



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV VLHKOSTI MATERIÁLU NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI FDM TIŠTĚNÉHO DÍLU

EFFECT OF MATERIAL MOISTURE ON MECHANICAL PROPERTIES OF A FDM PRINTED PART

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Matějka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Tomáš Matějka
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vliv vlhkosti materiálu na mechanické vlastnosti FDM tištěného dílu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na experimentální metody. Autor se zaměří na materiály používané při FDM tisku. Hlavním zkoumaným faktorem bude vliv absorbované vlhkosti v tištěném materiálu. Předpokládá volbu testovaných materiálů pro výrobu vzorků pro mechanické testy a následné měření a vyhodnocení experimentu. Výsledkem by měla být závislost zvolených mechanických vlastností na množství vody v materiálu filamentu, případně závislost množství absorbované vlhkosti v materiálu na čase ve vlhkém prostředí.

Cíle diplomové práce:

- rešerše zvolené problematiky
- volba testovaných materiálů
- návrh experimentu
- provedení a vyhodnocení experimentu
- technicko–ekonomické vyhodnocení a doporučení autora

Seznam doporučené literatury:

BILÍK, Oldřich a Martin VRABEC. Vrabec Martin Technologie obrábění s využitím CAD/CAM systémů. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univ., 2002, 128 s. ISBN 80-248-0034-9.

FÖRT, Petr a Jaroslav KLETEČKA. Autodesk Inventor. Brno: Computer Press, 2007, 296 s. ISBN 978-80-251-1773-6.

CHANG, Tien-Chien, Richard WYSK a Hsu-Pin WANG. Computer-Aided Manufacturing. 3. vyd. New Jersey: Prentice Hall, 2005, 684 s. ISBN 0-13-142919-1.

CHUA, Chee Kai, Kah Fai LEONG a Chu-Sing LIM. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010, 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.

PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, 2009, 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce pojednává o vlivu vlhkosti na mechanické vlastnosti 3D FDM tištěných dílů. Stanoveným cílem práce bylo experimentálně určit míru vlivu vlhkosti na mechanické vlastnosti, dle vybraných zkoušek, pro 3D tištěné díly metodou FDM. Dále byl sledován průběh pohlcení vzdušné vlhkosti v čase. Práce obsahuje popis používaných zařízení a materiálů. Dále je zde popsán způsob, jakým materiály pohlcují vlhkost. Na základě rešeršní části práce byly vybrány konkrétní sledované materiály, PLA, ABS, PETG, ASA a Nylon PA12. Výroba vzorků proběhla na 3D tiskárně typu delta s označením Kossel Linear Plus od společnosti Anycubic. V prvním experimentu byla vyhodnocena závislost úbytku hmotnosti vlivem sušení a závislost změny hmotnosti pohlcením vzdušné vlhkosti v čase. Následovalo experimentální vyhodnocení změn tahových vlastností připravených vzorků. V další části práce byla vyhodnocena změna vrubové houževnatosti jednotlivých materiálů. Pro obě zkoušky byla vyhotovena analýza makrostruktury lomů. Dále proběhlo měření tvrdosti a vyhotovení její změny v závislosti na přítomnosti vlhkosti v původních vzorcích. Zde byl vyhotoven mikrotomový řez pro účely analýzy výsledků. Poslední částí práce bylo ekonomické zhodnocení sušících procesů, ze kterých vzešla konkrétní doporučení skladování tiskových strun.

Klíčová slova

3D tisk, FDM, vlhkost, mechanické vlastnosti, vzájemná závislost

ABSTRACT

This thesis deals with the effect of humidity to the mechanical properties of 3D FDM printed parts. The aim of the thesis was to experimentally determine the rate of influence of humidity to the mechanical properties, according to selected tests, for 3D printed parts by FDM method. Furthermore the course of air moisture absorption over time was monitored. The thesis contains description of the machines and material used. The way in which materials absorb moisture is also described here. Based on the research were selected specific materials, PLA, ABS, PETG, ASA and Nylon PA12. Tested samples were produced on a Kossel Linear Plus 3D printer from Anycubic. First experiment dealt with weight loss due to drying and the weight change due to air moisture absorption over time. This was followed by experimental evaluation of changes in tensile properties of the samples. In the next part of the thesis the change in toughness of materials was evaluated. There were made analysis of the macrostructure of the quarries for both tests. Furthermore the hardness change was measured depending on the presence of moisture in the original samples. A microtome cut was made to analyze the results. The last part of the work was the economic evaluation of drying processes, which resulted in specific recommendations for the storage of printing materials.

Key words

3D printing, FDM, moisture, mechanical properties, interdependence

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MATĚJKA, Tomáš. *Vliv vlhkosti materiálu na mechanické vlastnosti FDM tištěného dílu* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137089>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Oskar Zemčík.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Vliv vlhkosti materiálu na mechanické vlastnosti FDM tištěného dílu* vypracoval(a) samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

místo, datum

Bc. Tomáš Matějka

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Oskarovi Zemčíkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Petrovi Kružíkovi za pomoc při měření v laboratořích. V neposlední řadě děkuji celé své rodině za úžasnou podporu během vypracování této práce.

OBSAH

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
1.1 Analýza problému	10
1.2 Cíle práce.....	11
2 REŠERŠE	12
2.1 Technologie a konstrukce FDM 3D tiskáren	12
2.1.1 Kartézská	13
2.1.2 Delta.....	14
2.1.3 Polar.....	15
2.1.4 Scara	16
2.2 Tiskové struny pro metodu FDM	16
2.2.1 PLA.....	18
2.2.2 ABS	18
2.2.3 PET/PETG	19
2.2.4 ASA	19
2.2.5 Nylon	20
2.2.6 TPU/TPE	21
2.3 Vlhkost a její dopad na 3D tisk dílů	21
2.3.1 Rozpoznání navlhnutého filamentu	23
2.3.2 Způsoby odvlhčování filamentů	25
3 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ	27
3.1 Stanovení hygroskopičnosti filamentů	27
3.1.1 Podmínky vlhčení	28
3.1.2 Podmínky sušení	29
3.1.3 Podmínky měření hmotnosti.....	31
3.2 Volba optimálních parametrů tisku	32
3.2.1 Kalibrace 3D tiskárny	32
3.2.2 Určení optimální teploty tisku	33
3.2.3 Stanovení retrakcí	33
3.2.4 Komplexní test.....	34
3.3 Zkoušky mechanických vlastností materiálů	34
3.3.1 Tahová zkouška ČSN EN ISO 527-1	34
3.3.2 Zkouška rázové a vrubové houževnatosti Charpy ČSN EN ISO 179-1	37
3.3.3 Zkouška tvrdosti polymerů Brinell ČSN EN ISO 2039-1	40
4 Vyhodnocení dosažených výsledků.....	42
4.1 Proces sušení	42
4.2 Proces vlhčení.....	43
4.3 Výsledky tisknutelnosti	45
4.3.1 PLA.....	46
4.3.2 ABS, ASA	46
4.3.3 PETG	48
4.3.4 NYLON	48

4.4 Tahová zkouška.....	49
4.5 Rázová zkouška.....	56
4.6 Zkouška tvrdosti	61
5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	64
ZÁVĚR.....	65
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	66
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	70
SEZNAM PŘÍLOH.....	71

ÚVOD

Fenoménem posledních let, který byl mezi širokou veřejností hojně rozšířen během pandemie koronaviru SARS-CoV-2, díky silné medializaci výroby lékařských ochranných pomůcek, a jenž je čím dál tím více využíván na poli aditivních technologií, je metoda výroby zvaná 3D tisk. To je proces, kdy je díl zhotoven postupným nanášením jednotlivých vrstev materiálu na sebe, až do jeho finální podoby. Kloubní náhrady, alternativní výstavba domů a uměleckých děl, možná samotná výroba mechanických dílců ve vesmírné stanici a následně i na jiných planetách, tisk potravin či dortů a cukrovinek. To je pouhá ukázka toho, co vše je dnes tímto způsobem možné vyrobit, nebo čeho bude snaha dosáhnout v následujících letech. Existuje tak široká paleta možností využití a jednotlivých technologií 3D tisku, se kterými tak bude nutno v budoucnu počítat a je proto vhodné tomuto tématu věnovat pozornost.

Nejvíce rozšířená je pak technologie *Fused Deposition Modeling* (FDM) využívající dnes již nejen plastových strun. Vlivem klesajících pořizovacích nákladů je stále dostupnější široké veřejnosti. Tím roste i nabídka výrobců stolních 3D tiskáren, doplňujících zařízení, a také materiálů, kteří se tak předhánějí v inovacích a nových možnostech, jenž dávají prostor k masivnímu rozšíření nejen samotné výroby, ale také tomu, co vše je touto metodou možné zhotovit.

Již dávno tak neplatí rozšířený mýtus, že FDM 3D tisk je vhodný leda tak na hraní a ozdobu. Díky dostupnosti technologie samozřejmě může převládat dojem hobby využití v podobě lapačů prachu na policičkách a nepoužitelných produktech. Podíváme-li se však do hloubky, nalezneme úžasné využití 3D tisku, například ve slévárenském odvětví, ve formě vytavitelných modelů, či automobilovém průmyslu ve zefektivnění vývoje nových dílců a rapidnímu snížení nákladů na tuto činnost. Samotný 3D tisk je tak v dnešní době velmi využívanou technologií v obrovské škále odvětví. Například pro zdravotní vozík jako je na obr. 1.



Obr. 1 Využití 3D tisku při výrobě vozíku pro hendikepované psy [1].

1 ROZBOR ZADÁNÍ

V dnešní době je možné pozorovat snahu výrobců 3D tiskáren a tiskových strun o co největší zjednodušení tisku pro koncové uživatele. K prodávaným zařízením jsou tak dodávány také tiskové profily odladěné na míru dané konstrukci tiskárny, použitému materiálu a v ideálním případě, také jednotlivým výrobcům těchto materiálů. Bohužel i přes tato všemožná opatření dochází ke vzniku tiskových vad způsobených nejrozličnějšími činiteli. Zejména pak v případě FDM. U výtisků pomocí této metody dochází vlivem nanášení vláken jednotlivých vrstev k nehomogenní makrostruktuře. Takový stav posléze způsobuje, že vyrobené díly se při zatížení chovají specifickým způsobem. Mechanické vlastnosti 3D tištěných dílů metodou FDM jsou tak velmi závislé na všech parametrech výrobního procesu, které je ovlivňují. [2]

Tloušťka vrstvy, rychlost tisku, nastavené teploty či orientace dílu v prostoru. To je pouze malý výčet parametrů a modifikací, jenž je možné během připravování procesu 3D tisku nastavit. Jsou zde však další vlivy, které nemusí být na první pohled patrné, avšak zásadním způsobem ovlivňují celkový výsledek 3D tištěného modelu. Jedním z těchto vlivů je vzdušná vlhkost a její dopad na mechanické vlastnosti těchto dílů. [2] [3]

1.1 Analýza problému

Vzdušná vlhkost je množství vodní páry ve vzduchu, je všude kolem nás. Množství vzdušné vlhkosti závisí na několika faktorech, jako je teplota vzduchu a množství páry v něm obsaženém. S rostoucí teplotou se zvyšuje také množství páry, které je schopen vzduch pojmout a naopak. Standardní míra relativní vlhkosti v domě bývá kolem 50 %. V závislosti na tom, kde a jakým způsobem skladujeme naše tiskové struny pak při zvyšující se vlhkosti úměrně tomu roste také množství vody, které tak mohou tyto struny absorbovat. [4]

V závislosti na hygroskopičnosti materiálu neboli schopnosti pohlcovat a udržovat vzdušnou vlhkost, pak dochází k negativním vlivům na proces 3D tisku. Po průchodu tiskové struny zahřátou tryskou dojde k expanzi molekul vody, což má za následek nekonzistentní vytlačování materiálu. Vlhkost proniká vláknem, způsobuje jeho bobtnání a skokovou změnu teploty skelného přechodu. Vlastnosti polymerů se mění, nabývají kaučukovitou pružností a tím klesá např. modul pružnosti. Tento jev se následně na modelu projevuje zhoršením kontaktní pevnosti vrstev, zvýšením celé nehomogenity tisku a tím zhoršením celkových mechanických vlastností. Proto je při skladování a používání tiskových strun potřeba s tímto na první pohled těžko předvídatelným jevem počítat a snažit se ho eliminovat. Příklad rozdílné kvality tisku vlivem vlhkosti je znázorněn na obr. 2. [2] [5]



Obr. 2 Porovnání dílců vyrobených ze suchého filamentu (vlevo) a vlhkého (vpravo) [6].

1.2 Cíle práce

Primárním cílem této práce je získat konkrétní data vlivu vlhkosti materiálu na mechanické vlastnosti 3D FDM tištěného dílu z vybraných materiálů a jejich vzájemnou závislost. Mechanické vlastnosti budou zjištěny pomocí experimentálních metod uskutečněných dle norem vybraných zkoušek. Experiment zvlhčování materiálu bude proveden podle jasně definovaného a strukturovaného postupu zkoumání a vyhodnocování v domácích podmínkách. Technicko-ekonomické zhodnocení a doporučení autora posléze přinesou detailnější představu o důležitosti prevence vhodného skladování tiskových strun. Tyto závislosti a ekonomické vyhodnocení experimentu tak mohou být velice nápomocným ukazatelem při návrhu specifických technických řešení.

2 REŠERŠE

Pro úspěšné splnění požadovaných cílů je nejprve zapotřebí pochopit samotnou podstatu jednotlivých úseků. Použitá technologie, stroje a nástroje, materiály náchylné k vlhnutí a jejich degradace, ale také proces samotného vlhnutí a rozpoznání vlivu na 3D tištěný díl. To vše jsou teoretické úseky, které je zapotřebí pochopit pro úspěšné dosažení požadovaných cílů.

Variací 3D tisku existuje mnoho. Od těch, které využívají práškový materiál zapékány pomocí laserového paprsku, jako je například *Selective Laser Sintering* (SLS), přes Stereolitografii (SLA), která naopak využívá vytvrzování tekutého fotopolymery pomocí UV záření. Pro tuto práci je však stěžejní pochopit principy metody *Fused Deposition Modeling* (FDM), se kterou je zde přímo pracováno a vyžadováno dosažení zadaných cílů. Z tohoto důvodu je zde tato technologie detailně popsána. [7]

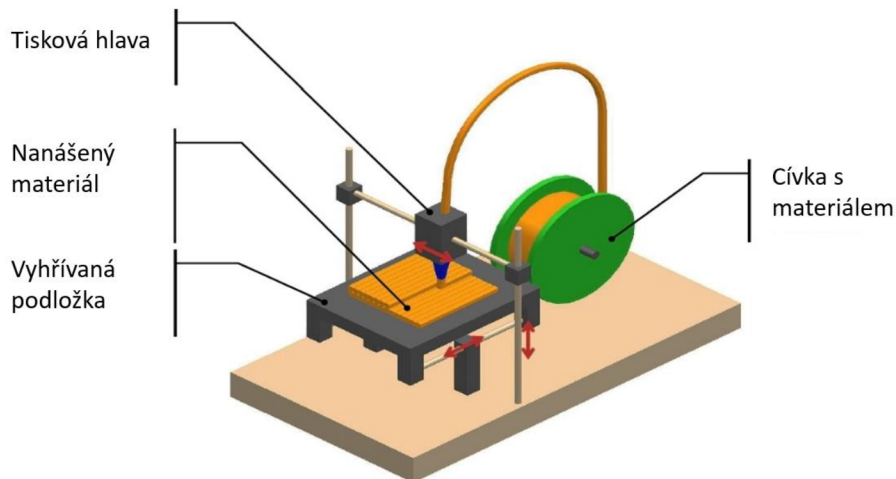
Také jednotlivé stroje se liší svou konstrukcí a tím i vlastnostmi, na základě, kterých je možno vybrat nejvhodnější variantu tisku k dosažení požadovaných cílů. Některé 3D tiskárny nedisponují vyhřívanou tiskovou podložkou, nejsou tak vhodné k použití pro materiály se špatnou adhezí a zvýšenou náchylností k tepelné roztažnosti. Další zařízení naopak nedisponují přímým podavačem materiálu, to může mít za následek složitější tisk flexibilních materiálů. Je tak zapotřebí zvážit vhodnou variantu stroje potřebnou k úspěšné realizaci požadovaných cílů. [7]

Rozdílné vlastnosti materiálů a jejich hygroskopičnost jsou dalšími předpoklady, které je nutné znát. Doba potřebná pro dosažení určitého stupně hygroskopičnosti se na základě materiálů značně liší. Znat proces vlhnutí a rozpoznat jeho přítomnost během tisku je teorie nutná k možné optimalizaci procesu stanovení vlhkosti ve filamentu a eliminaci jeho vlivu na mechanické vlastnosti. Z níže popsaných teoretických odvětví je následně v praktické části této práce vybíráno konkrétní technické řešení, zařízení a materiály.

2.1 Technologie a konstrukce FDM 3D tiskáren

FDM je technologie patentována panem Scottem Crumpem, spoluzakladatelem americké firmy Stratasys, která patří mezi průkopnické společnosti v tomto odvětví, již v roce 1989. V té době se však jednalo o velice drahou záležitost. Až v roce 2005 vznikl za pomoci Dr. Adriana Bowyera na Univerzitě of Bath projekt s názvem *Replicating rapid prototype* (RepRap). Projekt založený na principu *open source*, tedy volnému šíření podkladů k výrobě vlastních 3D tiskáren. Tento projekt a fakt, že postupem vypršely zadané patenty, tak umožnili masivní rozšíření této metody do podoby, jakou známe dnes. [8] [9]

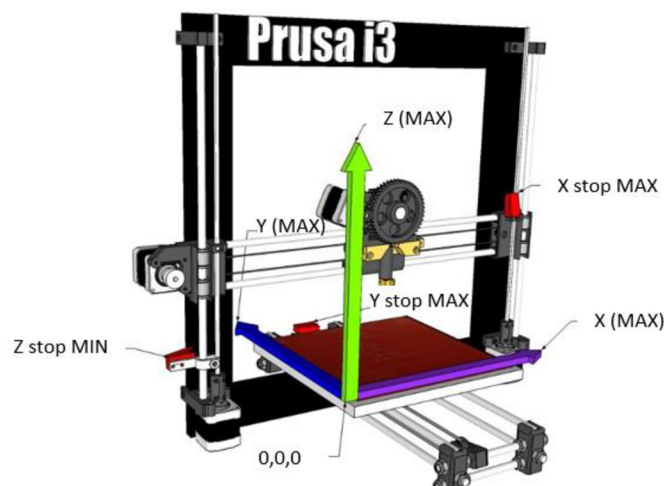
Samotný princip metody je velice jednoduchý, jak je znázorněno na obr. 3. Základní materiál ve formě tuhého vlákna (nejčastěji o průměru 1,75 mm, případně 2,85 mm u 3D tiskáren firmy Ultimaker) je pomocí extruderu protlačován skrze trysku nacházející se v tiskové hlavě. Tryska je pomocí topného tělesa nahřata na požadovanou teplotu vyšší, než je teplota tání daného materiálu. Materiál se při průchodu tryskou taví a je nanášen na pracovní podložku v jednotlivých vrstvách. Pro pohyb tiskové hlavy je nejčastěji využíváno krokových motorů s ozubenými řemeny. Přesné vedení pak zajišťují vodící tyče a ložiska. K rychlejšímu tuhnutí vytištěných vrstev napomáhá usměrněný vzduchový ventilátor. Stejně tak k zabránění šíření tepla v tiskové hlavě slouží chladič nejčastěji také se vzduchovým ventilátorem. Po dokončení jedné vrstvy je tryska oddálena od podložky o výšku nastavení jedné vrstvy. Tento proces je opakován do vytvoření celého tištěného dílu. [7]



Obr. 3 Metoda 3D tisku typu FDM [7].

2.1.1 Kartézská

Nezákladnější a také nejrozšířenější typ konstrukce 3D tiskárny známá zejména díky řešení RepRap. Princip pohybu je založen na vedení po třech lineárních osách. Kinematika pohybu jednotlivých komponent je znázorněna na přiloženém obr. 4. Tisková hlava, jenž nese také samotný extruder se pohybuje ve dvou směrech, a to v osách X a Z. Vyhřívaná podložka, zpravidla čtvercového nebo obdélníkového tvaru, pak realizuje pohyb ve směru Y. Samotné pohyby v osách X a Y jsou pak vyvozeny krokovými motory a jejich kroutícím momentem. Ten je skrze řemenice přenesen ozubenými řemeny na uchycení domečků ložisek, kde dojde ke změně na lineární pohyb. Pro každou osu je umístěn vlastní krokový motor. Dochází tak k nezávislému pohybu tiskové hlavy a podložky. V případě pohybů po ose Z je ve většině případů využito 2 krokových motorů, které jsou skrze spojky upevněny k trapézovým tyčím. Pohyb je pak realizován otáčením těchto trapézových tyčí skrze matice. Hlazené tyče slouží pro vedení přesného pohybu v daném směru. [3] [10] [11]



Obr. 4 Popis pohybu kartézské 3D tiskárny Prusa I3 [12].

Nejčastěji je využíváno hlazených nebo kalených vodicích tyčí o průměru 8 mm, a kuličkových ložisek. Pro snížení hlučnosti tohoto vedení je pak možné použít polymerová kluzná ložiska IGUS, která navíc přináší lepší přesnost a nižší nároky na údržbu než používaná kuličková ložiska, většinou LM8UU. [13]

V případě modifikovaného řešení zvaného Core XY, viz obr. 5, je využito také podélných a příčných lineárních vedení se dvěma motory a rozvodovými ozubenými řemeny pro osy X a Y, ve kterých se pohybuje tisková hlava. Rozdíl spočívá ve vzájemné závislosti pohybu os dané specifickým vedením ozubených řemenů. Pohyb v ose Z pak realizuje tisková podložka, která během tisku klesá a postupně se tak vzdaluje od trysky. Tento způsob řešení kartézských tiskáren přináší nesporné výhody v možné rychlosti tisku díky stabilnější konstrukci a nižší hmotnosti vedení v osách X a Y. Zároveň díky stabilní tiskové podložce nedochází k tak značným setrvačným silám během pohybu a díky tomu je možné dosáhnout vyšší kvality a přesnosti tisku, než je tomu v případě pohybujících se tiskových podložek. [10]



Obr. 5 3D tiskárna typu Core XY od Two Trees [14].

2.1.2 Delta

Tiskárny se zajímavou, o to ale složitější kinematikou, které zaujmou nejen svou výškou, ale také konstrukcí založenou na třech stabilních rámech rozmístěných po 120 °. Veškeré pohyby tisku vykonává tisková hlava, zavěšena na třech ramenech složených ze šesti uhlíkových či karbonových tyčí. Ty jsou konstrukčně připevněny pomocí neodymových magnetických kulových čepů. Pomocí krouťícího momentu krokových motorů je přes řemenice a ozubené řemeny připevněné na vozíky ložisek vyvozen lineární pohyb. Ten je veden nejčastěji skrze lineární vedení typu MGN, které při správné montáži zajišťuje velice hladký a přesný chod. Přes pohyby jednotlivých os X, Y a Z lineárních vedení, které jsou všechny uloženy vertikálně na rámech, je pak dána do pohybu i samotná tisková hlava na obr. 6. Pro zachování co nejnižší hmotnosti tiskové hlavy je pak využito bodnového extruderu, který se nachází na jednom z rámců. To přináší potíže s hůře tisknutelnými flexibilními materiály TPU či TPE, avšak díky tomu mohou delta tiskárny tisknout velice rychle (v řádu stovek mm/s) bez nadbytečných setrvačných sil. Tomuto navíc napomáhá nehybná kruhová podložka. Díky tomu, že se model při tisku nepohybuje je výsledný tisk kvalitnější, přesnější a spolehlivější, a to za již zmíněných zvýšených rychlostí pohybu. Zároveň nedochází ke zhoršení kvality výtisků s rostoucí výškou modelu, které na kartézské tiskárně vznikají značné vibrace. [10] [11] [15]

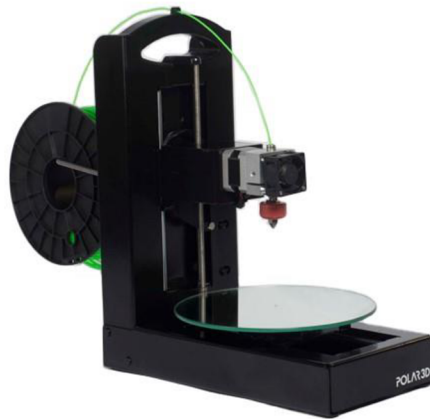


Obr. 6 3D tiskárna typu delta Trilab Deltiq 2 s vybavením [15].

Díky navržené konstrukci delta tiskáren je tak vhodné použití zejména pro vysoké dílce. Toto je však i jedna z hlavních nevýhod. Nad úrovní tiskové hlavy vzniká značný nevyužitý prostor znázorněný červeně na obr. 6. Zároveň pokud by bylo potřeba zvětšit průměr tiskové podložky, opět naroste potřeba zvýšení celé konstrukce. Samotná tisková podložka díky svému kruhovitému tvaru značně ubírá tiskový prostor z důvodu chybějících rohů. Pro rozměrné dílce je tak vhodnější využít kartézské tiskárny typu Core XY. [3] [10]

2.1.3 Polar

Neobvyklá a mladá technologie FDM 3D tisku, jenž je postavena na principu polárních souřadnicových systémů. Ty jsou založeny na bodech umístěných na oblouku, a ne v pravouhlém, jako u Kartézských tiskáren. Pohyb tiskové hlavy je vykonáván pouze ve vertikálním směru. Tisková podložka se pohybuje také pouze v jednom směru, a to horizontálním, ale zároveň se i otáčí. To přináší značné výhody zejména při tisku rotačních dílců. Systém je poměrně jednoduchý na sestavení a nevyužívá tolik komponent ke svému provozu. Problémem je však složité ovládání skrze polární souřadnice a nedostatečná základna slicerů (programů pro nastavení parametrů tisku), které by šlo pro tento způsob ovládání použít, a tím i malé rozšíření této metody v praxi. Díky své kinematice a konstrukčnímu řešení, jako je na obr. 7, dává systém polar prostor pro využití velkých tiskových ploch. Na druhou stranu vlivem rotační tiskové podložky není možné využít jejího vyhřívání, docházelo by ke kroucení přivedených vodičů, a tím je tak obtížný tisk spousty materiálů, které vyhřívanou podložku vyžadují. [3] [10] [11] [16]



Obr. 7 3D tiskárna Polar 3D [16].

2.1.4 Scara

Typ konstrukce 3D tiskárny s duálním ovládním typu scara. K ovládní pohybu tiskové hlavy je využito dvou robotických ramen, jako na obr. 8, jenž pomocí rotačních kloubů fungují jako paže a vykonávají celý proces nanášení jednotlivých vrstev. Alternativou je využití jednoho více kloubového ramene. Využívaná ramena se pohybují také ve vertikálním směru. Díky tomu je využito stabilní nehybné tiskové podložky, která může být vyhřívána a zároveň není nutné, aby byla upevněna ke konstrukci samotné tiskárny. To dává prostor pro využití tisku velmi rozměrných dílců, které by bylo jinak nutné tisknout po částech a tím celkově navyšovat čas potřebný pro výrobu. Také pro tento typ kinematiky není rozšířena nabídka slicerů a tím je snížena i celková popularita metody. Řešení je tak vhodné spíše pro velmi specifická využití rozměrných součástí. [11] [17] [18]



Obr. 8 3D tiskárna typu Scara [19].

2.2 Tiskové struny pro metodu FDM

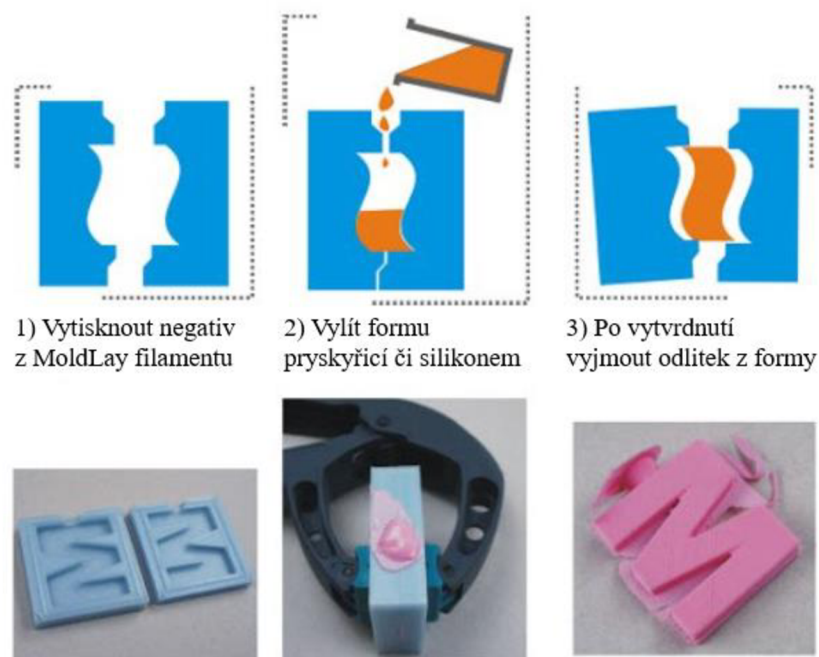
Správná volba tiskové struny pro metodu FDM je zcela zásadním faktorem ovlivňujícím vlastnosti, vzhled, tisknutelnost a ekonomičnost výsledných dílců. S rostoucí popularitou této metody 3D tisku vzrůstá i počet výrobců tiskových strun (filamentů), příklad cívek je uveden

na obr. 9. Výrobci se snaží získat konkurenční výhodu a na trhu se tak objevují nové materiály se specifickými vlastnostmi, v nejrůznějších barvách a provedeních. Sleduje se snadnost tisku, pohledové vlastnosti, mechanická odolnost, soudržnost vrstev, tepelná odolnost či následné opracování vytištěných dílců. [3]



Obr. 9 Cívky s filamenty [3].

Mezi nejčastěji používané materiály širokou komunitou 3D tiskařů, ale také na poli průmyslového tisku, patří Polylactic acid (PLA), Akrylonitrilbutadienstyren (ABS) a Polyethylentereftalátglykol (PETG). Každý je vyroben z odlišných výchozích surovin a rozdílnou technologií. Každý z nich má rozdílné vlastnosti a tisknutelnost. PLA je využíváno pro nízkou cenu a jednoduchost tisku, je to tak materiál vhodný primárně k prototypování. ABS naproti tomu vyčnívá svou tepelnou odolností. PETG je materiál vhodný pro základní mechanické díly. Existuje však obrovská základna použitelných materiálů. Timberfill je modifikované PLA s příměsí dřevěných pilin, které imituje dřevo. MoldLay je zase speciální voskový materiál používaný pro výrobu vlastních vytavitelných forem pro metodu ztraceného lítí či vytvoření formy. Postup odlití je uveden na obr. 10. [3] [20] [21]



Obr. 10 Postup odlití zaformováním materiálu MoldLay [21].

