síle (E_M), viz přílohy 5, 6 a 7.

4.1 Vyhodnocení jednoosého rázového namáhání

Z naměřených hodnot pro jednoosou rázovou houževnatost Charpy bylo zjištěno, že samotný biopolymer PLA má velice dobrou rázovou houževnatost. Toto tvrzení se opírá o skutečnost, že při zkoušení pomocí Charpyho kyvadla o nominální hodnotě 5 J nedošlo ani u jednoho ze zkoušených vzorků k přeražení, a to ani posléze za použití kyvadla o nominální hodnotě 50 J, viz obr. 4.1.



Obr. 4.1 Rázová houževnatost kompozitních struktur s 3D pleteninou a s 3D pleteninou mercerovanou v NaOH

Průměrné hodnoty rázové houževnatosti kompozitních struktur s 3D zátažnou pleteninou bez povrchové úpravy se pohybovaly od 26,4 až 29,9 kJ·m⁻² a průměrné hodnoty rázové houževnatosti pro kompozitní struktury s 3D zátažnou pleteninou mercerovanou v roztoku NaOH se pohybovaly od 24,2 až 32,1 kJ·m⁻² (viz obr. 4.1). Z grafického vyjádření lze vidět, že u kompozitních struktur s 3D mercerovanou pleteninou s 90° orientací vláken je zaznamenán pokles rázové houževnatosti vůči kompozitním strukturám s 3D mercerovanou pleteninou s orientací vláken 0° a 45° a to o 23 % resp. o 25 %. Vzhledem k rozptylu naměřených hodnot, vyjádřený směrodatnou odchylkou, je však tato změna staticky nevýznamná.

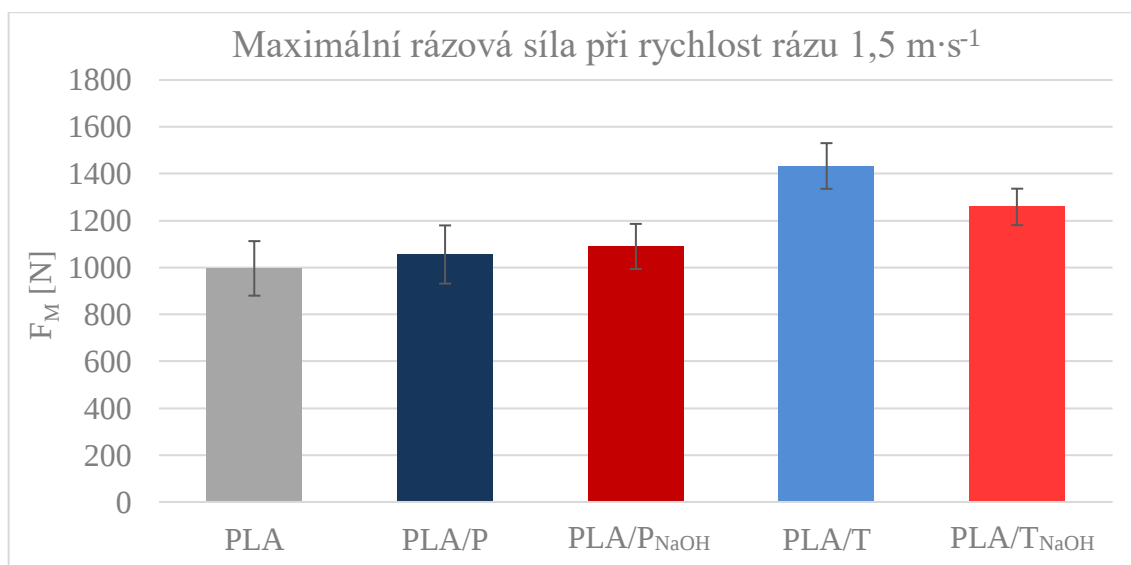
Z grafické závislosti je dále patrné, že chemická úprava vláken v podobě mercerace v roztoku NaOH měla za následek zvýšení hodnoty rázové houževnatosti, a to v případě 0° a 45° orientace vláken a snížení u 90° orientace vláken. Průměrná hodnota rázové houževnatosti kompozitních struktur s mercerovanou 3D pleteninou se u 0° orientace vláken oproti kompozitním strukturám s 3D pleteninou bez mercerace zvýšila o 11 %, u 45° orientace vláken o 7 % a u 90° orientace vláken se snížila o 8 %. S ohledem na rozptyl naměřených hodnot nejsou tyto změny ale dostatečně průkazné. Z toho důvodu nelze jednoznačně říci, že kompozitní struktura s 3D pleteninou mercerovanou v roztoku NaOH má lepší rázovou houževnatost než kompozitní struktura s 3D pleteninou bez mercerace. Velikost rozptylu měřených hodnot lze vysvětlit např. lokální deformací tvaru textilní výztuže způsobené při lisování kompozitu, kvalitou prosycení výztuže apod.

Kompozitní struktury s textilní výztuží v podobě 3D tkaniny s plátňovou vazbou měly, co se týče hodnot jednoosé rázové houževnatosti Charpy značně lepší výsledky než kompozity s 3D zátažnou pleteninou. Pouze v jednom případě došlo u těchto kompozitů (s orientací vláken 0°) k přeražení většiny vzorků, kde výsledná hodnota rázové houževnatosti byla 41,5 kJ·m⁻². U ostatních kompozitních struktur (s orientací vláken 45° a 90°) nedošlo k přeražení zkušebních těles, nebo případně tento charakter odolnosti rázovému namáhání převládal. Lze tedy konstatovat, že kompozitní struktury s 3D tkaninou s plátňovou vazbou mají jednoznačně vyšší rázovou houževnatost než kompozitní struktury s 3D zátažnou pleteninou a současně nižší než samotné PLA. Z výsledků rázové houževnatosti lze dále uvést, že kompozity s 3D tkaninou mercerovanou v NaOH budou rázovému namáhání odolávat méně, neboť u vzorků u nichž bylo zaznamenáno přeražení, došlo k tomuto porušení při menší rázové energii. Tato skutečnost potvrzuje výsledky studia

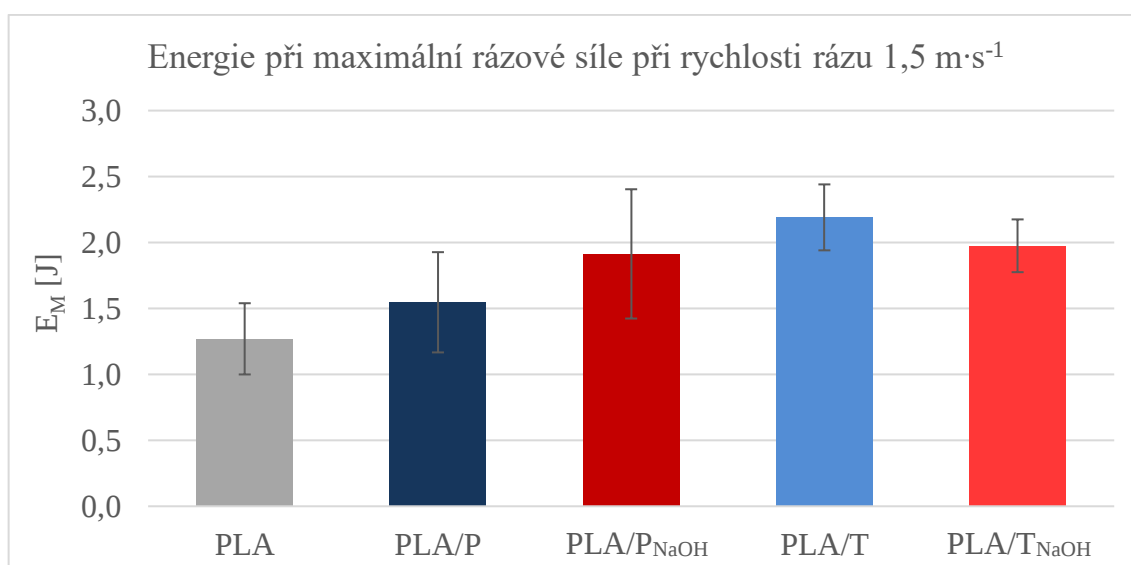
lomových ploch pomocí elektronové mikroskopie (viz kap. 3.3), které poukazují na nedostatečnou adhezi mezi mercerovanými vlákny a matricí.

4.2 Vyhodnocení víceosého rázového namáhání

Z naměřených průměrných hodnot při víceosém rázovém namáhání byly vytvořeny grafické závislosti porovnávající maximální rázovou sílu, která byla potřebná k iniciaci trhliny a energii při maximální rázové síle, která byla absorbována zkušebním tělesem.

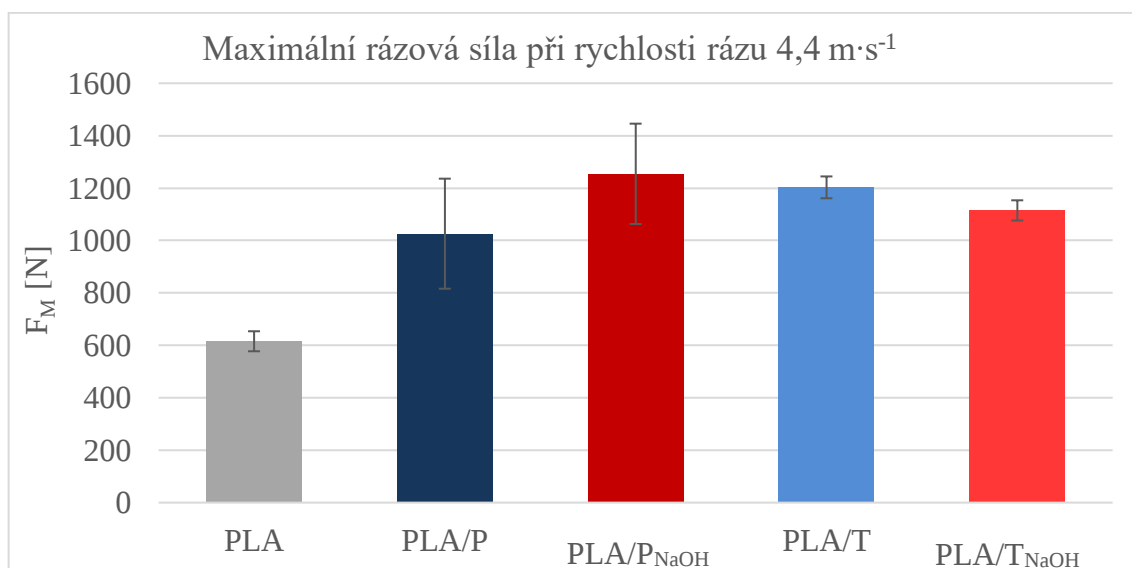


Obr. 4.2 Grafické srovnání maximální rázové síly s ohledem na typ textilní výztuže při rychlosti rázu $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

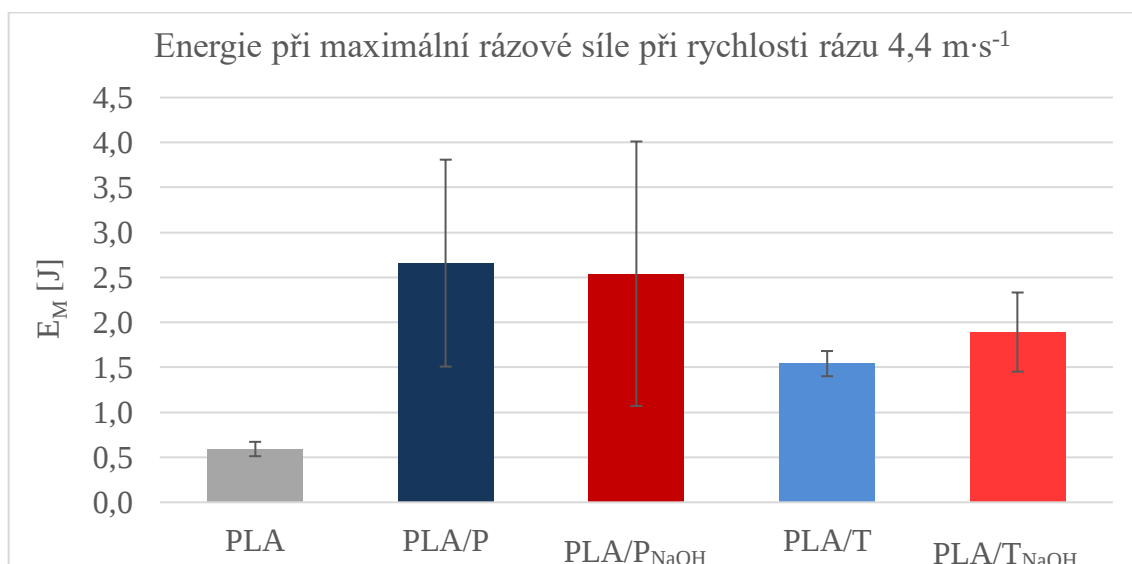


Obr. 4.3 Grafické srovnání energie při maximální rázové síle s ohledem na typ textilní výztuže při rychlosti rázu $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Na obr. 4.2 a obr. 4.3 lze vidět grafické závislosti maximální rázové síly a rázové energie kompozitních struktur při rychlosti rázu $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Z těchto obrázků lze konstatovat, že nejvyšší průměrná hodnota maximální rázové síly i energie při maximální rázové síle byla naměřena u kompozitní struktury s 3D tkaninou s plátňovou vazbou bez povrchové úpravy a to $1433,3 \text{ N}$ a $2,2 \text{ J}$, což je v korelaci s diskutovanými výsledky u jednoosého rázového namáhání.



