

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta dopravní

Ústav mechaniky a materiálů

Obor: Dopravní systémy a technika



Využití stereolitografie pro výrobu pokročilých porézních materiálů

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Veronika Drechslerová

Vedoucí práce: Ing. Jan Šleichrt

Ing. Michaela Neuhäuserová

Ing. Jan Falta

Rok: 2022



K618 **Ústav mechaniky a materiálů**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Veronika Drechslerová

Studijní program (obor/specializace) studenta:

bakalářský – DOS – Dopravní systémy a technika

Název tématu (česky): **Využití stereolitografie pro výrobu pokročilých porézních materiálů**

Název tématu (anglicky): Stereolithography for manufacturing of advanced porous solids

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Stereolitografie (SLA) je technologie 3D tisku pracující na principu vytvrzování polymerů pomocí záření určité vlnové délky, nejčastěji UV záření. Bakalářská práce bude zaměřena na osvojení si práce s 3D resinovou tiskárnou a její využití pro výrobu vysoce porézních struktur.
- V rámci bakalářské práce bude provedena rešerše problematiky 3D tisku metodou SLA se zaměřením na jeho využití v dopravních aplikacích. U různých 3D tištěných materiálů budou stanoveny mechanické vlastnosti v závislosti na vstupních parametrech výrobního procesu. Experimentálně stanovené hodnoty základních mechanických charakteristik vybraných 3D tištěných materiálů budou následně využity pro výběr vhodného materiálu pro výrobu pokročilých celulárních materiálů (např. auxetických struktur apod.).
- Cílem práce je definovat parametry 3D tisku metodou SLA a stanovit základní mechanické vlastnosti různých 3D tištěných materiálů. Získané hodnoty dále využít při výrobě celulárních struktur a zhodnotit vhodnost metody SLA pro výrobu těchto struktur.



Rozsah grafických prací: není stanoven

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Xu, W. et al.: 3D printing for polymer/particle-based processing, doi:10.1016/j.compositesb.2021.109102
Martín-Montal, J. et al.: Experimental Characterization Framework for SLA, doi:10.3390/polym13071147
Plessis, A. et al.: X-Ray Microcomputed Tomography in Additive Manufacturing, doi:10.1089/3dp.2018.0060

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jan Šleichert

Ing. Michaela Neuhäuserová

Ing. Jan Falta

Datum zadání bakalářské práce:

16. září 2021

(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce:

8. srpna 2022

- a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia



prof. Ing. Ondřej Jiroušek, Ph.D.

doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.

vedoucí

děkan fakulty

Ústavu mechaniky a materiálů

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Veronika Drechslerová

jméno a podpis studenta

V Praze dne.....16. září 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

Veronika Drechslerová

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala Ing. Michaela Neuhäuserové, Ing. Janu Faltovi, Ing. Janu Šleichrtovi za jejich odborné vedení a cenné rady, náměty a připomínky, které mi v průběhu psaní této práce poskytovali. Děkuji též Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i., oddělení biomechaniky, který mi poskytl potřebné zázemí pro realizaci experimentální části této práce.

Rovněž bych ráda poděkovala své rodině a blízkým, kteří mi byli oporou nejenom při vypracovávání této práce, ale i v průběhu celého mého studia.

V Praze dne

Veronika Drechslerová

Název práce: Využití stereolitografie pro výrobu pokročilých porézních materiálů

Autor: Veronika Drechslerová

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Obor: Dopravní systémy a technika

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Jan Šleichrt
Ing. Michaela Neuhäuserová
Ing. Jan Falta
Ústav mechaniky a materiálů, Fakulta dopravní, České vysoké učení
technické v Praze

Abstrakt:

Předmětem bakalářské práce je popis a využití technologie 3D tisku pracující na principu vytvrzování polymerů pomocí záření určité vlnové délky – stereolitografie. Práce je věnována osvojení si ovládání 3D resinové tiskárny, návrhu vhodného nastavení vstupních parametrů výrobního procesu a stanovení hodnot základních mechanických charakteristik použitých materiálů. Pro účely této práce byly navrženy a testovány dva typy zkušebních vzorků 3D tištěných materiálů. Jeden typ byl určen pro kvazi-statické mechanické zatěžování tahem a druhý pro kvazi-statické mechanické zatěžování tlakem. Vzorky na tlakovou zkoušku byly navrženy jako porézní materiály, přesněji auxetické materiály se strukturou známou pod názvem *re-entrant hexagonal honeycomb*. Na základě získaných a prezentovaných výsledků v této práci byl identifikován vhodný materiál a technologický postup pro využití stereolitografie k výrobě vybrané auxetické struktury.

Klíčová slova: stereolitografie, pokročilé porézní materiály, kvazi-statické zkoušky, resin, mechanické charakteristiky

Title: Stereolithography for manufacturing of advanced porous solids

Author: Veronika Drechslerová

Abstract:

The focus of the bachelor thesis is the description and the utilisation of a 3D printing technology working on the principle of curing polymers by the means of radiation of a certain wavelength - stereolithography. The thesis is focused on mastering the set up of a 3D resin printer, designing an appropriate setting of the input parameters of the production process and determining the values of basic mechanical characteristics of the materials used for production. For the purpose of this work, two types of 3D printed test specimens were designed and tested. One type was designed for quasi-static mechanical tensile loading and the other for quasi-static mechanical compressive loading. The compressive test specimens were designed as porous materials, more precisely auxetic materials with *are-entrant hexagonal honeycomb* structure. Based on the results obtained and presented in this work, a suitable material and technological procedure for the use of stereolithography to fabricate the selected auxetic structure was identified.

Key words: stereolithography, advanced porous materials, quasi-static testing, resin, mechanical characteristics

Obsah

1	Seznam veličin	10
2	Seznam použitých zkratk a pojmů	11
3	Úvod	13
I.	Teoretická část	15
4	Stereolitografie	16
4.1	Rozdělení SLA	16
4.2	Historický vývoj	19
4.3	Konstrukční části 3D tiskárny	20
4.4	Materiály pro SLA	22
4.5	Postup tisku (CAD, STL, Slicer)	23
4.6	Faktory ovlivňující tisk	24
4.7	Následné zpracování	26
4.8	Výhody a nevýhody SLA	27
5	Pokročilé porézní materiály	29
5.1	Celulární (buněčné) materiály	29
5.2	Auxetické materiály	30
5.2.1	Auxetické struktury	31
6	Mechanické zkoušky materiálů	34
6.1	Kvazi-statické mechanické zkoušky	35
6.2	Zkouška tahem	35
6.3	Zkouška tlakem	39

II. Praktická část	41
7 Příprava a průběh experimentu	42
7.1 Příprava zkušebních vzorků	42
7.2 Příprava resinové 3D tiskárny	44
7.3 Resiny	48
7.4 Nastavení parametrů	50
7.4.1 Natočení vzorků v souřadnicovém systému XYZ	50
7.4.2 Podpěrné konstrukce a jejich nastavení	52
7.4.3 Nastavení parametrů tisku	56
7.4.4 Model kalibrační matice	61
7.5 Post-processing	63
7.6 Problémy při tisku	65
7.7 Postup měření	67
8 Vyhodnocení experimentálního měření	69
8.1 Vyhodnocení zkoušky tahem	70
8.2 Vyhodnocení zkoušky tlakem	73
9 Závěr	81
Literatura a použité zdroje	84
Seznam obrázků	88
Seznam tabulek	92