Každý jednotlivý materiál vyžaduje specifické tiskové nastavení. Tato potřeba se dokonce liší také u stejných materiálů, ale rozdílných výrobců. Stejný typ materiálu může mít u různých výrobců odlišné vlastnosti. Vliv mají dokonce i jednotlivé barvy. Různé vlastnosti bude mít transparentní materiál oproti černému provedení. Pro dosažení optimálních výsledků je tak potřeba ke každé cívce filamentu přistupovat jednotlivě a najít konkrétní optimální tiskové parametry. [3]

2.2.1 PLA

Polylactic acid (PLA), neboli kyselina polylactonová patří k nezákladnějším materiálům 3D tisku a také nejvíce využívaným. Je to do jisté míry bioplast vyráběný z kukuřičného škrobu, který je možné rozložit kompostováním ve specializovaných kompostárnách. Vyznačuje se vysokou tvrdostí a odolností. Má nízkou teplotní roztažnost, díky tomu se při tisku nekrotí, a dokonce není potřeba ani vyhřívaná podložka. PLA se tiskne kolem 200 °C na trysce. To vše zajišťuje snadnou tisknutelnost. Během tisku navíc nezapáchá. Na druhou stranu PLA neodolává vlivům UV záření, měkne již kolem 60 °C okolního prostředí a díky tisku nižší teplotou nedochází k tak dobrému propojení vrstev, čímž následně při zatížení často praská právě po jednotlivých vrstvách. Materiál je tak díky svým vlastnostem a nízké ceně vhodný spíše k rychlému vytváření prototypů a tisku dílů, které následně nejsou použity pro mechanická zatížení. Příklad výrobku je uveden na obr. 11. [3] [22]



Obr. 11 Tištěný díl z materiálu PLA [23].

2.2.2 ABS

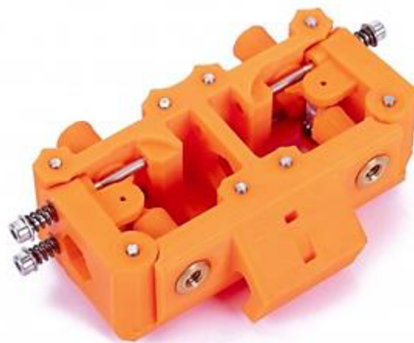
Akrylonitrilbutadienstyren (ABS) je amorfni termoplastický průmyslový polymer vhodný k tisku mechanicky namáhaných dílů. Vyznačuje se vysokou mechanickou odolností, tuhostí, rezistivitou vůči kyselinám a hydroxidům. Během tavení při průchodu tryskou silně zapáchá z důvodu uvolňování toxických výparů. Vyznačuje se také vysokou smrštitelností (0,3-0,7 %). Z tohoto důvodu je vhodné během tisku z ABS u rozměrných dílců udržovat v pracovní komoře stálou teplotu a na tiskové podložce někdy až 110 °C, jinak dochází ke kroucení a odlepování a tím k výrobě zmetku. K zabránění kroucení napomáhá také vypnutí ventilátoru ofuku, který má ovšem zásadní vliv na tvoření přemostění. Tisk ABS se pohybuje kolem teploty 255 °C na trysce. Díky zvýšeným teplotám tisku se tištěné díly vyznačují vyšším leskem a vysokou tepelnou odolností až 100 °C. Povrch dílů z ABS se dá vyhladit acetonem, je tak možné dosáhnout velmi hladké vnější vrstvy. Zároveň se dá acetonem také dobře lepit. Příklad výrobku je uveden na obr. 12. [3] [24]



Obr. 12 Tištěný díl z materiálu ABS [25].

2.2.3 PET/PETG

Polyethylentereftalátu (PET) a Polyethylentereftalátglykol (PETG) jsou materiály hojně využívané pro funkční součásti. Písmeno G označuje glykol, který modifikuje vlastnosti PET, díky tomu je méně křehký a lépe se tiskne. Vyznačuje se dobrou houževnatostí a tepelnou odolností kolem 80 °C. Tiskne se běžně s teplotou trysky 240 °C a na podložce pak 90 °C. Díky vyšším teplotám tisku dosahuje PETG lesklého povrchu a dobré přilnavosti vrstev. Je zapotřebí využít separačních vrstev na tiskové podložce, protože PETG vykazuje velmi dobrou přilnavost, často tak dokáže poškodit část tiskového plátu či skleněné podložky. Během tisku s vyšší teplotou na trysce často dochází ke stringování (tvorbě vlásků), je tak potřeba dobře vyladit potřebné retrakce (zatahování tiskové struny). Lze také snadno brousit za sucha i za mokra. Díky svým vlastnostem je tak PETG hojně využíváno pro základní konstrukční díly. Příklad výrobku uveden na obr. 13. [3] [26]



Obr. 13 Tištěný díl z materiálu PETG [27].

2.2.4 ASA

Acrylic Styrene Acrylonitrile (ASA) je technický materiál s podobnými vlastnostmi jako ABS. Tisk probíhá při teplotě na trysce kolem 260 °C a na podložce pak 105 °C. ASA je materiál s výbornou odolností proti UV záření a vůči zvýšeným teplotám okolního prostředí, které může dosahovat kolem 93 °C. Díky tomu je přímo vhodný pro tisk technických dílů do venkovního prostředí. Po mechanické stránce se jedná o velmi tvrdý a odolný materiál, který se dá snadno brousit za mokra i za sucha a v případě potřeby vyhladit či přímo rozpustit v acetonu. Hlavní nevýhodou je silné kroucení během tisku. Je tak přímo vyžadováno zabránit proudění studeného vzduchu a udržovat stálou teplotu v okolí tisku. Proti tomuto požadavku jde vlastnost, kdy jsou během tisku uvolňovány nebezpečné výpary (styren) a je tak potřeba zařízení provozovat v dobře větrané místnosti. Na obr. 14 jsou uvedeny dílce vyrobené z ASA. [3] [28]



Obr. 14 Tištěné díly z materiálu ASA [29].

2.2.5 Nylon

Polyamid (Nylon-PA) je syntetický polymer a termoplast. Je vyráběn z uhlí, vody a vzduchu. Vyznačuje se extrémní mechanickou odolností, ořezuvzdorností a výbornou adhezí mezi vrstvami. V tenkých vrstvách je značně flexibilní. Teplotní odolnost dosahuje více jak 100 °C. Zároveň dobře odolává chemikáliím. Všechny tyto vlastnosti tak Nylon předurčují pro využití k tisku velmi namáhaných mechanických dílů. Svou náročností tisku je však hodný spíše pro pokročilé uživatele. Nylon je extrémně hygroskopický, teoreticky dokáže pojmout více než 10% své hmotnosti ve formě vody za pouhých 24 hodin. Je tak kladek vysoký důraz na správně skladování a vysoušení filamentu. Dalším neduhem je značná náchylnost ke kroucení a odlepování výtisku od podložky. Běžně je využíváno teplot na trysce kolem 260 °C a na podložce pak 90 °C. Pro zabránění kroucení je však vhodné tisknout za stálé a zvýšené okolní teploty a také využít vhodných separačních přípravků na tiskový plát. Výborné mechanické vlastnosti jdou však ruku v ruce také s vyšší cenou výroby, je proto vhodné zvážit ekonomičnost využití tohoto materiálu. Na obr. 15 je uveden výrobek z materiálu Nylon AF80 Aramid. [3] [30]



Obr. 15 Tištěný díl z materiálu Nylon AF80 Aramid [31].

2.2.6 TPU/TPE

Termoplastické polyuretany (TPU) a Termoplastické elastomery (TPE) jsou zástupci flexibilních materiálů, které jsou charakterizovány výbornou ohebností, houževnatostí, odolností v tahu a také chemickou odolností vytištěných dílců. Rozdíl mezi nimi tkví primárně ve výsledné tvrdosti dle Shoreho stupnice, kde tvrdší z nich je TPU, a náročnosti tisku. Čím měkčí materiál, tím hůře se tiskne z důvodu mačkání struny kolem podávacího kolečka extruderu. Celkově je tisk flexibilních materiálů disciplínou pro pokročilé uživatele 3D tiskáren. Obtížné přemostění a převisy, horší odstraňování podpěr či časté stringování, to vše jsou velice časté problémy při tisku flexibilních materiálů. Jedním z problémů je také značná hygroskopičnost. Obecně však mají perfektní adhezi jednotlivých vrstev, dobrou prostorovou stabilitu a přilnavost k podložce. Výsledkem jsou tak díly, které vydrží velkou zátěž, aniž by došlo k jejich poškození. Tisknou se teplotou na trysce kolem 240 °C a na podložce 70 °C. Na obr. 16 je uveden příklad výtisků. [3] [32] [33]



Obr. 16 Tištěné díly z materiálu TPE [34].

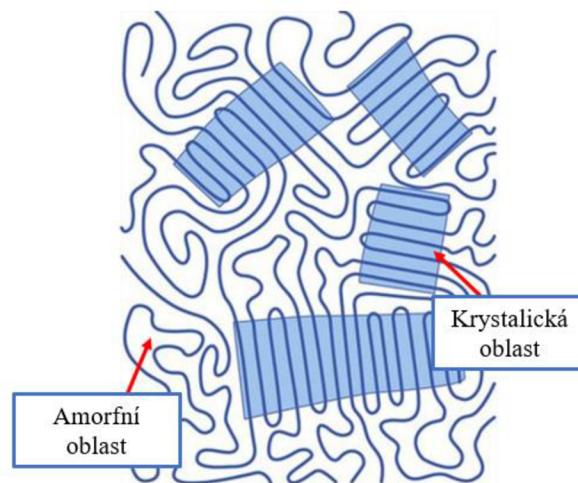
2.3 Vlhkost a její dopad na 3D tisk dílů

Voda a vzduch tvoří základní existenční podmínky života na Zemi. Je základní stavební látkou většiny organismů. Voda pak může tvořit více než 2 % objemu vzduchu, který dýcháme. Samozřejmě také polymery jsou vlhkostí ovlivněny. Navlhavost je pak schopnost látek přijímat vlhkost z okolního prostředí. Dělí se na hygroskopické materiály, které dokáží pojmout vlhkost do vlastní struktury a nehygroskopické, které mají sklon k absorpci vody pouze na svém povrchu, jako na obr. 17. Tento proces probíhá tak dlouho, než dojde k nasycení materiálu. To je rovnovážný stav, kdy vlhkost látky odpovídá relativní vlhkosti okolního prostředí. Tento proces může trvat několik hodin až týdnů. Nejedná se tak o materiálovou konstantu a je mimo jiné závislá na vlivu vnějších činitelů. [5] [35] [36]



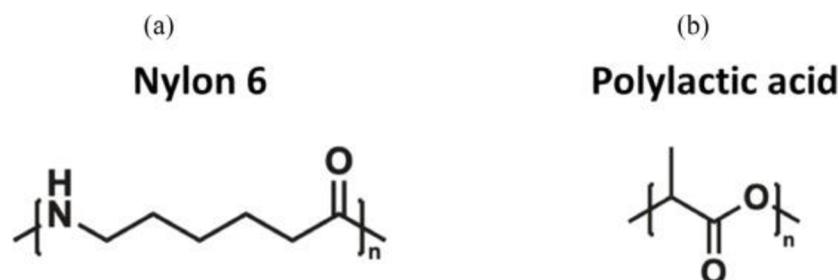
Obr. 17 Detail kapek vody na povrchu materiálu [37].

Polymery se skládají z dlouhých polymerních řetězců. Skládá se z krystalické oblasti, kde jsou polymerní řetězce zarovnané a amorfni oblasti, kde jsou pohromadě drženy neuspořádaně. Polymery s vyšší krystalickou oblastí jsou méně náchylné k vlhnutí, jsou k sobě drženy pomocí Van der Waalových sil. Hlavní příčinou vlhnutí polymerů, ze kterých jsou filameny vyráběny, je především jejich chemická struktura a složení. Z hlediska makromolekulárních řetězců snáze navlhají ty, které mají přítomny atomy elektronegativních prvků, jako jsou kyslík (O), dusík (N) či chlor (Cl). Elektronegativita je pak vlastnost atomu vyjadřující jeho schopnost přitahovat vazebné elektrony, záleží tedy i na jejich polaritě. Molekuly vody ze vzdušné vodní páry se naváží na řetězce polymeru pomocí mezimolekulárních sil. Vliv na mechanické vlastnosti polymerů je následně pokles meze pevnosti a modulu pružnosti, zvýšení houževnatosti a tažnosti či zhoršení odolnosti materiálu vůči vyšším teplotám. Během tisku však štěpení makromolekul vody při zvýšené teplotě na trysce přímo dopadá na kvalitu výrobku, která je rapidně zhoršena. [5] [35] [36] [37]



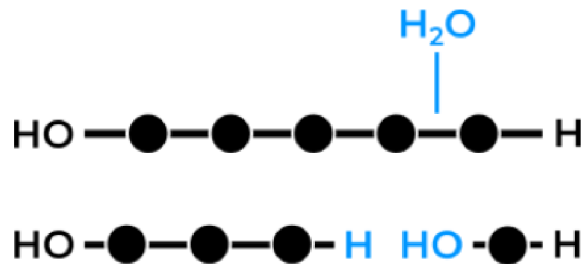
Obr. 18 Znárodnění a popis oblastí polymerů [37].

Navlhavost materiálu ovlivňují také aditiva přidávaná do filamentů během procesu výroby. Anorganická plniva jako jsou skelná vlákna budou mít pozitivní vliv a navlhavost snižovat. Důvod vlivu těchto aditiv vychází ze samotné podstaty procesu vlhčení. Na obr. 19 je znázorněna molekulární struktura nylonu PA6 a PLA obsahující navlhavé prvky O a N. [38] [39]



Obr. 19 Molekulární struktura materiálů Nylon PA6 a PLA [38].

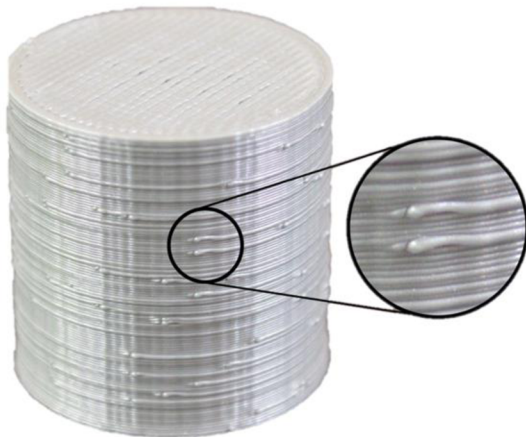
Vlhkost absorbována do amorfni oblastí nejprve snižuje molekulární vazby, což má za následek zvětšení objemu a pohyblivost řetězců. Následně dochází k degradaci hydrolyzou amidových vazeb a jejich následnou disociací, molekuly vody jsou umístěny mezi každý monomer a rozkládá tak strukturu polymeru, jako na obr. 20. Vyztužení pomocí skelných vláken snižuje pohyblivost polymerního řetězce a tím omezení vytváření volných objemů. Díky tomu jsou tak kompozity schopny zpomalit proces vlhnutí. [5] [35] [38]



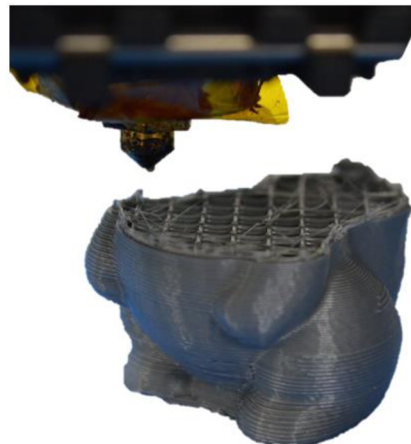
Obr. 20 Rozpad molekulární struktury polymeru přilnutím vody [39].

2.3.1 Rozpoznání navlhnutého filamentu

Během procesu 3D tisku každá obsluha stroje dříve či později narazí na problém s kvalitou. Pokud byla dodržena zásada, že pro každý nový materiál je nutno udělat základní testování za účelem stanovení optimálních tiskových podmínek, jako je teplota tisku, rychlost tisku, velikost extruze či ofuku ventilátoru, je možno dosáhnout optimálních podmínek. Po nějaké době tisku však proces začne vykazovat anomálie. Viditelné vibrace a přetékání materiálu na stěně dílu, obr. 21, díry ve vodorovné výplni, ucpaná tryska a tím znehodnocený výtisk, obr. 22, či výskyt značných vlásečnic a tvoření tuhých kapek, to je pouhý výčet rozmanitého výskytu tiskových vad. Každá z těchto vad lze identifikovat a má i své řešení. [40]

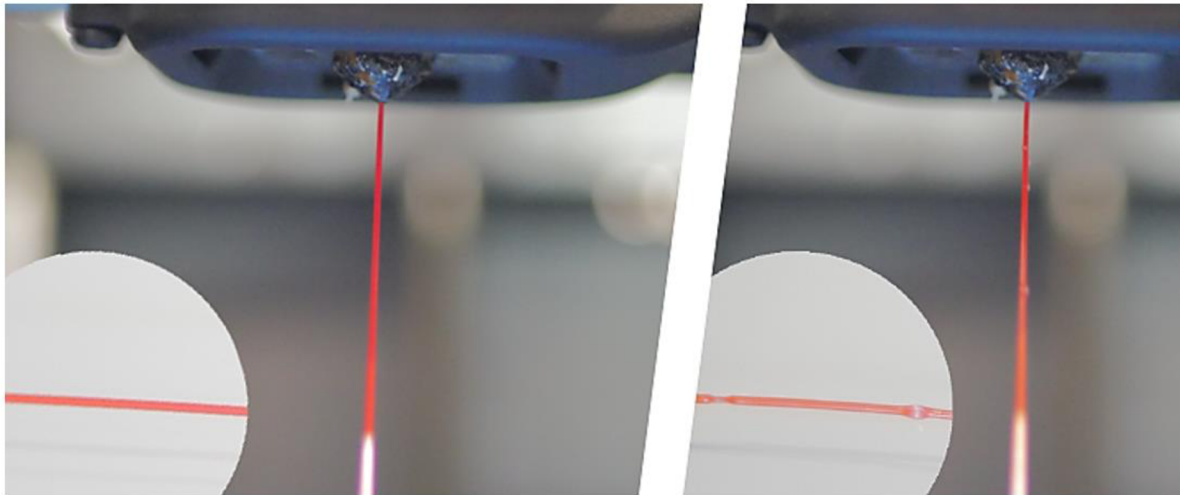


Obr. 21 Defekt výtisku vibracemi a přetékáním materiálu [40].



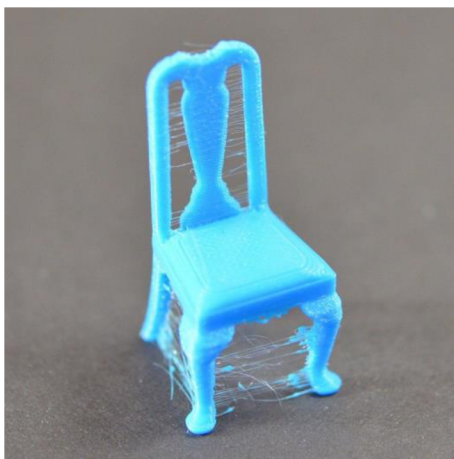
Obr. 22 Ucpaná tryska znemožňující průchod filamentu [40].

Stejně tak i navlhnutý filament vykazuje během tisku určité projevy a vlivy na samotný proces. Prvním indikátorem vlhkosti je možné pozorovat již při prvotním průchodu roztaveného filamentu skrze trysku. Slyšitelné prskání expandujících molekul vody během odpařování vlhkosti a viditelné tvoření bublin ovlivňující vytlačování filamentu jako je viditelné na obr. 23. Toto je první zřetelný projev ovlivněného filamentu. Dokonce i při tisku z nově rozbalené cívky je někdy možné tento jev pozorovat. [41] [42]

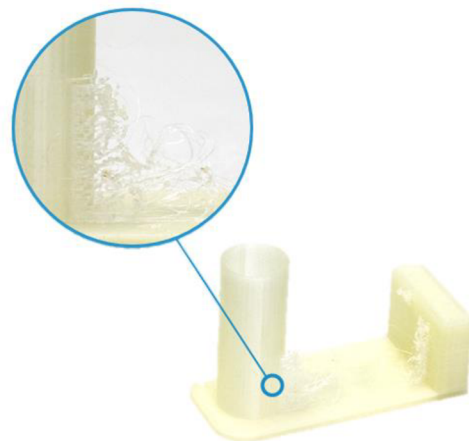


Obr. 23 Porovnání extruze suchého (vlevo) a vlhkého (vpravo) materiálu [42].

Pokud jsou tyto prvotní příznaky ignorovány, dalším rychle viditelným projevem, který je možné pozorovat během tisku, je tvoření vlásečnic neboli *stringing*, příklad uveden na obr. 24 a obr. 25. Během expanze molekul vody je vytvořen tlak často dostatečný k tomu, aby zapříčinil samovolné vytékání filamentu během přejezdů tiskové hlavy. Těmito přejezdy je takto nadměrný materiál tahán po jednotlivých úsecích pohybu a tím dochází ke vzniku vlásečnic. Tento jev je však složitější odhalit. Podobné chování je možné pozorovat u tisku s částečně ucpanou tryskou, kde během procesu dochází k náhodnému uvolnění uvízlého materiálu a jeho vytečení. Další možnou variantou je pak tisk s neúměrně vysokou teplotou, kde je nahromaděný materiál taven a dochází k samovolnému průchodu tryskou. [39] [40]

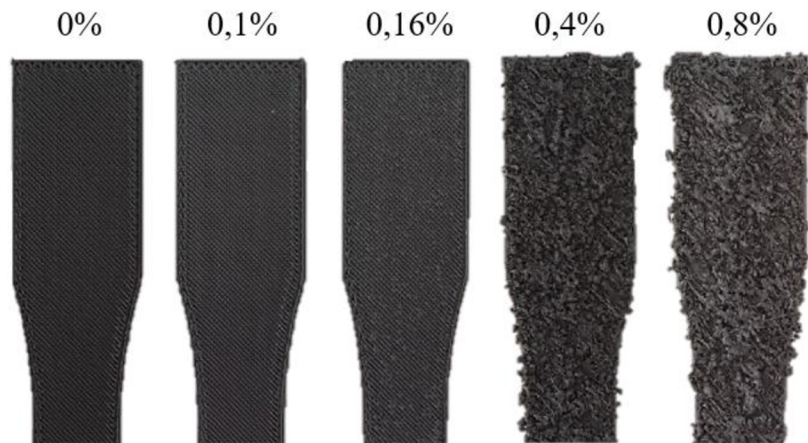


Obr. 24 Ukázka tahání vlásečnic [40].



Obr. 25 Detail tažení vlásečnic [39].

Posledním zřetelně pozorovatelným jevem vlhkého filamentu během procesu tisku je zhoršená kvalita povrchu. Na obr. 26 je zobrazena změna povrchu materiálu ULTEM 9085 do 0,8 % hmotnostní změny vlivem pohlcení vlhkosti filamentu. Odpaření molekul vody vytvoří na proudu vytékajícího filamentu vzduchové bubliny. To se na výsledném tisku projeví jako nekonzistentní struktura tisku. Jednotlivé vrstvy vykazují zřetelné přerušování dodávaného materiálu, čímž vzniknou nezaplňovaná místa. To má vliv jak na pohledovou stránku vytištěného dílu, tak i na jeho celkovou křehkost, kdy takto vytištěný díl vykazuje mnohonásobně nižší pevnost než z vysušeného materiálu. Stejně tak jako *stringing* je možnost vzniku této vady zapříčiněna více vlivy. Ucpaná tryska, nízká teplota tisku, neadekvátní tisková rychlost či nastavený nedostatečný průtok materiálu, to vše jsou možnosti vzniku tohoto problému. [41]



Obr. 26 Porovnání kvality povrchu materiálu ULTEM 9085 [41].

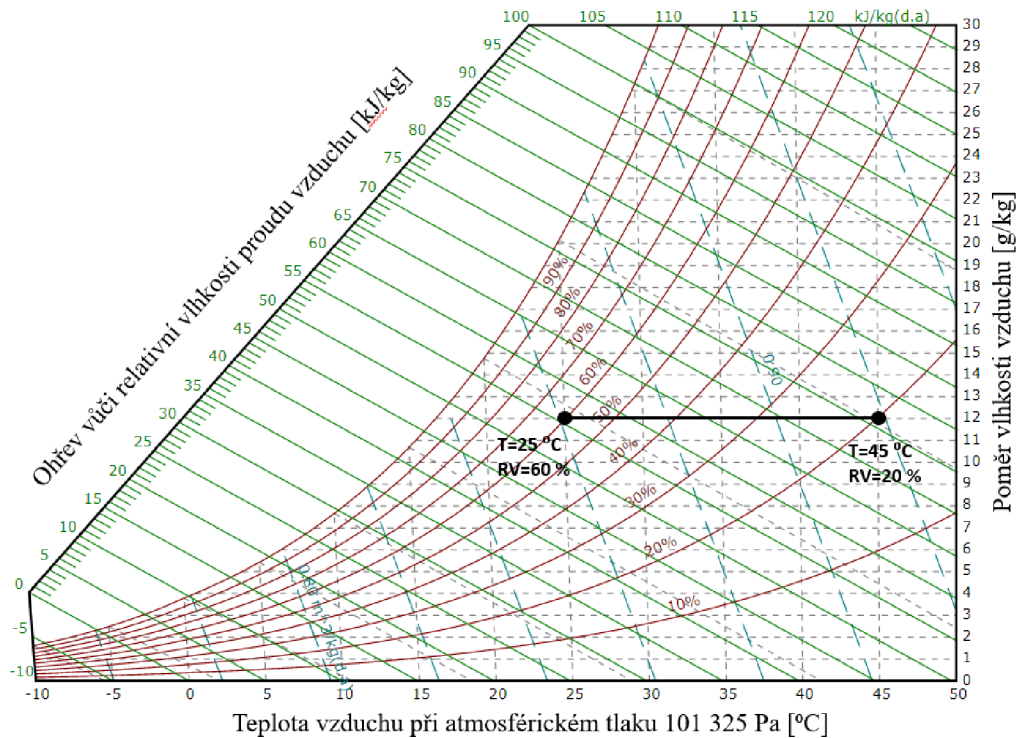
2.3.2 Způsoby odvlhčování filamentů

Preventivním opatřením k zamezení navlhnutí materiálu je správné skladování. Je zapotřebí skladovat materiály v prostředí s co nejnižší relativní vlhkostí a ideálně vyšší teplotou. Běžně je využíváno uzavřených boxů či sáčků s obsahem vysoušecích prvků, jako je silikagel či zvířecí stelivo přírodního či syntetického charakteru. Toto je však řešení oddalující nevyhnutelné navlhnutí. K dokonalému zabránění by bylo nutno materiál nejprve vysušit a následně využít hermeticky uzavřené komory. Pokud již dojde k navlhnutí tiskových strun, jedinou možnou eliminací tohoto jevu je ve vysušení filamentu od nežádoucí vody. [35] [36]



Obr. 27 Způsob skladování filamentů.

Na psychrometrickém diagramu je možné pozorovat vztah mezi absolutní vlhkostí vyjádřenou jako hmotnostní poměr vlhkosti, relativní vlhkostí a teplotou, obr. 28. Z diagramu je možné vypočítat, že při zahřátí vzduchu z teploty 25 °C a relativní vlhkosti 60 % na teplotu 45 °C se absolutní vlhkost nezmění, avšak dojde ke snížení relativní vlhkosti na 20 %. To je důvod, proč je nejčastěji využíváno sušení pevných látek pomocí proudícího horkého vzduchu a času potřebného k úplnému odstranění dané vlhkosti. Během procesu odvlhčování dochází k difúzi vlhkosti, která odchází směrem k teplému a suchému vzduchu, až dojde k následnému uvolnění těchto molekul do okolního prostředí. [35] [43]



Obr. 28 Psychrometrický diagram relativní vlhkosti [43].

Samotných metod sušení tiskových strun existuje celá řada. Každá disponuje svými výhodami a nevýhodami. Všechny však více či méně dodržují náležitosti potřebné k vytvoření teplotní difuze vlhkosti do okolního prostředí. Mezi tradiční a nejčastěji používané metody sušení filamentu v domácím prostředí patří využití domácí horkovzdušné trouby či sušiček na potraviny. Obě tyto varianty využívají k vysoušení ohřev vzduchu na požadovanou teplotu po stanovený čas. Ohřátý vzduch je prouděním odváděn pryč z ohřivaného prostoru. Tím se odvádí také vzdušná vlhkost. V současné době se na trhu objevuje spousta alternativ vyráběných přímo pro účel vysoušení jednotlivých cívek. Princip funkce je stejný, jako u sušiček potravin či horkovzdušných trub, avšak často nedisponují ventilátory. Ohřátý vzduch tak není odváděn pryč z komory a sušení se tím stává neefektivním. Takováto sušička je vhodná spíše k udržování filamentu, který již prošel procesem odvlhčování. Hlavní nevýhodou sušení filamentů pomocí těchto zařízení je v časové náročnosti procesu a energetické zátěže. [35] [44]



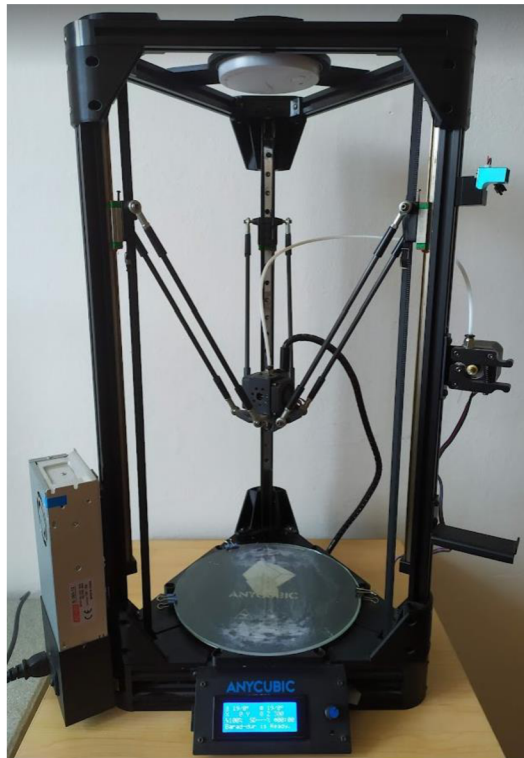
Obr. 29 Sušení v horkovzdušné troubě [44].



Obr. 30 Sušení v sušičce na potraviny [44].

3 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

K úspěšnému dosažení požadovaných cílů bylo zapotřebí vybrat a jasně definovat veškeré procesy a postupy. Na základě rešeršní části, která detailně popisuje nástroje dále využívané v této práci, byly vybrány konkrétní zařízení a materiály. Vzhledem ke zkoumání chování dílců vyráběných metodou FDM, byla zvolena 3D tiskárna typu delta s označením Kossel Linear Plus od společnosti Anycubic. Zařízení splňuje požadavky ukládané pro tisk vybraných materiálů. Ty byly zvoleny na základě rešeršní části. Ke zkoumání mechanických vlastností byly vybrány PLA, ABS, Nylon PA12, ASA a PETG, vše od jednoho výrobce Devil Design (DD). Flexibilní TPU a TPE byly využity pouze ke stanovení hygroskopičnosti strun. Mechanické vlastnosti by vzhledem k jejich elasticitě nebylo možné stanovit, nedošlo by k destrukci vzorků. K vlhkostní analýze byly navíc zvoleny také materiály od společností Prusa Research (PR), Fillamentum (FM) a Creality (CR). Bude sestaveno celkem 5 stavů vlhkosti. S označením 0 bude původní vysušený filament, ze kterého započne následný proces vlhčení. Následují stavy 1,2 a 3 určené dle průběžných výsledků vlhčení. Stav 4 bude s největším zvýšením hmotnosti vlivem pohlcení vzdušné vlhkosti. Dále bude sledován vliv opětovného vysušení již navlhnutého filamentu. Takto označené vzorky budou odděleny tečkou, tedy 1.1, 2.2, 3.3 a 4.4. Bližší informace o výběru zařízení je obsaženo v následujících kapitolách.