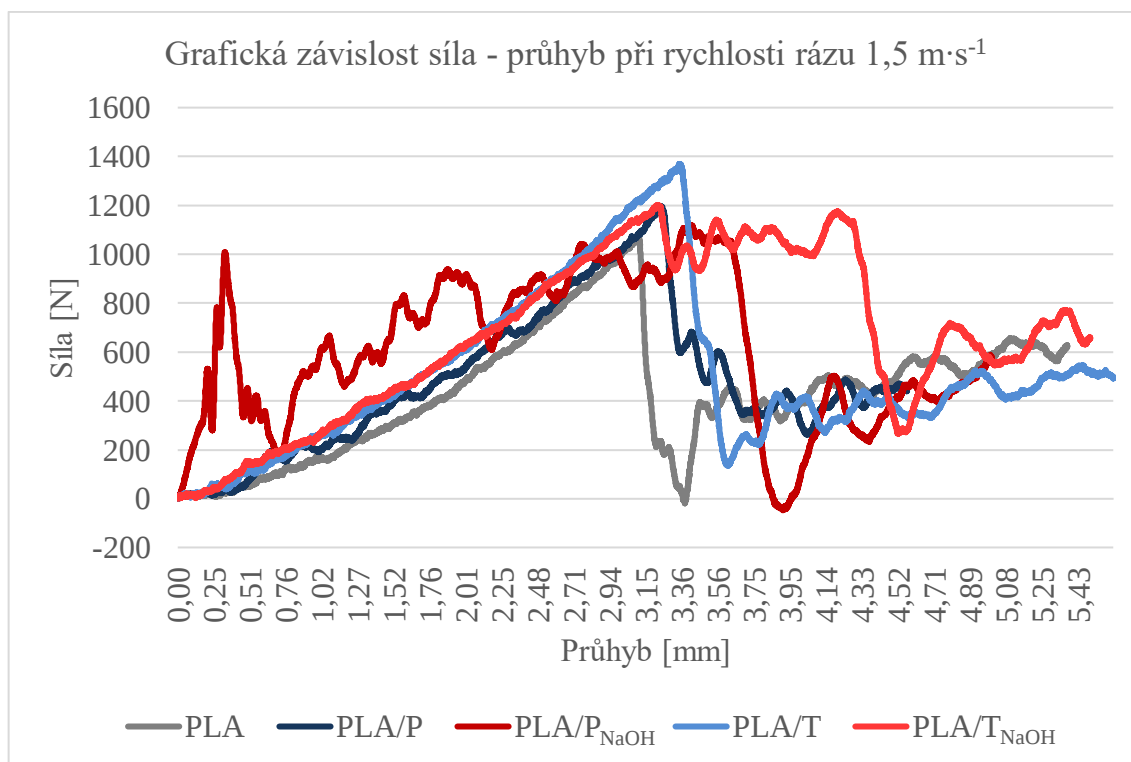
Obr. 4.4 Grafické srovnání maximální rázové síly s ohledem na typ textilní výztuže při rychlosti rázu $4,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



Obr. 4.5 Grafické srovnání energie při maximální rázové síle s ohledem na typ textilní výztuže při rychlosti rázu $4,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Na obr. 4.4 a obr. 4.5 lze vidět obdobné grafické závislosti vlastností při víceosém rázovém namáhání s rychlostí rázu $4,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. V případě měření při rychlosti rázu $4,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ docházelo u kompozitních struktur s 3D zátažnou pleteninou ke značnému rozptylu měřených hodnot než tomu bylo při rychlosti rázu $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Příčina těchto odchylek je ve vyhodnocení výsledných grafických závislostí, u kterých nelze jednoznačně určit v jaké fázi došlo k iniciaci trhliny, viz příloha 7.

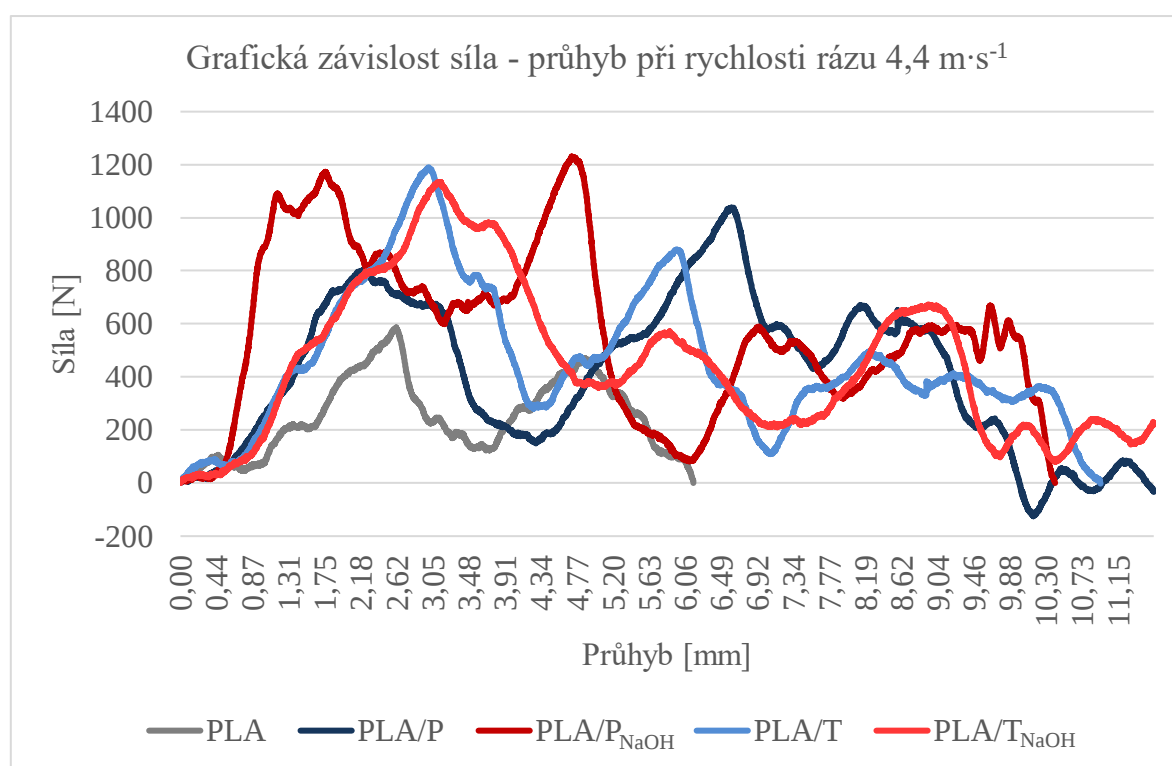
Při hodnocení víceosého rázového namáhání musí být tedy brán ohled na průběh grafické závislosti rázová síla – průhyb (průběh vybraných vzorků lze vidět na obr. 4.6 pro rychlost rázu $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a na obr. 4.7 pro rychlost rázu $4,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), neboť síla, resp. energie spotřebovaná k porušení vzorků, je složena z několika příspěvků (např. lomové plochy, viskoelastické a plastické deformace apod.), viz kap. 2.2.



Obr. 4.6 Grafické znázornění křivky síla – průhyb při rychlosti rázu $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Na obr. 4.6 lze vidět, že průběh křivky rázová síla – průhyb pro zkušební vzorek PLA, zkušební vzorek PLA/P a zkušební vzorek PLA/T se nejvíce blíží „ideálnímu chování“ kompozitu. Lze vidět, že křivka téměř lineárně stoupá až do bodu maximální rázové síly, kde dojde k iniciaci trhliny a pak skokově klesne. Tento průběh značí dobré prosycení výztuže a matrice. U zkušebních vzorků PLA/P_{NaOH} a PLA/T_{NaOH} je průběh

křivky síla – průhyb odlišný. U PLA/P_{NaOH} lze průběh křivky vysvětlit tak, že prudký nárůst hned na začátku znázorňuje iniciaci trhliny a postupný nárůst, který následuje je pouze v důsledku šumu, vibrací způsobených „odražením“ tlouku od zkušebního vzorku nebo zachycením prasklé části zkušebního vzorku na podložce (vytváří odpor pro tlouk). U PLA/T_{NaOH} lze vidět, že nárůst křivky k maximální rázové síle je podobný jako u vzorků PLA, PLA/P a PLA/T, avšak po dosažení maximální rázové síly zde nedochází k výraznému poklesu ale křivka „osciluje“ na hodnotě 1100 N a až posléze lehce vystoupá a rapidně klesne. Tento průběh je zřejmě způsoben rovněž možnými vibracemi způsobenými „odražením“ tlouku od zkušebního vzorku.



Obr. 4.7 Grafické znázornění křivky síla – průhyb při rychlosti rázu 4,4 m·s⁻¹

Na obr. 4.7 lze vidět křivky znázorňující závislost síla – průhyb při rychlosti rázu 4,4 m·s⁻¹. Jelikož se zkoušené kompozitní struktury řadí spíše mezi křehké materiály, lze lépe hodnotit víceosé rázové namáhání z výsledných průběhů síla – průhyb při rychlosti rázu 1,5 m·s⁻¹. Nicméně z tohoto obrázku lze vyčíst, že pro průraz zkušebním tělesem z PLA je potřeba značně menší rázová síla než pro kompozitní struktury. U zkušebních vzorků PLA/P a PLA/P_{NaOH} lze vidět náraz tlouku a následné protažení výztuže (3D zátažná pletenina je pružná), až do bodu jejího porušení, kde dochází k celkovému průrazu. U zkušebních vzorků PLA/T a PLA/T_{NaOH} je průběh podobný jako při rychlosti rázu 1,5 m·s⁻¹, nejprve je zde

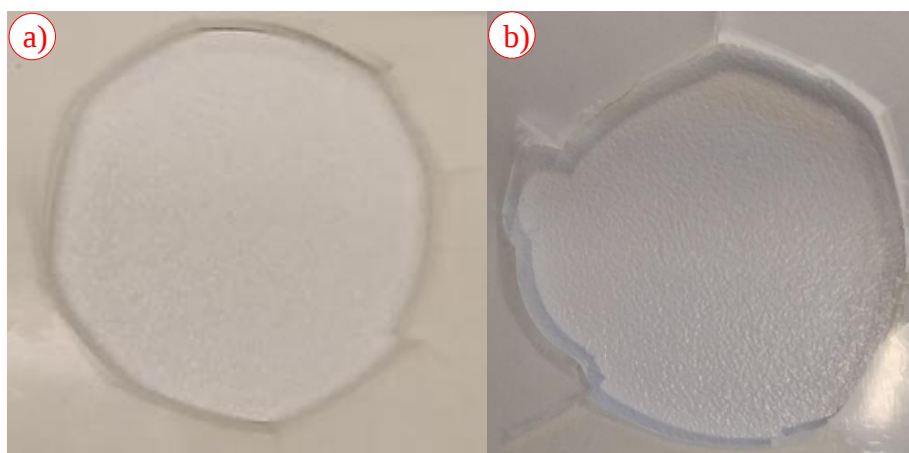
postupný nárůst až do maximální rázové síly, kde dochází k iniciaci trhliny a k následnému průrazu, který je následován skokovým poklesem s možnou oscilací, která je způsobena šumem, vibracemi a možným zachycením prasklé části vzorku na podložce.

Dle výsledných hodnot rázové síly a energie a dle grafických závislostí rázová síla – průhyb (hodnoceno při rázové rychlosti $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) odolávají víceosému rázovému namáhání PLA kompozity s 3D tkaninou lépe než PLA kompozity s 3D pleteninou, což jsou obdobné výsledky jako při jednoosém rázovém namáhání. Avšak oproti jednoosému rázovému namáhání vykazují kompozitní struktury vyšší rázovou odolnost než samotné PLA. I z této části experimentálního výzkumu lze konstatovat, že mercerace vlákenné výztuže nemá pozitivní vliv na zvýšení rázové odolnosti kompozitní struktury.

Na následujících obrázcích obr. 4.8 až obr. 4.12 jsou uvedeny tvary trhlín v závislosti na rychlosti rázu. Na obr. 4.8 lze vidět zkušební vzorek PLA, kde je patrné, že došlo k jeho porušení, jak při rychlosti rázu $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tak při $4,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. V případě rychlosti $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ se jedná o téměř hladký průraz bez prasklin, zatímco u rychlosti $4,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ lze vidět nepravidelný „tříštivý“ průraz s prasklinami v jeho okolí, ovlivňující měřenou křivku rázové síly na průhybu. Nižší rázová rychlost je tedy pro křehké materiály vhodnější.

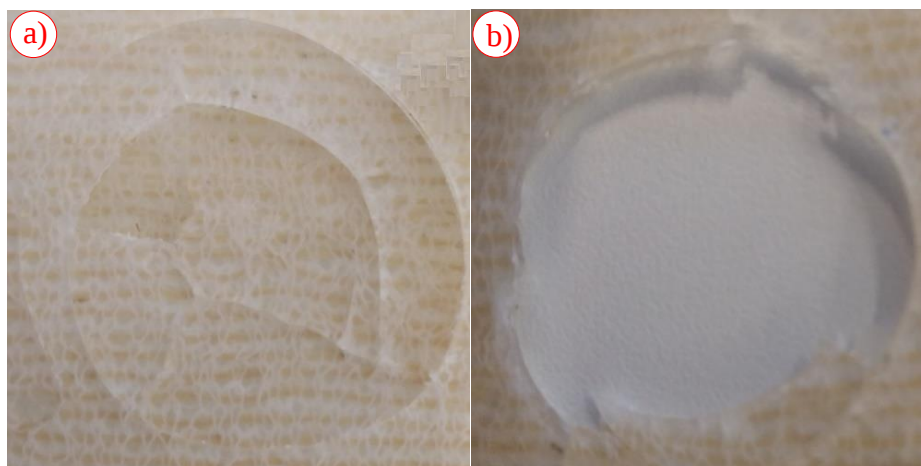
U všech kompozitních struktur PLA došlo při rychlosti rázu $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ k iniciaci trhlín, které lze podle tvaru klasifikovat jako nestabilní. Při rychlosti rázu $4,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ došlo u všech kompozitních struktur k průrazu zkušebních vzorků, u PLA/P a PLA/T k úplnému proražení a u PLA/P_{NaOH} a PLA/T_{NaOH} k částečnému proražení.

Grafické průběhy rázová síla – průhyb a typy trhlín jednotlivých zkušebních vzorků jsou uvedeny v přílohách 6 a 7.