Kapitola 1

Seznam veličin

symbol	jednotka	veličina
A	[%]	Tažnost
ϵ_{tb}	[%]	Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení
E	[Pa]	Modul pružnosti v tahu (Youngův modul)
F	[N]	Síla
h	[m]	Výška zkušební vzorku
L	[m]	Měrná délka zkušební tělesa
ΔL	[m]	Absolutní prodloužení
R_e	[Pa]	Mez kluzu
$R_{p0,2}$	[Pa]	Smluvní mez kluzu
R_m	[Pa]	Mez pevnosti
S	[m ²]	Průřezová plocha zkušební tělesa
V	[l]	Objem
Z	[%]	Kontrakce
ϵ	[-]	Poměrné prodloužení
ϵ_{sk}	[-]	Skutečné poměrné prodloužení
ϵ_t	[%]	Poměrné zkrácení
σ	[Pa]	Smluvní napětí
σ_{sk}	[Pa]	Skutečné napětí
ν	[%]	Porozita
ψ	[%]	Poměrné rozšíření

Kapitola 2

Seznam použitých zkratek a pojmů

Aditivní výroba: proces vytváření trojrozměrných objektů na základě digitálních dat

AMF: souborový formát používaný pro 3D tisk (Additive Manufacturing File Format)

CAD: počítačem podporované navrhování (Computer Aided Design)

CTB: souborový formát vytvořený pro 3D resinovou tiskárnu Sonic Mighty 4K (Color-Based Plot Style File)

DLP: digitální světelná projekce (Digital Light Projection)

FDM: způsob 3D tisku spočívající v tavení filamentů (Fused Deposition Modeling)

LCD: displej z tekutých krystalů (Liquid Crystal Display)

LED: světelná dioda (Light Emitting Diode)

LOM: způsob 3D tisku spočívající v pokládání vyříznutých vrstev z plastu na sebe (Laminated Object Manufacturing)

OBJ: souborový formát používaný pro 3D tisk (3D Object File)

Pixel: nejmenší obrazový element

PMMA: polymethylmethakrylát

RP: technologie používané pro výrobu prototypů, zejména metodami aditivní výroby (Rapid Prototyping)

SLA: stereolitografie (StereoLithography)

Slicer: krájecí software využívaný pro 3D tisk

SLS: způsob 3D tisku založený na zapékání práškového materiálu laserovým paprskem (Selective Laser Sintering)

STL: souborový formát používaný pro 3D tisk (Standard Triangle Language)

USB: univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)

UV: ultrafialové záření (UltraViolet)

VRML: grafický formát založený na deklarativním programovacím jazyce (Virtual Reality Modeling Language)

Wifi: komunikační standard pro bezdrátový přenos dat (Wireless Fidelity)

2D: dvojdimenzionální

3D: trojdimenzionální

Kapitola 3

Úvod

S moderní dobou je úzce spjat i rozvoj nových technologií aditivních výroby. „*Aditivní výroba je souhrnný název pro technologie vytvářející 3D objekty za pomoci vrstvení materiálu, např. plastu, kovu, betonu a dalších*“ [1]. Tento způsob výroby v 3D tiskárnách se postupně stává běžnou součástí našich životů. To, co pro nás bylo ještě před několika lety nemyslitelné, je dnes běžnou praxí. 3D tiskárny jsou využívány nejen pro tisk konstrukčních dílů v průmyslových odvětvích, jako např. v automobilovém, leteckém, stavebním aj., ale i v lékařství, ve výrobě šperků apod.

Jedním z nejmodernějších způsobů 3D tisku je technologie pracující na principu vytvrzování polymerů pomocí záření určité vlnové délky, tzv. stereolitografie. Přestože se tato technologie začala těšit oblibě až v posledních několika letech, jedná se o proces výroby, jehož historické kořeny sahají až do doby před více než 40 lety [2]. Tehdy se ovšem jednalo především o výzkum. Pro komerční účely začala být tato technologie využívána až s příchodem 21. století. Využívaly ji hlavně velké společnosti a firmy, protože tato zařízení byla nedostupná, drahá a prostorově náročná. Postupem doby technologie pronikla i do domácností, do modelářských dílen, do škol, a to především díky poklesu pořizovací ceny a dostupnosti. Metoda stereolitografie je pro svoji vysokou přesnost tisku, mimo jiné, využívána pro výrobu materiálů s geometricky řízenou mikrostrukturou. K těmto materiálům se řadí pokročilé porézní materiály, kam patří i auxetické materiály. Jedná se o moderní materiály, které díky svým specifickým vlastnostem zaujaly vědecký svět.

Bakalářská práce je zaměřena na využití stereolitografie pro výrobu zkušebních vzorků, které byly následně použity pro kvazi-statické mechanické zkoušky, konkrétně tahovou a tlakovou, kdy

na základě těchto zkoušek byly určeny základní mechanické vlastnosti 3D tištěných materiálů.

Cílem bakalářské práce bylo osvojení si práce s 3D resinovou tiskárnou a její využití pro výrobu porézních struktur. Dalším cílem práce bylo definovat parametry 3D tisku metodou stereolitografie, stanovení základních mechanických vlastností různých 3D tištěných materiálů a získané hodnoty využít při výrobě pokročilých celulárních struktur.

Bakalářská práce se skládá ze dvou hlavních částí – teoretické a praktické. Teoretická část je rozdělena do tří kapitol. První kapitola se věnuje stereolitografii, jejímu rozdělení, historickému vývoji, konstrukčním částem 3D tiskárny, materiálům, postupu tisku, faktorům ovlivňujícím tisk, následnému zpracování a výhodám a nevýhodám stereolitografie. Druhá kapitola referuje o pokročilých porézních a auxetických materiálech. Třetí kapitola se zabývá mechanickými zkouškami materiálů se zaměřením na kvazi-statické zkoušky. Praktická část práce je složena ze dvou kapitol, z nichž první se věnuje přípravě vzorků, nastavení parametrů výrobního zařízení a postupu měření, zatímco druhá kapitola je zaměřena na vyhodnocení měření a stanovení hodnot vybraných mechanických vlastností.