Obr. 31 3D delta tiskárna Anycubic Kossel Linear Plus.

3.1 Stanovení hygroskopičnosti filamentů

K úspěšnému vyhodnocení relevantních výsledků a průběhů vlhkostních křivek byl zcela zásadní korektně nastavený proces. Sušení, vlhčení, měření a výchozí vzorky bylo nezbytně nutné stanovit. Pro získání detailnějších dat o chování materiálů bylo přistoupeno ke zkoumání dalších zajímavých filamentů, na které má vlhkost negativní vliv, ale také porovnání stejných tiskových strun u rozdílných výrobců. Pro účely testování bylo vybráno celkem 11 odlišných materiálů či výrobců. Celkem 22 sledovaných vzorků, na kterých byla pozorována a vyhodnocena hygroskopičnost daných materiálů.

Pro účely porovnání, snazší manipulace a měření byly z cívek odmotány vzorky s hmotností kolem 30 g. Tato hodnota nebyla stěžejní a přesně odvažována, jelikož zásadním sledovaným parametrem byla pouze změna této hmotnosti. Konkrétní procesní podmínky experimentálně zjištěných a stanovených jsou blíže specifikovány v následující části práce. Na obr. 32 jsou uvedeny všechny vzorky pro výrobu testovacích dílců z materiálu PLA a na obr. 33 z PETG.



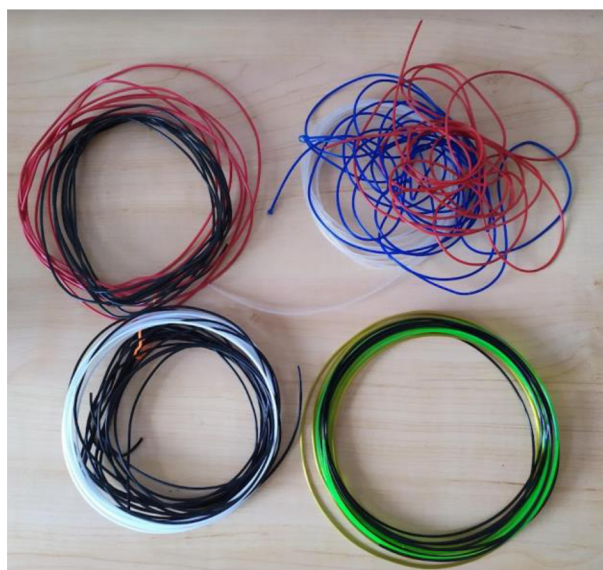
Obr. 32 Vzorky z materiálu PLA.



Obr. 33 Vzorky z materiálu PETG.

3.1.1 Podmínky vlhčení

Za účely získání podrobnějších dat chování jednotlivých materiálů během procesu pohlcování vzdušné vlhkosti, bylo rozhodnuto o využití dvou stavů vlhčení. V prvním pokusu (proces vlhčení I) byly vzorky vystaveny jasně definovanému prostředí, které se přibližovalo běžnému skladování materiálů širokou vřejností. Bylo určeno prostředí s využitím termostatu a díky tomu udržovanou teplotou v místnosti na 21 °C s běžnou odchylkou ± 1 °C. Tato místnost vykazovala přítomnost vzdušné vlhkosti v rozmezí 50–60 %. Jak teplota, tak vzdušná vlhkost byla v průběhu experimentu kontrolována pomocí 3 nezávislých měřících jednotek. Zároveň nedocházelo během procesu k žádnému přímému větrání otevřenými okny či dveřmi.



Obr. 34 Vzorky procesu vlhčení I.

Ve druhém pokusu (proces vlhčení II) bylo cílem nalézt extrémní podmínky daných materiálů, které by odpovídaly velmi nešetrným podmínkám skladování. Bylo přistoupeno k vložení vzorků do uzavíratelných nádob s vodou. V těchto nádobách byly vzorky kompletně ponořeny a udržovány tak v maximálně možném vlhkém prostředí. Zároveň bylo předpokládáno rychlejší dosažení stavu nasycení vlhkostí z vody a tím možnou přípravou extrémů pro vyhodnocení mechanických vlastností testovaných materiálů.



Obr. 35 Vzorky procesu vlhčení II.

3.1.2 Podmínky sušení

Všechny nashromážděné vzorky byly sušeny jednotným způsobem stanoveným na základě experimentů. Nejprve bylo vycházeno z tabulek podmínek pro sušení udávaných jedním z výrobců tiskových strun, společností Fillamentum. Zde byly uvedeny potřebné teploty a stanovený čas pro každý materiál zvlášť. V tab.1 jsou uvedeny konkrétní hodnoty s prioritou sušení od 1 do 5, 5 znamená největší důležitost. Zdroj informací je uveden v příloze 1.

Tab. 1 Přehled výrobcem doporučených parametrů sušení.

Materiál	Teplota sušení [°C]	Minimální doba sušení [h]	Priorita sušit [-]
Nylon	80	4	5
PETG	65	4	5
PLA	50	3	5
ABS	80	2	2
ASA	80	2	3
TPU	80	3	5
TPE	80	2	2

K samotnému sušení byly využity dvě zařízení, které disponují odlišnými parametry. Prvním zařízením byla sušička na ovoce Snackmaker FD-500, která byla uvažována pro sušení materiálů PLA a PETG. Svou konstrukcí a dostatečným větráním se jedná o zařízení velice účinné k sušení také filamentů. Bohužel vzhledem k reálně naměřené maximálně dosažitelné teploty, která byla 60 °C, oproti výrobcem udávaných 65 °C, bylo toto zařízení využito pouze pro materiál PLA.

Pro sušení všech ostatních vzorků bylo využito horkovzdušné trouby SilverCrest SGB 1200 D1 s nastavitelným rozsahem teplot 70–230 °C a odvětráváním na vrchní straně dvířek. Tato zařízení byla zvolena z důvodu rozšířenosti použití obdobných variant a jejich dostačujícím parametrům k sušení zvolených materiálů.



Obr. 36 Sušení ve zvolené sušičce na ovoce.



Obr. 37 Sušení ABS ve zvolené sušící troubě.

V prvním kroku vlastního experimentu bylo zapotřebí ověřit vhodnost a přesnost doporučených hodnot udávaných výrobcem vůči konkrétním testovaným materiálům a použitým sušicím zařízením. Teplota sušení byla stanovena na základě experimentu, kdy oproti udávaným hodnotám byla teplota plynule zvyšována o 5 °C a následovalo sledování stavu cívek. V momentě, kdy začalo docházet k tečení strun a jejich zapékání, jako na obr. 36, byl experiment zastaven a byla zvolena hodnota teplota z předcházejícího stavu, tedy o 5 °C nižší. Čas potřebný k vysušení testovaných vzorků byl také zvolen experimentálně. Opět se vycházelo z hodnot udávaných výrobcem a ze stanovených podmínek měření průběhu sušení. Nejprve byla naměřena výchozí hmotnost vzorků určených k sušení. Následně započal samotný proces sušení. Během tohoto procesu byla v pravidelných dvou hodinových intervalech kontrolována průběžná hmotnost vzorků za účelem stanovení sušicí křivky. Vzorky byly odebírány postupně a ihned měřeny. Tím bylo zabráněno zrychlenému opětovnému navlhnutí při přesunu vzorků do chladnějšího prostředí. Experiment byl ukončen v momentě, kdy se hmotnost třech následujících měření shodovala v rozmezí přesnosti měřidla. Opět byla zvolena hodnota času předchozí naměřená. Dosažené procesní parametry potřebné k vysušení cívek byly následně využity pro sušení všech iterací navlhčených vzorků za účely testování mechanických vlastností.



Obr. 38 Ukázka zapečeného filamentu.

3.1.3 Podmínky měření hmotnosti

K vyhodnocení změn hmotnosti vlivem pohlcené vlhkosti bylo zapotřebí stanovit jasné podmínky měření pro všechny materiály a využít vhodného měřicího zařízení. Vzhledem k očekávaným změnám ve hmotnosti v řádu desetin až desítek procent, v případě nylonu, a výchozí hmotnosti vzorků kolem 30 g, byla určena jako vyhovující digitální váha Pronett XT1253 s přesností měření 0,001 g a maximálním zatížením do 100 g. Tato váha disponovala vlastním kalibračním závažím o hmotnosti rovných 100 g, bylo možné si tak váhu zkalibrovat. Vzhledem k vysoké přesnosti této váhy bylo zvoleno jasné definované místo, na kterém byly následně provedeny všechny měření. Nacházelo se na rovné desce v místě bez průvanu. V totožné místnosti, jako byl zvolen první způsob navlhčování, tedy se stabilní teplotou 21 ± 1 °C a relativní vlhkostí 50-60 %. Pro možné upevnění vzorků na malou plochu měřicího zařízení byla využita plastová děrovaná nádoba s překvapivě přesnou hmotností rovných 19 g. Tato nádoba byla před každou iterací měření nulována.

Samotný proces získávání výsledků byl nastaven následovně. Nejprve byly zváženy výchozí hmotnosti všech vzorků před procesem sušení, tak jako na obr. 39. Všechny cívky byly nově otevřeny, byla tak získána vstupní data pro zjištění míry navlhnutí cívek během procesu výroby a dodání. Následovalo zvážení vzorků po procesu sušení, které vycházelo z nastavených experimentů. Naměřené hodnoty byly následně brány jako výchozí k určení změn hmotností během procesů vlhčení. K upřesnění výsledků v prvních hodinách od započetí navlhčování cívek byla zvýšena četnost měření. S ubíhající dobou byla tato četnost postupně prodlužována. Vzorky vycházející z prvního testu vlhčení byly před každým měřením mechanicky ořeny bavlněným hadříkem pro odstranění případného prachu a zkreslení výsledků. Vzorky ponořeny do vody byly před každým měřením taktéž setřeny, ale k odstranění povrchových kapek vody byly po dobu 5 minut sušeny dle teplotních parametrů. Všechna měření byla prováděna ve třech po sobě jdoucích iteracích ke zpřesnění výsledků měření a eliminování případných vnějších vlivů.



Obr. 39 Průběh procesu měření hmotnosti.

3.2 Volba optimálních parametrů tisku

Jednou z prvních aktivit úspěšného tisku, kterou by měl uživatel 3D tiskárny řešit, je kalibrace stroje a tvorba tiskových profilů. Ty dodavatelé zařízení zpravidla neposkytují. Pro jednotlivé materiály, ale mnohdy i samotné výrobce, je zapotřebí vhodně zvolit procesní podmínky. Obsluhy jsou tak odkázány na využití technických listů daných materiálů, které jsou však obvykle nepoužitelné, protože obsahují pouze rozmezí doporučených teplot tisku a vyhřívané podložky. Daný problém je však komplexnější. Mezi další proměnné patří intenzita chlazení, rychlost tisku a přejezdů, ale také hloubka a rychlost retrakcí. Na internetu existuje spousta dostupných testovacích modelů, které je možno využít k určení jednotlivých parametrů. Ty je nutno experimentálně určit tisknutím vzorků a následným vyhodnocením. K zamezení negativních vlivů vlhkosti strun bylo nutné provést testy na vysušených tiskových strunách.

3.2.1 Kalibrace 3D tiskárny

Nejprve bylo zapotřebí seřadit samotnou 3D tiskárnu. Tisková hlava je vedena pomocí uhlíkových tyčí na domečky lineárního vedení. To je přes ozubené řemeny a řemenice rozpořbováno krokovými motory. Bylo nutné zajistit hladký chod celé této soustavy. Bylo promazáno lineární vedení, napnuty řemeny a vyčištěny větráčky od prachu. Zadržávání či odpor vedení by v konečném důsledku negativně ovlivnilo výsledný tisk. Před zhotovením testovacích modelů došlo k osazení nových mosazných trysek o standardním průměru 0.4 mm a vyčištění přívodního otvoru pro filament. Tím byl zajištěn optimální průchod materiálu tryskou bez nežádoucího zadržávání.

Následovala kalibrace tiskové podložky. První vrstva ovlivňuje rozměrovou přesnost dílce, kvalitu dané plochy, a primárně přilnavost dílce k základně. Tryska příliš vysoko způsobuje slabou adhezi, nabalování materiálu na trysku a tím možný vliv na kvalitu. Opačný stav zapříčiňuje poškození tiskového plátu a rozměrovou nepřesnost ve výšce dílce. Zařízení Anycubic Kossel Linear Plus je vybaven mechanickou sondou s přesností v tisícinách mm. S využitím přednastaveného procesu v interním firmwaru tiskárny, běžícím na rozhraní Marlin ve verzi 2.0.9.3, byla provedena automatická kalibrace. Nastavená vůle na pozici 0 v ose Z byla 0,1 mm. Propsání této autokalibrace do G-kódů následných tisků bylo zajištěno příkazem M420 S1 ve start kódu každého tisku.

Proportional Integral Derivate (PID) je kalibrace k udržení stabilní teploty na trysce a tiskovém plátu. Byla provedena za účelem stabilizace teplotních procesů a zamezení negativního vlivu na tisk. Proces spočívá v cyklickém nastavení a dosažení požadovaných teplot. Tiskárna při každém cyklu zaznamenává výkon potřebný k dosažení a stabilizování nastavených hodnot. V poslední iteraci je tak tato hodnota propsána do firmwaru stroje a využívána pro následující tisky.

Posledním důležitým krokem je kalibrace množství materiálu vtlačovaného skrze trysku. Tato hodnota má zcela zásadní vliv na výsledný tisk. Ovlivňuje rozměrovou přesnost, pevnost a kvalitu povrchu. Pro tvorbu tiskových parametrů a zamezení negativního vlivu tak bylo nezbytné tuto kalibraci provést.

3.2.2 Určení optimální teploty tisku

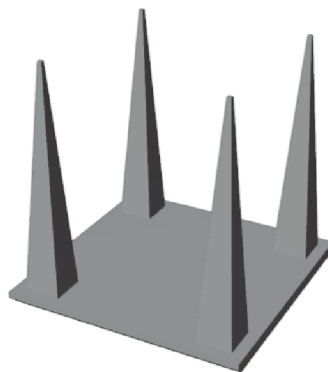
Zcela zásadním parametrem pro úspěšné dokončení tisku dílce je nastavení teplot tisku a jejího chlazení. Bylo zapotřebí experimentálně stanovit optimální rozpětí pro jednotlivé materiály. Princip testu spočívá v tisku definovaného modelu na obr. 40, s odstupňovaným nastavením jednotlivých teplot po 5 °C. Model z webu Thingiverse má uvedenou stupnici v rozsahu 45 °C. Pro jednotlivé parametry byla na modelu posuzována kvalita stěn, přemostění a tvar kuželu. Interval hodnot vycházel z technického listu a doporučení výrobců materiálu. Zjištěná teplota byla nastavena jako středová a z ní vycházely následné modifikace. Experimentální zkoušky byly prováděny v pěti iteracích, při nichž byl upravován procentuální výkon chladicího ventilátoru v rozsahu 0 až 100 %, odstupňovaného po 25 %.



Obr. 40 Model teplotní věže.

3.2.3 Stanovení retrakcí

Následujícím testem je určení optimální rychlosti a velikosti zpětného pohybu extrudového motoru během přejezdů trysky na modelu věžiček z webu Thingiverse. V momentě, kdy nedochází k vytlačování materiálu, dochází k samovolnému ukapávání roztaveného materiálu ven z trysky. Při přejezdech nad modelem tak může dojít k vytvoření ztvrdlé kuličky v prostoru tisku. Ta ovlivňuje nejen kvalitu dílce, ale mohla by při kontaktu s tryskou zapříčinit utržení modelu od podložky, či přeskočení řemenů na řemenicích a ztrátu kroků. Při přejezdech mezi tisknutými modely v jednom cyklu dochází k tahání vlásečnic, které ovlivňují výsledný povrch a v krajním případě mohou opět zapříčinit selhání tisku. Stanovení optimálních parametrů retrakcí tak byl další nezbytný parametr, který bylo zapotřebí stanovit. Samotný test probíhal v tisku čtyř jehlanů na podstavě viz obr. 41. Sledovaným parametrem byl tvar a kvalita povrchu zhotovených jehlanů a také množství vlásečnic.



Obr. 41 Model retrakčního testu.

3.2.4 Komplexní test

Závěrečným testovacím objektem byl etalon na poli posuzování způsobilosti tiskárny. Model lodičky z webu Thingiverse, obr. 42, obsahuje sledované prvky při komplexním posouzení optimálních parametrů 3D tisku. Je sledována kvalita povrchů, tisknutelnost převisů, správné nastavení první vrstvy, rozměrová přesnost, ale také nastavení retrakcí či chlazení. Model musí být vytisknut bez podpor a s jednotným nastavením celého tisku. Výsledek je hodnocen subjektivně. V závislosti na použití následných dílců, pro které jsou testy vyhodnocovány, je tak možné za účely zvýšení pevnosti a sjednocení vrstev využít tisku s vyšší vnesenou teplotou, která ale může negativně ovlivnit výslednou pohledovou kvalitu tisku.



Obr. 42 Model testovací lodičky.

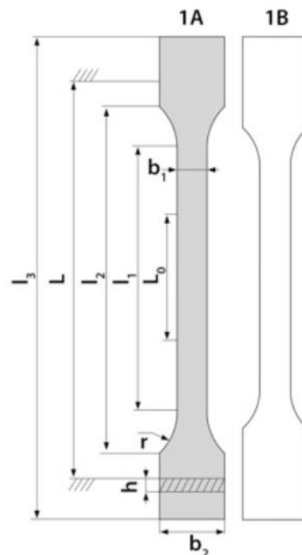
3.3 Zkoušky mechanických vlastností materiálů

Základní popis polymerů je možné definovat v zásadě ze čtyř jednotlivých vlastností. Jsou to pevnost, pružnost, plasticita a houževnatost. Pro popis samotného chování a možnostech jejich použití však existuje více charakteristik. Stejný model z totožného materiálu se bude chovat odlišně v prostředí o pokojové teplotě nebo za zvýšených teplot. Tyto charakteristiky jsou tak závislé na tvaru a rozměrech zkušebních těles, podmínkách zatěžování či jejich prostředí. Jsou stanoveny na základě experimentálních měření, kde jsou vlivy sledovány a vyhodnocovány. Během zkoušek dochází k trvalým deformacím, proto jsou označovány jako destruktivní. U namáhaných 3D tištěných dílů jsou vlivy znásobeny. Pouhým nastavením směru výplně či orientací modelu během tisku je možné dosáhnout signifikantních rozdílů limitních hodnot. Pro dosažení nejlepších výsledků mechanických vlastností daného materiálu je tak zapotřebí znát i konkrétní finální použití. K porovnání změn chování v materiálech nasycených vodou je naopak zásadní dodržet stejné podmínky výroby testovacích vzorků. Zároveň pro eliminaci nestandardních průběhů měření a možné ovlivnění jejich výsledků bylo rozhodnuto o měření vzorků ve 2 iteracích. Ke zjištění mechanických charakteristik materiálů ovlivněných nasycením vlhkostí byly vybrány následující zkoušky.

3.3.1 Tahová zkouška ČSN EN ISO 527-1

Jednou ze základních mechanických charakteristik polymerů je tahová zkouška. Poměrné prodloužení vyvolané vlivem deformace jednoosého namáhání je v závislosti na normálovém napětí sledováno pomocí deformačních křivek. Ty poskytují důležité informace o vlastnostech a chování testovaného materiálu. Vytvoření závislostí tak probíhá experimentálním měřením daných vzorků.

Pro tahovou zkoušku jsou jasně definovány rozměry a tvar zkušebních těles. Tyto veličiny určuje příslušná norma použita za účely testování a vyhodnocení. Pro 3D tištěné vzorky není přesně specifikována. Z tohoto důvodu byla pro měření vybrána validovaná norma s platností od května roku 2020 ČSN EN ISO 527-1, používanou pro obecné stanovení tahových vlastností plastů. Ta mimo jiné uvádí také požadavek na tvar (1A, 1B) na obr. 43 a rozměry zkušebních vzorků, které jsou ve tvaru oboustranných lopatek a zajišťují dostatečně pevné uchycení v čelistech stroje. Tento tvar navíc umožňuje koncentraci napětí ve zúžené části vzorku. Z důvodu velikosti plochy čelistí stroje byla pro výrobu vzorků zvolena varianta 1A s definovanými rozměry uvedenými v tab. 2.



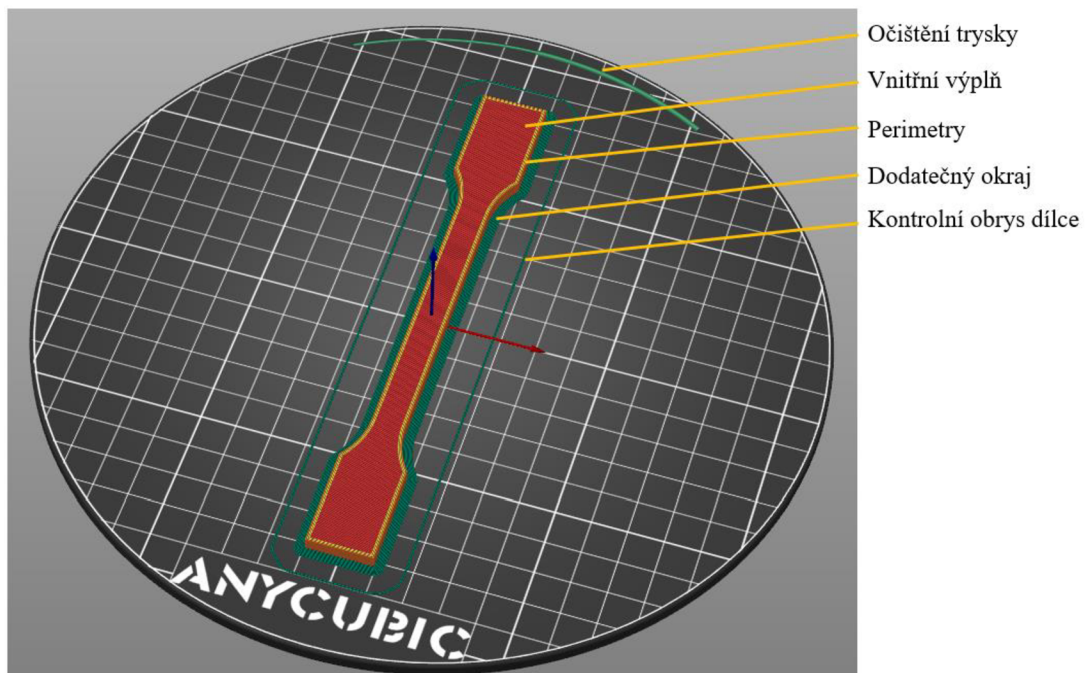
Obr. 43 Zakótování rozměrů zkušebních vzorků [5].

Tab. 2 Rozpis jednotlivých rozměrů vzorků.

Rozměry vzorku 1A	
Celková délka	l_3 170 mm
Vzdálenost mezi čelistmi	L 115 ± 1 mm
Vzdálenost mezi rovnoběžnými hranami	l_2 $109,3 \pm 3,2$ mm
Délka zúžené části	l_1 80 ± 2 mm
Počáteční měřená délka	L_0 $75 \pm 0,5$ mm
Šířka zúžené části	b_1 $10 \pm 0,2$ mm
Šířka konců	b_2 $20 \pm 0,2$ mm
Tloušťka vzorku	h $4 \pm 0,2$ mm
Poloměr zúžené části	r 24 ± 1 mm

K výrobě vzorků definovaných příslušnou normou bylo využito experimentálně stanovených tiskových profilů pro jednotlivé materiály. Nastavení tiskového procesu teplot, rychlostí, retrakcí a chlazení, tak vycházelo z nich. Parametry tištěných dílců však byly stanoveny pro všechny dané materiály stejně. Orientace modelu na tiskové podložce má zásadní vliv na výsledné pevnostní charakteristiky dílců. Při vrstvení ve směru následného zatěžování je oproti vrstvení v příčném směru pevnost značně snížena. [45]

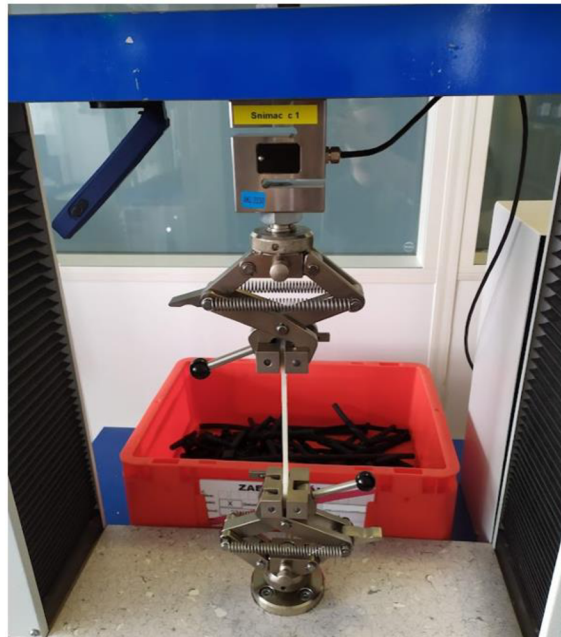
Proto i na základě dostupných studií byla zvolena poloha naležato s orientací v osách XY, která byla dodržena konstantně pro všechna testovaná tělesa. Vzhledem k použití mosazné trysky o průměru 0,4 mm, byl zvolen parametr výšky vrstvy 0,2 mm, který je pro tuto trysku standardně používán a zajišťuje dostatečnou kvalitu a soudržnost vrstev vzhledem k času tisku. Vliv na pevnost dílce má také velikost a vzor jeho vnitřní výplně. Ta sama o sobě způsobuje značnou nehomogenitu konečného dílce. Pro účely testování byla z důvodu zamezení zkreslení výsledků zvolena 100% výplň s orientací od -45° do $+45^\circ$, které se v jednotlivých vrstvách vzájemně překrývají. Dalším parametrem, který má podobně jako množství výplně zásadní vliv na pevnosti dílce, je počet okrajových stěn tzv. perimetrů. Ten byl zvolen v počtu 3, což odpovídá šířce stěny o velikosti 1,2 mm. Vzhledem k silné teplotní roztažnosti materiálů ASA a Nylon PA12 bylo pro jejich tisk využito také speciální funkce dodatečného okraje tzv. *Brim*. Je využíván pro zvětšení styčné plochy k podložce a oddálení krajů tištěného dílce a byl zvolen ve velikosti 3,2 mm. To napomáhá eliminovat kroucení vzniklé pnutím. Náhled dílu uveden na obr. 44.



Obr. 44 Model vzorku 1A s popisem vrstev.

Tahová zkouška probíhala na certifikovaném a kalibrovaném zařízení TIRAtest 2820 s nainstalovaným měřícím snímačem síly v rozsahu 80 N–20 kN s třídou přesnosti 0,5 N, obr. 45. Podmínky byly nastaveny na rychlost zatěžování $20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a teplota okolního prostředí $21 \pm 0,5^\circ \text{C}$. Testování probíhalo následujícím způsobem. Nejprve bylo nutné najít koncové pozice čelistí pro optimální a opakovatelné upnutí. Následovalo upnutí dílce a vynulování zbytkových sil na snímači síly. Poté byla jedna z čelistí uvedena do pohybu, čelisti se vzdalovaly a na dílec bylo kladeno jednoosé namáhání.

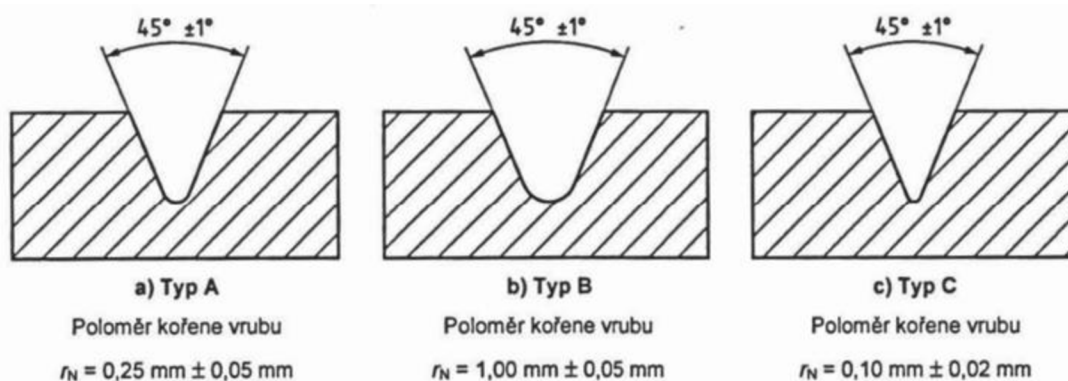
To bylo zaznamenáváno až do porušení dílce či poklesu zatěžující síly o více než 50 % maximální hodnoty. Následoval automatický návrat do výchozí pozice a upnutí nového dílce. Stejný postup byl aplikován na všechny zkušební vzorky.



Obr. 45 Průběh tahové zkoušky se vzorkem z Nylonu PA12.

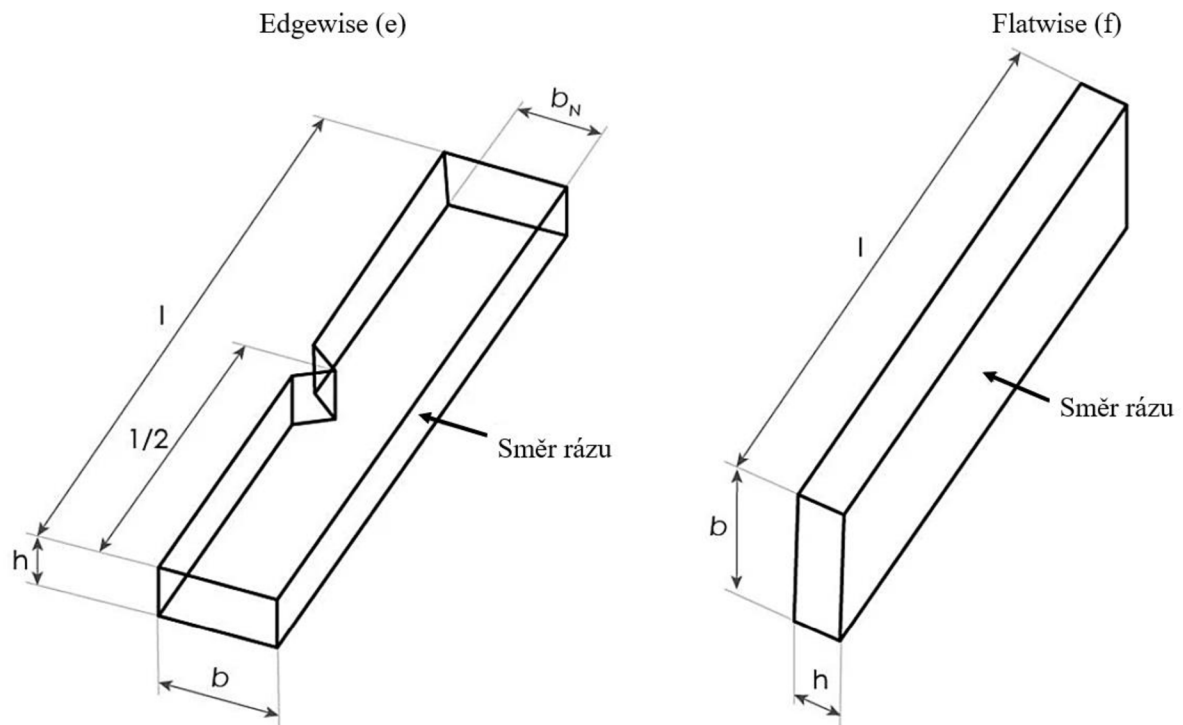
3.3.2 Zkouška rázové a vrubové houževnatosti Charpy ČSN EN ISO 179-1

Rázová houževnatost materiálů přímo souvisí se schopností rychle absorbovat energii, a tedy se deformovat určitou rychlostí. Obecně dochází ke dvěma typům lomů, křehkému a houževnatému. Ke křehkému dochází, pokud je okolní teplota nižší, než je teplota skelného přechodu daných dílců, v takovém případě by mělo dojít k úspěšnému přeražení testovaných vzorků. V případě houževnatého je skelný přechod nižší než okolní teplota a přeražení je obtížné. Rázová houževnatost plastů v případě 3D tisku závisí nejen na materiálu, teplotě okolí a vlhkosti v dílci, ale také na podmínkách zkoušky, typu zkušebního tělesa, a hlavně parametrech testovaného dílce. K usnadnění porušení dílce je využíváno definovaného vrubu, obr. 46, na středě vzorku. Vrub vytváří v jeho okolí koncentraci napětí a při rázovém namáhání následně nastává snazší porušení těles. V takovém případě se jedná o vrubovou houževnatost. [5]



Obr. 46 Rozměry jednotlivých typů vrubů [46].