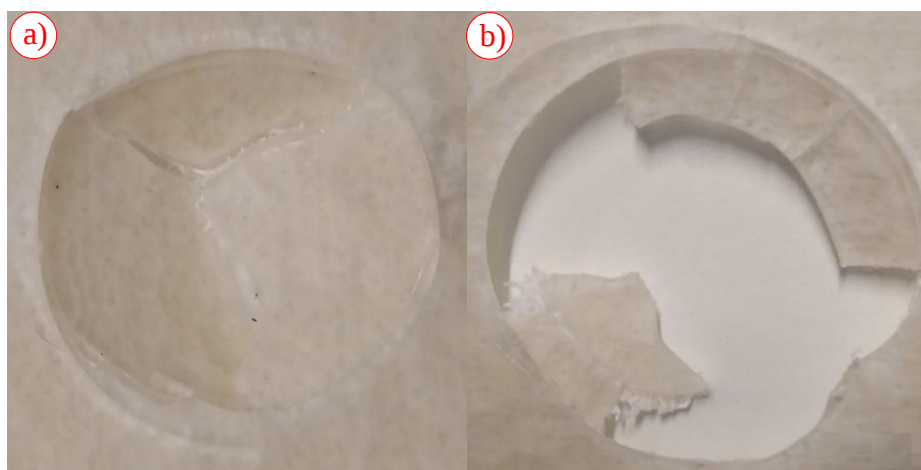


Obr. 4.8 Tvar průrazu vybraného zkušebního vzorku PLA

a) při rychlosti rázu $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, b) při rychlosti rázu $4,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



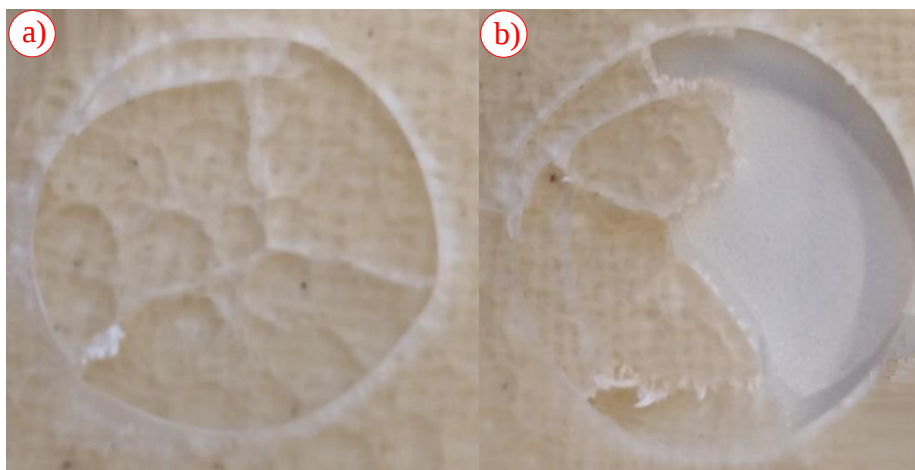
Obr. 4.9 Tvar průrazu vybraného zkušebního vzorku PLA/P
a) při rychlosti rázu $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, b) při rychlosti rázu $4,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



Obr. 4.10 Tvar průrazu vybraného zkušebního vzorku PLA/P_{NaOH}
a) při rychlosti rázu $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, b) při rychlosti rázu $4,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



Obr. 4.11 Tvar průrazu vybraného zkušebního vzorku PLA/T
a) při rychlosti rázu $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, b) při rychlosti rázu $4,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



Obr. 4.12 Tvar průrazu vybraného zkušebního vzorku PLA/T_{NaOH}
a) při rychlosti rázu $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, b) při rychlosti rázu $4,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

5 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo studium rázového namáhání jednovrstvých PLA kompozitních struktur v závislosti na typu a povrchové úpravě textilní bavlněné výztuže (pletenina, tkanina). Kompozitní struktury byly zkoušeny na jednoosý ráz metodou Charpy dle ČSN EN ISO 179-1 a na víceosý ráz dle ČSN EN ISO 6603-2.

V případě zkoumání rázové houževnatosti metodou Charpy bylo zjištěno, že nejvyšší rázovou houževnatost má samotné PLA. Z hlediska jednoosého rázového namáhání tedy nejlépe odolává matrice. Z porovnání kompozitních struktur lze konstatovat, že nejlepších rázových vlastností dosáhla PLA struktura vyztužená 3D tkaninou s plátňovou vazbou (bez ohledu na povrchovou úpravu). U této kompozitní struktury, při zkoumání rázové houževnatosti metodou Charpy, nedošlo ve většině případů k přeražení zkušebních vzorků, což znamená, že má velmi dobrou rázovou houževnatost.

U víceosého rázového namáhání měla velký vliv na výsledné grafické závislosti zvolená rychlost. V případě rázové rychlosti $4,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ byly výsledné křivky rázová síla – průhyb velmi ovlivněny šumem, vibracemi a možným odporem tlouku vůči zachyceným úlomkům ze zkušebních vzorků. Z těchto důvodů je vhodnější pro hodnocení víceosého rázového namáhání PLA kompozitních struktur volit rychlost $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, případně menší. Podle průběhu křivek rázová síla – průhyb u víceosého rázového namáhání se lze domnívat, že došlo k nejlepšímu prosycení matrice a textilní výztuže u PLA struktur vyztužených 3D tkaninou s plátňovou vazbou, které současně vykazují nejlepší rázovou odolnost při víceosém rázovém namáhání (hodnoceno při rázové rychlosti $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), obdobně jako tomu bylo u jednoosého rázu metodou Charpy. U kompozitní struktury vyztužené 3D zátažnou pleteninou nejsou výsledky rázové houževnatosti, jak pro jednoosý ráz, tak pro víceosý ráz uspokojivé a z hlediska rázového namáhání vykazují nižší odolnost než kompozitní struktury s 3D tkaninou s plátňovou vazbou. Z naměřených výsledků lze dále konstatovat, že mercerace bavlněných vláken nepřispěla k zvýšení rázové odolnosti PLA kompozitů.

Z hlediska jednoosého rázového namáhání nemají hodnocené kompozitní struktury velký význam (samotné PLA odolává jednoosému rázu nejlépe), avšak při požadavku na zvýšenou odolnost kompozitu vůči víceosému rázovému namáhání mohou struktury s 3D tkaninou nalézt snadněji praktické využití než samotný biopolymer PLA.

LITERATURA

- [1] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. *Vláknové kompozity: celostátní vysokoškolská příručka pro vysoké školy technické*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [2] DWIGHT, David W., *Comprehensive composite materials*. Amsterdam; New York: Elsevier, 2000, 231 – 261. ISBN 978-0-08-042993-9.
- [3] ČECH, Vladimír. *Řízená mezifáze v dlouhovláknových polymerních kompozitech: Vyztužené plasty*. Karlovy Vary, 1999, 98 – 105.
- [4] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [5] STEHNOVÁ, Ivana. *Vlastnosti nanokompozitu na bázi PHB a HNT*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Mgr. Radek Přikryl, Ph.D.
- [6] ČECH, Vladimír. *New progress in composite interphases: A use of plasma technologies*. University of Newcastle, 2000. ISBN 978-1-85573-550-7.
- [7] KROISOVÁ, Dora. *Biodegradovatelné polymery - úvod do problematiky*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-468-9.
- [8] STEVENS, E. S. *Green plastics: an introduction to the new science of biodegradable plastics*. Princeton: Princeton University Press, 2002. ISBN 978-0-691-04967-0.
- [9] *Škrobová zrna lilku bramboru (Solanum tuberosum)* [online]. Masarykova univerzita, 2019 [cit. 2019-10-10].
Dostupné z: https://www.sci.muni.cz/~anatomy/cytology/html/solanum_1.htm
- [10] *Škrobová zrna (jednoduchá) z endospermu obilky kukuřice* [online]. Masarykova Univerzita, 2009 [cit. 2019-10-31]. Dostupné z: https://www.sci.muni.cz/biol/Uloha_03/Zea/slides/zea%20skrob%2040x.jpg

-
- [11] Škrobová zrna (jednoduchá) z endospermu obilky pšenice [online]. Masarykova Univerzita, 2009 [cit. 2019-10-31]. Dostupné z: [https://www.sci.muni.cz/biol/Uloha_03/Triticum/slides/1\)%20Triticum%20aestivum.jpg](https://www.sci.muni.cz/biol/Uloha_03/Triticum/slides/1)%20Triticum%20aestivum.jpg)
- [12] DAVÍDEK, Jiří, Gustav JANÍČEK a Jan POKORNÝ. *Chemie potravin*. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1983. ISBN 04-815-83.
- [13] SCOTT, Gerald, *Degradable polymers: principles and applications*. 2nd ed. Dordrecht ; Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002. ISBN 978-1-4020-0790-3.
- [14] Škrob [online]. Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze, 2013 [cit. 2019-10-25]. Dostupné z: <http://www.studiumbiochemie.cz/struktury/skrob.jpg>
- [15] Škrob [online]. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, 2016 [cit. 2019-10-30]. Dostupné z: <http://www2.zf.jcu.cz/~moudry/databaze/Skrob.htm>
- [16] *Lignocellulosic biomass: a sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers* [online]. London, 2015 [cit. 2019-10-25]. Dostupné z: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2015/py/c5py00263j>
- [17] PALKOVSKÝ, Radim. *Zpracovatelská stabilita polyhydroxybutyrátu (PHB)*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. RNDr. Jiří Tocháček, CSc.
- [18] *Poly(3-Hydroxybutyrate-co-3-Hydroxyvalerate): Enhancement Strategies for Advanced Applications* [online]. Catholic University of Valencia, 2018 [cit. 2019-10-31]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/326162856_Poly3Hydroxybutyrate-co-3-Hydroxyvalerate_Enhancement_Strategies_for_Advanced_Applications
- [19] RYAN, V. *POLYLACTIDE - LIFE CYCLE* [online]. World Association of Technology teachers, 2011 [cit. 2020-02-07]. Dostupné z: <http://www.technologystudent.com/joints/poly2.html>
- [20] *Informace o bioplastu PLA* [online]. Praha, 2018 [cit. 2019-11-06]. Dostupné z: <https://www.eko-plasty.cz/bioplasty-pla/>

-
- [21] FAŠIANOK, Jiří. *Biologicky odbouratelné polymerní materiály*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010. Bakalářské práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.
- [22] SVOBODA, Jiří. *Organická chemie I*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 978-80-7080-561-9.
- [23] JANKŮ, Petr. *Studium krystalizace PLA kompozitů s přírodními vlákny metodou DSC*. Liberec, 2015. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.
- [24] *Structure of poly(lactic acid) isomers (L-PLA, D-PLA, D,L-PLA)* [online]. University of California, 2018 [cit. 2019-11-01]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/327842845/figure/fig5/AS:674375233703938@1537794993182/Structure-of-poly\(lactic-acid\)-isomers-L-PLA-D-PLA-D-L-PLA.png](https://www.researchgate.net/publication/327842845/figure/fig5/AS:674375233703938@1537794993182/Structure-of-poly(lactic-acid)-isomers-L-PLA-D-PLA-D-L-PLA.png)
- [25] HNÁTKOVÁ, Eva. *Využití biologicky rozložitelných polymerů pro konstrukční prvky v oblasti medicíny*. Zlín, 2010. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce prof. Ing. Vladimír Sedlařík, Ph.D.
- [26] BEDNÁŘOVÁ, Marcela. *Analýza struktury a hodnocení zralosti bavlněných vláken s využitím obrazové analýzy*. Liberec, 1995. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Jindra Porkertová
- [27] CAMPBELL, F. C. *Structural composite materials*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2010. ISBN 978-1-61503-037-8.
- [28] KOVÁŘOVÁ, Aneta. *Struktury osnovní pleteniny*. Liberec, 2016. Bakalářské práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Renata Štorová, CSc.
- [29] *Technické textilie* [online]. VEBA, 2017 [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <http://www.veba.cz/cs/technicky-textil>
- [30] *Geometric form of a 3-layer spacer fabric with different layer thickness and pole yarn density* [online]. Messe Frankfurt Exhibition, 2017 [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://www.texprocess-blog.com/3dtex/>
-

-
- [31] *Pleteniny* [online]. Brno: Nábytkářský informační server, 2013 [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <http://www.n-i-s.cz/cz/pleteniny/page/456/>
- [32] *3D textilie* [online]. Tylex Letovice, 2020 [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://www.tylex.cz/3d-textilie>
- [33] THOMAS, Sabu, Kuruvilla JOSEPH, S. K. MALHOTRA, Koichi GODA a M. S. SREEKALA, *Polymer composites*. First edition. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012. ISBN 978-3-527-32985-4.
- [34] MILITKÝ, Jiří. *Textilní vlákna: klasická a speciální*. V Liberci: Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-7372-844-1.
- [35] ZEMAN, Lubomír. *Konstrukční kompozity na bázi polypropylenu (část 2.)* [online]. 2014 [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/cs/konstrukcni-kompozity-na-bazi-polypropylenu-cast-2/c/2045/>
- [36] ČSN EN ISO 179. *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010
- [37] ČSN EN ISO 180. *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Izod*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001
- [38] ČSN EN ISO 179-1. *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy – Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010
- [39] ČSN EN ISO 179-2. *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy – Část 2: Instrumentovaná rázová zkouška*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2000
- [40] ČSN EN ISO 6603. *Plasty – Stanovení chování tuhých plastů při víceosém rázovém namáhání*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2000
- [41] ČSN EN ISO 6603-1. *Plasty – Stanovení chování tuhých plastů při víceosém rázovém namáhání – Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2000
-

- [42] ČSN EN ISO 6603-2. *Plasty – Stanovení chování tuhých plastů při víceosém rázovém namáhání – Část 2: Instrumentovaná rázová zkouška*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001
- [43] *Materiálový list PLA Ingeo™ Biopolymer 3001D* [online]. USA: NatureWorks LLC, 2020 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: https://www.natureworksllc.com/~media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet_3001D_injection-molding_pdf.pdf
- [44] LIZUNDIA E., VILAS J. L., LEÓN L. M. *Crystallization, structural relaxation and thermal degradation in Poly(L-lactide)/cellulose nanocrystal renewable nanocomposites* [online]. La Universidad del País Vasco, Spain, 2015 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/272192524_Crystallization_structural_relaxation_and_thermal_degradation_in_PolyL-lactidecellulose_nanocrystal_renewable_nanocomposites
- [45] *Q150R Plus - Rotary Pumped Coater* [online]. United Kingdom: Quorum Technologies, 2020 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: https://www.quorumtech.com/_assets_/Products/00356/Q150RESplus_front.png.img?w=250
- [46] *Ultra plus* [online]. Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2009 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://analyticalscience.wiley.com/do/10.1002/imaging.323/full/i89f6e6f648a33fdb48b0680beb740447.jpg>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Materiálový list PLA Ingeo 3001D

Příloha 2: DSC křivka PLA 3001D: fáze ohřevu

Příloha 3: DSC křivka PLA 3001D: fáze chlazení

Příloha 4: Výsledky rázové houževnatosti Charpy kompozitních struktur

Příloha 5: Výsledky víceosého rázového namáhání kompozitních struktur

Příloha 6: Grafické závislosti rázová síla – průhyb a typy trhlin pro rychlost rázu $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Příloha 7: Grafické závislosti rázová síla – průhyb a typy trhlin pro rychlost rázu $4,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Příloha 1: Materiálový list PLA Ingeo 3001D



Ingeo™ Biopolymer 3001D Technical Data Sheet

Injection Molding Process Guide

Ingeo 3001D is a product from NatureWorks LLC. The biopolymer, is designed for injection molding applications. It is designed for clear applications with heat deflection temperatures lower than 120°F (49°C). See Table 1 for properties.