I. Teoretická část

Kapitola 4

Stereolitografie

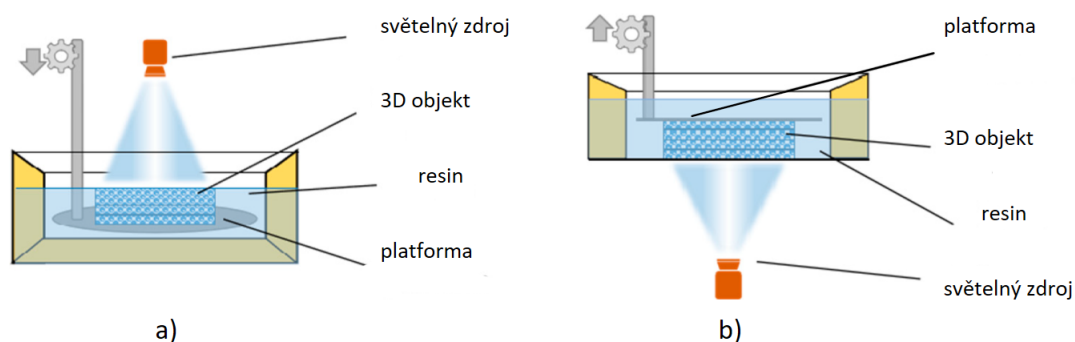
Stereolitografie je technologií aditivní výroby, která je využívána pro své vysoké rozlišení tisku v mnoha odvětvích pro výrobu součástí, modelů, protéz či hraček. Označuje se obvykle zkratkou SLA podle prvního stereolitografického přístroje, ale je možné se setkat i s názvy fotopolymeryzace nebo pryskyřičný 3D tisk [2]. SLA funguje na principu vytvrzování tekuté fotosenzitivní pryskyřice vrstvu po vrstvě pomocí světelného zdroje – projektoru nebo ultrafialového laserového paprsku s rozsahem vlnových délek mezi 300 a 400 nm – v závislosti na typu SLA tiskárny [3, 4]. Světelný zdroj je zaostřován pomocí čoček a v předem definované dráze dopadá na povrch fotosenzitivní kapaliny a vytváří selektivním vytvrzováním novou vrstvu. Proces se opakuje do té doby, než je celý vzorek vytištěn [5]. Výtisky vytvořené metodou SLA potřebují následné zpracování pro finální dokončení vyrobeného dílu.

4.1 Rozdělení SLA

Stereolitografii lze dělit podle architektury nebo podle použité technologie pro vytvrzování tekuté fotosenzitivní pryskyřice.

Dělení podle architektury závisí na způsobu, jakým se stereolitografický přístroj pohybuje v Z-tové (svislé) souřadnici. Pokud se konstrukční platforma pohybuje v záporném směru (klesá), pak se architektura označuje za *Top-down* architekturu, pokud se pohybuje platforma v opačném směru, tedy stoupá, pak se architektura nazývá *Bottom-up*. Při tisku s architekturou *Top-down*

laser přímo dopadá na povrch zásobníku s pryskyřicí a dochází k polymerizaci tekuté pryskyřice, která se vytvrzuje. Po vytvrzení každé vrstvy je konstrukční platforma ponořena hlouběji do nádrže o stanovenou velikost kroku, obvykle 0,05 mm až 0,15 mm, a již vytvrzená vrstva je překryta novou vrstvou tekuté pryskyřice. Celý proces se opakuje, dokud není vytvořen celý 3D objekt. Principem architektury *Bottom-up* je propouštění světelného zdroje skrz dno nádrže pryskyřice, které je tvořeno průhlednou fólií. Po dokončení vytvrzení každé vrstvy dojde ke zvednutí konstrukční platformy, aby se nevytvrzená pryskyřice dostala pod platformu a proces se mohl opakovat. Schéma jednotlivých architektur je možno vidět na obrázku 4.1. Obě architektury potřebují při tisku složitějších dílů podpěrné konstrukce, které zajišťují správný tisk a zabraňují jeho zborcení. Po dokončení tisku je nutné následné zpracování [6, 7]. Výhody a nevýhody obou architektur jsou uvedené v tabulce 4.1.



Obrázek 4.1: Schéma architektury SLA a) Top-down architektura, b) Bottom-up architektura, převzato z [8]

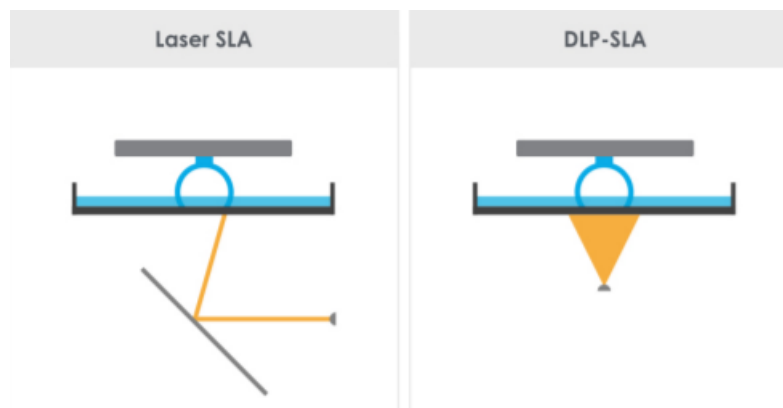
Architektura *Bottom-up* je výhodnější pro menší stolní 3D tiskárny díky své jednoduchosti a cenové dostupnosti, ale tyto výhody jsou za cenu nutnosti použití většího množství materiálu potřebného pro podpěrné konstrukce a častějšího vyměňování fólie nádrže na pryskyřici [6].

Podle použitého zdroje ultrafialového záření (UV) lze dělit SLA na tři typy. Prvním typem je *direct laser writing* neboli přímý laserový zápis. Jedná se o způsob tisku, kdy laser vytvrzuje fotopolymerní pryskyřici bod po bodu v předem definované dráze, která reprezentuje plochu řezu 3D modelem. Tento způsob 3D tisku může využívat jak architekturu *Top-down*, tak *Bottom-up*. Laser je ve většině případů vychylován pomocí galvanometru a směřován do konkrétního bodu [9, 10]. Druhým typem je *digital light projection* (zkr. DLP), neboli digitální světelná projekce. Základním principem je použití digitálního světelného projektoru s tisíci LED diodami ve velikosti mikrometrů a projekčního zrcadla. Projektor, na rozdíl od laseru, dokáže najednou ozářit celou

Tabulka 4.1: Výhody a nevýhody SLA architektur, převzato z [6]

Top-down		Bottom-up	
Výhody	Nevýhody	Výhody	Nevýhody
rychlejší proces tisku	prostorově náročnější	cenově dostupnější	pravidelná výměna fólie
menší vliv gravitačních sil	nutnost kontroly tloušťky vrstvy	snadnější na ovládání	významnější vliv gravitačních sil na tištěný díl
potřeba menšího množství podpěrného materiálu	obtížná výměna pryskyřice	menší množství potřebné pryskyřice v nádrži	nutnost tisknout díly pod úhlem
spolehlivější	nákladná výměna nádrže	snadné ovládání tloušťky každé vrstvy	

vrstvu, přičemž se každá vrstva vytvrzuje v okamžiku, kdy je objekt vyzdvižen z polymerní kapaliny. Tento způsob tisku je umožněn pouze architekturou *Bottom-up*. Rozlišení DLP závisí na velikosti pixelu, který je mnohem menší než velikost laserového bodu [9, 7, 11]. První dvě technologie je možné vidět na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2: Schéma typu SLA přímého laserového zápisu (vlevo) a digitální světelné projekce (vpravo), převzato z [12]

Třetím typem SLA tiskárny je *Liquid crystal display* (zkr. LCD), který funguje na stejném principu jako druhý typ jen s rozdílem, že namísto digitálního světelného projektoru je zde použita LCD obrazovka [7]. Výhody a nevýhody jednotlivých technologií jsou uvedeny v tabulce 4.2.