Ani v případě zkoušek houževnatosti není přímo definována norma pro 3D tištěné materiály, která by specifikovala průběh testování. Byla proto využita norma platná od ledna roku 2011 ČSN EN ISO 179-1, používaná pro stanovení rázové houževnatosti plastů metodou Charpy. Ta popisuje princip zkoušky v umístění přesně definovaného zkušební tělesa na vodorovné podpěry. To je možné uskutečnit dvěma způsoby, jedním je Edgewise (e) a druhým Flatwise (f), obr. 47. Dle normy je na vzorku vytvořen definovaný vrub orientovaný naproti přerážené ploše. Těleso je následně přeráženo úderem rázového kladiva vedeným na střed dílce. Je sledována měrná energie vynaložena na přerážení zkušební tělesa. Rozměry vzorku jsou uvedeny v tab. 3.

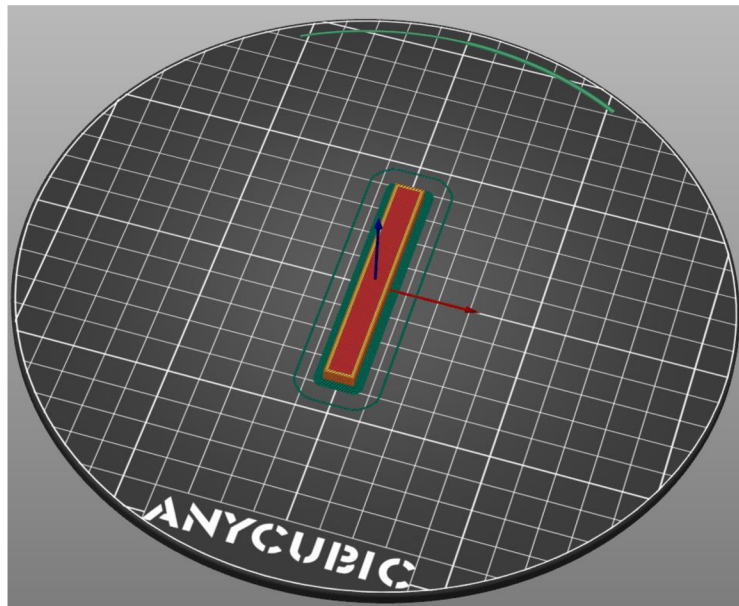


Obr. 47 Umístění zkušebních těles edgewise (vlevo) a flatwise (vpravo) [47].

Tab. 3 Rozměry testovacího vzorku typu A.

Rozměry vzorku typu A	
Délka	l 80 ± 0,2 mm
Šířka	b 10 ± 0,2 mm
Tloušťka	h 4 ± 0,2 mm

Výroba tištěných vzorků probíhala obdobně jako v případě tahové zkoušky. Bylo využito předem připravených tiskových profilů pro jednotlivé materiály. Orientace modelu v prostoru byla nastavena širší plochou v rovině XY. Bylo využito stejné trysky o průměru 0,4 mm, takže nastavená výška vrstvy činila 0,2 mm. Výplň všech vzorků byla nastavena na 100 % s překrývající se výplní od -45 ° do +45 °. Počet perimetrů byl rovněž stanoven na hodnotu 3. Vzhledem k silnému kroucení materiálů ASA a Nylon PA12 bylo i v tomto případě nutné využít *brim* o velikosti 3,2 mm. Na obr. 48 je uveden díl v prostředí přípravy tisku.

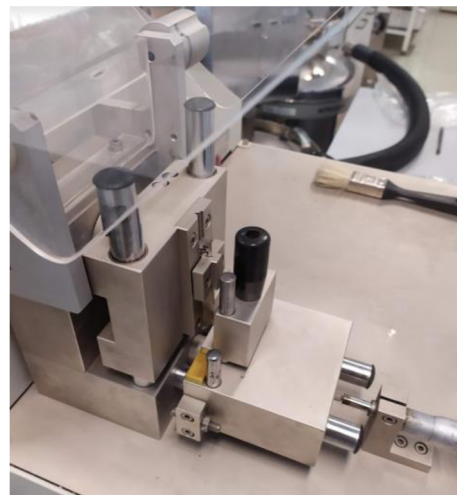


Obr. 48 Model vzorku typu A bez vrubu.

Samotné provedení testu bylo uskutečněno na kalibrovaném zařízení Zwick 5113.100 s využitím kladiva do velikosti měrné energie 2,7 J. Rychlost nárazu kladiva do vzorku činila $3,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \pm 10 \%$. Rozteč mezi podpěrami $62^{+0,5} \text{ mm}$. Teplota okolního prostředí $22 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, mělo by se tak jednat o křehký lom. Nejprve bylo zapotřebí ověřit vhodnost použitého kladiva. Na testovacích vzorcích byla vyzkoušena rázová houževnatost dílců bez vrubu. To se ukázalo jako nedostatečné řešení. Jiné kladivo nebylo k dispozici. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k vytvoření přesně definovaných vrubů dle příslušné normy ČSN EN ISO 179-1. Výroba probíhala na zařízení Notchvis 6951.000 a byl vytvořen vrub typu A s poloměrem kořene vrubu $0,25 \pm 0,05 \text{ mm}$ a hloubkou 1,5 mm.



Obr. 49 Testovací zařízení Zwick 5113.100.



Obr. 50 Přípravné zařízení Notchvis 6951.000.

Takto upravené vzorky již byly dostatečné pro možné použití s kladivem do 2,7 J. Nejprve bylo zapotřebí zjistit velikost ztrátové energie puštěním kladiva naprázdno. To proběhlo v pěti iteracích a bylo zapotřebí tuto hodnotu následně odečíst od naměřených dat. Následovalo umístění vzorků dle stanovené normy a přeražení kladivem. Příslušná hodnota kinetické energie byla vyhodnocena na řídicím panelu stroje. Výsledná hodnota vrubové houževnatosti a_{cA} [$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$], byla následně definována vztahem [5]:

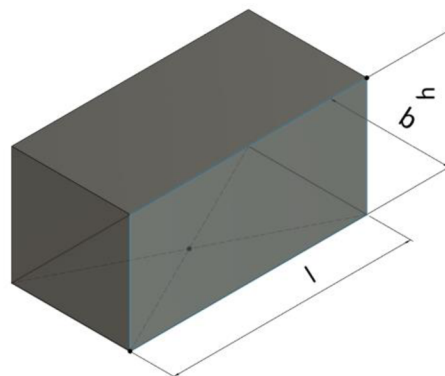
$$a_{cA} = \frac{E_c}{h \cdot b_n} [\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}], \quad (1)$$

- kde: E_c - kinetická energie spotřebovaná k přeražení tělesa [kJ],
 h - tloušťka vzorku [mm],
 b_n - šířka vzorku pod vrubem [mm].

3.3.3 Zkouška tvrdosti polymerů Brinell ČSN EN ISO 2039-1

Tvrdot polymeru je mechanickou charakteristikou vyjadřující odpor jeho povrchu vůči vnikání jiného, tvrdšího materiálu. Princip měření je ve vtlačování tělíska (indentoru) různého tvaru předepsanou silou do povrchu zkušebního materiálu, kde se měří hloubka vniknutí po definované době a při zatížení. Na rozdíl od kovů, kde se měří až po ukončení zatížení a není zde tedy podíl pružné deformace, ale pouze plastické, polymery vykazují značný podíl pružné deformace a dochází k elastickému zotavení. Ve výsledku je tak zahrnuta jak deformace plastická, tak i elastická.

I zde platí, že měření tvrdosti 3D tištěných dílců nemá vlastní specifickou normu, proto byla zvolena norma platná od září roku 2003 ČSN EN ISO 2039-1, používaná pro stanovení tvrdosti plastů metodou vtlačení kuličky. Norma přikazuje jednotlivé postupy zatěžování a vyhodnocování. Dále je popsán rozměr testovaného vzorku, popsán na obr. 51, který byl ve skutečnosti pro potřeby testování změněn. Rozměry jsou popsány v tab. 4.

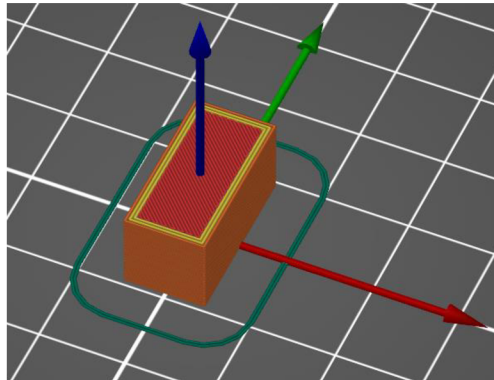


Obr. 51 Popis testovacího vzorku.

Tab. 4 Definované rozměry zkušebního vzorku.

Rozměry vzorku	
Délka	l 20 ± 0,2 mm
Šířka	b 10 ± 0,2 mm
Tloušťka	h 10 ± 0,2 mm

Také pro výrobu vzorků k měření tvrdosti bylo využito jednotlivých profilů a nastavení 3D tisku pro dané materiály. I zde byla zvolena orientace v rovině XY se 100% výplní dílce v režimu překrývajících se vrstev od -45° do $+45^\circ$. Nastavena výška vrstvy 0,2 mm pro trysku o průměru 0,4 mm. Počet perimetrů zvolen 3. Na rozdíl od předešlých modelů u tohoto nebylo zapotřebí využít funkce *brim*, u takto málo rozměrného dílce nedocházelo k prnutí a přizvedávání rohů.



Obr. 52 Model zkušební tělesa.

Nejprve bylo zapotřebí připravit vzorky k dosažení optimálních výsledků. Vzorek musel mít dvě rovné protilehlé strany. Zároveň u materiálů světlých a lesklých barev bylo zapotřebí zkoumanou plochu ztmavit. K tomu byl využit obyčejný lihový fix, který byl dostatečný. Měření probíhalo na profesionálním zkalibrovaném stroji DuraVision 30 G5. Nejprve bylo nutné umístit vzorek na střed vedení, aby bylo zabráněno ovlivnění měření vlivem krajních poloh testovaného dílce. Následně došlo k vynulování výchozí pozice pomocí měřicí sondy a automatickému přehození nástroje na požadovanou testovací kuličku HB5/25. Stroj následně našel dotyk kuličky s dílcem a aplikoval předzátížení. To odpovídalo velikosti 50 N po stanovenou dobu 5 s. Následovalo hlavní zatížení, které odpovídalo 246 N po stanovenou dobu 10 s. Během tohoto zatížení stroj na základě úhlopříček vpichu vyhodnotil dosaženou tvrdost HB. Stejný postup byl opakován pro všechny vzorky. Vzhledem k dosaženým průběžným výsledkům, které neneplnily očekávání, bylo rozhodnuto o dodatečném změření vpichu na externím zařízení Zeiss Discovery V20. Zde byl vpich ručně překontrolován pomocí vnesení dvou na sebe kolmých úhlopříček. Tímto měřením bylo potvrzeno, že primární měřicí stroj DuraVision 30 G5 vyhodnocoval obdobně dosažené výsledky, jako externí měření.



Obr. 53 Měřicí zařízení DuraVision 30 G5.



Obr. 54 Kontrolní zařízení Zeiss Discovery.

4 VYHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Všechny následující vyhodnocené experimenty a jejich průběhy byly vytvořeny z průměrných hodnot jednotlivých iterací měření. Procesy vlhčení a sušení byly stanoveny na základě 3 samostatných iterací měření. Výsledky mechanických zkoušek v tahu byly určeny na základě průměrné hodnoty 2 iterací z celkem 80 vzorků. Výsledky vrubové houževnatosti rovněž ze 2 iterací celkem 80 vzorků. Měření tvrdosti proběhlo ve 2 iteracích měření na 1 vzorku, dohromady tedy 40 testovaných dílců.

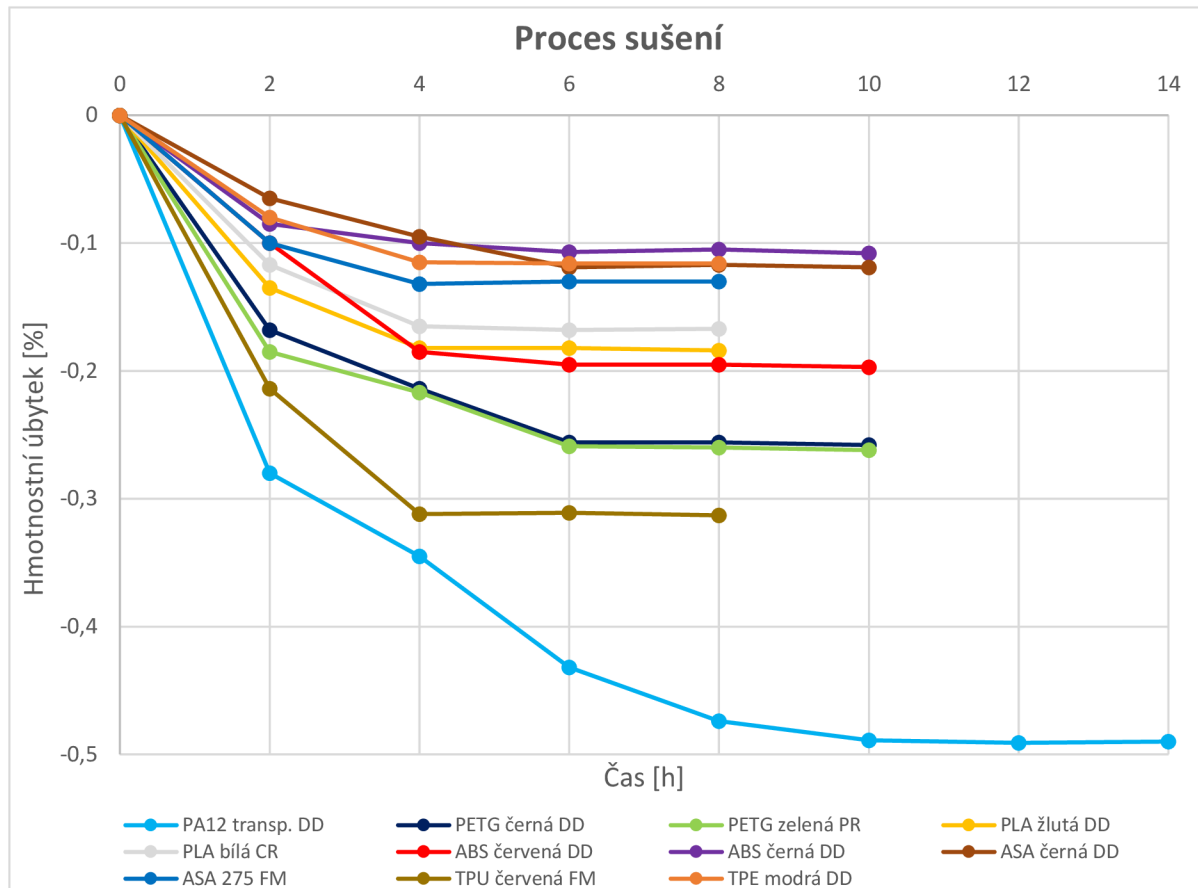
4.1 Proces sušení

Nejprve proběhlo experimentální stanovení sušících parametrů. Z dosažených výsledků bylo nadále vycházeno během sušení všech připravených vzorků. V tab. 5 je přehled dosažených experimentálních hodnot teplot, které byly pro sušení využity a jednotlivých výsledků. Závislost mezi úbytkem hmotnosti tiskových strun vlivem vysušení v závislosti na čase je zobrazena na obr. 55.

Tab. 5 Přehled získaných experimentálních hodnot sušení.

Vzorek	Teplota sušení [°C]	Hmotnost před [g]	Hmotnost po [g]	Rozdíl [%]
PA12 transp. DD	110	28,437	28,298	0,490
PETG černá DD	70	29,326	29,250	0,258
PETG zelená PR	70	30,315	30,235	0,262
PLA žlutá DD	60	30,404	30,348	0,184
PLA bílá CR	60	29,262	29,213	0,167
ABS červená DD	85	29,670	29,612	0,197
ABS černá DD	85	29,624	29,592	0,108
ASA černá DD	85	28,457	28,423	0,119
ASA 275 FM	70	27,619	27,583	0,130
TPU červená FM	95	29,385	29,293	0,313
TPE modrá DD	85	28,537	28,504	0,116

Z výsledků vyplývá, že nejvyšší potřebnou teplotu sušení vykazoval Nylon PA 12. Naopak nejnižší PLA. Bylo dosaženo očekávaných hodnot. Konkrétní hodnoty byly z důvodu rozsáhlosti zaneseny do přílohy 2.



Obr. 55 Průběh úbytku hmotnosti vlivem procesu sušení.

Z grafu vyplývá doba potřebná k vysušení zkoumaných materiálů. Obecně bylo dosaženo podobných výsledků jednotlivých materiálů daných výrobci či barev. Nejkratší dobu potřebuje PLA, ASA275, TPU a TPE, shodně kolem 4-6 h, pro sušení dalších vzorků byla vybrána hodnota 6 h. Následovalo PETG, ABS a ASA. Zde bylo dosaženo 6-8 h, stanoveno 8 h. Nejdéle potřebuje sušit Nylon PA12, kde bylo zapotřebí 10-12 h sušení. Stanoveno bylo 12 h. Zajímavého výsledku bylo dosaženo v procentuálním úbytku hmotnosti. Vzhledem k tomu, že vzorky byly připraveny z nově otevřených cívek, byla tato hodnota nad očekáváním, a tedy lze prohlásit, že přímo od výrobce mohou opravdu dorazit tiskové struny s nezanedbatelným podílem vlhkosti.

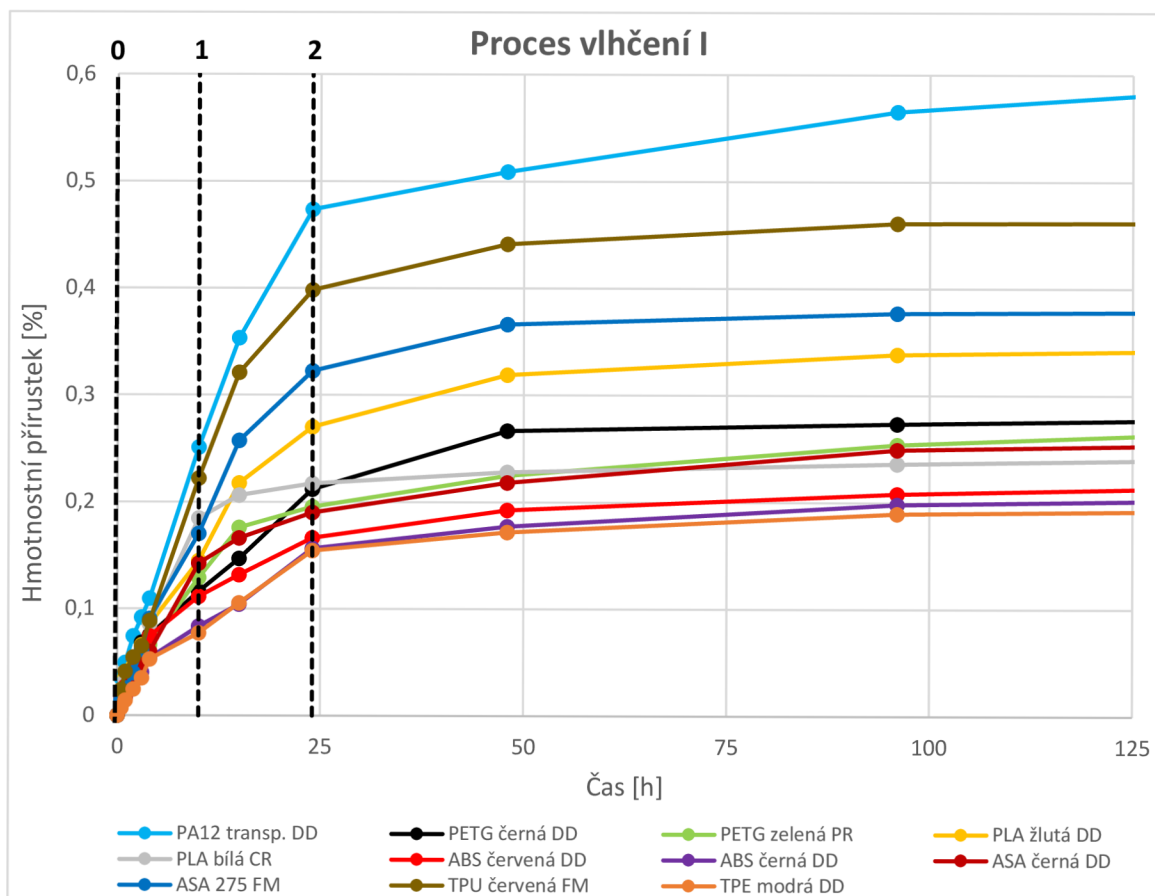
4.2 Proces vlhčení

Během procesu vlhčení byly definovány jednotlivé stavy vlhkosti, ze kterých byly vyráběny samotné vzorky. Vzhledem k průběžným výsledkům a kapacitním možnostem v měřicích laboratořích, bylo upuštěno od znovu vysušeného stavu 4.4. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 6.

Tab. 6 Přehled jednotlivých stavů vlhkosti.

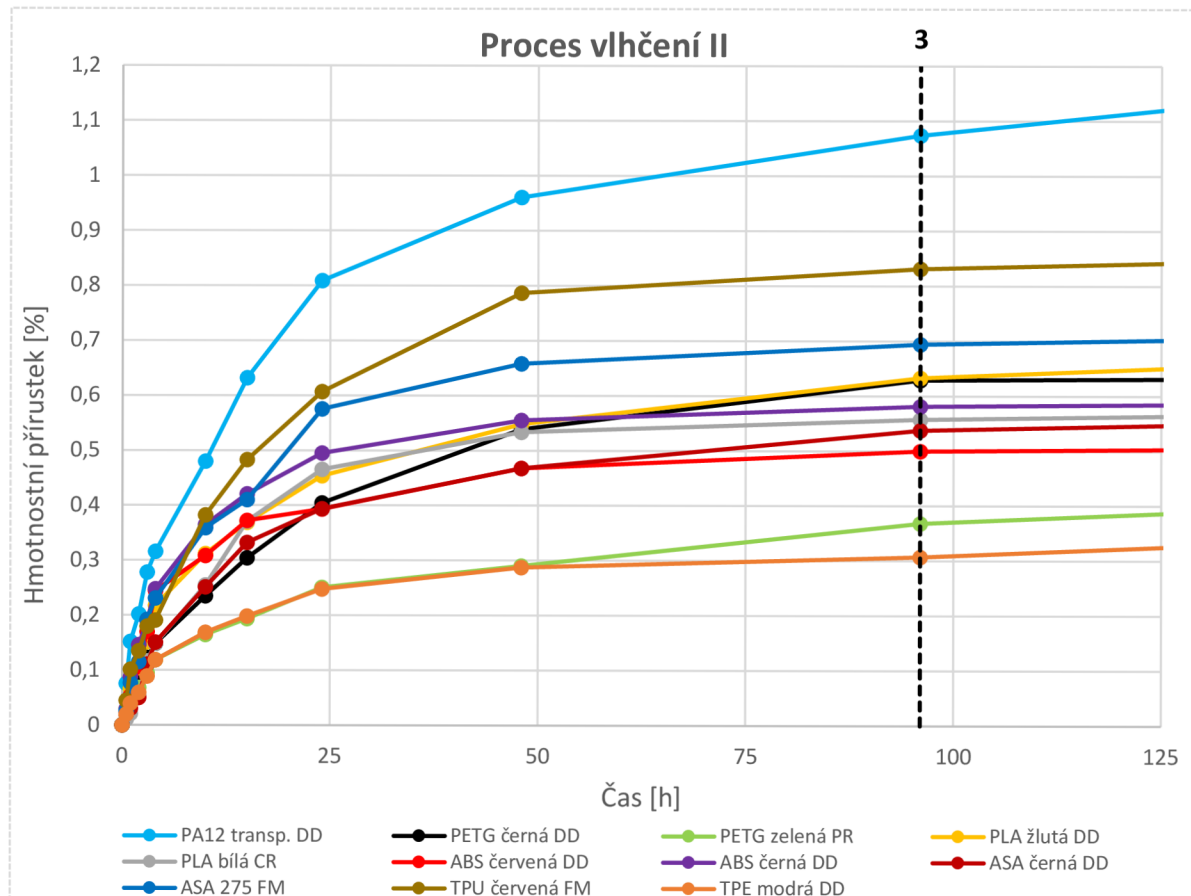
Stav vlhkosti	Čas vlhčení [h]	Proces vlhčení
0	0	I
1 (1.1)	10	I
2 (2.2)	24	I
3 (3.3)	96	II
4	384	II

Jednotlivé stavy vlhkosti byly pro představu o aktuální změně hmotnosti zaneseny do grafických průběhů procesu vlhčení. Svislé přerušované čáry. První z nich je zobrazen na obr. 56. Konkrétní hodnoty byly z důvodu rozsáhlosti zaneseny do příloh této práce. Pro proces vlhčení I jsou uvedeny v příloze 3.



Obr. 56 Průběh procesu vlhčení I.

Během procesu vlhčení I bylo dosaženo zajímavých výsledků ve velikosti hmotnostního přírůstku, a tedy absorpci vzdušené vlhkosti do tiskových strun. Materiál Nylon PA12 dosahoval signifikantně rozdílných hodnot, než bylo očekáváno. Po 384 h sušení dosahoval pouze 0,855 % hmotnostního přírůstku. Očekáváno bylo zhruba 5 % a více. Výrobce Devil Design tak dostal svému tvrzení, že tento PA12 není tak hygroskopický, jako ty od ostatních výrobců. Dalším překvapením byl fakt, že třetím materiálem nejvíce absorbujícím vlhkost byl ASA275 s přírůstkem 0,384 % po 384 h. Stejně tak i PLA dosahovalo vysokých hodnot kolem 0,358 % za 384 h. Překvapením také byl markantní rozdíl mezi flexibilními materiály, kde TPU s hodnotou 0,473 % více než dvojnásobně předčilo TPE s 0,210 %. Ostatní materiály se chovaly dle očekávání. Zajímavých výsledků bylo dosaženo také ve druhém procesu vlhčení vyobrazeném na obr. 57 s konkrétními hodnotami v příloze 4.



Obr. 37 Průběh procesu vlhčení II.

U vzorků zcela ponořených do vody bylo zajímavé sledovat, že průběh většiny zkoumaných materiálů byl stejný, jako v případě procesu vlhčení I. Diametrální rozdíl byl pouze ve velikosti hmotnostního přírůstku, který se vlivem zvýšené relativní vlhkosti znásobil. Například u PETG od DD došlo ke zvýšení o 55, 37 %. Podobných výsledků bylo dosaženo i u většiny ostatních materiálů. Je zde tedy možné pozorovat zajímavou úměru mezi hodnotami v prostředí mezi 50-60 % a ve vodě se 100 % vlhkosti. Téměř dvojnásobný nárůst vlhkosti způsobil podobné zvýšení hmotnosti vzorků. Nejvyšších hodnot pak dosáhl Nylon PA12 s 1,390 % za 384 h. Nejnižších naopak TPE s pouhými 0,377 % za 384 h.

4.3 Výsledky tisknutelnosti

Pro zjištění optimálních nastavení 3D tiskárny pro jednotlivé materiály byly provedeny experimentální testy na vysušených tiskových strunách. Na základě dosažených výsledků z procesu stanovení optimálních parametrů tisku vzešly finální procesní podmínky. Přehled výsledných nastavení je shrnut v následující tabulce tab. 7. Pro všechny vzorky bylo využito separačního aplikátoru na tiskovou podložku ve formě tyčinkového lepidla značky Kores a podložky ze skla o tloušťce 3 mm.

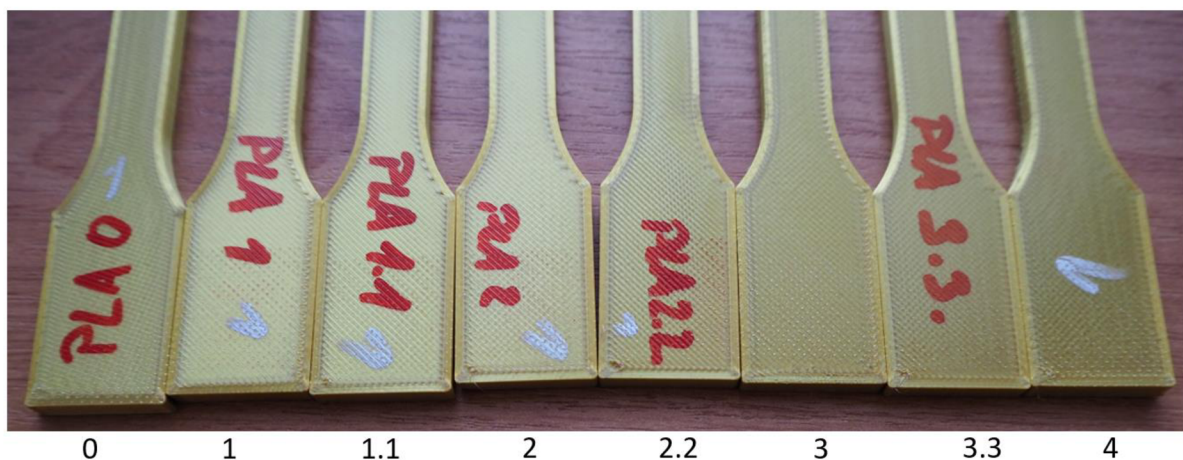
Tab. 7 Výsledky parametrů tisku jednotlivých materiálů.