Applications

The variety of products made with 3001D is growing every day. Applications include cutlery, cups, plates, cosmetics, and outdoor novelties.

Processing Information

3001D biopolymer injection molding applications can be processed on conventional injection molding equipment. The material is stable in the molten state, provided that the drying procedures are followed. Mold flow is highly dependent on melt temperature. It is recommended to balance screw speed, back pressure, and process temperature to control melt temperature. Injection speed should be medium to fast.

Machine Configuration

Ingeo biopolymer 3001D will process on conventional injection molding machinery. A general purpose screw designed to minimize residence time and shear works well. One should size the machine for minimum residence time in the barrel. Please refer to the Ingeo Injection Molding Guide for more information.

Process Details

Startup and Shutdown

1. 3001D is not compatible with a wide variety of resins and special purging sequences should be followed:
2. Clean extruder and bring temperatures to steady state with low-viscosity, general-purpose polystyrene or polypropylene.
3. Vacuum out hopper system to avoid contamination.
4. Introduce Ingeo polymer into the extruder at the operating conditions used in Step 1.
5. Once Ingeo polymer has purged, reduce barrel temperatures to desired set points.
6. At shutdown, purge machine with high-viscosity polystyrene or polypropylene.

Table 1 - Typical Material & Application Properties ⁽¹⁾

Physical Properties	Ingeo Resin	ASTM Method
Specific Gravity	1.24	D792
MFR, g/10 min (210°C, 2.16kg)	22	D1238
Clarity	Transparent	
Mechanical Properties		
Tensile Yield Strength, psi (MPa)	9,000 (62)	D638
Tensile Elongation, %	3.5	D638
Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m)	0.3 (16)	D256
Flexural Strength (MPa)	15,700 (108)	D790
Flexural Modulus (MPa)	515,000 (3600)	D790
Heat Distortion Temperature (°C)	55	E2092

(1) Typical properties; not to be construed as specifications.

Processing Temperature Profile

Melt Temperature	390°F	200°C
Feed Throat	70°F	20°C
Feed Temperature (crystalline pellets)	330°F	165°C
Feed Temperature (amorphous pellets)	300°F	150°C
Compression Section	380°F	195°C
Metering Section	400°F	205°C
Nozzle	400°F	205°C
Mold	75°F	25°C
Screw Speed	100-175 rpm	
Back Pressure	50-100 psi	
Mold Shrinkage	.004 in/in. +/- .001	

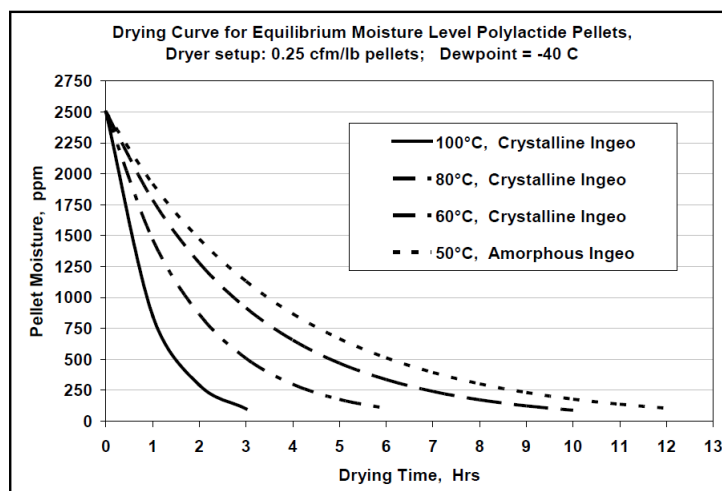
Note: These are starting points and may need to be optimized. For thin walled parts temperatures up to 450F may be needed.

Ingeo Biopolymer 3001D Technical Data Sheet

Drying

In-line drying is recommended for Ingeo resins. A moisture content of less than 0.025% (250 ppm) is recommended to prevent viscosity degradation. Polymer is supplied in foil-lined boxes or bags dried to <400 ppm. The resin should not be exposed to atmospheric conditions after drying. Keep the package sealed until ready to use and promptly dry and reseal any unused material. The drying curves for both amorphous and crystalline resins are shown to the right.

Note: Amorphous polymer must be dried below 120F (50C).



Food Packaging Status

U.S. Status

On January 3, 2002 FCN 000178 submitted by NatureWorks LLC to FDA became effective. This effective notification is part of list currently maintained on FDA's website at

<http://www.fda.gov/food/ingredientspackaginglabeling/packagingfcs/notifications/default.htm>

This grade of Ingeo biopolymers may therefore be used in food packaging materials and, as such, is a permitted component of such materials pursuant to section 201(s) of the Federal, Drug, and Cosmetic Act, and Parts 182, 184, and 186 of the Food Additive Regulations. All additives and adjuncts contained in the referenced Ingeo biopolymers formulation meet the applicable sections of the Federal Food, Drug, and Cosmetic Act. The finished polymer is approved for all food types and B-H use conditions. We urge all of our customers to perform GMP (Good Manufacturing Procedures) when constructing a package so that it is suitable for the end use.

European Status

This grade of Ingeo biopolymer complies with Plastics Regulation 10/2011 as amended. No SML's for the above referenced grade exist in Plastics Regulation 10/2011 as amended. NatureWorks LLC would like to draw your attention to the fact that the EU- Plastics Regulation 10/2011, which applies to all EU-Member States, includes a limit of 10 mg/dm² of the overall migration from finished plastic articles into food. In accordance with Plastics Regulation 10/2011 the migration should be measured on finished articles placed into contact with the foodstuff or appropriate food simulants for a period and at a temperature which are chosen by reference to the contact conditions in actual use, according to the rules laid down in Plastics Regulation 10/2011.

Please note that it is the responsibility of both the manufacturers of finished food contact articles as well as the industrial food packers to make sure that these articles in their actual use are in compliance with the imposed specific and overall migration requirements.

This grade as supplied meets European Parliament and Council Directive 94/62/EC of 20 December 1994 on packaging and packaging waste heavy metal content as described in Article 11.

Should you need further clarification, contact NatureWorks LLC.

Bulk Storage Recommendations

The resin silos recommended and used by NatureWorks LLC are designed to maintain dry air in the silo and to be isolated from the outside air. This design would be in contrast to an open, vented to atmosphere system that we understand to be a typical polystyrene resin silo. Key features that are added to a typical (example: polystyrene) resin silo to achieve this objective include a cyclone and rotary valve loading system and some pressure vessel relief valves. The dry air put to the system is sized to the resin flow rate out of the silo. Not too much dry air would be needed and there may be excess instrument air (-30°F dew point) available in the plant to meet the needs for dry air. Our estimate is 10 scfm for a 20,000 lb/hr rate resin usage. Typically, resin manufacturers specify aluminum or stainless steel silos for their own use and avoid epoxy-lined steel.

Ingeo Biopolymer 3001D Technical Data Sheet**Safety and Handling Considerations**

Safety Data Sheets (SDS) for Ingeo biopolymers are available from NatureWorks. SDS's are provided to help customers satisfy their own handling, safety, and disposal needs, and those that may be required by locally applicable health and safety regulations. SDS's are updated regularly; therefore, please request and review the most current SDS's before handling or using any product.

The following comments apply only to Ingeo biopolymers; additives and processing aids used in fabrication and other materials used in finishing steps have their own safe-use profile and must be investigated separately.

Hazards and Handling Precautions

Ingeo biopolymers have a very low degree of toxicity and, under normal conditions of use, should pose no unusual problems from incidental ingestion or eye and skin contact. However, caution is advised when handling, storing, using, or disposing of these resins, and good housekeeping and controlling of dusts are necessary for safe handling of product. Pellets or beads may present a slipping hazard.

No other precautions other than clean, body-covering clothing should be needed for handling Ingeo biopolymers. Use gloves with insulation for thermal protection when exposure to the melt is localized. Workers should be protected from the possibility of contact with molten resin during fabrication.

Handling and fabrication of resins can result in the generation of vapors and dusts that may cause irritation to eyes and the upper respiratory tract. In dusty atmospheres, use an approved dust respirator.

Good general ventilation of the polymer processing area is recommended. At temperatures exceeding the polymer melt temperature (typically 175°C), polymer can release fumes, which may contain fragments of the polymer, creating a potential to irritate eyes and mucous membranes. Good general ventilation should be sufficient for most conditions. Local exhaust ventilation is recommended for melt operations. Use safety glasses (or goggles) to prevent exposure to particles, which could cause mechanical injury to the eye. If vapor exposure causes eye discomfort, improve localized fume exhausting methods or use a full-face respirator.

The primary thermal decomposition product of PLA is acetaldehyde, a material also produced during the thermal degradation of PET. Thermal decomposition products also include carbon monoxide and hexanal, all of which exist as gases at normal room conditions. These species are highly flammable, easily ignited by spark or flame, and can also

auto ignite. For polyesters such as PLA, thermal decomposition producing flammable vapors containing acetaldehyde and carbon monoxide can occur in almost any process equipment maintaining PLA at high temperature over longer residence times than typically experienced in extruders, fiber spinning lines, injection molding machines, accumulators, pipe lines and adapters. As a rough guideline based upon some practical experience, significant decomposition of PLA will occur if polymer residues are held at temperatures above the melting point for prolonged periods, e.g., in excess of 24 hours at 175°C, although this will vary significantly with temperature.

Combustibility

Ingeo biopolymers will burn. Clear to white smoke is produced when product burns. Toxic fumes are released under conditions of incomplete combustion. Do not permit dust to accumulate. Dust layers can be ignited by spontaneous combustion or other ignition sources. When suspended in air, dust can pose an explosion hazard. Firefighters should wear positive-pressure, self-contained breathing apparatuses and full protective equipment. Water or water fog is the preferred extinguishing medium. Foam, alcohol-resistant foam, carbon dioxide or dry chemicals may also be used. Soak thoroughly with water to cool and prevent re-ignition.

Disposal

DO NOT DUMP INTO ANY SEWERS, ON THE GROUND, OR INTO ANY BODY OF WATER. For unused or uncontaminated material, the preferred option is to recycle into the process otherwise, send to an incinerator or other thermal destruction device. For used or contaminated material, the disposal options remain the same, although additional evaluation is required. Disposal must be in compliance with Federal, State/Provincial, and local laws and regulations.

Environmental Concerns

Generally speaking, lost pellets, while undesirable, are benign in terms of their physical environmental impact, but if ingested by wildlife, they may mechanically cause adverse effects. Spills should be minimized, and they should be cleaned up when they happen. Plastics should not be discarded into the environment.

Product Stewardship

NatureWorks has a fundamental duty to all those that use our products, and for the environment in which we live. This duty is the basis for our Product Stewardship philosophy, by which we assess the health and environmental information on our products and their intended use, and then take

Ingeo Biopolymer 3001D Technical Data Sheet

appropriate steps to protect the environment and the health of our employees and the public.

Customer Notice

NatureWorks encourages its customers and potential users of its products to review their applications from the

standpoint of human health and environmental quality. To help ensure our products are not used in ways for which they were not intended or tested, our personnel will assist customers in dealing with ecological and product safety considerations. Your sales representative can arrange the proper contacts. NatureWorks literature should be consulted prior to the use of the company's products.

NOTICE:

No freedom from infringement of any patent owned by NatureWorks LLC or others is to be inferred. No information in this publication can be considered a suggestion to infringe patents.

The technical information, recommendations and other statements contained in this document are based upon tests or experience that NatureWorks believes are reliable, but the accuracy or completeness of such information is not guaranteed. Many factors beyond NatureWorks control can affect the use and performance of a NatureWorks product in a particular application, including the conditions under which the product is used and the time and environmental conditions in which the product is expected to perform. Since these factors are uniquely within the user's knowledge or control, it is essential that the user evaluate the NatureWorks product to determine whether it is fit for a particular purpose and suitable for the user's method of application. In addition, because use conditions are outside of NatureWorks control and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, Customer is solely responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace, use and disposal practices are in compliance with applicable laws and regulations. NatureWorks LLC assumes no obligation or liability for the information in this document.

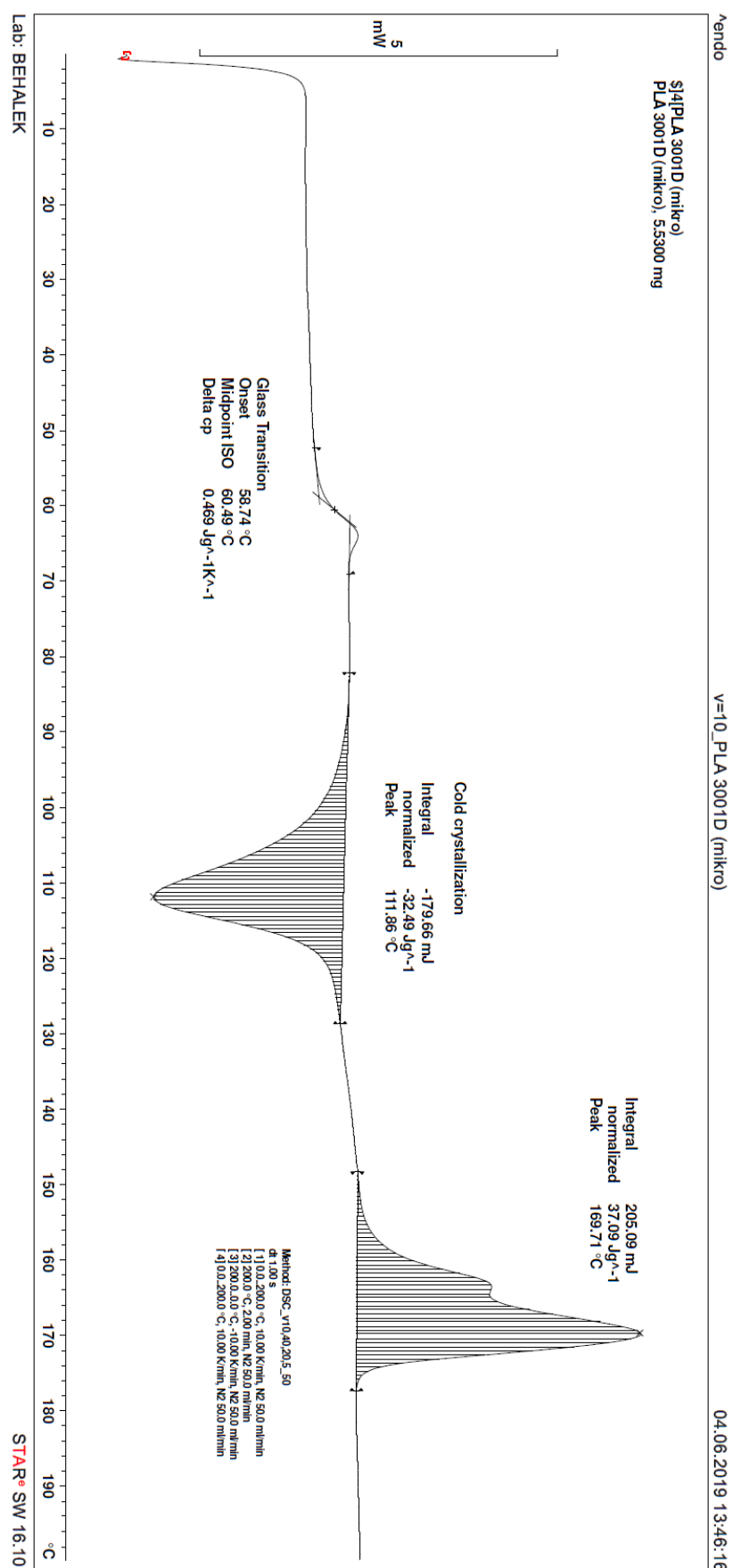
NATUREWORKS MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING THE INFORMATION CONTAINED HEREIN OR ITS PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY WARRANTY AS TO ACCURACY OR COMPLETENESS OF INFORMATION, OR ANY IMPLIED WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.