Tabulka 4.2: Porovnání výhod a nevýhod technologií SLA, převzato z [9]

Přímý laserový zápis		DLP/LCD	
Výhody	Nevýhody	Výhody	Nevýhody
spolehlivější tisk	delší doba tisku	vyšší rychlost tisku	schodkovitý defekt na okraji výtisku
	menší rozlišení	vyšší rozlišení	
	výška výtisku omezena výškou nádrže na pryskyřici	nižší pořizovací cena	
	větší pravděpodobnost poruch	jednodušší údržba a opravy	

4.2 Historický vývoj

Stereolitografie je považována za nejstarší metodu 3D tisku. Její počátky sahají až do roku 1977, kdy byl udělen první patent spojený s 3D tiskem vědci W. K. Swainsonovi na „*použití laseru k vytvoření kovalentního zesíťování na povrchu kapalného monomeru, kdy vyráběný objekt spočíval na tácu, který byl postupně po jednotlivých krocích spouštěn do kádě*“ [13]. Na první úspěch spojený s 3D tiskem chtěl o několik let později navázat japonský vynálezce Dr. Hideo Kodama, který podal patentovou přihlášku na proces 3D tisku jakožto metody pro rychlou výrobu prototypů a roku 1981 vydal vědecký článek zabývající se automatickou metodou výroby 3D plastového modelu pomocí tvrdnoucího polymeru vlivem UV záření. Článek podrobně popisoval využití kapalného tvrdnoucího polymeru, který byl znám pod názvem Tevista. K udělení patentu Dr. H. Kodamovi ale nedošlo, protože autor nestihl podat kompletní patentovou přihlášku před uplynutím jednorocní lhůty. Na scéně se roku 1983 poprvé objevuje jméno vynálezce Charlese Hulla, který je považovaný na celém světě za otce 3D tisku. Do historie se zapsal jeho vynálezem stere-

olitografického přístroje a následným patentem na metodu stereolitografie, který mu byl udělen roku 1986. Jeho metoda se zakládala na vytvrzování pryskyřice UV laserovým paprskem. Charles Hull se stal zakladatelem společnosti 3D Systems, která v roce 1987 představila první komerční 3D tiskárnu SLA-1, která se o rok později začala prodávat [7, 13]. Tento rok se stal milníkem v celém vývoji 3D tisku, protože dal základ vývoji dalších typů tisku, jako jsou výroba pomocí tavení filamentů (FDM), zapékání práškového materiálu pomocí laseru (SLS) či vyřezávání jednotlivých vrstev z plastu a lepení na sebe (LOM). Nicméně i přes objevy dalších metod 3D tisku se stereolitografie stále rozvíjela. Byly založeny další společnosti jako například EOS, Solidscape nebo Objet Geometries, které se zabývaly výrobou tiskáren. Roku 2011 byla založena třemi mladými studenty společnost FormLabs, která se proslavila výrobou prvních stolních SLA tiskáren. Téhož roku se na trhu objevila nová technologie SLA založená na vytvrzování fotopolymeru pomocí světelného projektoru, což byl velký posun dopředu, jelikož tato technologie byla rychlejší, přesnější a cenově dostupnější. Poměrně novou technologií se stala technologie využívající LCD obrazovek pro vytvrzování [9, 14]. Stereolitografické tiskárny se postupně přeměnily z velkých a poměrně náročných strojů na malé, lehce ovladatelné tiskárny, které se díky svému neustálému nárůstu využití staly dostupnými pro širokou veřejnost a začaly se používat v různých odvětvích jako zdravotnictví, strojírenství, stavebnictví atd.

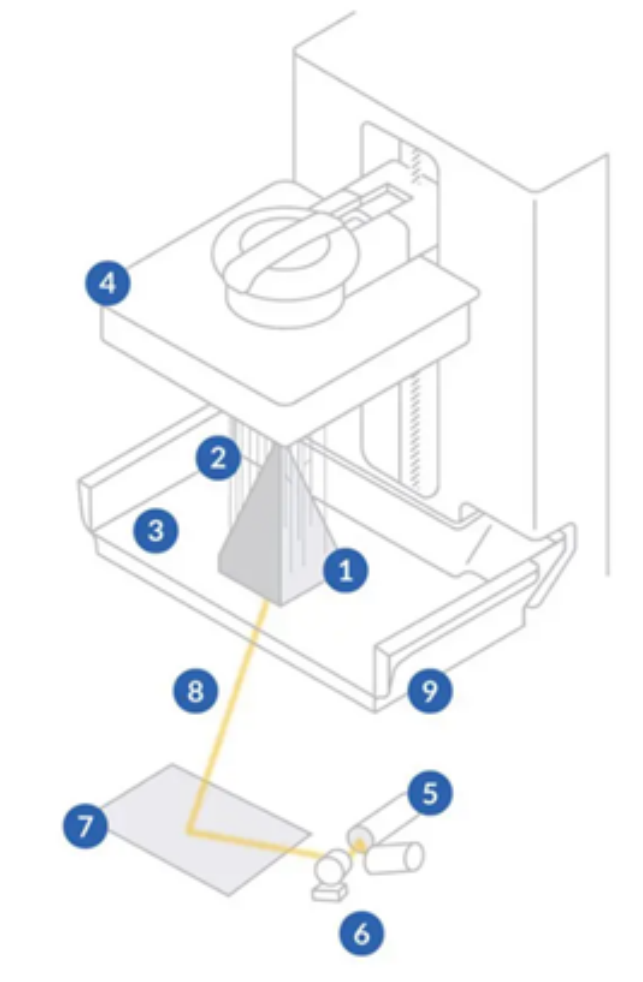
4.3 Konstrukční části 3D tiskárny

Konstrukční části jednotlivých SLA tiskáren záleží na jejich technologii tisku, přičemž všechny standardní SLA tiskárny se obvykle skládají z těchto základních částí [2] (viz obrázek 4.3):

- tištěný díl (1) – tisknoucí se počítačový model podle vygenerovaného G-kódu;
- podpůrné konstrukce (2) – slouží k zabránění zhroucení tištěného dílu a dodržení požadovaných linií;
- tekutá pryskyřice (3) – fotosenzitivní materiál potřebný pro tisk;
- konstrukční platforma (4) – část, na které se vytváří tištěný díl;
- světelný zdroj (5);
- galvanometry (6);

- zrcadlo (7) – odráží paprsek;
- laserový paprsek (8) – vytvrzuje tekutou pryskyřici bod po bodu;
- zásobník na pryskyřici (9) – obsahuje tekutou pryskyřici;
- LCD obrazovka/projektor - vyskytuje se u 3D tiskárny s technologií LCD/DLP namísto laseru, galvanometrů a zrcadla [2].