Materiál	Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]	Rychlost tisku [mm/s]	Velikost chlazení [%]	Velikost retrakce [mm]	Rychlost retrakce [mm/s]
PA 12 DD	255	105	35-45	15	9	45
PETG DD	235	75	45-55	80	10	40
PLA DD	225	60	55-65	100	8	35
ABS DD	240	100	45-55	35	9	40
ASA DD	250	100	45-55	25	9	45

4.3.1 PLA

Tento materiál se řadí mezi základní pro běžné uživatele 3D tisku. Jednoduchost tisknutelnosti bylo možné pozorovat také během experimentálního stanovení procesních parametrů. Při tisku testovacích modelů nebylo pozorováno žádných nestandardních jevů, které by měly zásadní negativní vliv na kvalitu tisku. Vzhledem k přítomnosti přísad ve verzi pla s označením *hevbábi (silk)*, byla odlišná teplota tisku od standardních nastavení klasických materiálů. Ta se pohybovala zhruba o 20 °C výše. Tato hodnota byla v intervalu udávaným výrobcem. Přísady měly prokazatelný vliv na vysokou lesklost celého povrchu, ovšem výrobci tiskových strun se snaží konkrétní detaily skrýt. Běžně tak nastává, že stejná barva různých výrobců s označením *silk* dosahuje značně odlišných výsledků lesklosti.

Kvalita testovacích vzorků zůstala neměnná. Během tisku nebyly pozorovány typické projevy vlhkosti. Tomu odpovídal i výsledek povrchu. Zároveň nedošlo ani k degradaci rozměrů.



Obr. 58 Porovnání kvality tisku PLA na vzorcích pro tahovou zkoušku.

4.3.2 ABS, ASA

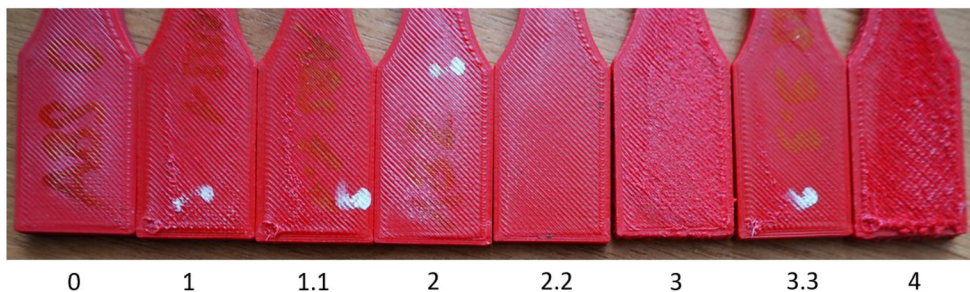
U obou těchto materiálů bylo obtížné stanovení optimální teploty tisku a velikost chlazení. Při nízkých teplotách docházelo ke špatné adhezi jednotlivých vrstev a výtisky tak byly znatelně křehké. Naopak při nadměrném nastavení teplot tisku docházelo k propadům jednotlivých vrstev či tvořením vystouplých defektů. Stávalo se tak, že při zchladnutí tohoto výstupku během následujícího průchodu trysky došlo ke kontaktu, což vedlo k přeskočení řemenů nebo utržení výtisku. Bylo tak velmi důležité určit optimální velikost chlazení, které napomáhalo zabránit tomuto jevu. Rozdíl mezi teplotami na trysce činil 10 °C a v chlazení také 10 %.

Vzhledem k obsahu dvou stejných látek ze tří, tedy akrylonitrilu a styrenu, je možné dedukovat, že s přítomností uhlovodíku butadien dochází k nižší potřebě nastavení vysokých teplot. Zároveň díky přítomnosti styrenu během tisku obou těchto materiálů docházelo ke zdatnému zápachu. Obecně lze však říci, že vytvořené tiskové profily odpovídaly standardním procesním parametrům udávaných výrobcí. Na obr. 59 je nedotisknutá teplotní věž z ASA z důvodu ucpání trysky nečistotami ve filamentu.

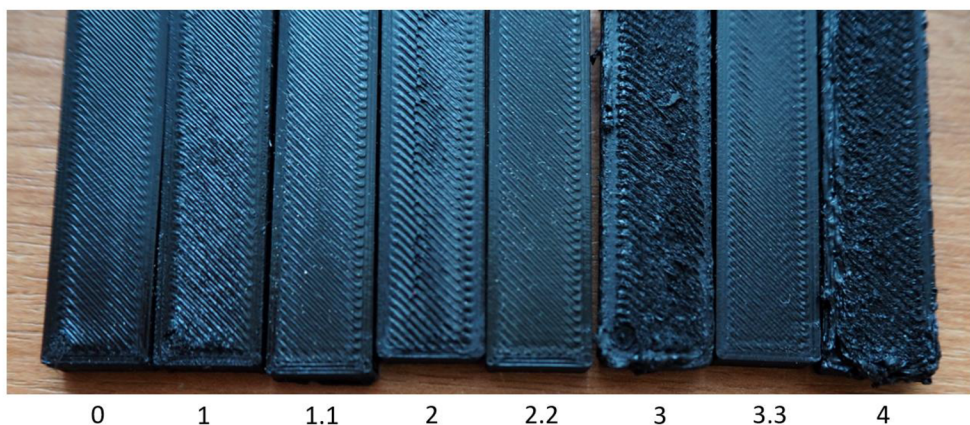


Obr. 59 Teplotní věž ASA.

U samotných vzorků obou materiálů bylo pozorováno rapidní zhoršení kvality tisku. Od vlhkostního stavu 3, tedy 96 hodin po započítání vlhčení bylo zaznamenáno nekonzistentní vrstvení a tahání jednotlivých vláken materiálu. Naopak opětovně vysušené stavy 1.1, 2.2. a 3.3 vykazaly obdobné výsledky, jako vysušený stav 0. Bylo dokázáno, že opětovné vysušení nezanechává negativní vliv na kvalitu tisku.



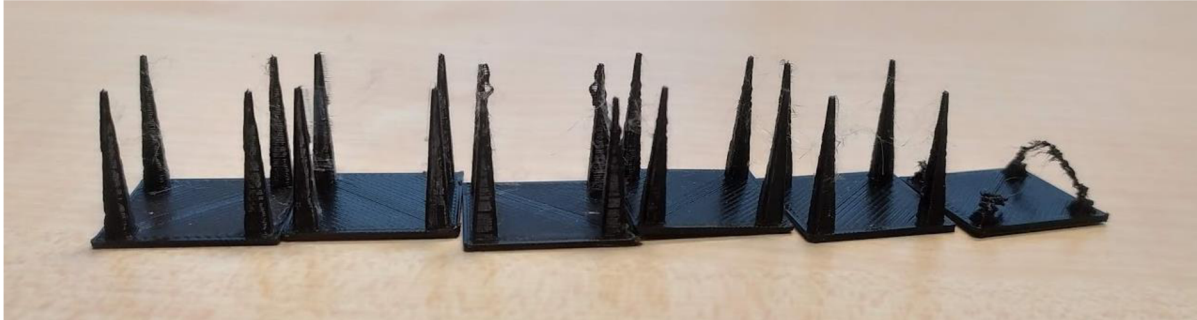
Obr. 60 Vzorky tahové zkoušky z ABS.



Obr. 61 Vzorky vrubové houževnatosti z ASA.

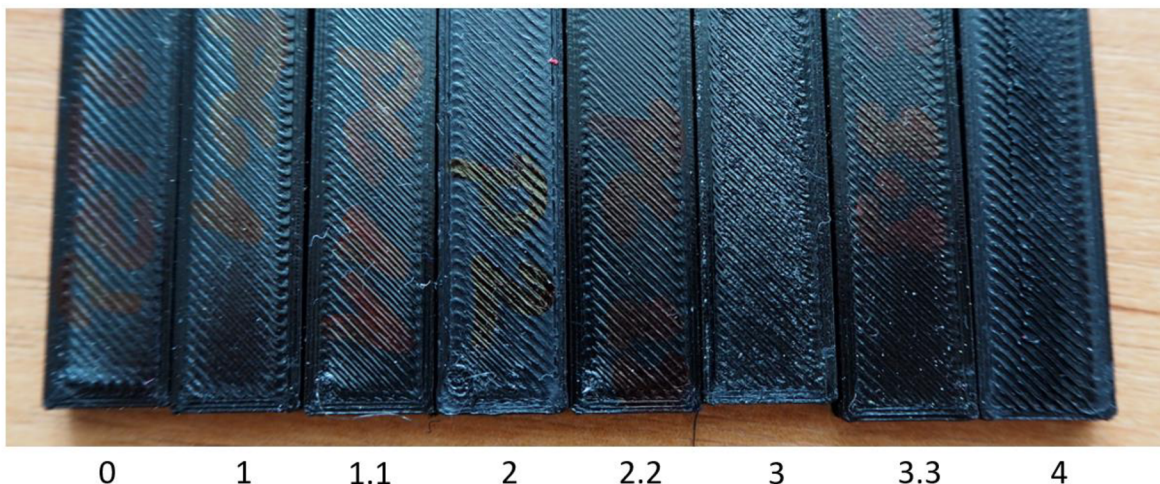
4.3.3 PETG

Během tvorby tiskových profilů s tímto materiálem bylo možné pozorovat značné tahání vlásečnic. Úprava nastavení retrakcí nebyla dostačující a během definovaných iterací nebylo dosaženo uspokojivých výsledků, obr. 62. Největší vliv na tento negativní jev měla až zpětná úprava teploty, které oproti určené optimální hodnotě z testů teplotní věže byla snížena o 10 °C. Celková nastavená teplota tak byla určena na 230 °C, což je v intervalu výrobce, avšak běžné teploty tisku s těmito filamenty činí více než 250 °C.



Obr. 62 Retrakční věže z PETG.

PETG vykázalo lepší výsledky, než ABS či ASA. Byl pozorovaný mírný vliv na kvalitu tisku ve vlhkostních stavech 3 a 4. Zejména v nehomogenním vrstvení jednotlivých tahů. Obr. 63.

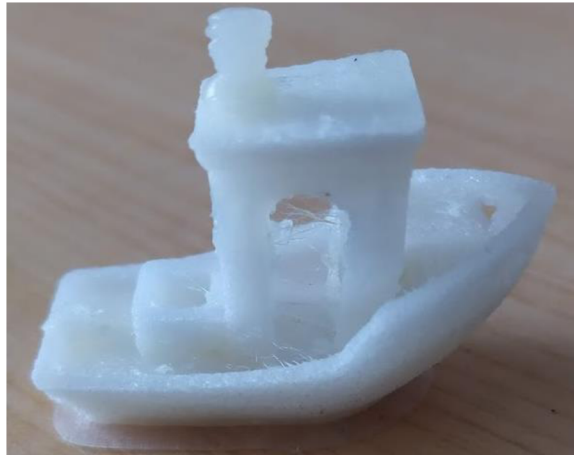


Obr. 63 Porovnání vzorků z vrubové houževnatosti.

4.3.4 NYLON

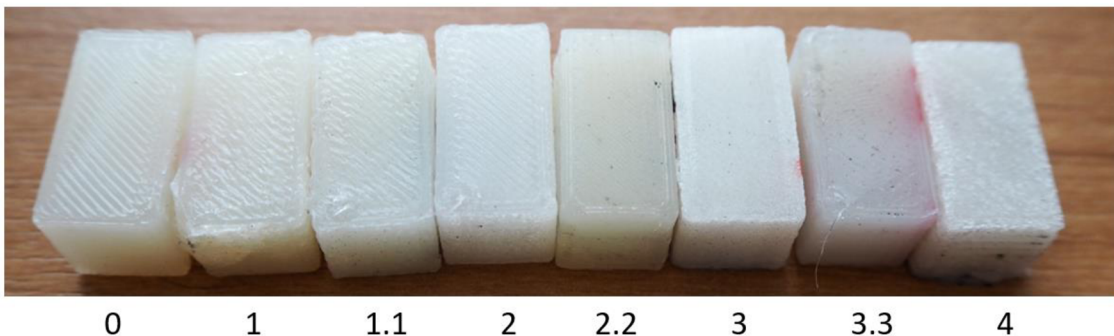
Během vytváření tiskového profilu pro materiál Nylon PA12 bylo zapotřebí vytisknout více iterací vzorků než u předešlých materiálů. Docházelo k častému kroucení a odlepování testovacích modelů od podložky. Proto bylo přistoupeno k využití dek upevněných v horní části 3D tiskárny. Tyto deky zabraňovaly průchodu chladného vzduchu do okolí tisku a zároveň napomáhaly stabilizovat vnitřní teplotu. Opět tak byla prokázána teze, že pro tisk rozměrnějších dílců z PA12 je stěžejní využít tiskových komor ideálně s aktivním vyhříváním prostoru. Dosažené výsledky byly v rozsahu daných výrobcem. Zároveň pro všechny zkušební testy bylo navíc využito funkce *brim*.

Kvalita tisku odpovídala běžným podmínkám při experimentálním stanovení procesních parametrů a nijak zvlášť nevybočovala. První testy však ukázaly silnou navlhavost PA12. Již při vytváření tiskových profilů bylo pozorováno navlhnutí materiálu a tím zhoršení tiskové kvality, jako je na obr. 64.



Obr. 64 Kontrolní lodička z Nylonu PA12.

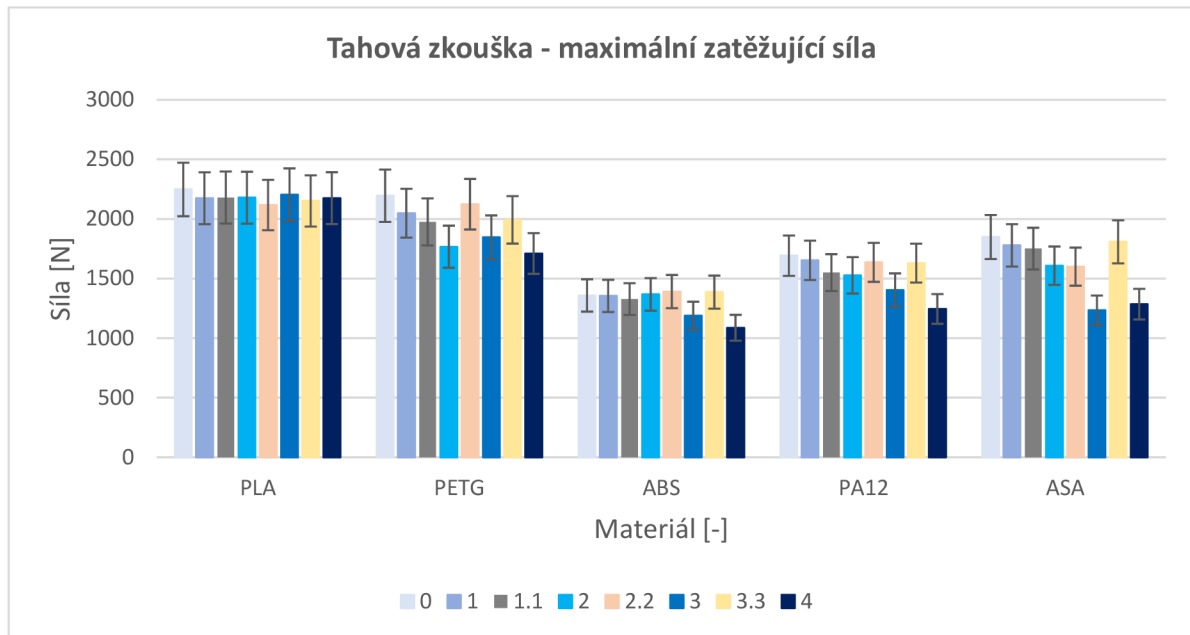
Nylon PA12 zaznamenal rapidní změnu v kvalitě tisku. Stav 3 a 4 vykazovaly zrnitý povrch. Bylo také pozorováno změny barvy, kdy vysušené vzorky byly nažloutlé, kdežto s přibývajícím vzdušnou vlhkostí vysvitly. Během tisku se také objevovaly vypoukliny na stěnách dílců, které byly zapříčiněny vysokými teplotami tisku.



Obr. 65 Výsledky tisknutelnosti z Nylonu PA12 na vzorcích pro zkoušku tvrdosti.

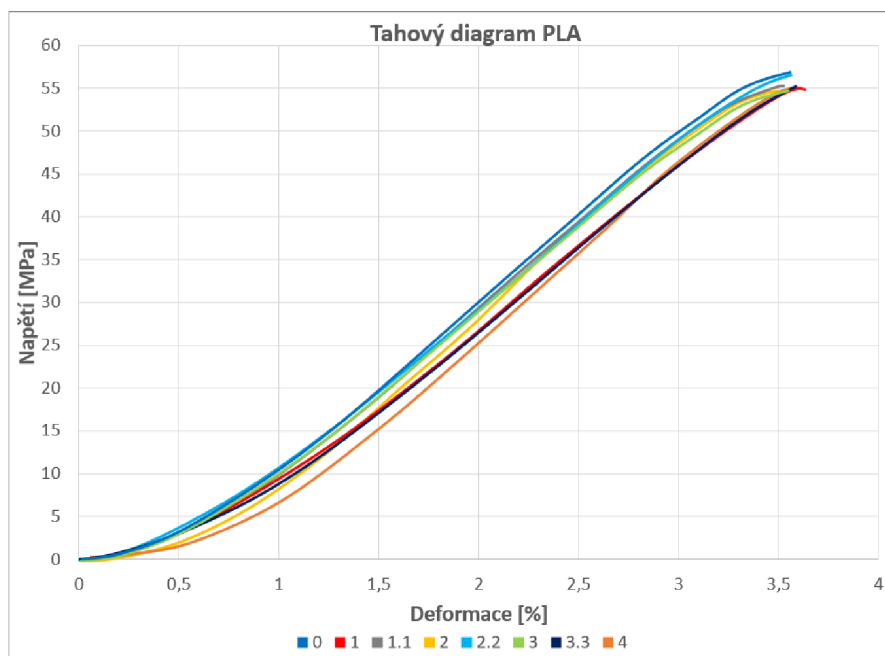
4.4 Tahová zkouška

Během hledání meze pevnosti tahovou zkouškou dle normy ČSN EN ISO 527 došlo k přetržení celkem 74 vzorků z 80 testovaných. Z testovaných materiálu nedošlo k přetržení u Nylonu PA12 ve 3 stavech vlhkosti. Dosažené průměrné výsledky naměřené ve 2 iteracích maximálních zatěžujících sil jsou přehledně uvedeny na obr. 66. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v příloze 5.

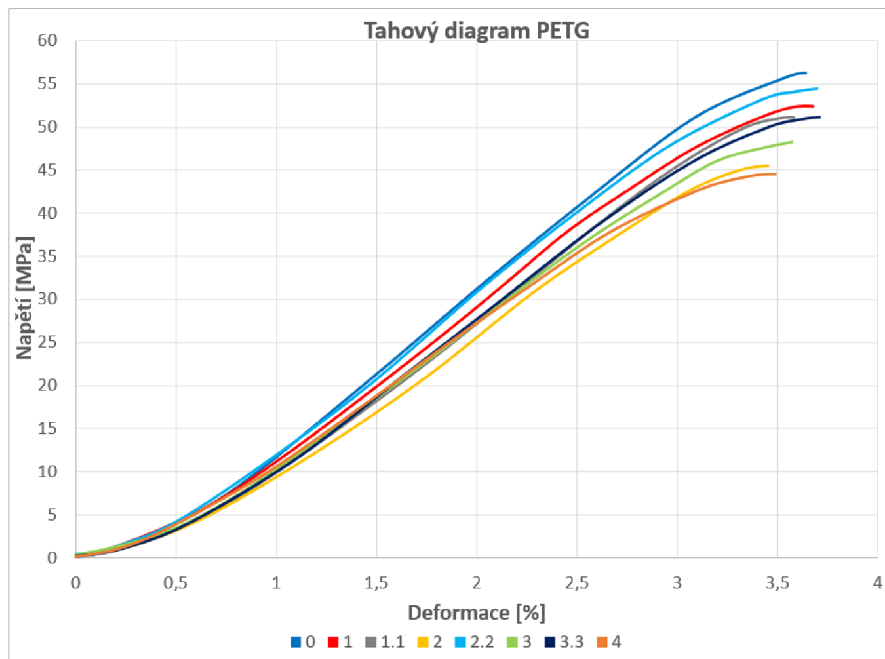


Obr. 66 Výsledky maximálních zatěžujících sil během tahové zkoušky.

Z uvedených výsledků vyplývá, že nejvyšší dosažené hodnoty síly potřebné k přetržení zkušebního tělesa dosáhl materiál PLA. Ve stavu 0 dosáhl hodnoty 2 247, 42 N. To je o 51,64 % více, než v případě ABS ve stavu 4, kde bylo naměřeno naopak nejnižších hodnot síly a to 1 087, 02 N. Průběh zatížení během tahové zkoušky byl ve všech případech sledován do bodu dosažení meze pevnosti a byl vyhotoven pro střední hodnotu naměřenou ze 2 zkušebních iterací. U materiálů PLA na obr. 67 a PETG na obr.68 bylo sledováno obdobných průběhů napříč všemi stavy vlhkosti.

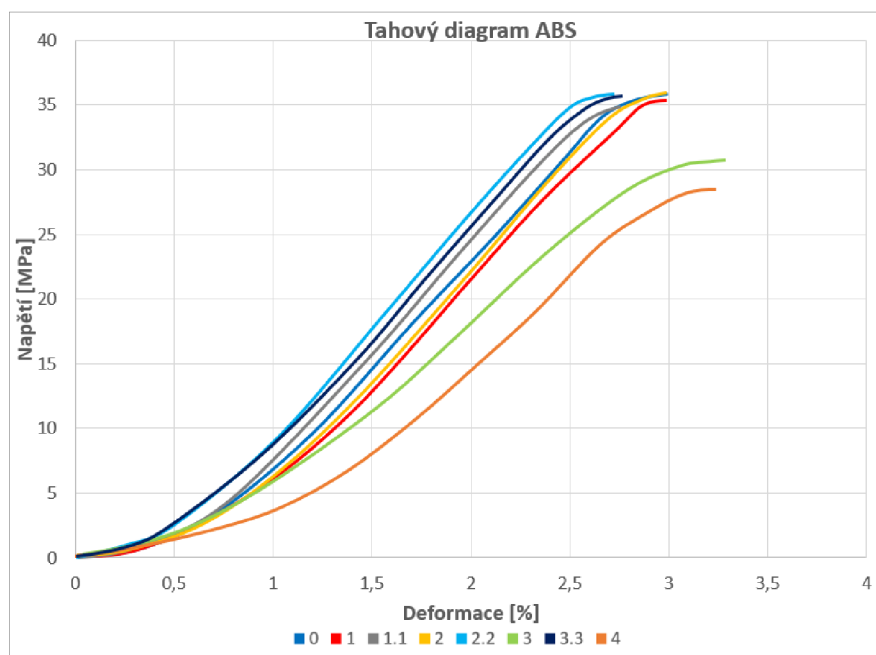


Obr. 67 Průběh tahové zkoušky PLA.

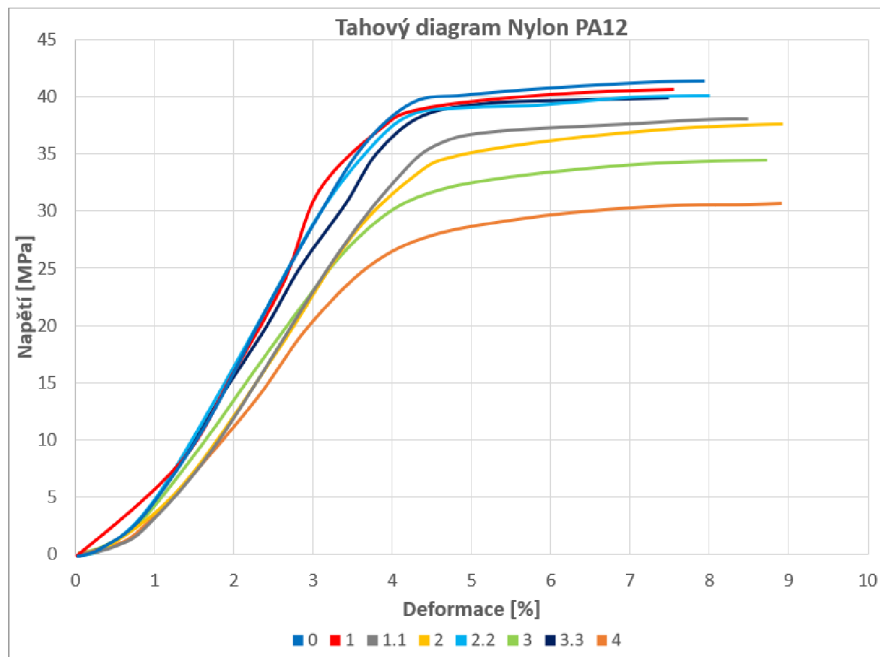


Obr. 68 Průběh tahové zkoušky PETG.

Z výsledků je patrné, že u materiálu PLA nebyl zaznamenán téměř žádný vliv nasycením vlhkosti. Všechny testované vzorky se chovaly konstantně a bylo dosaženo obdobných výsledků napětí a velikosti deformace. To je patrné způsobeno faktem, že PLA nejlépe odolalo vlivu vlhkosti na samotný tisk. Naproti tomu u PETG byl zaznamenán značný pokles v mezi pevnosti. Bylo dosaženo rozdílu napětí ve velikosti 22,08 % mezi nejvyšší hodnotou stavu 0 a nejnižší stavu 4. Materiál vykazoval postupnou tendenci snižování meze pevnosti vzhledem k nasyceným stavům vzdušnou vlhkostí. Zároveň nebyl prokázán vliv opakovaného procesu sušení na zhoršení meze pevnosti. Na dalších snímcích je zobrazen průběh ABS, na obr. 69 a Nylonu PA12, obr. 70.

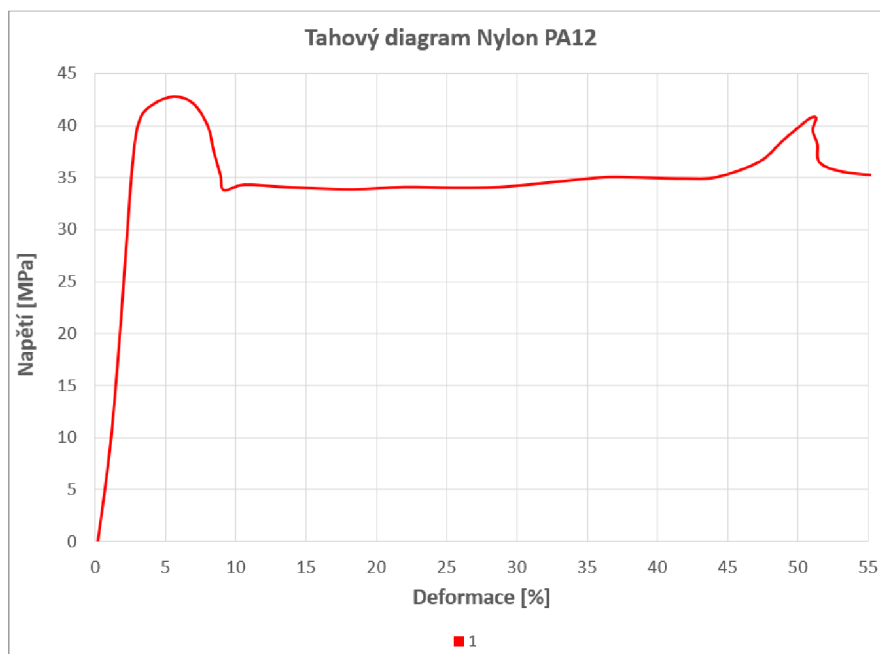


Obr. 69 Průběh tahové zkoušky ABS

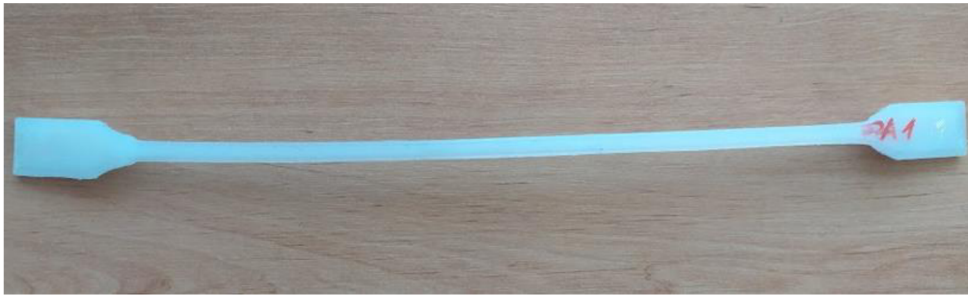


Obr. 70 Průběh tahové zkoušky Nylon PA12.

U ABS i Nylonu PA12 bylo zaznamenáno znatelného poklesu napětí, a tedy meze pevnosti. Pro ABS nejvyšší rozdíl činil 21,83 % mezi nejvyšší hodnotou opětovně vysušeného stavu 2.2 a nejnižší ve stavu 4. Zároveň je možné sledovat téměř 0,5 % změny deformace u navlhčlých stavů 3 a 4. Nylon PA12 dosáhl nejvyšších hodnot deformace, která se přibližovala 9 % ve vlhčených stavech 2 a 4. Rozdíl meze pevnosti stavu 0 a 4 je 26,43 %. PA12 byl zároveň jediný materiál, u kterého nedošlo k přetržení celkem 6 vzorků ve 3 stavech vlhkosti, konkrétně 1, 2.2 a 3.3. Jeden ze zkušebních vzorků ve stavu 1 byl podrobněji prozkoumán. Na obr. 71 je znázorněn průběh deformace a na obr. 72 je samotný testovaný vzorek.



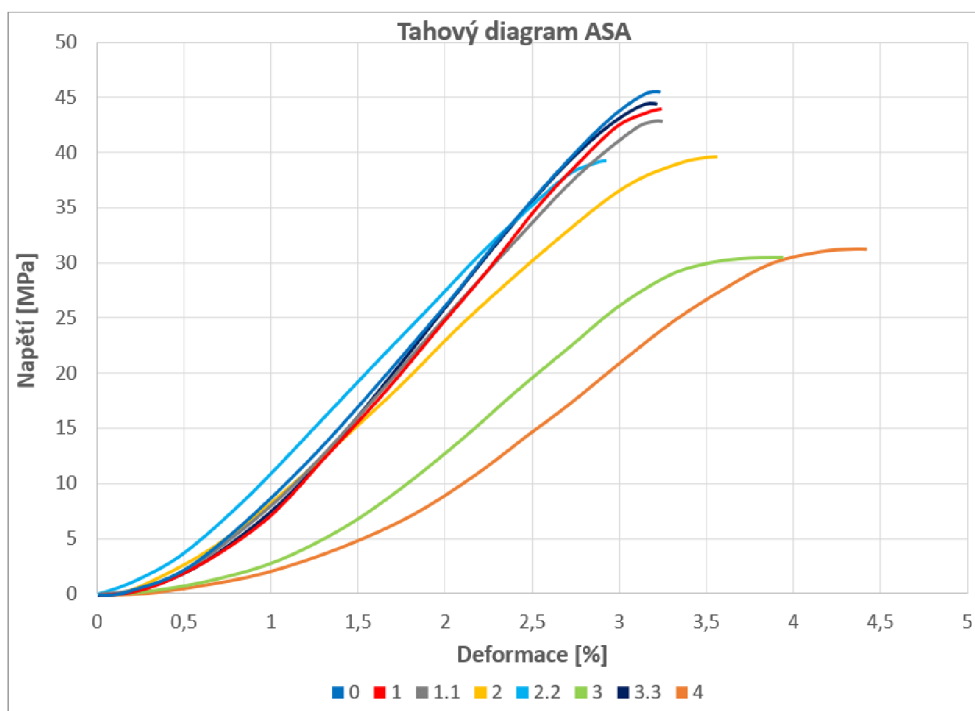
Obr. 71 Detail průběhu tahové zkoušky PA12 ve stavu 1.