NOTICE REGARDING PROHIBITED USE RESTRICTIONS: Unless specifically agreed to in writing by NatureWorks, NatureWorks LLC will not knowingly sell or sample any product into any of the following commercial or developmental applications (i) components of or packaging for tobacco products, (ii) components of products intended for human or animal consumption, (iii) any application that is intended for any internal contact with human body fluids or body tissues, (iv) as a critical component in any medical device that supports or sustains human life, (v) in any product that is designed specifically for ingestion or internal use by pregnant women, (vi) in any application designed specifically to promote or interfere with human reproduction, (vii) in microbeads, including those used in personal care/cosmetic applications, or (viii) to manufacture bottles or bottle pre-forms in North America.

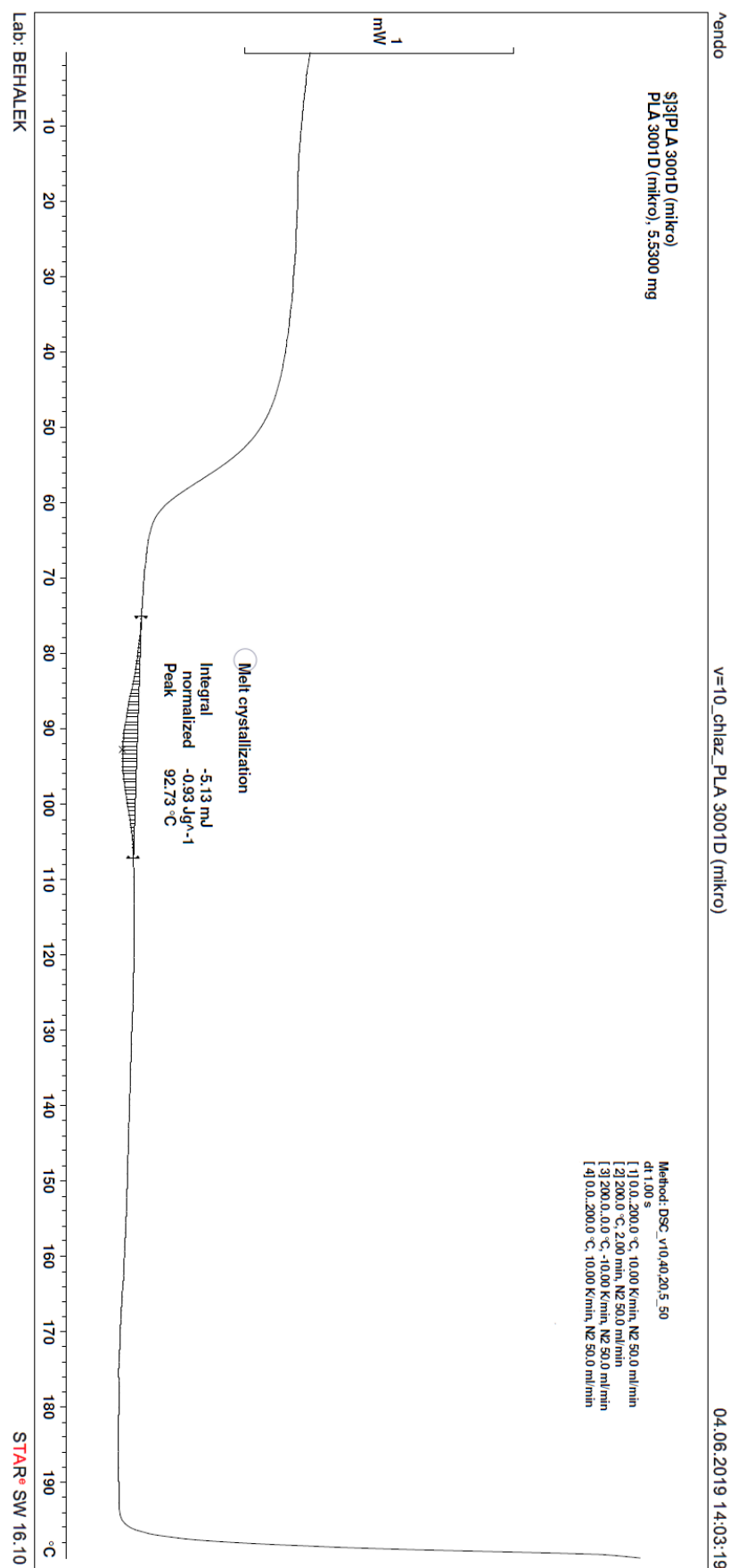
For additional information please contact NatureWorks via our [website](#) on the tab called [FAQ's](#) or by clicking [here](#).

 **NatureWorks**
15305 Minnetonka Blvd., Minnetonka, MN 55345

Příloha 2: DSC křivka PLA 3001D: fáze ohřevu



Příloha 3: DSC křivka PLA 3001D: fáze chlazení



Příloha 4: Výsledky rázové houževnatosti Charpy kompozitních struktur

PLA					
vzorek	h [mm]	b [mm]	Ec [J]	a _{CU} [kJ·m ⁻²]	Typ přeražení
1	1,88	10,09	N	N	N
2	1,96	10,14	N	N	N
3	1,91	10,14	N	N	N
4	1,91	10,16	N	N	N
5	1,93	10,18	N	N	N
6	1,98	10,15	N	N	N
7	1,93	10,11	N	N	N
8	1,90	10,08	N	N	N
9	1,99	10,17	N	N	N
10	1,93	10,09	N	N	N
x =				N	N

PLA / P / 0°					
vzorek	h [mm]	b [mm]	Ec [J]	a _{CU} [kJ·m ⁻²]	Typ přeražení
1	1,89	10,10	0,365	19,1	C
2	1,94	10,12	0,582	29,6	C
3	1,91	10,13	0,544	28,1	C
4	1,99	10,80	0,482	22,4	C
5	2,02	10,34	0,587	28,1	C
6	1,94	10,21	0,558	28,2	C
7	2,01	10,15	0,685	33,6	C
8	1,97	10,15	0,595	29,8	C
9	1,95	10,15	0,653	33,0	C
10	2,04	10,51	0,653	30,5	C
x =				28,2	C
s =				4,4	

PLA / P / 45°					
vzorek	h [mm]	b [mm]	Ec [J]	a _{CU} [kJ·m ⁻²]	Typ přeražení
1	1,96	10,10	0,614	31,0	C
2	1,97	10,17	0,663	33,1	C
3	2,00	10,09	0,630	31,2	C
4	1,99	10,11	0,587	29,2	C
5	1,95	10,16	0,474	23,9	C
6	1,99	10,05	0,474	23,7	C
7	1,99	10,13	0,552	27,4	C
8	2,01	10,13	0,803	39,4	C
9	1,96	10,06	N	N	C
10	1,97	10,16	N	N	C
x =				29,9	C
s =				5,1	

PLA / P / 90°					
vzorek	h [mm]	b [mm]	Ec [J]	a _{cU} [kJ·m ⁻²]	Typ přeražení
1	2,01	10,25	0,526	25,5	C
2	2,04	10,25	0,432	20,7	C
3	1,93	10,20	0,508	25,8	C
4	1,99	10,27	0,403	19,7	C
5	1,99	10,91	0,667	30,7	C
6	2,07	10,22	0,663	31,3	C
7	1,99	10,30	0,538	26,2	C
8	1,99	10,20	0,441	21,7	C
9	1,96	10,23	0,562	28,0	C
10	1,96	10,33	0,683	33,7	C
x =				26,4	C
s =				4,7	

PLA / P _{NaOH} / 0°					
vzorek	h [mm]	b [mm]	Ec [J]	a _{cU} [kJ·m ⁻²]	Typ přeražení
1	1,95	10,24	0,823	41,2	C
2	2,03	10,19	0,926	44,8	C
3	2,05	10,18	0,597	28,6	C
4	1,96	10,22	0,593	29,6	C
5	1,99	10,29	0,806	39,4	C
6	1,95	10,20	0,546	27,5	C
7	2,00	10,29	0,405	19,7	C
8	1,96	10,23	0,494	24,6	C
9	2,01	10,24	0,443	21,5	C
10	1,98	10,24	0,724	35,7	C
x =				31,3	C
s =				8,6	

PLA / P _{NaOH} / 45°					
vzorek	h [mm]	b [mm]	Ec [J]	a _{cU} [kJ·m ⁻²]	Typ přeražení
1	2,04	10,15	0,713	34,4	C
2	2,06	10,63	0,781	35,7	C
3	2,07	10,32	0,843	39,5	C
4	2,06	10,20	0,530	25,2	C
5	2,01	10,20	0,690	33,7	C
6	2,07	10,16	0,454	21,6	C
7	2,03	10,23	0,401	19,3	C
8	2,01	10,76	0,801	37,0	C
9	2,05	10,60	0,972	44,7	C
10	1,96	10,26	0,611	30,4	C
x =				32,1	C
s =				8,0	

PLA / P _{NaOH} / 90°					
vzorek	h [mm]	b [mm]	Ec [J]	a _{cu} [kJ·m ⁻²]	Typ přeražení
1	2,00	10,17	0,605	29,7	C
2	1,98	10,23	0,580	28,6	C
3	1,97	10,21	0,570	28,3	C
4	2,04	10,34	0,548	26,0	C
5	1,98	10,41	0,393	19,1	C
6	2,04	10,28	0,520	24,8	C
7	1,97	10,19	0,488	24,3	C
8	1,98	10,32	0,382	18,7	C
9	1,95	10,21	0,313	15,7	C
10	1,97	10,21	0,542	26,9	C
x =				24,2	C
s =				4,8	

PLA / T / 0°					
vzorek	h [mm]	b [mm]	Ec [J]	a _{cu} [kJ·m ⁻²]	Typ přeražení
1	1,93	10,15	0,662	33,8	C
2	1,97	10,07	0,868	43,8	C
3	1,98	10,22	0,895	44,2	C
4	1,92	10,17	N	N	N
5	1,96	10,24	0,845	42,1	C
6	1,97	10,18	1,009	50,3	C
7	1,95	10,34	N	N	N
8	1,97	10,28	0,937	46,3	C
9	1,94	10,16	0,711	36,1	C
10	1,93	10,25	0,763	38,6	C
11	1,91	10,46	N	N	N
12	1,99	10,00	N	N	N
13	1,96	10,53	N	N	N
14	1,98	10,22	0,785	38,8	C
x =				41,5	C
s =				5,2	

PLA / T / 45°					
vzorek	h [mm]	b [mm]	Ec [J]	a _{cU} [kJ·m ⁻²]	Typ přeražení
1	1,93	10,13	N	N	N
2	1,97	10,49	N	N	N
3	1,95	10,29	N	N	N
4	1,93	10,09	N	N	N
5	1,94	10,13	N	N	N
6	1,96	10,18	N	N	N
7	1,96	10,35	N	N	N
8	1,94	10,06	N	N	N
9	1,97	10,22	N	N	N
10	1,96	10,34	N	N	N
11	1,98	9,98	N	N	N
12	1,94	10,46	N	N	N
13	1,97	10,02	N	N	N
14	1,93	10,82	N	N	N
x =				N	N

PLA / T / 90°					
vzorek	h [mm]	b [mm]	Ec [J]	a _{cU} [kJ·m ⁻²]	Typ přeražení
1	1,91	10,25	N	N	N
2	1,93	10,14	N	N	N
3	1,96	10,12	N	N	N
4	1,97	10,17	N	N	N
5	2,01	9,98	N	N	N
6	1,99	10,46	N	N	N
7	1,91	10,10	0,774	40,1	C
8	1,94	10,28	N	N	N
9	1,98	10,19	N	N	N
10	1,92	10,23	0,595	30,3	C
11	1,96	10,17	N	N	N
12	1,93	10,81	N	N	N
13	1,99	10,78	1,054	49,1	C
14	1,94	10,30	N	N	N
x =				N	N

PLA / T _{NaOH} / 0°					
vzorek	h [mm]	b [mm]	Ec [J]	a _{cu} [kJ·m ⁻²]	Typ přeražení
1	1,96	10,18	0,502	25,2	C
2	1,94	10,26	0,471	23,7	C
3	1,99	10,32	N	N	N
4	1,95	10,29	N	N	N
5	2,02	10,17	N	N	N
6	1,95	10,70	0,799	38,3	C
7	1,97	10,56	N	N	N
8	1,96	10,73	0,489	23,3	C
9	1,98	10,34	N	N	N
10	1,94	10,71	0,449	21,6	C
11	1,96	10,58	N	N	N
12	1,97	10,34	N	N	N
13	2,03	10,15	N	N	N
14	1,97	10,33	N	N	N
x =				N	N