Součástí SLA tiskáren je také ovládací panel, který se většinou nachází na přední části tiskárny. Poskytuje uživatelské rozhraní, přes které je možné kalibrovat tiskárnu, spouštět a zastavovat tisk, kontrolovat průběžně tisk vrstev a dodatečně nastavovat parametry tiskárny. Instrukce k tisku jednotlivých dílů mohou být do tiskárny posílány prostřednictvím Wifi nebo připojením USB, což umožňuje pracovat SLA tiskárně bez nutnosti připojení k počítači [15].



Obrázek 4.3: Ilustrační schéma konstrukčních částí SLA tiskárny, převzato z [2]

4.4 Materiály pro SLA

Metoda SLA využívá fotocitlivé neboli fotopolymerní pryskyřice (častěji známé pod cizím označením resiny), ze kterých postupně vytváří pomocí světelného zdroje 3D objekt. Fotopolymer je podle definice: „*materiál citlivý na světlo, který mění své fyzikální vlastnosti, když je vystaven světlu*“ [16]. Fotopolymerní pryskyřice se dodává v tekuté podobě a vlivem vystavení světlu o specifických vlnových délkách je přeměňována na pevnou látku s předem definovaným tvarem na základě počítačového modelu. „*Slovo polymer znamená mnoho částí a je definován jako jakýkoli materiál, syntetický nebo organický, sestávající z malých jednoduchých molekul, které jsou spolu spojeny, aby vytvořily větší molekulu. Fotografie ve fotopolymeru označuje jeho citlivost na světlo.*“ [17] První zmínka o fotopolymerech ve spojení se stereolitografií se objevila v roce 1984, kdy vynálezce Charles Hull zkoumal vytvrzování pryskyřice UV laserovým paprskem. Kapalné fotopolymerní pryskyřice obsahují monomery, oligomery a fotoiniciátory, které polymerizují při vystavení UV záření. Výběr pryskyřice záleží na konečném využití dílu, respektive jeho požadovaných mechanických vlastnostech, např. pevnosti, tepelné odolnosti, pružnosti, voděodolnosti nebo transparentnosti. Cena za jednotlivé typy pryskyřice se liší v závislosti na jejich vlastnostech a pohybuje se v rozmezí od 1000 Kč až do 9000 Kč za litr. Nejčastěji používanými pryskyřicemi jsou epoxydové a methakrylátové (PMMA) pryskyřice [16, 18].

Označení epoxydové pryskyřice se využívá jak pro nevytvrzenou, tak i pro vytvrzenou formu pryskyřice. Epoxydová pryskyřice označuje typ reaktivního polymeru, který se skládá ze dvou složek, a to ze samostatné pryskyřice a vytvrzovacího činidla (katalyzátoru nebo tvrdidla). Epoxydové pryskyřice jsou velmi oblíbené pro jejich vlastnosti, mezi které patří např. dobrá přilnavost materiálu k mnoha podkladům, vysoká houževnatost, vysoký elektrický odpor, dobré izolační vlastnosti, dlouhá trvanlivost a celkově vyšší tepelná a chemická odolnost než u jiných pryskyřic. Navíc při vytvrzování se málo smršťují. Postup vytvrzování potřebný k vytvoření vytvrzené pryskyřice s optimálními vlastnostmi závisí na přesné kombinaci pryskyřice, vytvrzovacího činidla a katalyzátoru. Velkou výhodou epoxydových pryskyřic je, že při procesu vytvrzování nevznikají žádné těkavé vedlejší produkty, což umožňuje tisk souvislých struktur bez vzniku dutin. Díky svým skvělým vlastnostem se využívají např. v leteckém průmyslu pro výrobu součástek nebo jako matrice pro kompozity [19, 20].

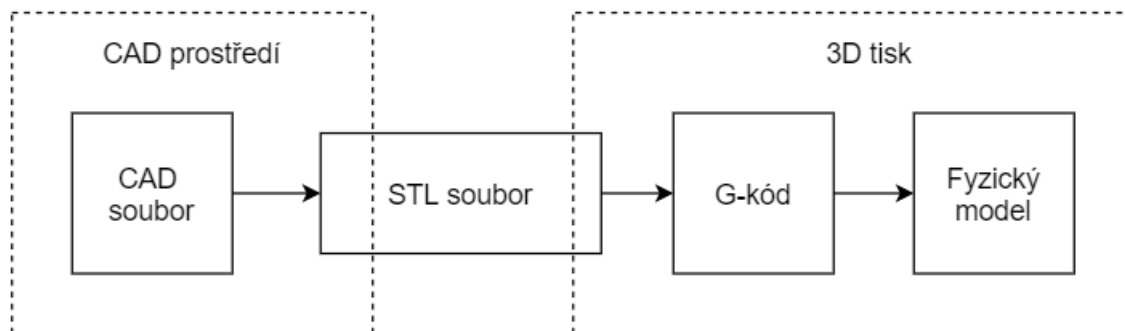
Methakrylátové pryskyřice (PMMA) jsou vysoce výkonné polymerní materiály, které byly objeveny v roce 1930. Mají velkou škálu příznivých vlastností, díky kterým našly uplatnění v mnoha

průmyslových aplikacích, zejména však v oblasti optiky a biomateriálů. Mezi jejich vlastnosti patří vysoký index lomu, dobrá odolnost vůči UV záření, vysoká tuhost, tvrdost a chemická trvanlivost. Navíc jsou netoxické, poměrně levné, snadno zpracovatelné a biokompatibilní. Pro využití v medicíně je důležité, že PMMA vykazuje minimální zánětlivé reakce při kontaktu s biologickými tkáněmi. Nevýhodou PMMA pryskyřic je jejich křehkost, nízká rázová pevnost a odolnost proti únavě [21, 22].

S vývojem pryskyřičných fotocitlivých materiálů se začaly do pryskyřice přidávat i méně obvyklé materiály pro zlepšení a přizpůsobení výsledných vlastností jako např. titan, keramický prášek nebo korkový prášek.