Obr. 72 Testovaný vzorek ve stavu 1 z PA12.

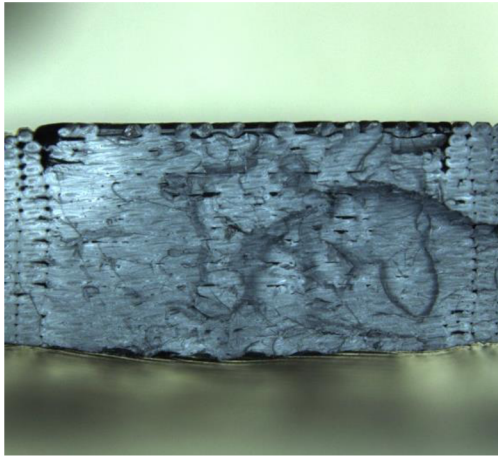
Z obrázků je patrná masivní míra poměrné deformace dílce. Zejména zajímavé je opětovné navýšení napětí kolem 50 % deformace. V tento moment došlo na dílci k vyčerpání vláken obsažených ve zúžené části vzorku a na zatížené straně došlo k napojení vláken ze širší části dílce. To se posléze projevilo vytvořením silnějšího krčku a dočasného skokového navýšení potřebné zatěžující síly.

Nejmarkantnějších rozdílů bylo dosaženo u materiálu ASA. Ten vykázal pokles v mezi pevnosti mezi nejvyšší ve stavu 0 a nejnižší ve stavu 3 ve velikosti 33,22 %. Bylo dosaženo také nejznatelnějšího rozdílu v deformaci. Ta mezi nejnižší hodnotou ve stavu 2.2 a nejvyšší ve stavu 4 činila rozdíl 1,5 %. To je hodnota o 0,25 % vyšší než v případě PA12. Průběh zatížení ASA je znázorněn na obr. 73.

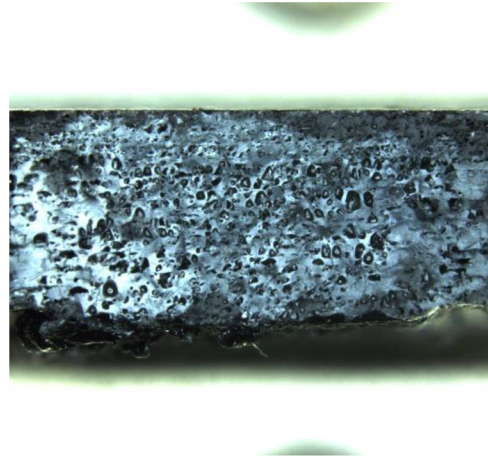


Obr. 73 Průběh tahové zkoušky ASA.

Pro pochopení důvodu poklesu meze pevnosti u dílců vyrobených z navlhnutých filamentů bylo na strojích Zeiss Discovery V20 a Zeiss Gemini Sigma 300 VP provedeno vyhodnocení makrostruktury lomu. Vzhledem k dosaženým výsledkům a použití barev byl vybrán materiál ASA, na kterém byly dobře rozeznatelné změny ve struktuře lomu. Na obr. 74 je znázorněna makrostruktura lomu materiálu ASA ve vysušeném stavu 0 a na obr. 75 v navlhčeném stavu 4.

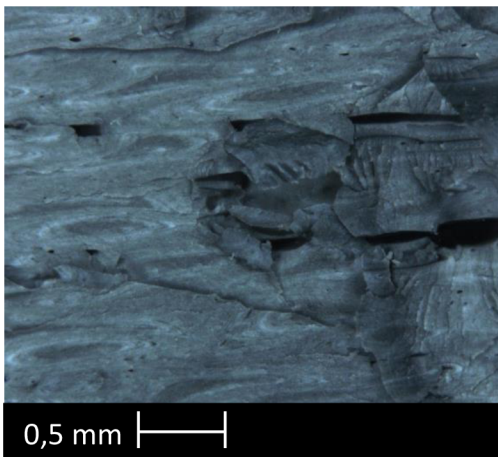


Obr. 74 Lom vysušeného ASA ve stavu 0.

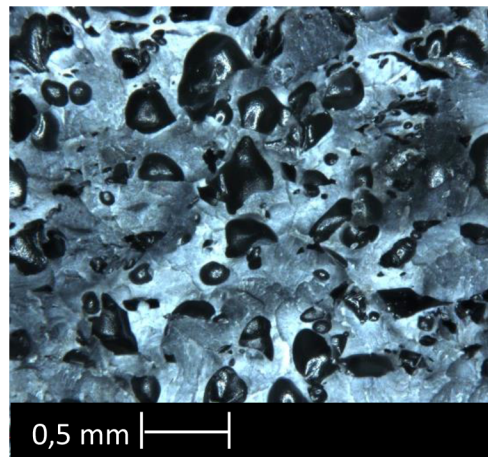


Obr. 75 Lom navlhnutého ASA ve stavu 4.

Na snímcích je pozorovatelný markantní rozdíl mezi strukturou lomu vytištěného dílce z vysušeného filamentu vůči navlhnutému. Ve druhém případě zcela vymizely vrstvy perimetrů, které jsou u suchého stavu pozorovány. Je zřejmá četnost vytvořených bublin během tisku, které se utvořily expanzí molekul vody. Vzorky také vykazují známky křehkého lomu, nedochází ke koncentraci a zhuštění materiálu. Detaily lomů jsou blíže pozorovány na obr. 76 v případě stavu 0 a na obr. 77 ve stavu 4.

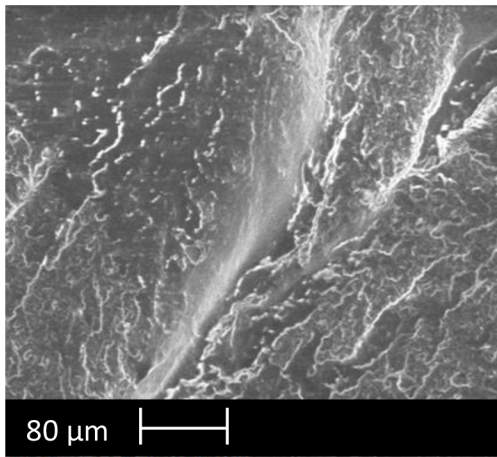


Obr. 76 Detail lomu ASA stavu 0.

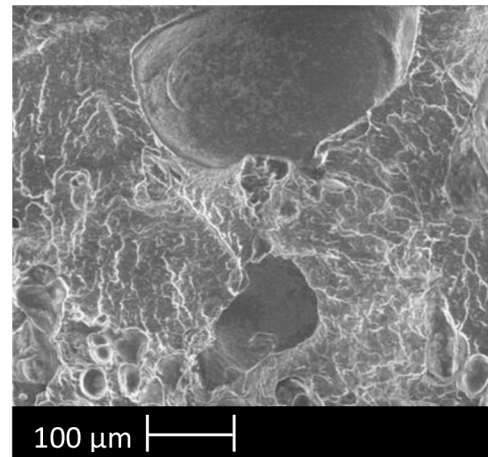


Obr. 77 Detail lomu ASA stavu 4.

V detailech je jasně patrná velikost změny plochy u stavu 4. Ta nastala vytvořením vzduchových bublin ve struktuře materiálu. To má negativní vliv na soudržnost vrstev. Chybějící materiál v příčné ploše lomu tak má za následek pozorovatelné snížení meze pevnosti. Na obr. 78 je pak znázorněno šíření trhlin v jádru vzorku u vysušeného stavu 0, pro porovnání je přidán také detail ve stavu 4 na obr. 79.

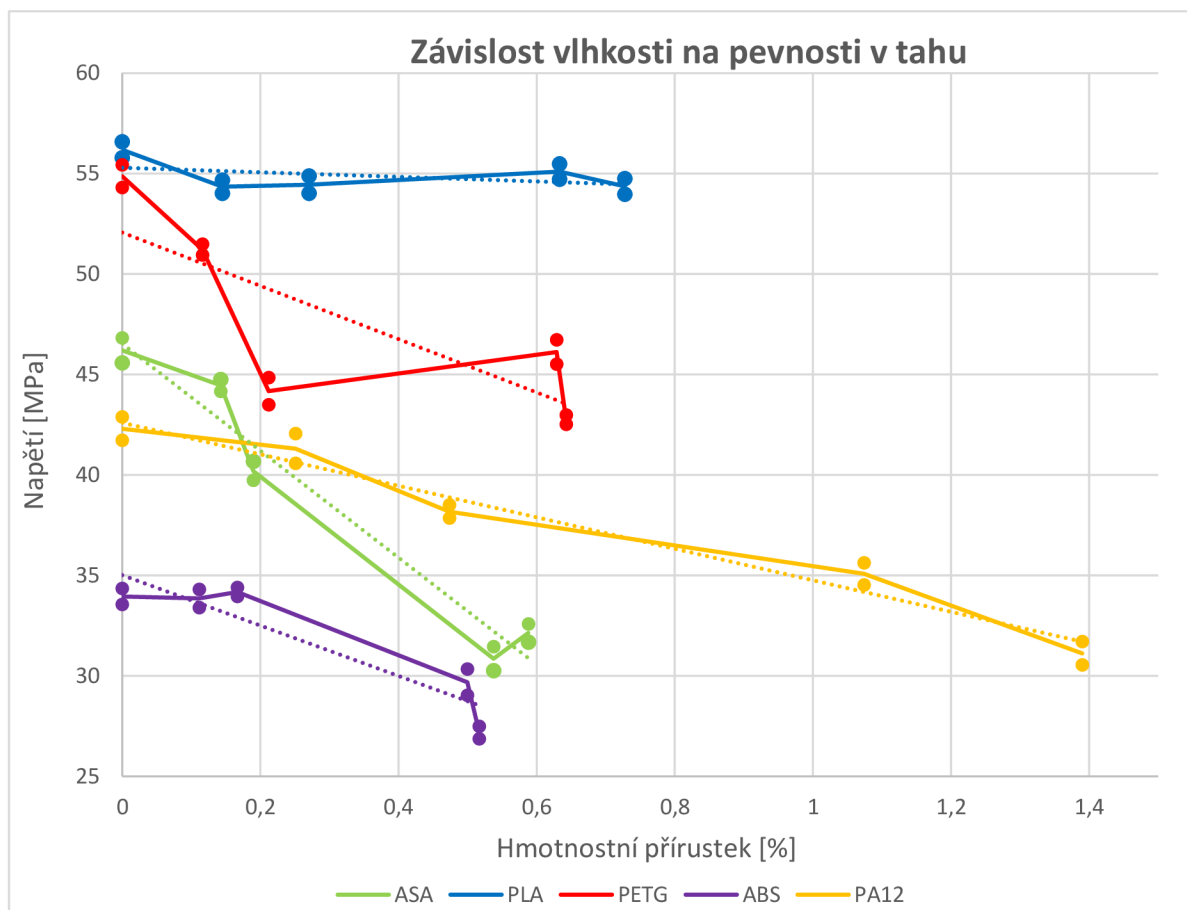


Obr. 78 Šíření lomu ASA ve stavu 0.



Obr. 79 Šíření lomu ASA ve stavu 4.

Ve stavu 0 je možné pozorovat koncentrované šíření svazků mikrotrhlin vycházejících z jedné hlavní trhliny ve směru zatížení. Výsledky vykazují standardní průběh lomu. Naopak u dílce ze stavu 4 je patrné šíření trhlin všemi směry vycházejících z okolí vzduchových kapes. Zde jsou vytvořeny koncentrátoři napětí, které se během lomu uvolnilo. Za účely pozorování postupných pevnostních vlastností v závislosti na množství absorbované vzdušné vlhkosti v tiskových strunách byl vytvořen graf na obr. 80, který tuto závislost definuje.



Obr. 80 Graf závislosti vlhkosti na pevnosti v tahu.

Z výsledků je možné pozorovat trend vlivu vlhkosti na výslednou pevnost dílců v tahu. Nejstrmější pokles byl zaznamenán u materiálu ASA. Následují ABS a PETG, které vykazují obdobný průběh. PA12 zaznamenal relativně lineární pokles pevnosti. Nejstabilnějším materiálem se stalo PLA, to téměř nezaznamenalo žádný pokles. Z dostupných výsledků z experimentální fáze vlhčení nastává předpoklad, že pevnostní vlastnosti se nadále takto rapidně zhoršovat nebudou vzhledem k téměř dosaženým stavům nasycení.

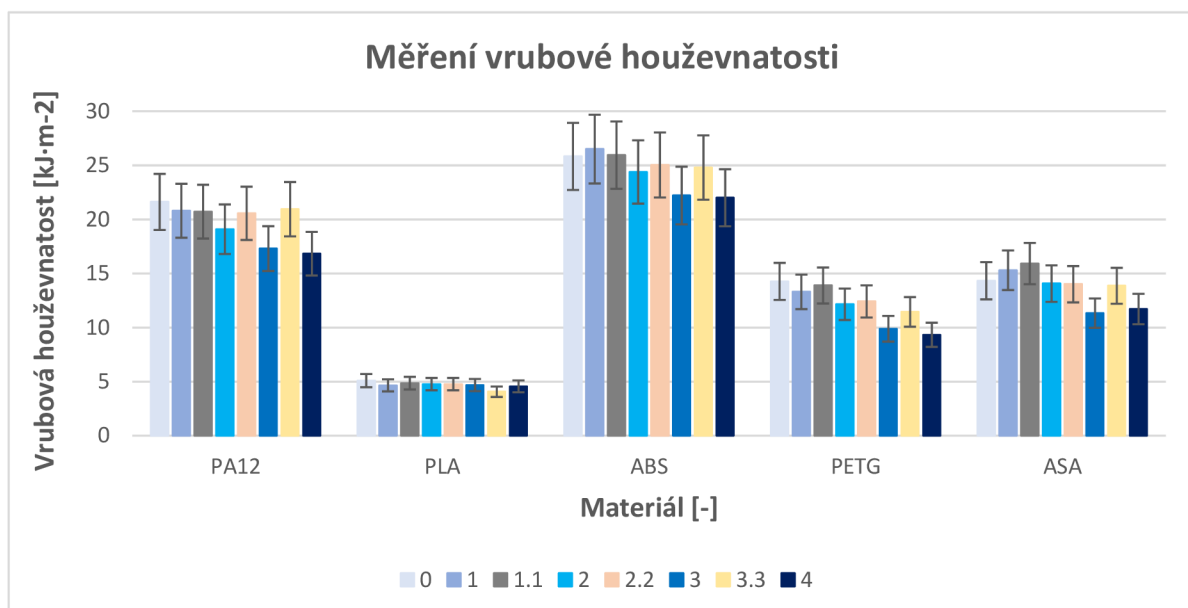
4.5 Rázová zkouška

Před samotným měřením testovacích vzorků proběhlo určení ztrátové energie mechanismu vlivem tření. To proběhlo v pěti iteracích. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v tab. 8. Dosažené výsledky průměrné hodnoty \bar{x} bylo zapotřebí odečíst od všech následujících naměřených výsledků.

Tab. 8 Hodnoty jednotlivých měření ztrátové energie.

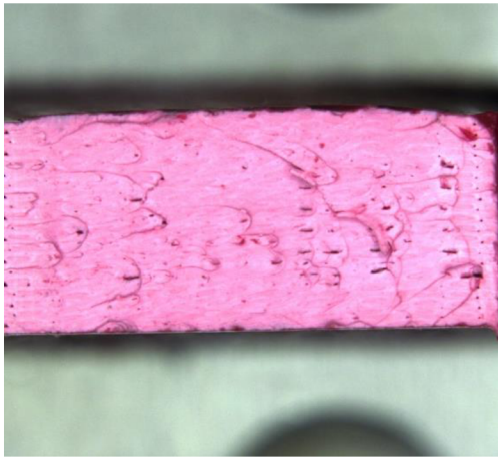
Pořadí měření	Energie tření [J]
1	0,013
2	0,013
3	0,013
4	0,013
5	0,012
\bar{x}	0,0128

Během testování vrubové houževnatosti dle normy ČSN EN ISO 179-1 s využitím zkušebního rázového Charpyho kladiva 2,7 J došlo k úspěšnému přeražení všech 80 zkušebních vzorků s vytvořenými vruby. Postupným testováním tak byly stanoveny jednotlivé měrné kinetické energie vynaložené k přeražení zkušebních těles. Bylo dosaženo přeražení typu C, tedy úplného. Uvedené výsledky na grafu z obr. 81 ukazují dosažené hodnoty vrubové houževnatosti. Výsledky byly dosaženy s orientací upevnění dílu typu edgewise (e). Byla díky vrubu stanovena pro plochu o šířce $8,5 \pm 0,2$ mm na $4 \pm 0,2$ mm. Konkrétní hodnoty jsou v příloze 6.

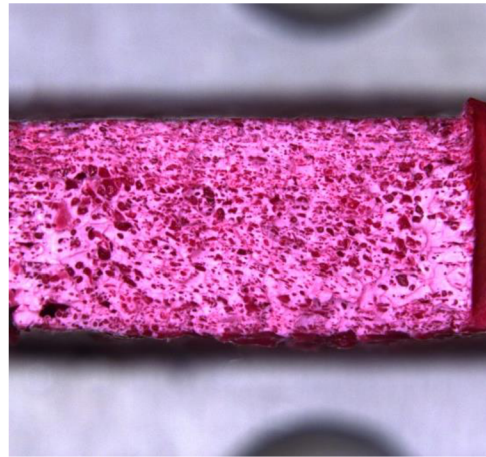


Obr. 81 Graf naměřených průměrných hodnot vrubové houževnatosti.

Z dat uvedených výše vyplývá pozorovatelný vliv vlhkosti na vrubovou houževnatost testovaných vzorků. Ta se nepřímo projevila postupným snížením houževnatosti. Nejvyšších hodnot dosáhlo překvapivě ABS oproti předpokládanému Nylonu PA12. Nejvyšší dosažená hodnota činila $26,50 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ u stavu 1, což je o 84,68 % více než v případě nejkřehčího PLA s $4,06 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ve stavu 3.3. Dalším překvapivým výsledkem byl fakt, že ABS dosahovalo cca o 39,96 % vyšších maximálních hodnot než ASA, která obsahuje 2 totožné stěžejní prvky, jako ABS, a to styren a akrylonitril. Z tohoto důvodu byly za účely pozorování obou materiálů vytvořeny makrosnímky přibližující procesy ve struktuře dílců během přeražení. Na obr. 82 je zachycen lom vysušeného ABS ve stavu 0, na obr. 83 naopak detail lomu z navlhnutého ABS ve stavu 4. Zachycený detail naznačuje, že se opravdu jednalo o úplný křehký lom. Nejsou vykazovány znatelné prvky houževnatého přeražení.

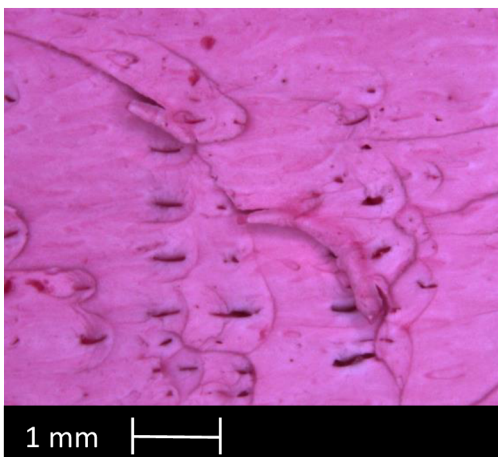


Obr. 82 Lom vysušeného ABS ve stavu 0.

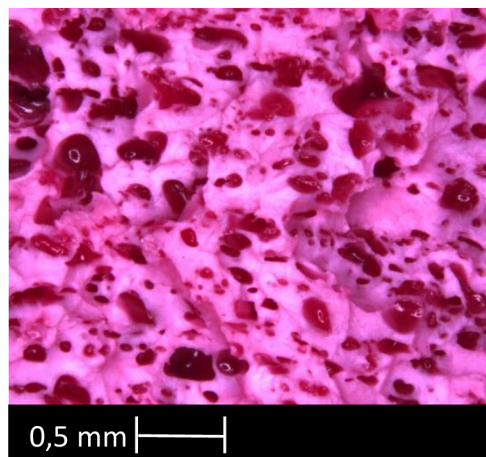


Obr. 83 Lom navlhnutého ABS ve stavu 4.

Na výše zmíněných snímcích je pozorovatelná markantní změna ve struktuře lomu po vytištění dílce navlhnutým filamentem. V jádru se objevují znatelné vzduchové kapsy. Ty zapříčiňují snížení plochy průřezu a tím také zhoršení vlastností houževnatosti dílce. Ten se tak stává křehčím a náchylnějším k poškození. Na obr. 84 je zachyceno šíření lomu zleva ve směru k vrubu. Materiál byl průchodem kladiva vytržen a vlečen dále ve směru rázu. Při detailnějším pohledu jsou více patrné přerušené překrytí vnitřní výplně, která byla nastavena v úhlech od -45° do $+45^\circ$. Na obr. 85 je tato výplň značně zkreslena vytvořením vzduchových bublin.



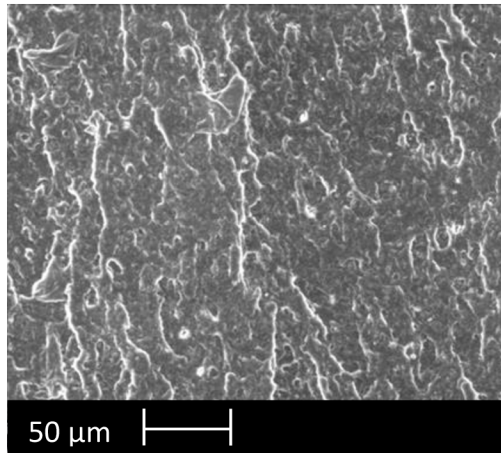
Obr. 84 Detail lomu ABS ve stavu 0.



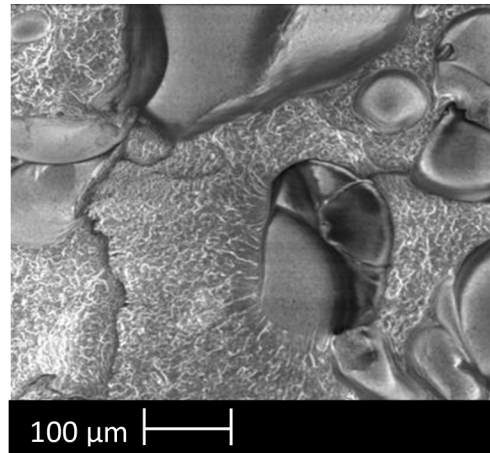
Obr. 85 Detail lomu ABS ve stavu 4.

Pro účely pochopení šíření lomu byly na profesionálním stroji Zeiss Gemini Sigma 300 VP vytvořeny detailnější makro snímky lomu. Na obr. 86 je možné pozorovat koordinované šíření trhlin ve svazcích, které postupují ve směru inicializace zatížení.

Snímek nevykazuje žádné anomálie. Zajímavějších výsledků bylo dosaženo v makro struktuře u stavu 4 na obr. 87. Zde se vyskytuje patrné šíření trhlin vycházející od vytvořených vzduchových mezer, které se navíc šíří nekoordinovaně, avšak ve směru zatížení.

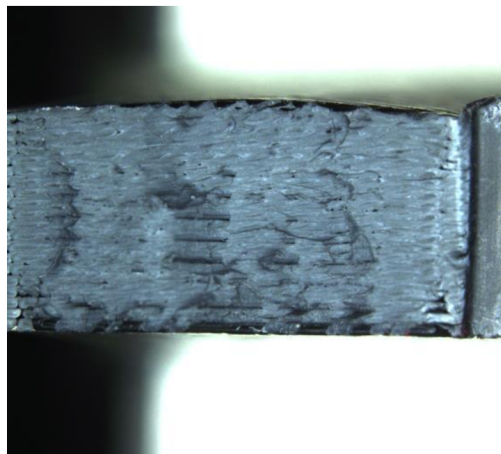


Obr. 86 Detail trhlin ABS ve stavu 0.

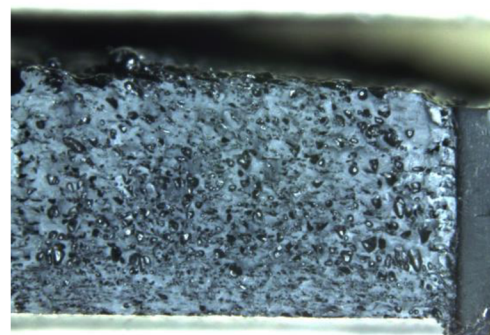


Obr. 87 Detail trhlin ABS ve stavu 4.

Pro možné odhalení možných příčin tak markantních výsledků mezi oběma materiály, byly pořízeny makro snímky také pro ASA. Na snímku z obr. 88 je zachycen detail šíření lomu ve vysušeném stavu 0. Oproti ABS snímek nevykazuje nic zvláštního, naopak je zjevná větší pravidelnost šíření v celém průřezu vzorku. Oproti tomu z obr. 89 je patrné dosažení častějších vzduchových mezer o větší velikosti.

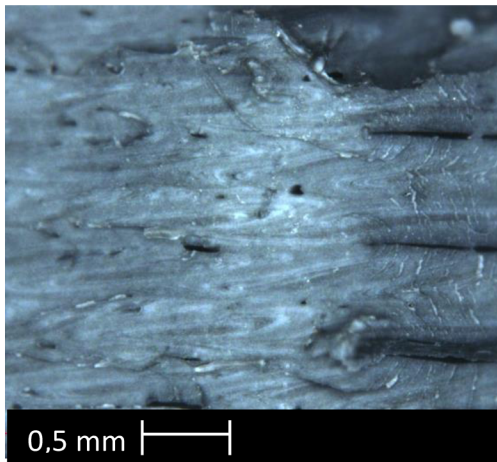


Obr. 88 Lom vysušeného ASA ve stavu 0.

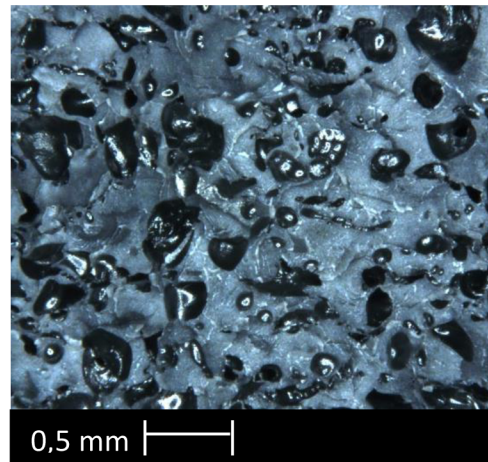


Obr. 89 Lom navlhnutého ASA ve stavu 4.

Snímkem na obr. 90 je detailněji přiblíženo vrstvení vnitřní výplně. Paradoxně se zdá být napojení vrstev více homogenní, než stejný detail na obr. 84 v případě ABS. Prokázání častějšího výskytu rozměrnějších mezer dokazuje snímek na obr. 91. Na snímku je zachyceno i celkově rozsáhlejší propojení. To ovšem nevysvětluje, proč téměř polovičních výsledků oproti ABS dosahuje také vysušený stav 0, který se zdá být naopak celistvější.

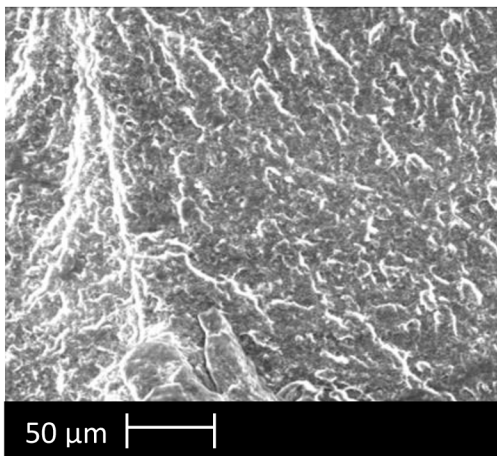


Obr. 90 Detail lomu ASA ve stavu 0.

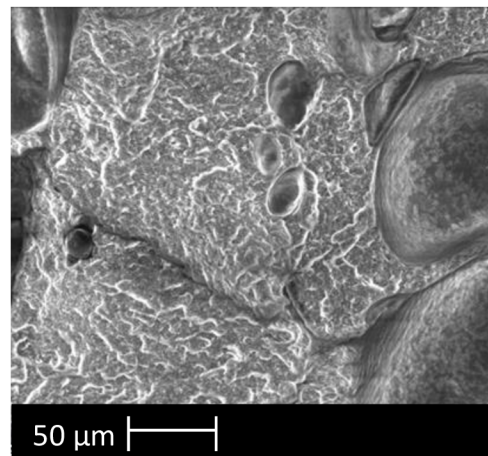


Obr. 91 Detail lomu ASA ve stavu 4.

Možná odpověď přišla při detailním pohledu na makro snímky. Na levém obrázku 92 je zachyceno šíření vlásečnic od inicializace lomu, které vykazuje značně zvýšené množství, ale hlavně šířku mikrotrhlin. To samé je možné pozorovat i v případě vlhčeného stavu 4 na obr. 93. Šíření mikrotrhlin zde také vychází od vzniklých dutin, ovšem síla a intenzita se zdá být v porovnání s ABS z obr. 87 vyšší. Ovšem s jistotou není možné tuto tezi potvrdit či vyvrátit. Možný vliv rozdílu zbylých látek obsažených v ASA a ABS nebylo v tomto experimentu, jak zhodnotit.