PLA / T _{NaOH} / 45°					
vzorek	h [mm]	b [mm]	Ec [J]	a _{cu} [kJ·m ⁻²]	Typ přeražení
1	1,96	10,51	N	N	N
2	1,98	10,11	N	N	N
3	1,98	10,12	0,779	38,9	C
4	1,94	10,16	N	N	N
5	1,95	10,39	N	N	N
6	1,94	10,15	N	N	N
7	1,96	10,32	0,814	40,2	C
8	1,97	10,10	N	N	N
9	1,98	10,21	N	N	N
10	1,97	10,09	0,593	29,8	C
11	1,99	9,96	0,69	34,9	C
12	1,98	10,04	N	N	N
13	1,98	10,87	N	N	N
14	1,97	10,07	N	N	N
x =				N	N

PLA / T_{NaOH} / 90°					
vzorek	h [mm]	b [mm]	Ec [J]	a _{cu} [kJ/m ²]	Typ přeražení
1	2,00	10,46	0,852	40,7	C
2	1,99	10,22	N	N	N
3	1,97	10,04	N	N	N
4	2,03	10,83	N	N	N
5	2,02	10,02	N	N	N
6	1,95	10,05	N	N	N
7	1,97	10,76	0,728	34,3	C
8	2,01	10,71	N	N	N
9	1,95	10,14	N	N	N
10	1,97	10,11	0,510	25,6	C
11	1,99	10,83	N	N	N
12	2,03	9,99	N	N	N
13	1,96	10,79	0,54	25,5	C
14	2,00	10,81	0,74	34,1	C
x =				N	N

Příloha 5: Výsledky víceosého rázového namáhání kompozitních struktur

PLA	Rychlost rázu					
	1,5 m·s ⁻¹			4,4 m·s ⁻¹		
vzorek	F _M [N]	I _M [mm]	E _M [J]	F _M [N]	I _M [mm]	E _M [J]
1	809,9	2,67	0,9	586,3	2,53	0,6
2	1037,1	3,11	1,3	643,9	2,58	0,7
3	1098,4	3,35	1,6	591,0	2,20	0,6
4	961,8	3,03	1,2	668,7	2,32	0,5
5	1074,8	3,21	1,4	588,2	2,25	0,5
x =	996,4	3,07	1,3	615,6	2,38	0,6
s =	116,4	0,26	0,3	38,2	0,17	0,1
v =	0,1	0,08	0,2	0,1	0,07	0,1

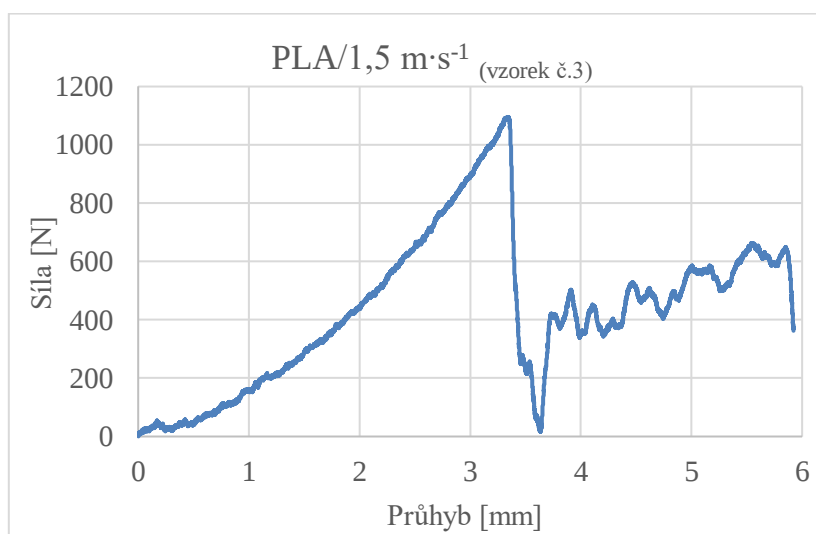
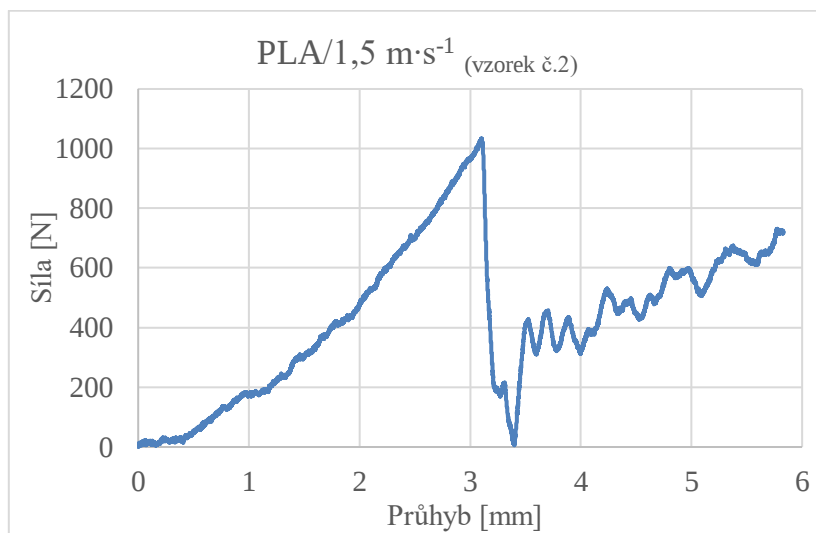
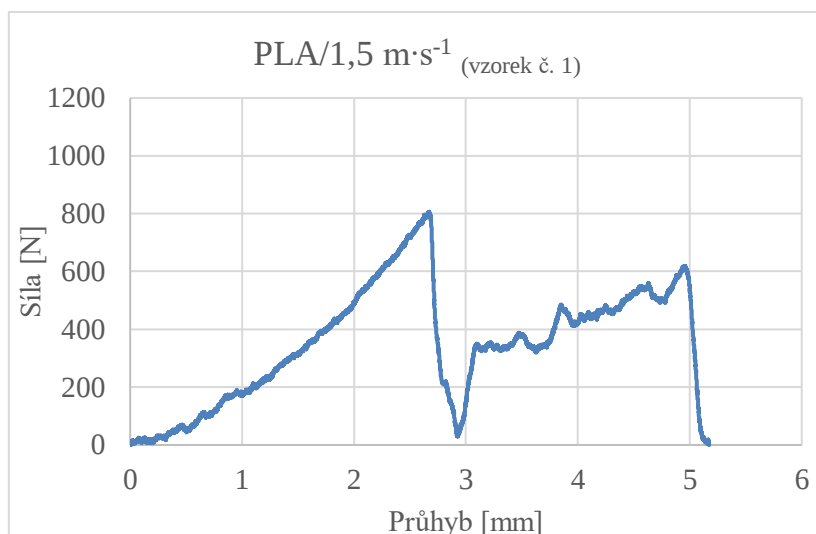
PLA / P	Rychlost rázu					
	1,5 m·s ⁻¹			4,4 m·s ⁻¹		
vzorek	F _M [N]	I _M [mm]	E _M [J]	F _M [N]	I _M [mm]	E _M [J]
1	1111,3	3,56	1,9	797,0	5,21	2,6
2	920,6	2,79	1,1	1330,3	6,23	3,5
3	1199,6	3,25	1,7	1039,5	6,72	3,1
4	991,2	3,11	1,4	865,3	2,11	0,7
5	920,59	2,56	1,149	1098,4	6,22	3,4
x =	1055,7	3,18	1,5	1026,1	5,30	2,7
s =	124,1	0,32	0,4	209,9	1,86	1,1
v =	0,1	0,10	0,2	0,2	0,35	0,4

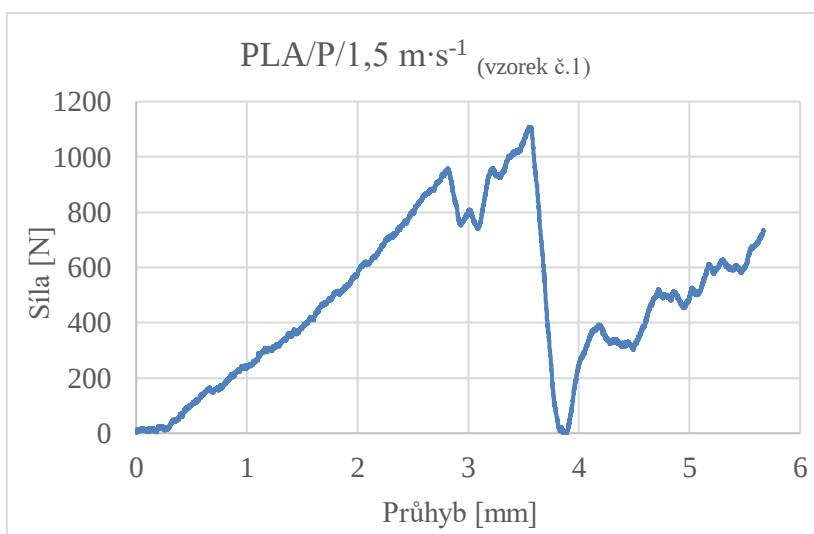
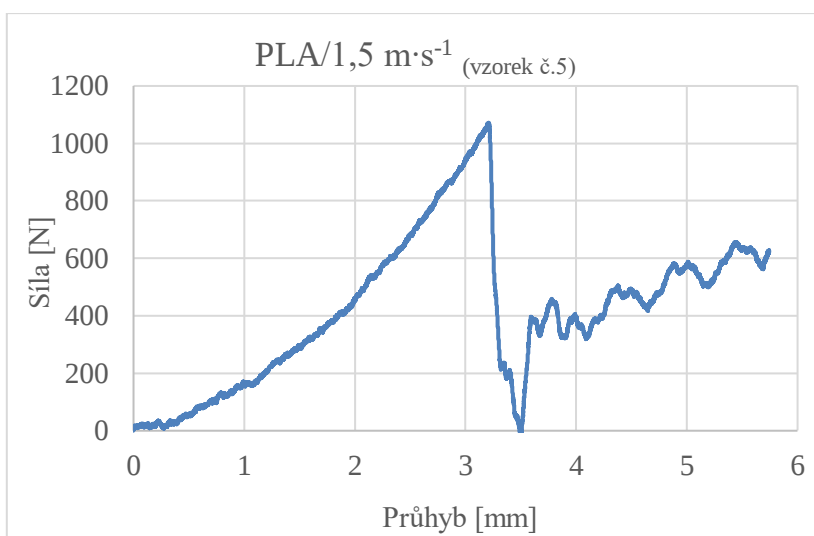
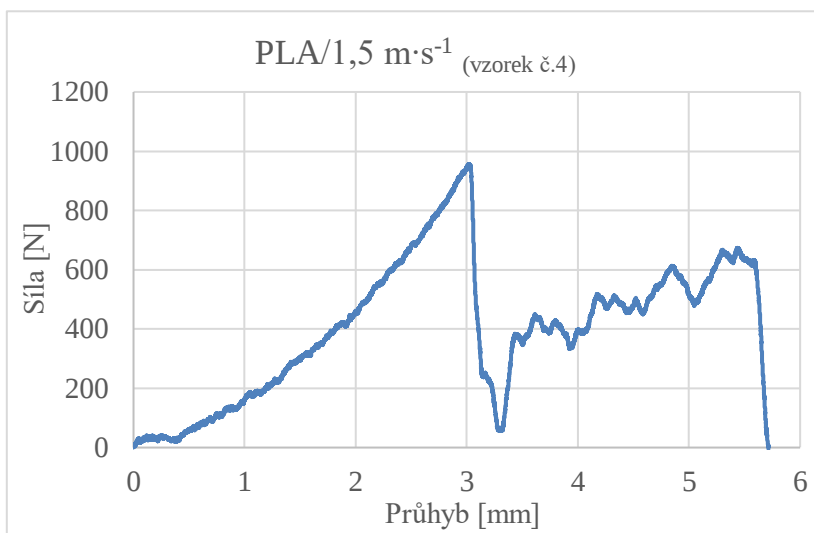
PLA / P _{NaOH}	Rychlost rázu					
	1,5 m·s ⁻¹			4,4 m·s ⁻¹		
vzorek	F _M [N]	I _M [mm]	E _M [J]	F _M [N]	I _M [mm]	E _M [J]
1	1039,0	3,23	2,3	1364,4	5,22	3,6
2	1244,3	2,43	1,7	1236,1	4,91	3,5
3	1011,2	2,21	1,3	1071,3	1,83	1,0
4	1123,1	3,42	2,5	1519,8	4,96	3,7
5	1032,4	2,76	1,8	1080,7	1,98	0,9
x =	1090,0	2,81	1,9	1254,5	3,78	2,5
s =	96,2	0,51	0,5	191,4	1,72	1,5
v =	0,1	0,18	0,3	0,2	0,45	0,6