4.5 Postup tisku (CAD, STL, Slicer)

Proces 3D tisku začíná vytvořením 3D objektu s využitím počítačově podporovaného návrhového softwaru (CAD), dat ze skenování nebo matematických rovnic. Soubory CAD obsahují informace o tvaru a velikosti modelu, nicméně tento formát není tiskárnou podporovaný a je nutno převést modely nejčastěji na soubory STL, OBJ nebo AMF. Soubor STL je schopen uchovávat informaci o geometrii objektu pouze ve formě trojúhelníkových segmentů, avšak informace o barvě modelu postrádá. Proto je tento formát vhodný jen pro jednobarevný tisk. Pro vícebarevný tisk se doporučuje formát VRML nebo OBJ, který umí vytvářet objekty nejenom pomocí trojúhelníků, ale i jiných tvarů a křivek. Následně je model rozřezán pomocí krájecího softwaru do jednotlivých 2D vrstev. Pro tento krájecí software je častěji využíván název *Slicer*, který je přejat z oficiálního anglického označení. Každá SLA tiskárna používá jiný krájecí software, tudíž se uživatelské rozhraní může mírně lišit. Proces krájení v sobě obnáší i možnost nastavení konkrétních parametrů tisku, které ovlivňují průběh tisku a mohou mít vliv i na vlastnosti tištěných dílů, a umístění podpůrných konstrukcí pro části tištěné v převisech či pod úhlem. *Slicer* převede STL soubor na G-kód, ve kterém jsou zakotveny veškeré příkazy pro tisk jednotlivých vrstev modelu, které řídí pohyb částí tiskárny (konstrukční plošiny, zrcadel, laseru atd.) po předem definovaných drahách odpovídajícím 2D řezu modelem a vytváří 3D objekt vrstvu po vrstvě. V obecné rovině by se celý proces vytváření 3D tisku dal shrnout do dvou velkých celků (viz obrázek 4.4), kdy první celek se zabývá prací v CAD systému, kam spadá již zmíněné vytvoření souboru CAD, a druhý celek se zabývá samostatnou přípravou tisku a vlastním tiskem [3, 9].



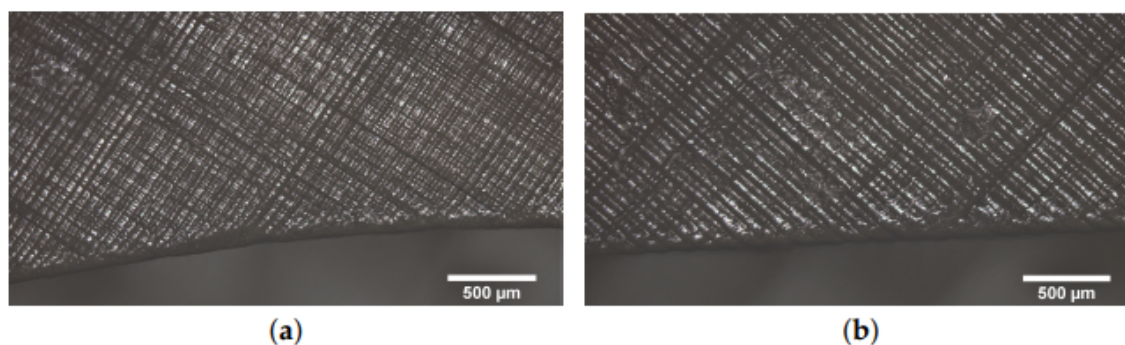
Obrázek 4.4: Zjednodušené schéma procesu 3D tisku, převzato z [23]

Důležitým nástrojem při krájení modelu je prohlížeč 3D objektů (*3D models viewer*), který umožňuje zkontrolovat navržený model před tiskem, jestli nevznikají převisy, které by nebyly podepřeny, nebo jestli se model vejde na konstrukční platformu a nedochází k přesahům mimo stanovený prostor. V obou případech by jinak mohlo dojít k deformaci tisku či dokonce poničení SLA tiskárny.

4.6 Faktory ovlivňující tisk

Při procesu krájení je potřeba se rozhodnout pro správné nastavení parametrů tisku. Je důležité mít na paměti, že ideální nastavení by mělo vést k rovnováze mezi kvalitou a rychlostí tisku jednotlivých dílů. Pokud se upřednostní rychlost tisku, bude to na úkor kvality výtisků. Potřebná úroveň kvality se liší v závislosti na zamýšleném využití tištěného modelu. Pro vědecké účely bude muset být vzorek v daleko větší kvalitě než např. u nekomerčního domácího použití.

Mezi parametry, které je možné nastavit při procesu krájení, se například řadí výška vrstvy, čas vytvrzení vrstev, rychlost pohybu konstrukční platformy, orientace vzorku nebo vyhlazení schodkovitého efektu. Výška vrstvy charakterizuje množství materiálu vytvrzeného světelným zdrojem v každé vrstvě v průběhu tisku. Její rozměr se uvádí zpravidla v mikrometrech a pohybuje se v rozmezí od $25\ \mu m$ do $100\ \mu m$. Výška vrstvy ovlivňuje jak rychlost tisku, tak jeho kvalitu. Čím jsou vrstvy tenčí, tím se zvyšuje detail tisku a potřebná doba pro vytisknutí celého dílu. Vliv výšky vrstvy na tištěný materiál je vidět na obrázku 4.5 [24, 25].



Obrázek 4.5: Detailní zobrazení vlivu výšky vrstvy na povrch tištěného materiálu a) $50\ \mu\text{m}$, b) $100\ \mu\text{m}$, převzato z [24]

Dalšími parametry, které lze nastavit a ovlivňují kvalitu tisku, jsou intenzita světla a čas potřebný na vytvrzení jedné vrstvy. Nelze přesně říci, jaká doba na vytvrzení je nejlepší, protože každá SLA tiskárna vyžaduje jiné nastavení, nicméně ale jako výchozí hodnota se uvádí 6 sekund. Uživatelské rozhraní umožňuje nastavení rozdílného času vytvrzování pro spodní vrstvy a pro ostatní vrstvy. Doporučená doba vytvrzování spodních vrstev by měla být 8 až 12krát delší než ostatních. Pokud je doba nedostačující, může dojít k odlepení tištěného dílu od konstrukční platformy. Podstatným nastavitelným parametrem je i rychlost, se kterou se zvedá konstrukční platforma z nádrže v průběhu vytvrzování. Je uváděna v mm/min a její nastavení má velký dopad na výsledek tisku. Pokud je rychlost malá, tisk trvá dlouho, pokud je rychlost příliš velká, může dojít k poničení tištěného dílu či přímo částí SLA tiskárny [25].

Neméně důležitým parametrem je orientace tištěného vzorku. Kritickým místem je rozhraní mezi vrstvami, kdy se nevytvrzená pryskyřice musí přichytit na již vytvrzenou vrstvu. Úhel tisku vzorku má velký vliv na jeho kvalitu. Náhlé změny struktury modelu, například z malého průřezu na velkou plochu, mají za následek výrazné objemové změny vrstev, porušení integrity modelu a vznik patrných viditelných čar na povrchu. Proto je nutné rozumně uvažovat, jak ideálně situovat vzorek na platformu, aby nedocházelo k velkým skokům v přírůstcích ve směru osy z a zatížení od tištěného dílu bylo rozloženo do větší plochy [24, 25]. S orientací tisku vzorku je úzce spojena potřeba podpěrných konstrukcí, které slouží k podepření vzorku v místech, kde by nebyla možnost uchycení vytvrzené pryskyřice již k vytvořené vrstvě. Podpěry se umísťují do převisů a zabraňují zhroucení konstrukce či jejímu poničení.

4.7 Následné zpracování

Následné zpracování je častěji označováno anglickým výrazem *Post-processing*. Jedná se o proces, kdy jsou modely dále zpracovávány, aby dosáhly nejvyšší možné pevnosti, stability či požadovaného vzhledu. *Post-processing* obnáší činnosti jako je odstraňování podpěr, čištění vzorků pomocí ultrazvukové čističky a vytvrzování. Tyto kroky jsou nutností k získání finální podoby výtisku. Následně je možné vytištěné modely ručně dobarvit či složit jednotlivé části dohromady, ale tyto úpravy již nemají vliv na jejich mechanické vlastnosti.