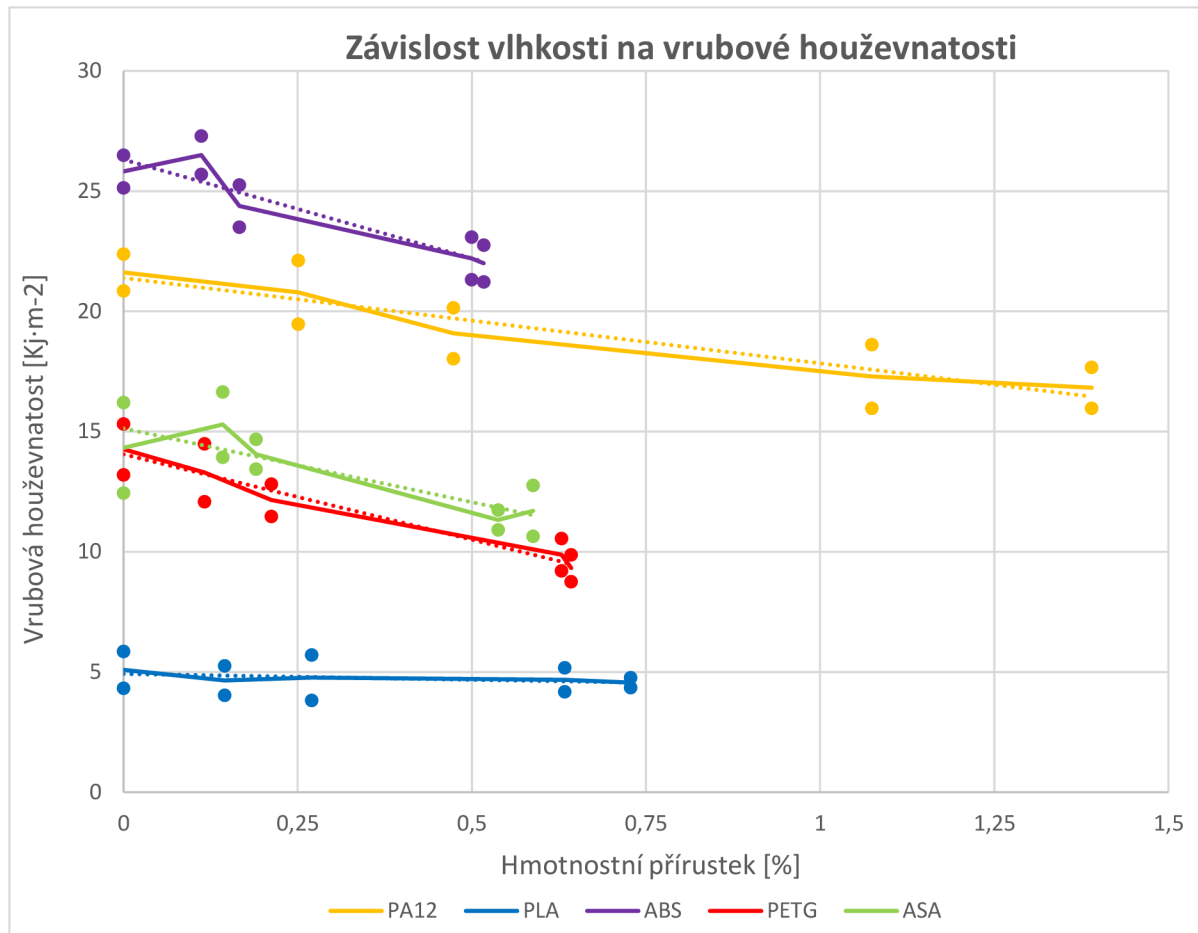


Obr. 92 Detail trhlin ASA ve stavu 0.



Obr. 93 Detail trhlin ASA ve stavu 4.

U všech materiálů vyjma PLA bylo možné pozorovat postupnou tendenci snižování houževnatosti. Z bližšího makro rozboru materiálů ABS a ASA vyplývá rozložení trhlin a možného sledu dislokací. Z teoretické části práce vychází předpoklad zvyšující se houževnatosti v závislosti na přítomnosti vlhkosti v plastu. Měřením nebylo toto tvrzení ani potvrzeno, ani vyvráceno. V tomto případě totiž dochází k odpaření vzdušné vlhkosti během tisku a je tak sledován vliv vytvořených vzduchových kapes, ne přítomnosti vody. K bližšímu určení závislosti vrubové houževnatosti testovaných dílců na vlivu přítomnosti vlhkosti v tiskových strunách byl vytvořen grafický průběh zobrazený na graf na obr. 94.

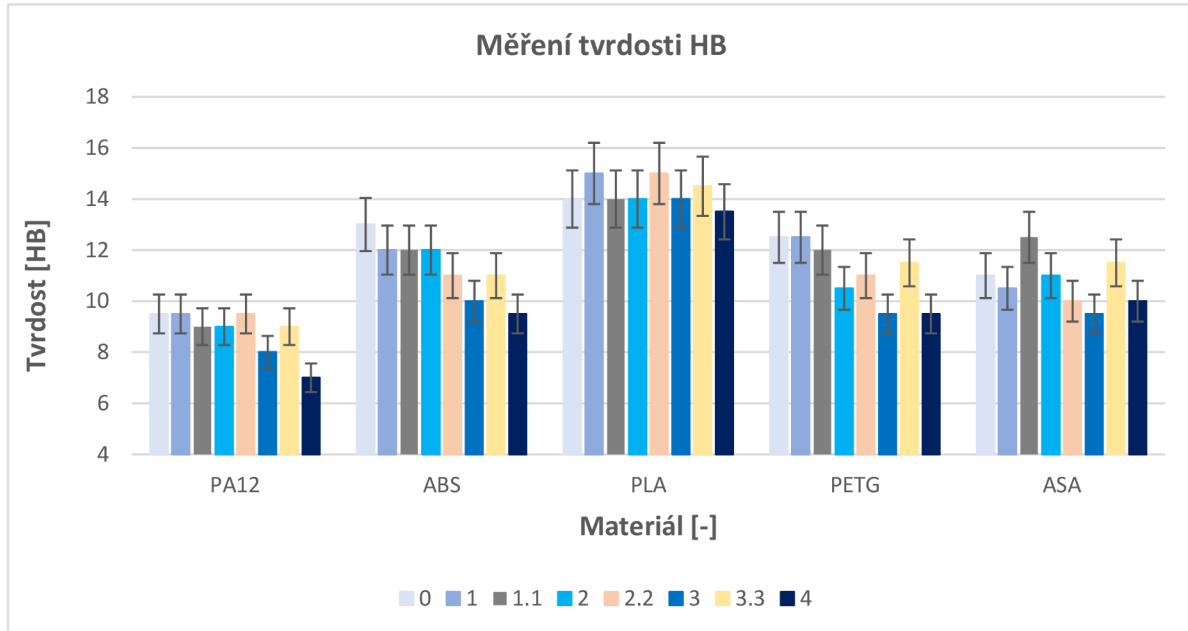


Obr. 94 Graf závislosti vlhkosti na vrubové houževnatosti.

Z grafu je možné pozorovat trend poklesu vrubové houževnatosti. Nejmarkantnější vliv byl pozorován u materiálu ABS. Následovalo PETG a za ním ASA. Všechny 3 materiály však mají v zásadě velice podobný průběh. Lépe odolává Nylon PA12. Nejlepších výsledků bylo dosaženo u PLA, které vykazuje zanedbatelný vliv na vrubovou houževnatost.

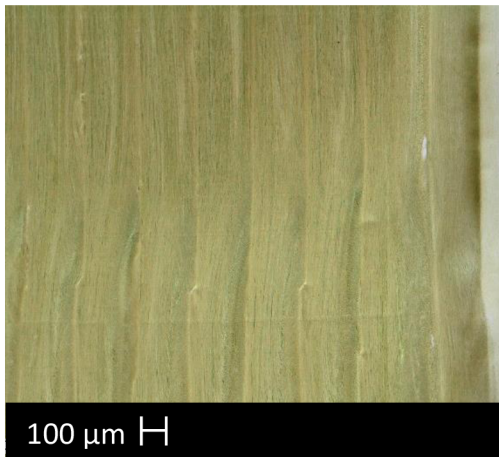
4.6 Zkouška tvrdosti

Sledování dosažených výsledků bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 2039-1 na stroji DuraVision 30 G5 s dodatečnou kontrolou pomocí externího zařízení Zeiss Discovery V20. Na všech 40 vzorcích se povedlo naměřit sledované hodnoty. Ty jsou přehledně graficky vyjádřeny na obr. 95. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v příloze 7.

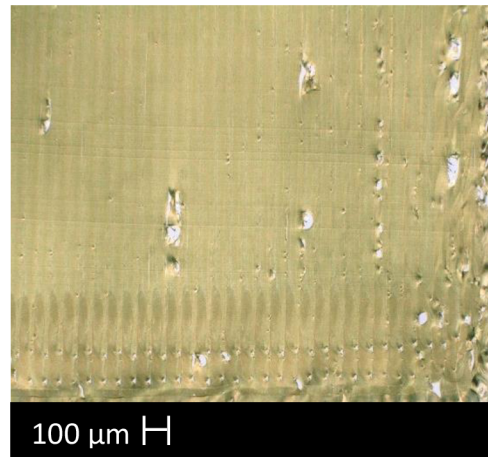


Obr. 95 Graf dosažených tvrdostí HB.

Z dat uvedených výše je patrné, že dle experimentálního měření byla nejvyšší hodnota tvrdosti dosažena u materiálu PLA s nejvyšší průměrnou hodnotou 15 HB ve stavech 1 a 2.2. To odpovídá predikcím z teoretické části této práce. Zároveň je možné pozorovat, že u tohoto materiálu prakticky nenastává žádná změna v tvrdosti při nasycení vzdušnou vlhkostí. Tomu napomáhá také fakt, že během tisku nedošlo ke znatelnému ovlivnění kvality. Vzhledem k dosaženým výsledkům navlhavosti PLA je možné pozorovat, že tento jev může mít co dočinění s tiskem za nižších teplot, podobné navlhavosti dosáhly i ostatní materiály jako PETG či ABS, u kterých je zhoršení pozorováno. Na obr. 96 je porovnání mikrotomového řezu prosvíceného světelným mikroskopem ve vysušeném stavu, vůči navlhnutému materiálu z obr. 97. Je možné pozorovat mírné zhoršení v krajích dílce, kde ovšem vpich nebyl proveden. Ve zbytku dílce se nacházel relativně homogenní stav slití vrstev.

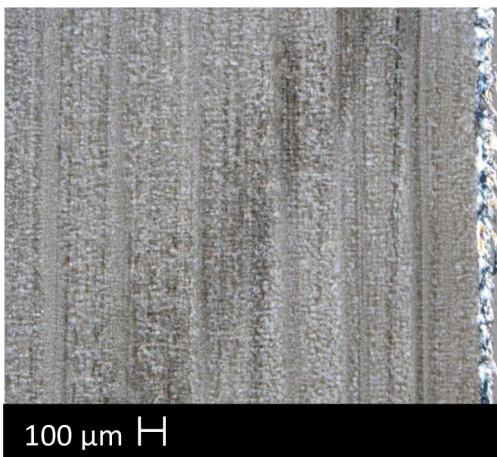


Obr. 96 Mikrotomový řez vysušeného PLA ve stavu 0.

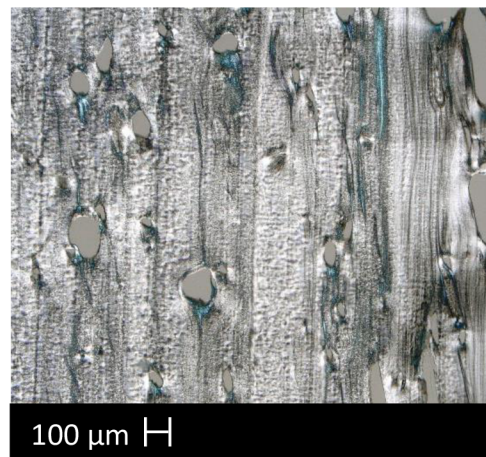


Obr. 97 Mikrotomový řez navlhnutého PLA ve stavu 4.

Nejnižších hodnot tvrdosti bylo dosaženo na materiálu Nylon PA12. Maximální průměrné hodnoty byly 9,5 HB, nejnižší pak 7 HB. Oproti PLA ve stavu 1 se jedná o rozdíl 53,33 %. Zde bylo ovšem nejobtížnější vyhodnocení tvrdosti. Materiál byl transparentního rázu, což stěžovalo určení vpichu. Použití lihového fixu se ukázalo jako pohodové řešení, avšak v kombinaci se silnou elastickou pružností zařízení nedokázalo zcela stoprocentně vyhodnotit diskrétní hodnotu. Zde tedy mohl vzniknout prostor pro chybovost. K eliminaci bylo využito vícenásobné dodatečné kontroly externím strojem Zeiss Discovery V20. Samotný pokles tvrdosti vlivem pohlcení vzdušné vlhkosti tiskové struny byl naměřen ve velikosti 26,33 %. Na mikrotomovém řezu z obr. 99 je značný rozdíl ve struktuře vrstev. PA12 byl silně ovlivněn expanzí molekul vody během tisku, což zapříčinilo narušení struktury vzduchovými bublinami.

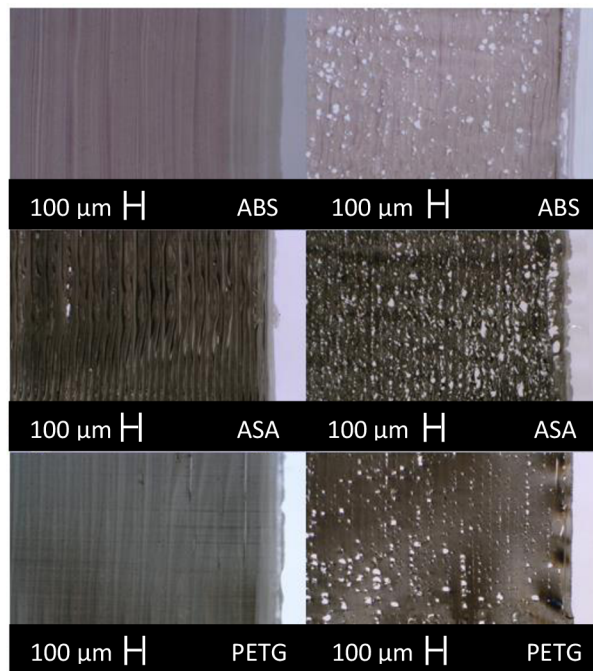


Obr. 98 Mikrotomový řez vysušeného PA12 ve stavu 0.



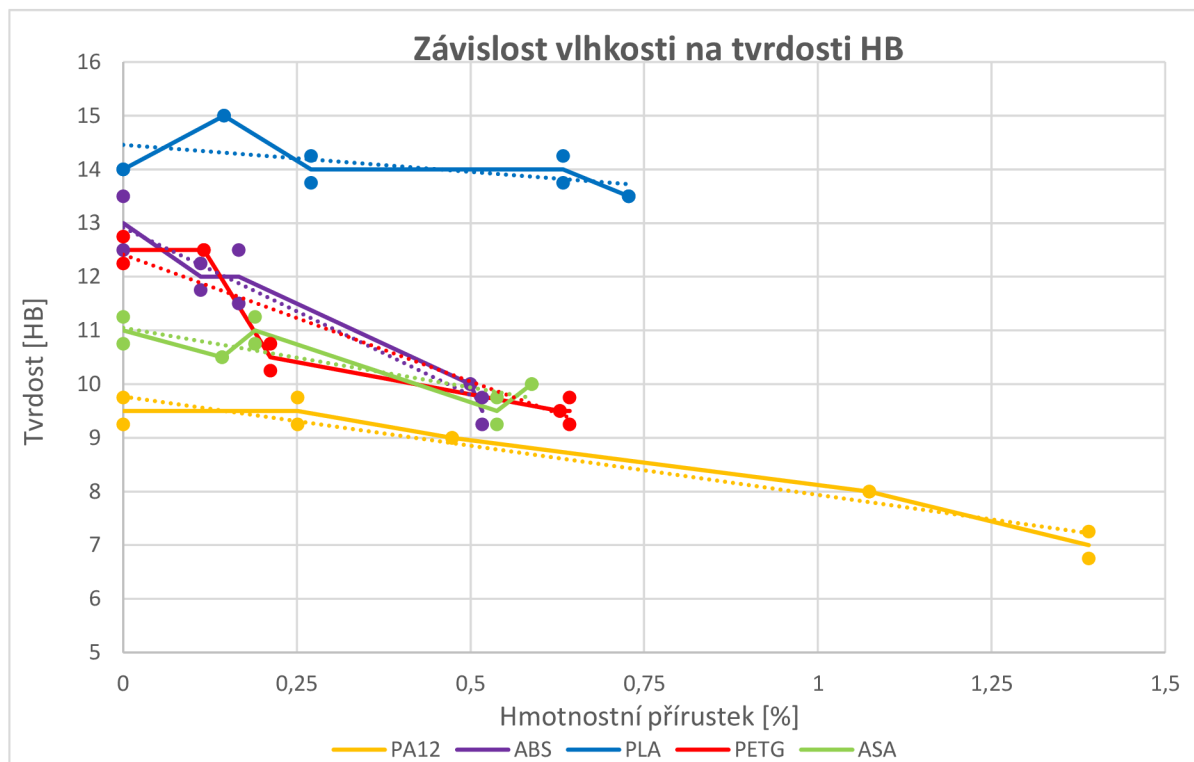
Obr. 99 Mikrotomový řez navlhnutého PA12 ve stavu 4.

Zbylé materiály, tedy ABS, PETG i ASA vykazovaly určitý pokles tvrdosti v závislosti na stavu nasycení vzdušnou vlhkostí. Zajímavý výsledek byl dosažen u ABS, kde na rozdíl od ostatních vykazuje snížení tvrdosti u znovu vysušených vzorků. Vykázal také největší rozdíl mezi vysušeným stavem 0 a vlhkým stavem 4, celkem 26,93 % poklesu. PETG a ASA vykázaly shodně pokles o 24 %. I zde byl patrný vliv vlhkosti na mikrotomovém řezu. Na obr.100 je vidět porovnání mezi materiály.



Obr. 100 Porovnání mikrotomových řezů mezi stavy 0 (vlevo) a 4 (vpravo)

Pro podrobnější analýzu byl vytvořen graf závislosti tvrdosti na přítomnosti vlhkosti. Vyobrazení je na obr. 101. Zde je možné pozorovat rozsah poklesu tvrdosti.



Obr. 101 Graf závislosti vlhkosti na tvrdosti HB.

Z trendu je patrné, že největší vliv na tvrdost byl pozorován u ABS. Následuje PETG a ASA. Pozorovatelná změna se projevily také u Nylonu PA12 a nejmenší vliv, avšak na rozdíl od předchozích zkoušek, pozorovatelný, zaznamenalo PLA. Tato data však mohou být do jisté míry zkreslena díky obtížnému měření výsledných hodnot.

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Důležitost prevence před navlhnutím filamentů již byla rozebírána. Vzhledem k dlouhým časovým nárokům na sušení bylo vhodné zhodnotit náročnost sušení po finanční stránce. Po vyjmutí vyhřáté cívky ze sušícího zařízení, a tedy přechodu z vyhřátého prostoru do ochlazeného s vyšší relativní vlhkostí, dochází k rychlejší absorpci této vlhkosti zpět do cívky. Podle technického listu materiálů ze společnosti Fillamentum, doložen v příloze 1, to může být pouze v řádu minut. A to na vyšší hodnotu, než byla původní před sušením. Z tohoto důvodu byl sestaven modelový příklad finanční zátěže na celkovou hodnotu tisku. Bylo uvažováno využití testovaného materiálu Nylon PA12 od společnosti Devil Design. Většina prodávaných cívek s filamenty obsahuje 750 g až 1 kg čisté váhy. Jako sušící zařízení byla vybrána již zmiňovaná trouba SilverCrest SGB 1200 D1 s naměřeným průměrným příkonem 850 W. Bylo uvažováno s hmotností jednoho tisku 40 g. Přehled vstupních hodnot je uveden v tab. 9.

Tab. 9 Vstupní parametry pro výpočet.

Materiál	Cena cívky [Kč]	Čistá hmotnost filamentu [g]	Počet tisků	Doba sušení [h]	Průměrný příkon trouby [W]	Cena za 1 kWh elektrické energie [Kč]
Nylon PA12	1 180	800	20	12	850	6,47

Ze vstupních dat je pak dle jednoduchého vzorce možné vypočítat celkové náklady N [Kč] navíc, které je tiskař nucen zaplatit za sušení filamentů. Je uvažována opětovná nutnost sušení před každým tiskem. Cena za 1 kWh vychází z ceníku společnosti E.ON.

$$N = P \cdot t \cdot C \cdot n \text{ [Kč]}, \quad (2)$$

- kde: P - Příkon trouby [kW],
 t - Doba sušení [h],
 C - Cena za 1 kWh [Kč],
 n - Počet tisků [-].

Po dosazení hodnot z tabulky do vzorce vychází celkový náklad na sušení ve výši 1 320 Kč. To je o 11,86 % více, než byla samotná původní cena za cívku. Časová náročnost procesu sušení by pak byla 240 h, což odpovídá 10 celým dnům. Takovýto způsob sušení je finančně, a hlavně časově naprosto nerentabilní. Do výpočtu navíc nebyla zahrnuta pořizovací cena sušícího zařízení. Vzhledem k uvolňování partikulů během vysoušení plastových strun, je zdraví škodlivé používat horkovzdušných trub v domácnosti, ve kterých jsou následně připravovány pokrmy. Možným řešením je použití méně energeticky náročných variant sušení, jako jsou sušičky potravin, ty disponují příkonem kolem 100–200 W a optimálním prouděním vzduchu. Ovšem většina z nich nedokáže překročit hranici 80 °C, což je pro náročnější materiály jako Nylon, nedostatečná hodnota. Nejlepším řešením je však využití pasivního způsobu skladování materiálu, které zamezí přístupu vzdušné vlhkosti a ze kterého je možnost přímo tisknout. Dnes jsou nabízené možnosti uzavíratelných boxů, které obsahují pohlčovače vlhkosti s indikátorem změny barvy, které je navíc možné opětovně vysoušet daleko rychleji, a tedy i levněji. Na trhu se také objevují zařízení, která sice nevysouší, ale dokáží udržovat cívku v přijatelných mezích a jsou energeticky nenáročná, jako například PolyBox od Polymakeru. V neposlední řadě je možné využít i obalů, které je možné následně vakuově odsát. Zde je však nutné využít dalšího boxu pro samotný tisk.

ZÁVĚR

Na základě rešeršní části byly vybrány materiály a zařízení využity v této práci. Byla zvolena 3D FDM tiskárna typu delta s označením Anycubic Kossel Linear Plus. Z materiálu bylo vybráno PLA, ABS, ASA, PETG a Nylon PA12, vše od společnosti Devil Design.

První experiment se zaměřoval na získání konkrétních dat navlhavosti jednotlivých materiálů. Výsledkem byly závislosti změn hmotnosti tiskových strun během těchto procesů na čase. Materiál Nylon PA12 dosahoval rozdílných hodnot, než bylo očekáváno. Po 384 h procesu vlhčení I dosahoval pouze 0,855 % hmotnostního přírůstku. Očekáváno bylo zhruba 5 % a více. U PETG od DD došlo ke zvýšení o 55,37 % v procesu II. Za daných podmínek nejvyšších změn hmotnosti dosahoval materiál Nylon PA12 o velikosti 1,390 % za 384 h. Nejnižších naopak TPU se změnou 0,377 % za 384 h, oboje v procesu vlhčení II.

Jednou ze zvolených zkoušek mechanických vlastností materiálů byla tahová zkouška. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo ve vysušeném stavu 0 u PLA, mez pevnosti byla dosažena při napětí 56,18 MPa. To navíc neznamenalo prakticky žádný vliv vlhkosti na zhoršení pevnosti v tahu. Nejnižších hodnot dosahovalo ABS ve vlhčeném stavu 4 s hodnotou 27,18 MPa, rozdíl oproti nejvyšší hodnotě ve stavu 2 činil 21,83 %. U PETG byl zaznamenán značný pokles v mezi pevnosti. Bylo dosaženo rozdílu napětí ve velikosti 22,08 % mezi nejvyšší hodnotou stavu 0 a nejnižší ve stavu 4. Nylon PA12 dosáhl nejvyšších hodnot deformace, která se přibližovala 9 % ve vlhčených stavech 2 a 4. Rozdíl meze pevnosti stavu 0 a 4 byl 26,43 %. Stanovenou závislostí byl prokázán negativní vliv vlhkosti na pevnost dílců v tahu.

Další zvolenou zkouškou bylo vyhodnocení vrubové houževnatosti. Nejvyšších hodnot dosáhl materiál ABS ve stavu 1, konkrétně houževnatosti o velikosti $26,5 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$, což bylo o 84,68 % více, než v případě nejkřehčího PLA s $4,06 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ve stavu 3.3. ABS dosahovalo cca o 39,96 % vyšších maximálních hodnot než ASA. Pomocí profesionálních strojů Zeiss Discovery V20 a Zeiss Gemini Sigma 300 VP byla vyhodnocena makrostruktura lomů. Byla zakomentována a určena míra vlivu vlhkosti na zhoršení vrubové houževnatosti.

Poslední zvolenou zkouškou byla tvrdost. Nejvyšších hodnot dosáhlo dle očekávání PLA. Ve stavu 1 i 2.2 bylo naměřeno 15 HB. Nejnižších hodnot dosáhl Nylon PA12 ve stavu 4, konkrétně 7 HB, to je oproti PLA rozdíl 53,33 %. Nejvyšších pak 9,5 HB. Zajímavý výsledek byl dosažen u ABS, které na rozdíl od ostatních vykazuje snížení tvrdosti u znovu vysušených vzorků. Dosáhlo také největší rozdíl mezi vysušeným stavem 0 a vlhkým stavem 4, celkem 26,93 % poklesu. PETG a ASA vykázaly shodně pokles o 24 %. Dosažené výsledky tvrdosti však nelze brát za velmi diskrétní vzhledem k obtížnosti vyhodnocení vpichů na vzorcích.

Poslední část práce se věnovala finanční stránce sušení filamentů. Z uvedeného experimentu za daných podmínek vyplynulo, že sušení materiálu Nylon PA12 může být o 11,86 % dražší než samotná pořizovací cena tiskové struny. Z tohoto důvodu byla rozebrána důležitost prevence před navlhnutím a navržena možná řešení tohoto problému.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *AnyoneGo: Voziček AnyoneGo: Zadní nohy* [online]. In: . [cit. 2022-03-21].
Dostupné z: <https://anyonego.com/cs/produkty/>
- [2] *ABS filament moisture compensation possibilities in the FDM process* [online]. In: . 2021 [cit. 2022-03-21].
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581721001437>
- [3] *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. In: *Pusa Research s.r.o.* [online]. Praha, Česká republika: Pusa Research a.s., 2019 [cit. 2020-03-15].
Dostupné z: <https://www.pusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>
- [4] SÝKORA, Rudolf. *Úvod do vlhkosti plynů* [online]. In: . Comet System, s.r.o. 2015 [cit. 2022-04-10].
Dostupné z: <http://www.cometsystem.cz/userfiles/file/software/utills/vlhkost.pdf>
- [5] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Pardubice: *Publi.cz*, 2015 [cit. 2022-04-10]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [6] O'CONNELL, Jackson. *Hygrosopy (3D Printing): What It Is & How to Deal With It*. In: *All3DP* [online]. 2020 [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: <https://all3dp.com/2/hygrosopy-3d-printing-guide/>
- [7] *Přehled technologií 3D tisku*. In: *Dk metal prominent s.r.o.* [online]. Česká republika: dk metal prominent s.r.o., 2018 [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologie-3D-tisku>
- [8] *The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today*. In: *Sculpteo* [online]. San Francisco, Spojené státy americké: Sculpteo, c2009-2020 [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing/>
- [9] *Making History: History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented?*. In: *All3DP* [online]. Německo: Leo Gregurić, 2018 [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- [10] *Typy tiskáren a rozdíly mezi nimi*. In: *Prusa Knowledge Base* [online]. 2022 [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/typy-tiskaren-a-rozdily-mez-nimi_112464
- [11] *Typy 3D tiskáren: 3D tiskárny FDM*. In: *MakersLab* [online]. Praha, Česká republika: MakersLab, 2016 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://makerslab.cz/typy-3d-tiskaren/>
- [12] *Stack Exchange: How does the home position work on a Prusa i3 RepRap Printer?*. In: *Stack Exchange* [online]. 2016 [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: <https://3dprinting.stackexchange.com/questions/2593/how-does-the-home-position-work-on-a-prusa-i3-reprap-printer>
- [13] *Ložisko IGUS DryLin RJ4JP-01-08 8 mm* [online]. In: . 2019 [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: <https://www.elegant3d.cz/Lozisko-IGUS-DryLin-RJ4JP-01-08-8-mm-d374.htm#detail-anchor-description>
- [14] *CoreXY 3D Printer Twotrees SP-3 High Resolution Professional Cube 3D Printer*. In: *Two Trees* [online]. c2018-2022 [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: <https://twotrees3d.com/product/corexy-3d-printer/>

-
- [15] TRILAB DeltiQ 2: Na první pohled jiný 3D tisk. In: *TriLAB Group s.r.o.* [online]. Brno, Česká republika: TriLAB Group s.r.o., 2022 [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: <https://trilab3d.com/deltiq-2/>
- [16] Polar 3D Launches Unique Polar Coordinate-Based FFF 3D Printer at CES 2015. In: *3Dprint* [online]. Spojené státy americké: adlughmin, 2015 [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: <https://3dprint.com/35656/polar-3d-printer-ces-2015/>
- [17] 3D tisk: Jak funguje FDM/FFF tiskárna?. In: *Svět Hardware* [online]. 2019 [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457-2>
- [18] FRKETIC, Jolie Breaux, Sean PSULKOWSKI, Alex SHARP a Tarik DICKENS. Dexterous Printing and Fabrication of Multi-Functional Parts: Design for Science and Engineering Education: Design for Science and Engineering Education. *Procedia Manufacturing*. 2017, **10**, 1087-1096. ISSN 2351-9789.
Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.099>
- [19] Scara Arm 3D Printer. In: *Robot Digg* [online]. Shanghai, China: Robot Digg [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://m.robotdigg.com/product/929/Scara-Arm-3D-Printer#>
- [20] Timberfill® (Wood Composite). In: *Fillamentum* [online]. Hulín, Česká republika: Fillamentum, 2022 [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: <https://fillamentum.com/collections/timberfill-filament>
- [21] MoldLay voskový (Wax-Alike) filament 1,75mm 750g. In: *Materialpro3D.cz* [online]. 2022 [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/specialni-filamenty/moldlay-voskovy-filament-1-75mm-750g/>
- [22] Průvodce materiály: PLA. In: *Prusa Knowledge Base* [online]. 2022 [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/pla_2062
- [23] Případová studie: Využití materiálů Flexfill TPU 98A a PLA Extrafill ve společnosti Meopta-optika. In: *Fillamentum Industrial* [online]. Hulín, Česká republika: Fillamentum industrial [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: <https://www.fillamentumindustrial.cz/meopta>
- [24] Průvodce materiály: ABS. In: *Prusa Knowledge Base* [online]. 2022 [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/abs_2058
- [25] 3D printing in ABS. In: *Beamler* [online]. Amstrdam, Nizozemsko: Beamler, 2021 [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: <https://www.beamler.com/3d-printing-capabilities/materials/abs/>
- [26] Průvodce materiály: PETG. In: *Prusa Knowledge Base* [online]. 2022 [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/petg_2059
- [27] Prusament PETG Prusa Orange 1kg. In: *Prusa Research s.r.o.* [online]. Praha, Česká republika: Prusa Research s.r.o., 2022 [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/prusament/801-prusament-petg-prusa-orange-1kg.html>
- [28] Průvodce materiály: ASA. In: *Prusa Knowledge Base* [online]. 2022 [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/asa_1809
- [29] ASA Extrafill. In: *Fillamentum* [online]. Hulín, Česká republika: Fillamentum, 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://fillamentum.com/collections/asa-filament/>
- [30] Průvodce materiály: Nylon. In: *Prusa Knowledge Base* [online]. 2022 [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/nylon_167188
-