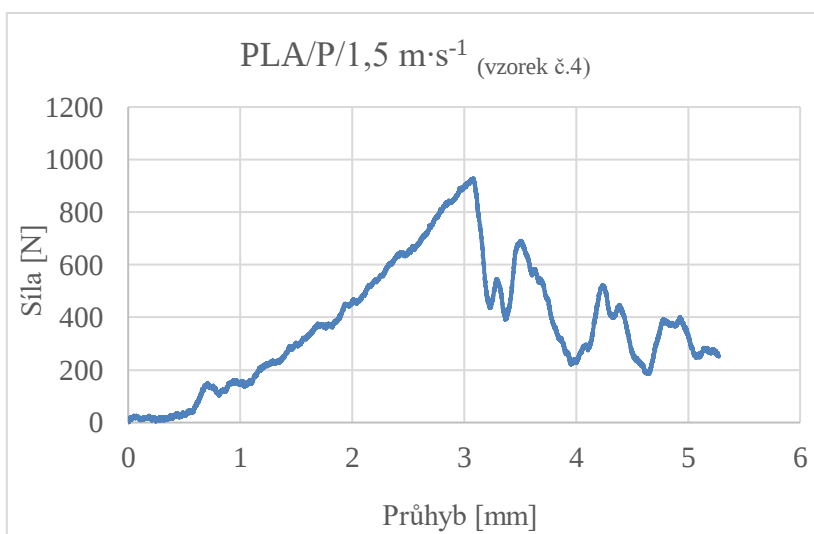
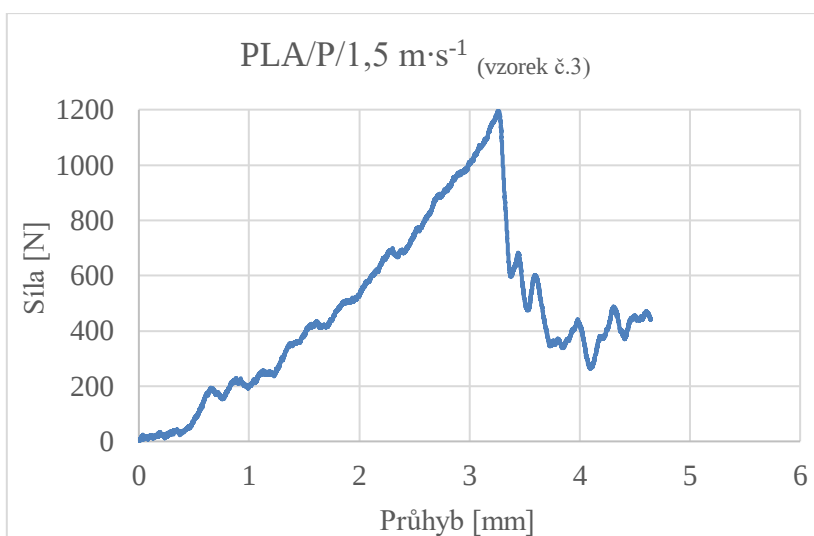
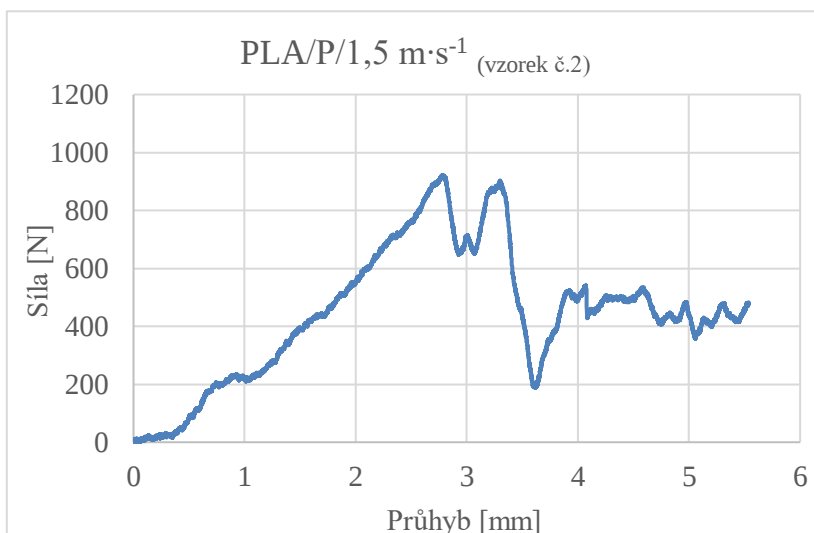
PLA / T	Rychlost rázu					
	1,5 m·s ⁻¹			4,4 m·s ⁻¹		
vzorek	F _M [N]	I _M [mm]	E _M [J]	F _M [N]	I _M [mm]	E _M [J]
1	1372,6	3,35	2,0	1191,4	3,05	1,5
2	1603,4	3,63	2,5	1274,9	3,23	1,8
3	1366,8	3,40	1,9	1167,8	3,05	1,5
4	1413,2	3,48	2,2	1196,1	3,01	1,5
5	1410,3	3,78	2,3	1184,3	3,20	1,5
x =	1433,3	3,53	2,2	1202,9	3,11	1,5
s =	97,4	0,18	0,3	41,7	0,10	0,1
v =	0,1	0,05	0,1	0,0	0,03	0,1

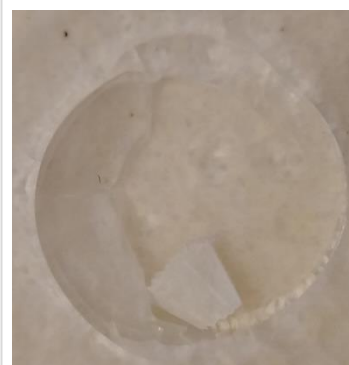
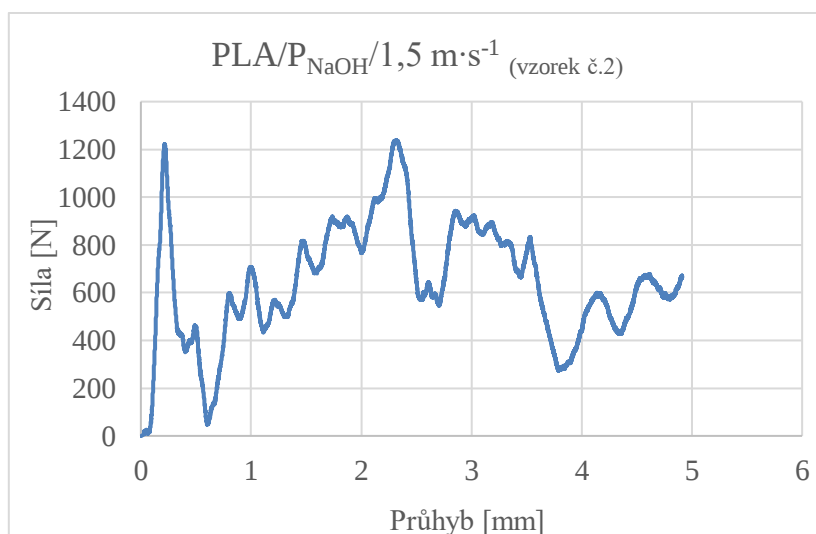
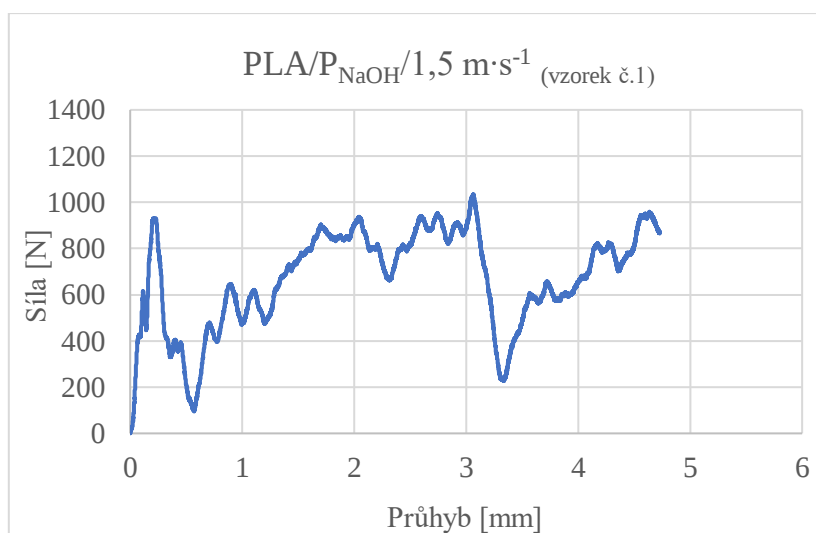
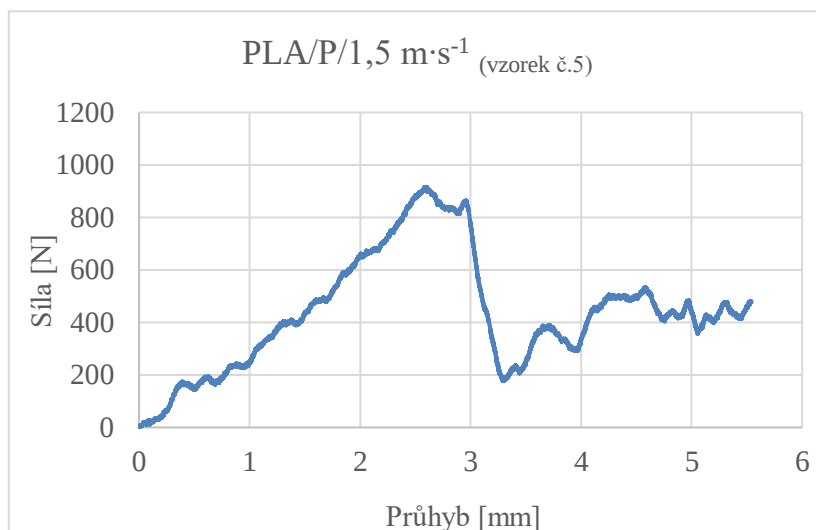
PLA / T _{NaOH}	Rychlost rázu					
	1,5 m·s ⁻¹			4,4 m·s ⁻¹		
vzorek	F _M [N]	I _M [mm]	E _M [J]	F _M [N]	I _M [mm]	E _M [J]
1	1306,7	3,21	1,9	1059,5	2,98	1,4
2	1360,9	3,64	2,3	1117,2	3,91	2,4
3	1165,5	3,63	2,1	1159,6	3,57	2,2
4	1206,7	3,89	1,8	1098,4	3,54	1,9
5	1253,7	3,43	1,8	1139,6	3,13	1,5
x =	1258,7	3,56	2,0	1114,8	3,43	1,9
s =	77,7	0,25	0,2	38,6	0,37	0,4
v =	0,1	0,07	0,1	0,0	0,11	0,2

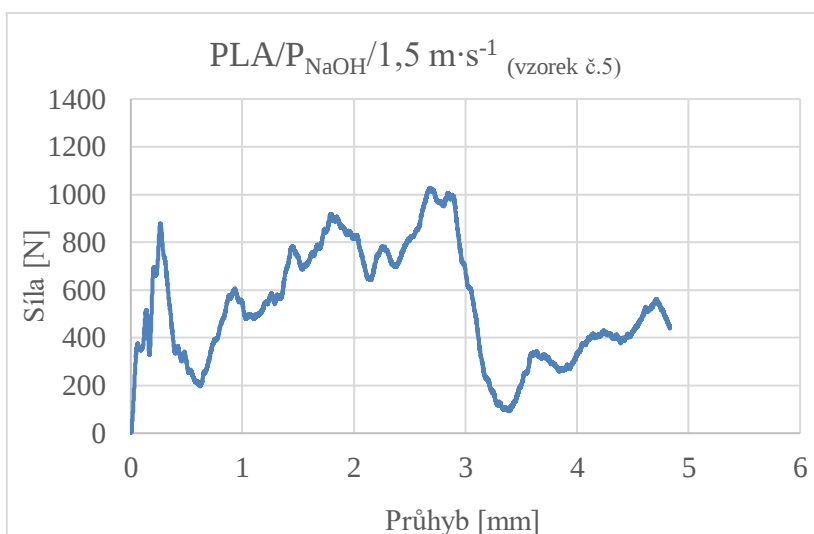
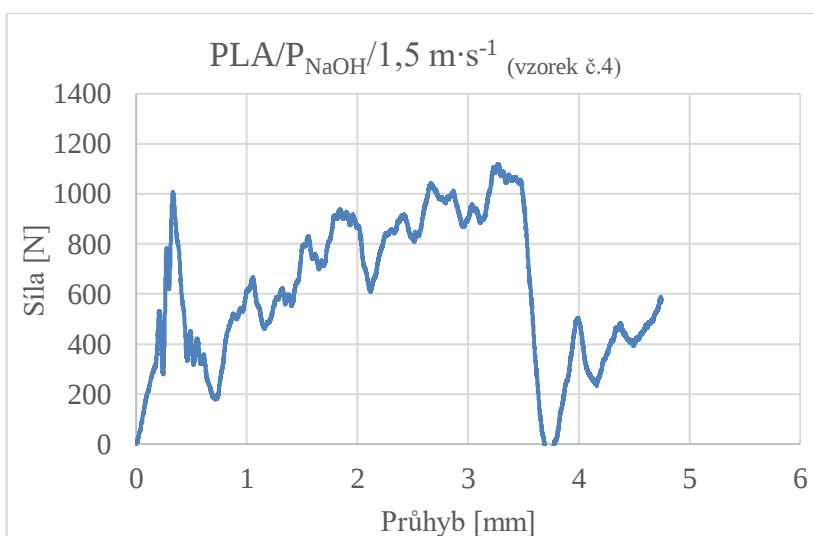
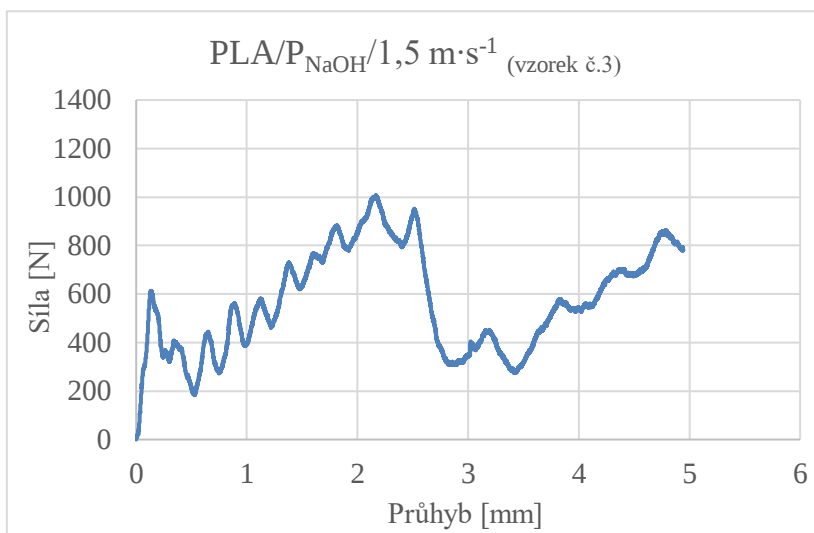
Příloha 6: Grafické závislosti rázová síla – průhyb a typy trhlin pro rychlost rázu $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