Čištění výtisků pomocí ultrazvuku je nejrozšířenějším způsobem odstraňování nečistot a zbytků resinu po tisku. „*Ultrazvuk je akustické vlnění o kmitočtu vyšším než 20 kHz. Pro čištění je nejrozšířenější používání kmitočtů v rozmezí 20 - 100 kHz.*“ [26] Vyšší frekvence jsou vhodné k čištění drobných a křehkých věcí jako je např. optika. Chemický proces, při kterém dochází k rozrušení nečistot na povrchu modelu a k jejich následnému odstraňování, se nazývá kavitace. Funguje na principu rychlého nárustu teploty a tlaku pracovní kapaliny, ke kterému dochází při průchodu akustické vlny kapalinou a rozkmitání jejich částic. Pracovní kapalina se dostane mezi povrch modelu a vrstvu nečistoty, čímž se naruší vazební síly na rozhraní čištěného modelu a kapaliny a dojde k odplavování nečistoty. Tento chemický proces je doprovázený vznikem bublin v kapalině [26].

Modely po dokončení tisku nabývají svého finálního vzhledu, ale jejich polymerace není ještě dokončena, což znamená, že model nedosáhl ještě svých finálních mechanických vlastností. Navíc modely zůstávají na dotek měkké, lepkavé a může docházet k odpařování toxických látek. Aby se danému problému zabránilo a modely dosáhly maximální pevnosti, odolnosti a stability, dochází k vytvrzování modelů pomocí UV světla a tepla. Existují tři základní způsoby, jak k vytvrzení může dojít:

- **pomocí slunečního světla** – jedná se o nejlevnější způsob vytvrzení, protože není potřeba žádných přístrojů. Výtisky jsou umístěny na sluneční světlo a ponechány dostatečně dlouho, aby se vytvrdily. Tento způsob vytvrzování má však hned několik značných nevýhod. Doba vytvrzování se pohybuje v rozmezí několika hodin a vlivem proměnných vnějších podmínek není možné jednoznačně stanovit konkrétní hodnotu, jak dlouho by vytvrzování mělo trvat. Vliv na dobu trvání mají např. intenzita UV záření, stupeň oblačnosti, zeměpisná poloha a denní doba. Navíc při dopadání světelných paprsků vzniká nerovnoměrné ozáření modelu a je nutné model ručně otáčet;

- **vytvrzováním výtisku pod vodou** – výtisky jsou u tohoto způsobu vytvrzování ponořeny do vody a vystaveny slunečnímu záření. Výhodou této metody oproti předchozí je, že díky schopnosti vody rozptylovat UV paprsky dochází k rovnoměrnému ozáření výtisku, což zkracuje dobu potřebnou pro vytvrzení až na polovinu oproti obyčejnému vystavení modelu slunečnímu záření;
- **pomocí vytvrzovací stanice (UV lampy)** – vytvrzování výtisků pomocí UV lamp značně zkracuje dobu vytvrzování z několika hodin na minuty a je nejpohodlnějším způsobem následného zpracování. Důležité je i zajištění rovnoměrného osvětlení výtisků díky jejich umístění na otáčivou plošinu, která se pohybuje konzistentní rychlostí a umožní proniknout UV světlu do všech míst výtisku. Některé vytvrzovací stanice jsou navrženy i s funkcí mytí vzorku, tudíž není potřeba před vytvrzováním umísťovat výtisky do ultrazvukové čističky [24].

Při vytvrzování je potřeba klást důraz na volbu délky doby vytvrzování, protože doba vytvrzování zásadně ovlivňuje mechanické vlastnosti 3D tištěných výtisků. Pokud je doba příliš krátká, výtisk zůstává měkký, naopak pokud je vystaven UV záření příliš dlouho, bude výtisk extrémně křehký a porézní. Ideální doba nelze obecně určit, protože doba vytvrzování se liší v závislosti na velikosti objektu, zdroji UV světla či použitém resinu [24].

4.8 Výhody a nevýhody SLA

SLA se stala rozšířenou a velice oblíbenou metodou kvůli vynikajícím vlastnostem, které objekty vytištěné touto metodou mají. Ve srovnání s jinými metodami tisku SLA tiskne objekty s vysokou kvalitou, přesností, mírou detailu na mikrometry a hladkou povrchovou úpravou, což umožňuje vytváření různých složitých geometrií a přizpůsobení designu požadavkům. Velkým pozitivem jsou i mechanické vlastnosti jako je izotropie či vodotěsnost materiálu.

Přesnost a preciznost SLA tisku umožňuje opakovaně vytvářet komponenty se stejnými výslednými vlastnostmi. Díky uzavřenému prostředí 3D tiskárny jsou zachovávány pro každý tisk identické podmínky. Přesnost oproti termoplastickým technologiím je zajištěna nižší teplotou tisku, protože není nutné tavit materiál, jelikož pryskyřice se vyskytuje v kapalném stavu. Proces tisku probíhá již při pokojové teplotě. Hladká povrchová úprava je základním požadavkem tisku a po-

máhá zkrátit dobu následného zpracování, kdy odpadá potřeba broušení a leštění vzorku. Tištěné díly pomocí SLA jsou izotropní narozdíl od tištěných objektů pomocí FDM, kdy mezi vytvořenými vrstvami vlivem tisku vzniká anizotropie, která omezuje využitelnost tištěných dílů. Izotropie u SLA umožňuje vytvářet díly s předvídatelnými mechanickými vlastnostmi. Díly vytvořené pomocí SLA jsou spojitě, což umožňuje jejich voděodolnost, která je důležitá pro inženýrské aplikace, kde je potřeba umět řídit a předvídat průtok vzduchu nebo kapaliny daným dílem, čehož se hojně využívá např. v automobilovém (např. Rolls-Royce) nebo leteckém průmyslu (např. společnost Boeing, Airbus) [2]. Různé typy pryskyřic se používají pro rozdílné výsledné vlastnosti tištěného materiálu. Materiály mohou být měkké nebo tvrdé, odolné proti nárazu nebo doplněny o sekundární složky jako keramika či sklo. Tyto různé vlastnosti zajišťují všestrannost materiálu a jeho použití, které se pohybuje od výroby průmyslových dílů až po výrobu implantátů v medicíně [2]. Neodmyslitelnou výhodou je i fakt, že SLA tiskárny jsou schopné pracovat bez potřeby přítomnosti člověka v průběhu tisku.