-
- [31] Nylon AF80 Aramid is soon here!. In: *Fillamentum* [online]. Hulín, Česká republika: Fillamentum, 2022 [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: <https://fillamentum.com/blogs/news/nylon-af80-aramid-is-here/>
- [32] Průvodce materiály: Flexibilní materiály. In: *Prusa Knowledge Base* [online]. 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/flexibilni-materialy_2057
- [33] KOČÍ, Jakub. Jak tisknout s flexibilním filamentem. In: *Josef Průša* [online]. Praha, Česká republika, 2019 [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: <https://josefprusa.cz/jak-tisknout-s-flexibilnim-filamentem/>
- [34] Flexfill TPE 90A: ZCELA NOVÝ FLEXIBILNÍ MATERIÁL NA BÁZI TERMOPLASTICKÉHO ELASTOMERU. In: *Fillamentum Industrial* [online]. Hulín, Česká republika: Fillamentum Industrial [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: <https://www.fillamentumindustrial.cz/flexfill-tpe-90a>
- [35] Výzkum škodlivých účinků vlhkosti na hygroskopické polymery a metody sušení vláken (filamentů). In: *BCN3D* [online]. 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: https://www.abc3d.cz/media/attachments/2020/10/20/bcn3d_white_paper_smart_cabin_et_cz.pdf
- [36] DUŠKOVÁ, Bohumila. NAVLHAVOST POLYMERŮ: Důsledky. In: *Anzdoc* [online]. 2010 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://adoc.pub/navlhavost-polymer-dsledky.html>
- [37] 3D Printing with Water Absorbing Polymers. In: *Nexus3 Manufacturing & Engineering* [online]. 2021 [cit. 2022-05-16].
Dostupné z: <https://www.nexus3mfg.com/post/3d-printing-with-water-absorbing-polymers>
- [38] BANJO, Adedotun D., Vinamra AGRAWAL, Maria L. AUAD a Asha-Dee N. CELESTINE. Moisture-induced changes in the mechanical behavior of 3D printed polymers. *Composites Part C: Open Access*. 2022, **7**, 100243. ISSN 2666-6820.
Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100243>
- [39] Printing issues related to filament affected by humidity: Why it happens and how to notice, avoid and deal with it. In: *Knowledge base - BCN3D* [online]. 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://support.bcn3d.com/knowledge/humid-filament-bcn3d>
- [40] Print Quality Troubleshooting Guide. In: *Simplify 3D* [online]. 2022 [cit. 2022-05-18].
Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/>
- [41] ZALDIVAR, R.J., T.D. MCLOUTH, G.L. FERRELLI, D.N. PATEL, A.R. HOPKINS a D. WITKIN. Effect of initial filament moisture content on the microstructure and mechanical performance of ULTEM® 9085 3D printed parts. *Additive Manufacturing*. 2018, **24**, 457-466. ISSN 2214-8604.
Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.022>
- [42] TYSON, Matt. STARTERS GUIDE TO MOISTURE, DRYING AND FILAMENT STORAGE. In: *3D Printing Solutions* [online]. Adelaide, Austrálie, 2018 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.3dprintingsolutions.com.au/User-Guides/starters-guide-to-moisture-drying-and-filament-storage>
- [43] Online Interactive Psychrometric Chart: A convenient, precise and customizable psychrometric chart & calculator tool for HVAC engineers. Support IP and SI units. In: *FlyCarpet Inc* [online]. 2022 [cit. 2022-05-18].
Dostupné z: <http://www.flycarpet.net/en/psyonline>
- [44] KORSGAARD, Nana. Say Goodbye to Failed 3D Prints!. In: *3devo B.V.* [online]. 2021 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.3devo.com/blog/3-ways-to-dry-filament>
-

-
- [45] REDWOOD, Ben. How does part orientation affect a 3D print?. In: *HUBS* [online]. 2022 [cit. 2022-05-18].
Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/how-does-part-orientation-affect-3d-print/#introduction>
- [46] PLASTIC IMPACT TEST SPECIMEN NOTCH MACHINE. In: *United Test* [online]. c2006-2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: http://www.unitedtest.com/products/impact_testing_machine/sample_preparation_machine/impact-specimen-notching.html#a1
- [47] Impact Charpy. In: *Instron* [online]. 2022 [cit. 2022-05-18].
Dostupné z: <https://www.instron.com/en/our-company/library/glossary/c/charpy>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK
Symbols

Označení	Legenda	Jednotka
A_{cA}	vrubová houževnatost	[kJ·m ⁻²]
b	šířka vzorku	[mm]
b_1	šířka zúžené části vzorku	[mm]
b_2	šířka konců vzorku	[mm]
b_n	šířka vzorku pod vrubem	[mm]
C	cena za 1 kWh	[Kč]
E_c	kinetická energie spotřebovaná k přeražení tělesa	[kJ]
h	tloušťka vzorku	[mm]
l	délka vzorku	[mm]
l_1	délka zúžené části vzorku	[mm]
l_2	vzdálenost mezi rovnoběžnými hranami	[mm]
l_3	celková délka vzorku	[mm]
L	vzdálenost mezi čelistmi	[mm]
L_0	počáteční měřená délka	[mm]
n	počet tisků	[-]
P	příkon trouby	[kW]
r	poloměr zúžené části vzorku	[mm]
t	doba sušení	[h]

Zkratky

Označení	Legenda
3D	Třidimenzionální
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ASA	Akrylonitrilstyrenakrylát
CR	Creality
DD	Devil Design
FDM	Fused deposition modeling
FM	Fillamentum
PA	Polyamid
PET	Polyethylentereftalát
PETG	Polyethylentereftalátglykol
PID	Proportional integral derivate
PLA	Polylactid acid
PR	Prusa Research
RepRap	Replicating rapid rrototype
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective laser sintering
TPE	Termoplastický elastomer
TPU	Termoplastický polyuretan
UV	Ultrafialové záření

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Doporučené hodnoty pro sušení filamentů společnosti Fillamentum
- Příloha 2 Hodnoty experimentálně změřené při procesu sušení
- Příloha 3 Hodnoty experimentálně změřené při procesu vlhčení I
- Příloha 4 Hodnoty experimentálně změřené při procesu vlhčení II
- Příloha 5 Hodnoty experimentálně změřené a vypočítané při tahové zkoušce
- Příloha 6 Hodnoty experimentálně změřené a vypočítané při vrubové zkoušce
- Příloha 7 Hodnoty experimentálně změřené při zkoušce tvrdosti

Doporučení pro zpracování Sušení filamentů před zpracováním na 3D tiskárně



Datum revize: 9. 12. 2020/4

Důležité pro stabilizaci kvality každého tisku (bez ovlivnění podmínkami skladování). Při skladování mimo obal nebo po delší době tisku, kdy je cívka v místnosti, nasaje materiál vlhkost. Některé polymery pohlcují vlhkost pouze povrchově, ale hygroskopické materiály absorbují vlhkost do celé struktury. Proto byly materiály rozděleny na **stupnici 1-5** (1 - není nutno sušit, 5 - potřeba vždy). Viz sloupec „**Nutnost sušit**“ v Tabulce 1.

V průběhu zpracování vlhkých hygroskopických materiálů při teplotě tání atakují molekuly vody jednotlivé řetězce, které jsou nevratně zkráceny. Pro sušení je třeba použít **zařízení s přesnou termoregulací** (ideálně laboratorní sušárnu) - před samotným sušením celého návinu vložte pouze malý vzorek filamentu pro otestování funkčnosti. V případě, že je materiál o poznání měkčí nebo ztratí svůj původní tvar, snižte teplotu sušení. V případě ztráty transparentnosti použijte jiné zařízení.

Po sušení nesmí být cívka umístěna do prostředí bez kontrolované hodnoty relativní vlhkosti. **Proces chlazení** musí probíhat **v exsikátoru** (případně v jiné těsnící nádobě s obsahem sílikagelu). Pokud je horká cívka umístěna do prostředí s vyšší vlhkostí, může zpět absorbovat vlhkost asi během 10 minut. A to i na vyšší hodnotu vlhkosti, než byla před sušením.

Obsah vlhkosti v materiálu ovlivňuje výsledné vlastnosti, dochází ke krácení polymerních řetězců a tím:

- především ke snížení **mechanických vlastností** (= MV), materiál je křehčí, případně příliš flexibilní,
- k častému výskytu **stringování** (jemné vlásky při přejezdu trysky),
- k **poklesu** teplotní a chemické **odolnosti**,
- k **oozingu** (hromadění materiálu na okrajích trysky, což může vést k uvolnění a kontaminaci výtisku),
- k **ucpání trysky** z důvodu hromadění degradovaného materiálu,
- ke snížení průtoku materiálu, tedy **under-extrusion**, což způsobuje špatnou adhezi mezi vrstvami, díry ve vrstvách nebo chybějící části vrstev.

Tabulka 1: Doporučené podmínky pro sušení produktů Fillamentum

MATERIÁL	MINIMÁLNÍ DOBA SUŠENÍ	TEPLOTA SUŠENÍ	NUTNOST SUŠIT	OBSAHEM VLHKOSTI JE ZPŮSOBENO:
CPE CF112 CARBON	5 h	75 °C	5	stringování, MV, oozing
CPE HG100	5 h	75 °C	5	stringování, MV, pokles teplotní a chemické odolnosti, bublinky, „napěněný“ vzhled výtisku
FLEXFILL PEBA 90A	5 h	70 °C	5	stringování, MV, bublinky, nízká adheze vrstev, nízká adheze k podložce, kvalita povrchu
FLEXFILL TPU 92A	3 h	80 °C	5	stringování, under-extrusion, ucpání trysky
FLEXFILL TPU 98A	3 h	100 °C	5	stringování, under-extrusion, ucpání trysky
NYLON AF80 ARAMID	4 h	80 °C	5	MV, změna odstínu
NYLON CF15 CARBON	4 h	80 °C	5	stringování, MV
NYLON FX256	3 h	80 °C	5	stringování, MV, bublinky
PC/ABS	4 h	80 °C	5	stringování, MV, vzhled povrchu
PETG	4 h	65 °C	5	stringing, MV, bublinky, prskání, „napěněný“ vzhled, under-extrusion
PLA CRYSTAL CLEAR	4 h	50 °C	5	stringování, MV, ucpání trysky, optická čistota
PLA EXTRAFILL	3 h	50 °C	5	stringování, MV
TIMBERFILL	2 h	50 °C	5	stringování, MV
ASA EXTRAFILL	2 h	80 °C	3	nestabilita procesu, u Metallic Grey nízká adheze vrstev
ABS EXTRAFILL	2 h	80 °C	2	nestabilita procesu
FLEXFILL TPE 96A	2 h	80 °C	2	/
FLEXFILL TPE 90A	2 h	80 °C	2	/
HIPS EXTRAFILL	3 h	70 °C	1	/
PP 2320	2 h	80 °C	1	/
VINYL 303	2 h	70 °C	1	/
FLUORODUR	2 h	80 °C	1	/

Hodnoty experimentálně změřené při procesu sušení

Tab. Hodnoty jednotlivých měření sušení.

Čas sušení [h]	PA12 DD [g]	PA12 DD [%]	PETG DD [g]	PETG DD [%]	PETG PR [g]	PETG PR [%]
0	28,437	0	29,326	0	30,315	0
2	28,358	-0,280	29,276	-0,168	30,258	-0,185
4	28,339	-0,345	29,263	-0,214	30,249	-0,217
6	28,314	-0,432	29,251	-0,256	30,236	-0,259
8	28,302	-0,474	29,251	-0,256	30,236	-0,260
10	28,298	-0,489	29,250	-0,258	30,235	-0,262
12	28,298	-0,491	-	-	-	-
14	28,298	-0,490	-	-	-	-

Tab. Hodnoty jednotlivých měření sušení.

Čas sušení [h]	PLA DD [g]	PLA DD [%]	PLA CR [g]	PLA CR [%]	ABS črv. DD [g]	ABS črv. DD [%]
0	30,404	0	29,262	0	29,670	0
2	30,363	-0,135	29,228	-0,117	29,641	-0,100
4	30,349	-0,182	29,214	-0,165	29,616	-0,185
6	30,349	-0,182	29,213	-0,168	29,613	-0,195
8	30,348	-0,184	29,213	-0,167	29,613	-0,195
10	-	-	-	-	29,612	-0,197

Tab. Hodnoty jednotlivých měření sušení.

Čas sušení [h]	ABS črn. DD [g]	ABS črn. DD [%]	ASA DD [g]	ASA DD [%]	ASA 275 FM [g]	ASA 275 FM [%]
0	29,624	0	24,857	0	27,619	0
2	29,599	-0,085	28,439	-0,065	27,591	-0,100
4	29,594	-0,100	28,430	-0,095	27,583	-0,132
6	29,592	-0,107	28,423	-0,119	27,583	-0,130
8	29,593	-0,105	28,424	-0,117	27,583	-0,130
10	29,592	-0,108	28,423	-0,119	-	-

Tab. Hodnoty jednotlivých měření sušení.

Čas sušení [h]	TPU FM [g]	TPU FM [%]	TPE DD [g]	TPE DD [%]
0	29,385	0	28,537	0
2	29,322	-0,214	28,514	-0,080
4	29,293	-0,312	28,504	-0,115
6	29,294	-0,311	28,504	-0,116
8	29,293	-0,313	28,504	-0,116

Hodnoty experimentálně změřené při procesu vlhčení I

Tab. Hodnoty procesu vlhčení I.

Čas vlhčení [h]	PA12 DD [g]	PA12 DD [%]	PETG DD [g]	PETG DD [%]	PETG PR [g]	PETG PR [%]
Před sušením	28,437	-0,490	29,326	-0,258	30,315	-0,262
0	28,298	0,000	29,250	0,000	30,235	0,000
0,5	28,308	0,035	29,253	0,011	30,238	0,010
1	28,312	0,049	29,259	0,032	30,241	0,020
2	28,319	0,074	29,266	0,054	30,247	0,040
3	28,324	0,092	29,270	0,068	30,252	0,056
4	28,329	0,110	29,272	0,075	30,255	0,066
10	28,369	0,251	29,284	0,116	30,274	0,129
15	28,398	0,353	29,293	0,147	30,288	0,176
24	28,432	0,474	29,312	0,212	30,294	0,195
48	28,442	0,509	29,328	0,267	30,303	0,225
96	28,458	0,565	29,330	0,274	30,312	0,254
192	28,472	0,615	29,333	0,284	30,320	0,281
384	28,540	0,855	29,334	0,287	30,328	0,308

Tab. Hodnoty procesu vlhčení I.

Čas vlhčení [h]	PLA DD [g]	PLA DD [%]	PLA CR [g]	PLA CR [%]	ABS črv. DD [g]	ABS črv. DD [%]
Před sušením	30,404	-0,184	29,262	-0,167	29,670	-0,197
0	30,348	0,000	29,213	0,000	29,612	0,000
0,5	30,354	0,019	29,219	0,022	29,617	0,017
1	30,359	0,036	29,223	0,033	29,620	0,027
2	30,362	0,046	29,229	0,054	29,624	0,041
3	30,368	0,066	29,231	0,062	29,630	0,061
4	30,374	0,086	29,238	0,086	29,634	0,074
10	30,392	0,145	29,267	0,185	29,645	0,111
15	30,414	0,217	29,273	0,206	29,651	0,132
24	30,430	0,270	29,276	0,217	29,661	0,166
48	30,445	0,319	29,280	0,228	29,669	0,192
96	30,451	0,338	29,282	0,236	29,674	0,208
192	30,454	0,348	29,285	0,246	29,678	0,223
384	30,457	0,358	29,289	0,261	29,682	0,236

Tab. Hodnoty procesu vlhčení I.

Čas vlhčení [h]	ABS črn. DD [g]	ABS črn. DD [%]	ASA DD [g]	ASA DD [%]	ASA 275 FM [g]	ASA 275 FM [%]
Před sušením	29,624	-0,108	28,457	-0,119	27,619	-0,130
0	29,592	0,000	28,423	0,000	27,583	0,000
0,5	29,595	0,010	28,426	0,012	27,587	0,015
1	29,597	0,017	28,428	0,018	27,590	0,025
2	29,601	0,031	28,432	0,032	27,594	0,040
3	29,604	0,041	28,437	0,049	27,600	0,062
4	29,608	0,054	28,440	0,060	27,608	0,091
10	29,617	0,083	28,463	0,142	27,630	0,170
15	29,623	0,104	28,470	0,166	27,654	0,257
24	29,638	0,156	28,477	0,190	27,672	0,323
48	29,644	0,177	28,485	0,218	27,684	0,366
96	29,651	0,198	28,494	0,249	27,687	0,377
192	29,654	0,209	28,497	0,261	27,688	0,381
384	29,657	0,219	28,500	0,271	27,689	0,384

Tab. Hodnoty procesu vlhčení I.

Čas vlhčení [h]	TPU FM [g]	TPU FM [%]	TPE DD [g]	TPE DD [%]
Před sušením	29,385	-0,313	28,537	-0,116
0	29,293	0,000	28,504	0,000
0,5	29,300	0,024	28,506	0,007
1	29,305	0,041	28,508	0,014
2	29,309	0,055	28,511	0,025
3	29,312	0,065	28,514	0,035
4	29,319	0,089	28,519	0,053
10	29,358	0,222	28,526	0,077
15	29,387	0,321	28,534	0,105
24	29,410	0,398	28,548	0,154
48	29,422	0,441	28,553	0,172
96	29,428	0,461	28,558	0,189
192	29,429	0,463	28,560	0,196
384	29,432	0,473	28,564	0,210

Hodnoty experimentálně změřené při procesu vlhčení II

Tab. Hodnoty procesu vlhčení II.

Čas vlhčení [h]	PA12 DD [g]	PA12 DD [%]	PETG DD [g]	PETG DD [%]	PETG PR [g]	PETG PR [%]
0	27,914	0,000	28,942	0,000	30,31	0,000
0,5	27,935	0,076	28,948	0,022	30,316	0,019
1	27,956	0,152	28,955	0,045	30,322	0,039
2	27,970	0,202	28,968	0,089	30,331	0,068
3	27,992	0,278	28,978	0,123	30,339	0,096
4	28,002	0,316	28,985	0,149	30,346	0,119
10	28,048	0,480	29,010	0,235	30,360	0,165
15	28,090	0,632	29,030	0,304	30,369	0,194
24	28,140	0,809	29,059	0,404	30,386	0,251
48	28,182	0,960	29,098	0,539	30,398	0,290
96	28,214	1,074	29,124	0,629	30,422	0,369
192	28,256	1,226	29,126	0,636	30,440	0,429
384	28,302	1,390	29,128	0,643	30,448	0,455

Tab. Hodnoty procesu vlhčení II.

Čas vlhčení [h]	PLA DD [g]	PLA DD [%]	PLA CR [g]	PLA CR [%]	ABS črv. DD [g]	ABS črv. DD [%]
0	30,581	0,000	29,428	0,000	29,403	0,000
0,5	30,590	0,028	29,431	0,011	29,409	0,021
1	30,601	0,066	29,434	0,021	29,419	0,053
2	30,613	0,104	29,444	0,053	29,434	0,106
3	30,627	0,151	29,462	0,117	29,453	0,170
4	30,647	0,217	29,472	0,148	29,475	0,245
10	30,676	0,312	29,503	0,255	29,494	0,308
15	30,694	0,369	29,537	0,371	29,512	0,372
24	30,720	0,454	29,565	0,466	29,519	0,393
48	30,749	0,548	29,585	0,534	29,541	0,468
96	30,775	0,633	29,592	0,557	29,550	0,500
192	30,792	0,690	29,598	0,578	29,553	0,510
384	30,804	0,728	29,601	0,588	29,555	0,517

Čas vlhčení [h]	ABS črn. DD [g]	ABS črn. DD [%]	ASA DD [g]	ASA DD [%]	ASA 275 FM [g]	ASA 275 FM [%]
0	26,851	0,000	29,937	0,000	27,802	0,000
0,5	26,859	0,029	29,943	0,020	27,809	0,026
1	26,875	0,088	29,946	0,030	27,823	0,077
2	26,890	0,146	29,952	0,050	27,834	0,115
3	26,902	0,190	29,970	0,111	27,855	0,192
4	26,918	0,248	29,982	0,151	27,866	0,231
10	26,949	0,365	30,012	0,252	27,902	0,359
15	26,964	0,421	30,036	0,332	27,916	0,410
24	26,984	0,495	30,055	0,394	27,962	0,575
48	27,000	0,555	30,077	0,468	27,985	0,658
96	27,007	0,581	30,098	0,538	27,995	0,694
192	27,010	0,592	30,107	0,568	28,002	0,719
384	27,011	0,596	30,113	0,588	28,009	0,745

Tab. Hodnoty procesu vlhčení II.

Čas vlhčení [h]	TPU FM [g]	TPU FM [%]	TPE DD [g]	TPE DD [%]
0	28,9	0,000	30,09	0,000
0,5	28,913	0,045	30,096	0,020
1	28,929	0,101	30,102	0,040
2	28,939	0,135	30,108	0,059
3	28,952	0,180	30,117	0,089
4	28,955	0,191	30,126	0,119
10	29,010	0,382	30,141	0,168
15	29,040	0,483	30,150	0,198
24	29,075	0,607	30,165	0,248
48	29,127	0,787	30,176	0,287
96	29,140	0,831	30,182	0,307
192	29,150	0,865	30,200	0,367
384	29,157	0,888	30,203	0,377

Hodnoty experimentálně změřené a vypočítané při tahové zkoušce

Tab. Hodnoty maximální síly tahové zkoušky, iterace 1.

Stav vlhkosti	PLA DD [N]	PETG DD [N]	ABS DD [N]	PA12 DD [N]	ASA DD [N]
0	2231,69	2217,23	1374,17	1668,84	1823,22
1	2187,11	2037,92	1372,12	1622,99	1790,20
1.1	2184,09	1956,67	1313,66	1559,17	1770,11
2	2195,14	1739,46	1358,14	1540,11	1627,12
2.2	2108,75	2105,44	1420,47	1650,47	1630,2
3	2219,24	1869,12	1161,18	1425,17	1210,15
3.3	2170,14	1974,14	1399,2	1607,23	1820,14
4	2190,13	1719,23	1099,74	1221,46	1267,17

Tab. Hodnoty maximální síly tahové zkoušky, iterace 2.

Stav vlhkosti	PLA DD [N]	PETG DD [N]	ABS DD [N]	PA12 DD [N]	ASA DD [N]
0	2263,15	2171,97	1342,07	1715,24	1873,12
1	2160,93	2059,2	1335,92	1682,17	1766,32
1.1	2175,63	1994,01	1342,14	1540,11	1732,37
2	2160,98	1794,1	1375,94	1513,89	1589,08
2.2	2124,73	2141,44	1360,69	1620,69	1569,08
3	2188,92	1820,68	1213,18	1380,99	1258,33
3.3	2131,94	2010,22	1372,96	1651,37	1795,82
4	2158,95	1700,73	1074,3	1268,14	1303,15

Tab. Hodnoty maximální síly tahové zkoušky, průměrné hodnoty.

Stav vlhkosti	PLA DD [N]	PETG DD [N]	ABS DD [N]	PA12 DD [N]	ASA DD [N]
0	2247,42	2194,6	1358,12	1692,04	1848,17
1	2174,02	2048,56	1354,02	1652,58	1778,26
1.1	2179,86	1975,34	1327,9	1549,64	1751,24
2	2178,06	1766,78	1367,04	1527	1608,1
2.2	2116,74	2123,44	1390,58	1635,58	1599,64
3	2204,08	1844,9	1187,18	1403,08	1234,24
3.3	2151,04	1992,18	1386,08	1629,3	1807,98
4	2174,54	1709,98	1087,02	1244,8	1285,16

Tab. Hodnoty maximálního napětí tahové zkoušky, iterace 1.

Stav vlhkosti	PLA DD [MPa]	PETG DD [MPa]	ABS DD [MPa]	PA12 DD [MPa]	ASA DD [MPa]
0	55,79	55,43	34,35	41,72	45,58
1	54,68	50,95	34,30	40,57	44,76
1.1	54,60	48,92	32,84	38,98	44,25
2	54,88	43,49	33,95	38,50	40,68
2.2	52,72	52,64	35,51	41,26	40,76
3	55,48	46,73	29,03	35,63	30,25
3.3	54,25	49,35	34,98	40,18	45,50
4	54,75	42,98	27,49	30,54	31,68

Tab. Hodnoty maximálního napětí tahové zkoušky, iterace 2.

Stav vlhkosti	PLA DD [MPa]	PETG DD [MPa]	ABS DD [MPa]	PA12 DD [MPa]	ASA DD [MPa]
0	56,58	54,30	33,55	42,88	46,83
1	54,02	51,48	33,40	42,05	44,16
1.1	54,39	49,85	33,55	38,50	43,31
2	54,02	44,85	34,40	37,85	39,73
2.2	53,12	53,54	34,02	40,52	39,23
3	54,72	45,52	30,33	34,52	31,46
3.3	53,30	50,26	34,32	41,28	44,90
4	53,97	42,52	26,86	31,70	32,58

Tab. Hodnoty maximálního napětí tahové zkoušky, průměrné hodnoty.

Stav vlhkosti	PLA DD [MPa]	PETG DD [MPa]	ABS DD [MPa]	PA12 DD [MPa]	ASA DD [MPa]
0	56,19	54,87	33,95	42,30	46,20
1	54,35	51,21	33,85	41,31	44,46
1.1	54,50	49,38	33,20	38,74	43,78
2	54,45	44,17	34,18	38,18	40,20
2.2	52,92	53,09	34,76	40,89	39,99
3	55,10	46,12	29,68	35,08	30,86
3.3	53,78	49,80	34,65	40,73	45,20
4	54,36	42,75	27,18	31,12	32,13

Hodnoty experimentálně změřené a vypočítané při vrubové zkoušce

Tab. Hodnoty kinetické energie k přeražení tělesa, iterace 1.

Stav vlhkosti	PA12 DD [J]	PLA DD [J]	ABS DD [J]	PETG DD [J]	ASA DD [J]
0	0,761	0,199	0,901	0,521	0,423
1	0,752	0,179	0,874	0,493	0,474
1.1	0,762	0,199	0,823	0,494	0,592
2	0,685	0,194	0,799	0,39	0,499
2.2	0,648	0,175	0,887	0,401	0,425
3	0,543	0,142	0,785	0,359	0,399
3.3	0,743	0,143	0,877	0,401	0,452
4	0,601	0,162	0,774	0,298	0,362

Tab. Hodnoty kinetické energie k přeražení tělesa, iterace 2.

Stav vlhkosti	PA12 DD [J]	PLA DD [J]	ABS DD [J]	PETG DD [J]	ASA DD [J]
0	0,709	0,147	0,855	0,449	0,551
1	0,662	0,137	0,928	0,411	0,566
1.1	0,647	0,131	0,941	0,450	0,490
2	0,613	0,130	0,859	0,436	0,457
2.2	0,750	0,149	0,815	0,443	0,527
3	0,633	0,176	0,725	0,313	0,371
3.3	0,681	0,133	0,809	0,377	0,490
4	0,543	0,148	0,722	0,336	0,434

Tab. Hodnoty kinetické energie k přeražení tělesa, průměrné hodnoty.

Stav vlhkosti	PA12 DD [J]	PLA DD [J]	ABS DD [J]	PETG DD [J]	ASA DD [J]
0	0,735	0,173	0,878	0,485	0,487
1	0,707	0,158	0,901	0,452	0,520
1.1	0,704	0,165	0,882	0,472	0,541
2	0,649	0,162	0,829	0,413	0,478
2.2	0,699	0,162	0,851	0,422	0,476
3	0,588	0,159	0,755	0,336	0,385
3.3	0,712	0,138	0,843	0,389	0,471
4	0,572	0,155	0,748	0,317	0,398

Stav vlhkosti	PA12 DD [kJ·m ⁻²]	PLA DD [kJ·m ⁻²]	ABS DD [kJ·m ⁻²]	PETG DD [kJ·m ⁻²]	ASA DD [kJ·m ⁻²]
0	22,38	5,85	26,50	15,32	12,44
1	22,12	5,26	25,71	14,50	13,94
1.1	22,41	5,85	24,21	14,53	17,41
2	20,15	5,71	23,50	11,47	14,68
2.2	19,06	5,15	26,09	11,79	12,50
3	15,97	4,18	23,09	10,56	11,74
3.3	21,85	4,21	25,79	11,79	13,29
4	17,68	4,76	22,76	8,76	10,65

Tab. Hodnoty vrubové houževnatosti, iterace 2.

Stav vlhkosti	PA12 DD [kJ·m ⁻²]	PLA DD [kJ·m ⁻²]	ABS DD [kJ·m ⁻²]	PETG DD [kJ·m ⁻²]	ASA DD [kJ·m ⁻²]
0	20,85	4,32	25,15	13,21	16,21
1	19,47	4,03	27,29	12,09	16,65
1.1	19,02	3,85	27,68	13,24	14,41
2	18,03	3,82	25,26	12,82	13,44
2.2	22,06	4,38	23,97	13,03	15,50
3	18,62	5,18	21,32	9,21	10,91
3.3	20,03	3,91	23,79	11,09	14,41
4	15,97	4,35	21,24	9,88	12,76

Tab. Hodnoty vrubové houževnatosti, průměrné hodnoty.

Stav vlhkosti	PA12 DD [kJ·m ⁻²]	PLA DD [kJ·m ⁻²]	ABS DD [kJ·m ⁻²]	PETG DD [kJ·m ⁻²]	ASA DD [kJ·m ⁻²]
0	21,62	5,09	25,82	14,26	14,32
1	20,79	4,65	26,50	13,29	15,29
1.1	20,71	4,85	25,94	13,88	15,91
2	19,09	4,76	24,38	12,15	14,06
2.2	20,56	4,76	25,03	12,41	14,00
3	17,29	4,68	22,21	9,88	11,32
3.3	20,94	4,06	24,79	11,44	13,85
4	16,82	4,56	22,00	9,32	11,71

Hodnoty experimentálně změřené při zkoušce tvrdosti

Tab. Hodnoty tvrdosti HB, iterace 1.

Stav vlhkosti	PA12 DD [HB]	ABS DD [HB]	PLA DD [HB]	PETG DD [HB]	ASA DD [HB]
0	9,25	12,50	14,00	12,25	10,75
1	9,25	11,75	15,00	12,50	10,50
1.1	9,00	11,50	14,25	10,25	11,25
2	8,00	10,00	13,75	9,50	9,75
2.2	7,25	9,750	13,50	9,75	10,00
3	9,25	12,50	14,00	12,25	10,75
3.3	9,25	11,75	15,00	12,50	10,50
4	9,00	11,50	14,25	10,25	11,25

Tab. Hodnoty tvrdosti HB, iterace 2.

Stav vlhkosti	PA12 DD [HB]	ABS DD [HB]	PLA DD [HB]	PETG DD [HB]	ASA DD [HB]
0	9,75	13,50	14,00	12,75	11,25
1	9,75	12,25	15,00	12,50	10,50
1.1	9,00	12,50	13,75	10,75	10,75
2	8,00	10,00	14,25	9,50	9,25
2.2	6,75	9,25	13,50	9,25	10,00
3	9,75	13,50	14,00	12,75	11,25
3.3	9,75	12,25	15,00	12,50	10,50
4	9,00	12,50	13,75	10,75	10,75

Tab. Hodnoty tvrdosti HB, průměrné hodnoty.

Stav vlhkosti	PA12 DD [HB]	ABS DD [HB]	PLA DD [HB]	PETG DD [HB]	ASA DD [HB]
0	9,50	13,00	14,00	12,50	11,00
1	9,50	12,00	15,00	12,50	10,50
1.1	9,00	12,00	14,00	12,00	12,50
2	9,00	12,00	14,00	10,50	11,00
2.2	9,50	11,00	15,00	11,00	10,00
3	8,00	10,00	14,00	9,50	9,50
3.3	9,00	11,00	14,50	11,50	11,50
4	7,00	9,50	13,50	9,50	10,00