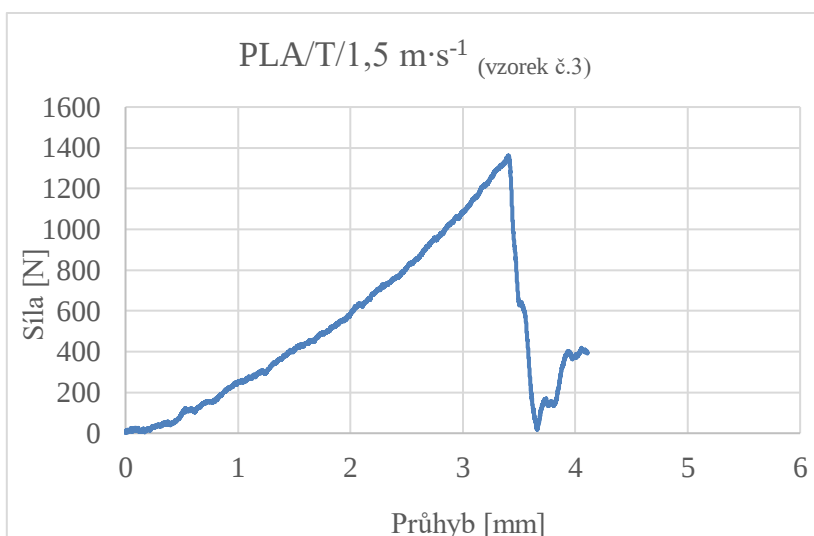
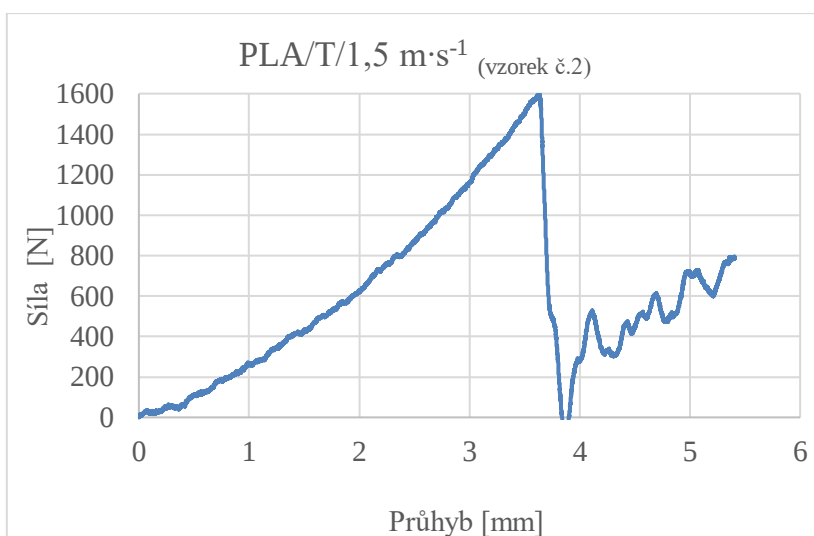
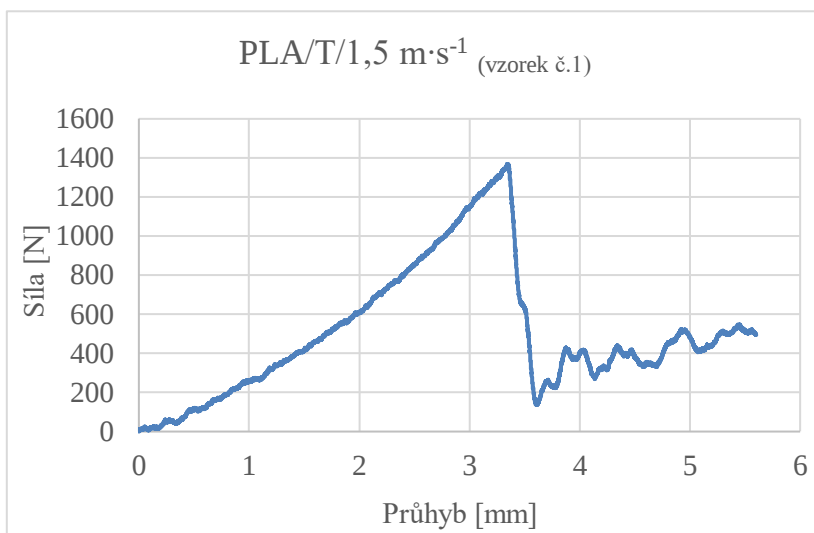


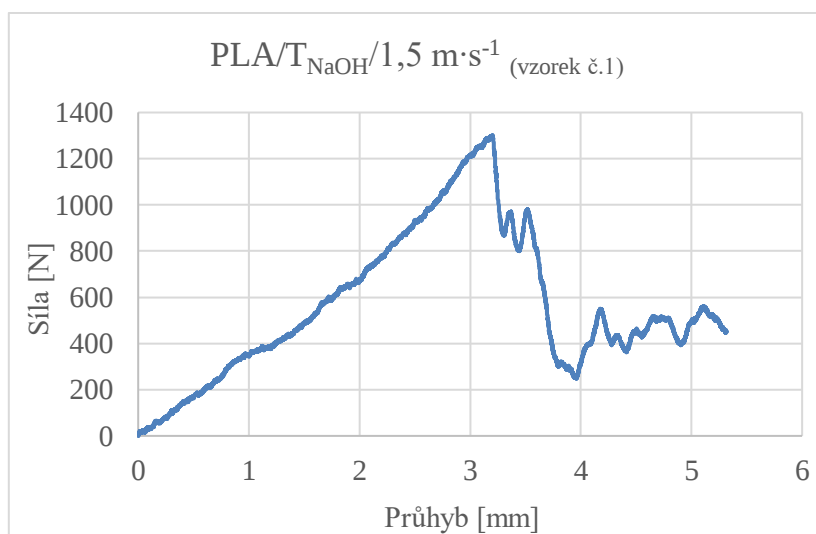
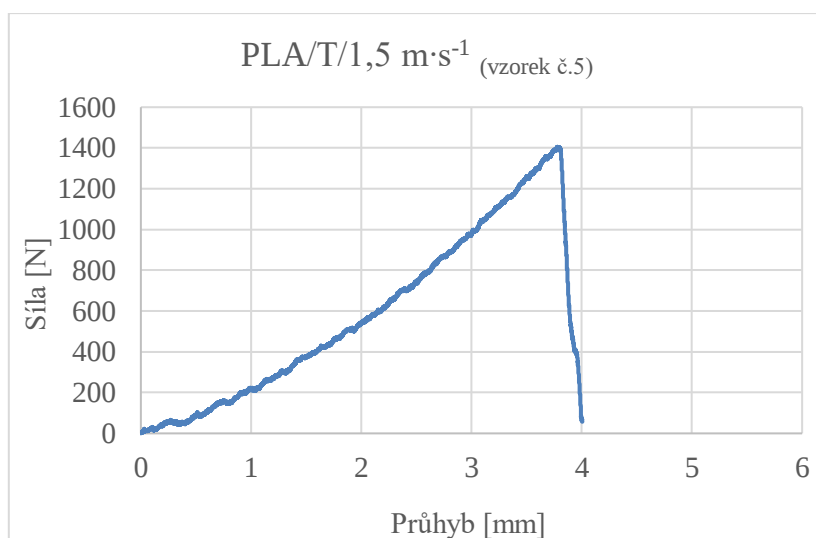
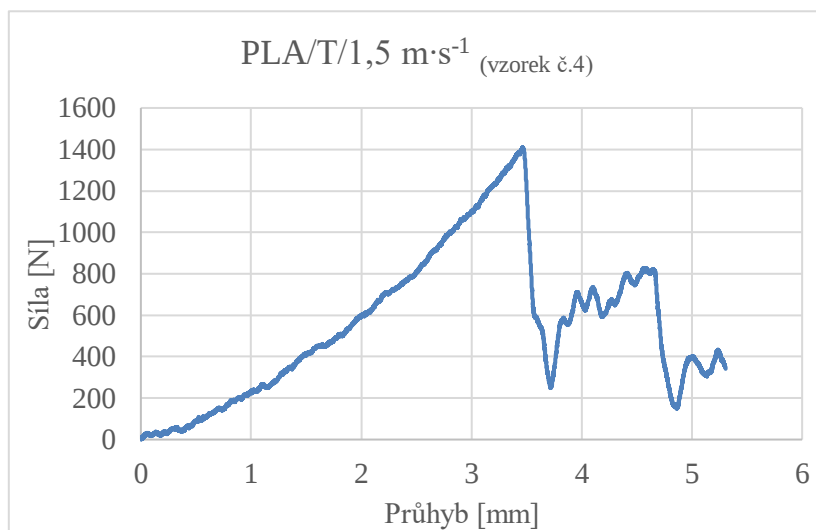


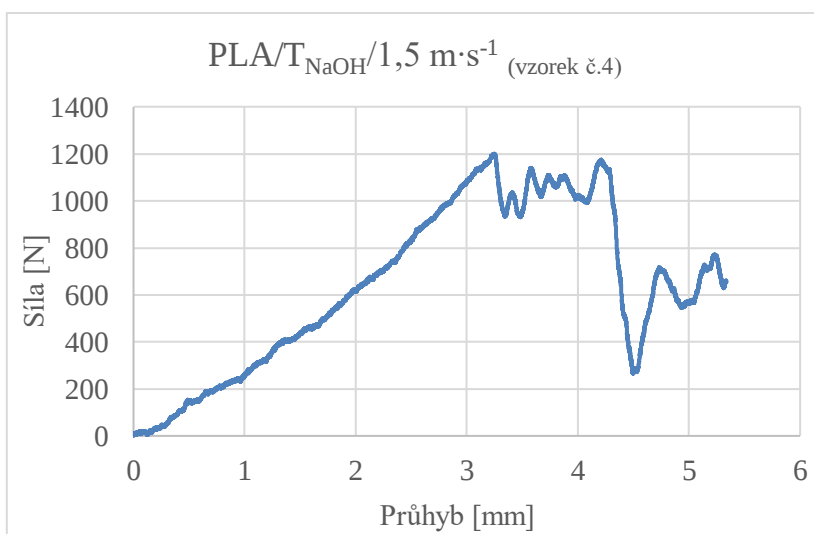
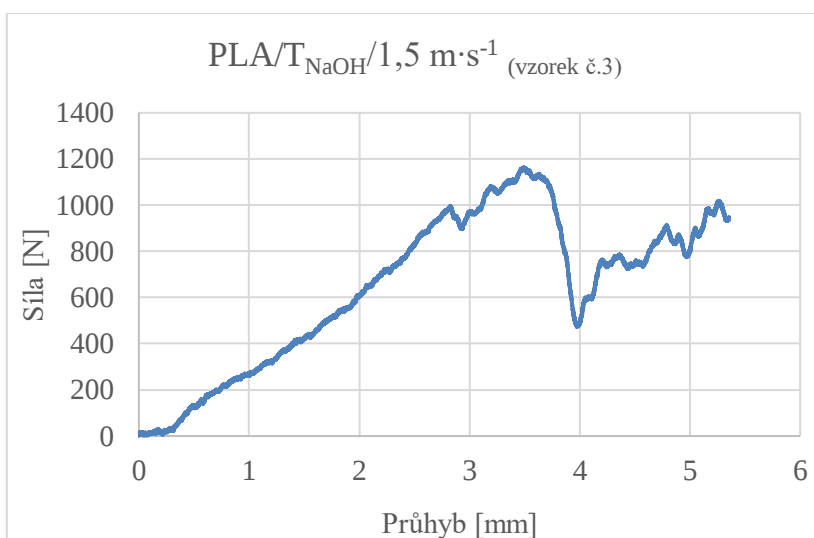
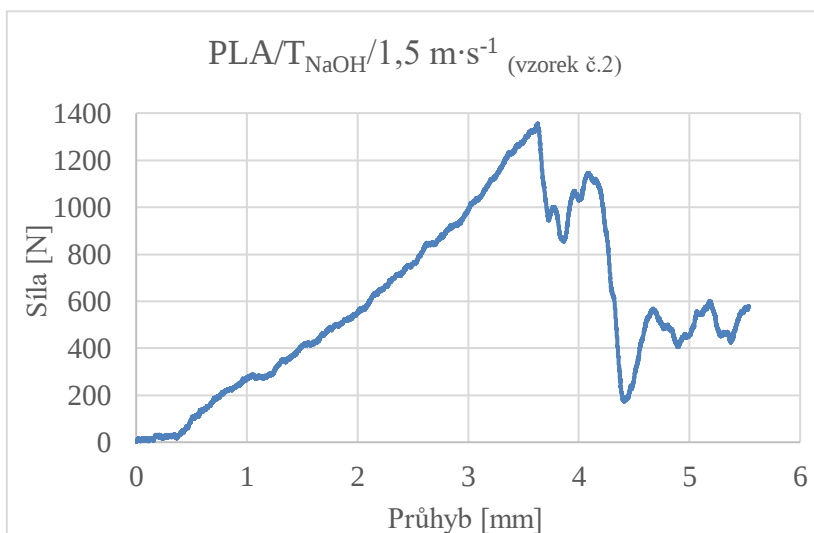


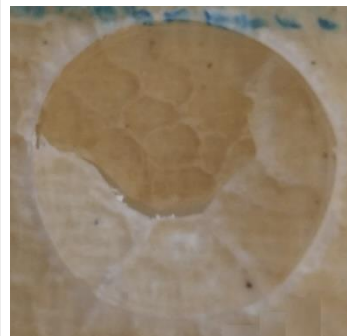
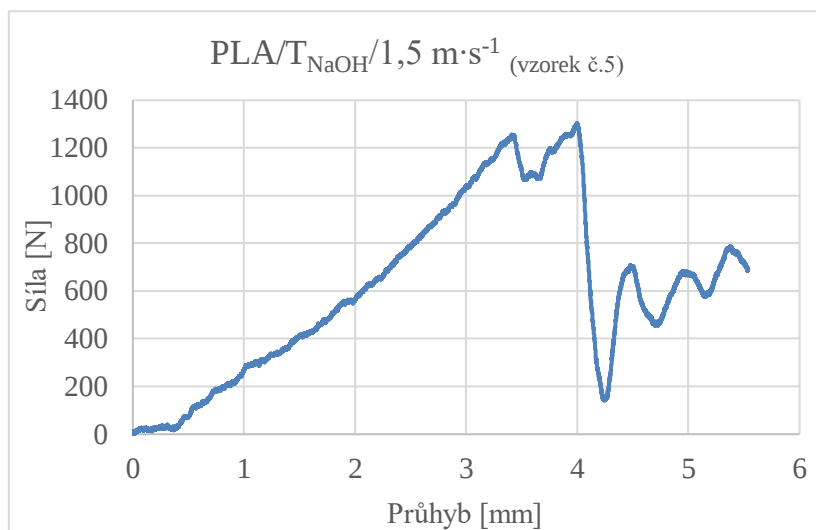












Příloha 7: Grafické závislosti rázová síla – průhyb a typy trhlin pro rychlost rázu $4,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