Metoda SLA má i své nedostatky, na které je potřeba při výběru technologie pro tisk myslet. Jednou z hlavních nevýhod je, že tištěné díly potřebují po vytištění následné zpracování, které má zajistit úplnou polymerizaci pryskyřice. Dále SLA vyžaduje použití podpěrných konstrukcí, které slouží k připevnění dílu ke konstrukční platformě a zabraňují selhání tisku v důsledku působení gravitace. I výběr použitelných materiálů je omezen na polymery, které lze vytvrzovat pomocí světelného zdroje. U více materiálových SLA tiskáren nastává problém, že technologie ještě není natolik zdokonalená jako u použití jednoho materiálu a je nutné časté čištění zásobníku s pryskyřicí a opakovatelná výměna tiskárny, což dělá 3D tisk časově náročný a cenově nákladný. Mezi další nevýhody lze zařadit křehkost materiálu a jeho náchylnost ke smršťování, vysoké náklady na tisk, omezený výběr materiálu a barvy, toxicita materiálu a s tím spojené určité zásady bezpečnosti práce. Vlivem dlouhodobého slunečního záření dochází k postupné degradaci mechanických vlastností a vzhledu tištěných dílů [9, 27].

Kapitola 5

Pokročilé porézní materiály

S moderní dobou začala stoupat potřeba po spolehlivých, pevných, ale zároveň lehkých materiálech, které bylo doposud komplikované vyrábět. Až s rozvojem 3D tisku a možností tisknout výrobky vrstvu po vrstvě, došlo ke značnému zjednodušení výroby porézních materiálů, u kterých lze přesně definovat jejich vnitřní architekturu. Do té doby se vyráběly pěny, u kterých bylo takřka nemožné ovládat jejich vnitřní uspořádání. Porézní, konkrétně celulární materiály se pro své specifické mechanické vlastnosti staly oblíbenými v mnoha průmyslových odvětvích, např. v biomedicíně, automobilovém a leteckém průmyslu či sportu. 3D tisk zároveň umožňuje zachování stejných podmínek pro každý tisk, díky čemuž je možné tisknout téměř identické výtisky [28].

5.1 Celulární (buněčné) materiály

„Buněčné materiály se vyznačují porézní mikrostrukturou, která se skládá z pevných a dutých sítí. Slovo "buněčný" je odvozeno od slova "buňka", což byl název pro nejmenší stavební prvek, který identifikoval Robert Hooke, vynálezce mikroskopu, v roce 1660 při zkoumání mikrostruktury korku.“ [29] Inspirace pro umělou výrobu buněčných materiálů vychází z přírodních materiálů, jako jsou včelí plástve, mořské houby, dřevo či sépiová kost, které vykazují výjimečné mechanické a fyzikální vlastnosti.

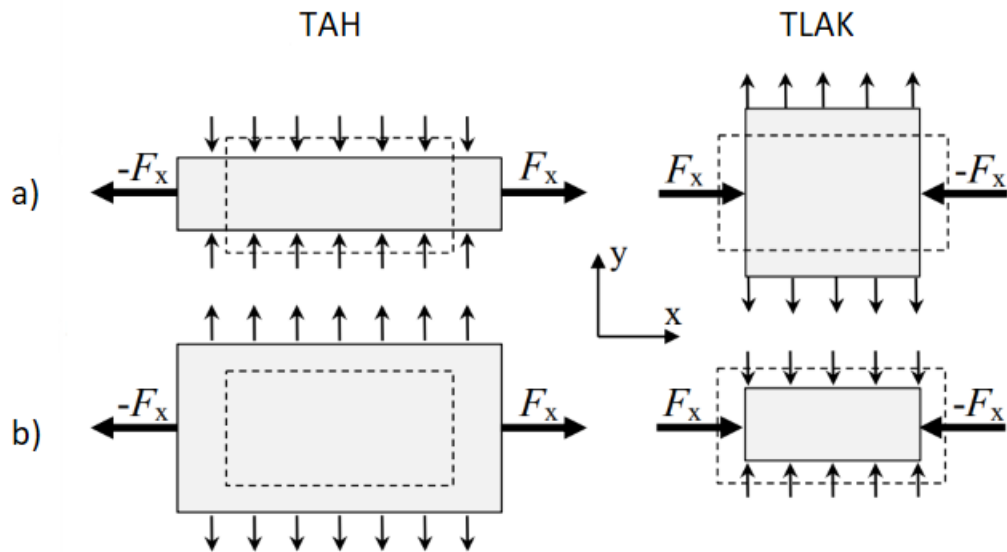
Studiem buněčných materiálů se zabývá obor biomimikry, který na základě studie živých organismů vymýšlí nová technická řešení a materiály. Buněčné materiály jsou oproti pevným materiálům výhodné pro svoji nízkou hustotu, vysokou akustickou izolaci a tlumení, vysokou schopnost pohlcování energie, odolnost při dynamickém zatížení a únavě, vysokou houževnatost a další. Lze je dělit na pěny a architektonické buněčné materiály, které jsou někdy označovány jako mřížkové struktury. Hlavní rozdíl mezi pěny a architektonickými buněčnými materiály spočívá v tom, že pěny mají náhodnou strukturu, u které nelze kontrolovat velikost buněk, jejich rozmístění a tloušťku buněčné stěny, zatímco architektonické buněčné materiály mají přesně definovanou geometrii. Buněčné materiály se vyrábějí z různých materiálů jako jsou kovy, polymery, keramika nebo polymerní kompozitní materiály [28, 29].

I přes výše vyjmenované výhody je stále snaha buněčné materiály dále zdokonalovat a získávat výhodnější mechanické a fyzikální vlastnosti, a proto se v posledních letech začaly na scéně objevovat pokročilé celulární materiály známé pod názvem auxetické materiály.

5.2 Auxetické materiály

Auxetické materiály jsou pokročilé buněčné materiály, které díky své vnitřní struktuře vykazují mimo jiné i netypické chování při zatížení. Na rozdíl od konvenčních materiálů se auxetické materiály při natažení příčně rozpínají a při stlačení ztenčují. Tento princip chování se označuje jako *auxetický efekt* a je znázorněn na obrázku 5.1. Auxetický efekt způsobuje, že materiály vykazují vynikající mechanické vlastnosti jako zvýšenou tuhost, vysoký modul pružnosti ve smyku, vyšší odolnost proti vtisku, lepší lomovou houževnatost či schopnost pohlcovat energii [30]. V důsledku daného deformačního chování mají auxetické materiály záporné Poissonovo číslo, které je definováno jako záporný poměr mezi příčnou ϵ_y a podélnou ϵ_x deformací materiálu při zatížení [31].

Termín auxetické materiály byl zaveden v roce 1991 profesorem Kenem Evansem a vychází z řeckého výrazu *auxetos* – to, co může být zvětšeno, což odkazuje na rozpínání se materiálu při natažení. Ačkoliv byl termín zaveden až v roce 1991, auxetické materiály byly studovány již před tímto rokem. První systematický výzkum těchto materiálů byl zahájen v roce 1985 studiem 2D-reentrantní auxetické struktury, přičemž důležitým rokem se stal rok 1987, kdy profesor Roderic Lakes poprvé vyrobil auxetický materiál transformací polymerní pěny s otevřenými buňkami [31].



Obrázek 5.1: Rozdíl chování a) konvenčního materiálu a b) auxetického při zatěžování v tahu a tlaku, převzato z [31]

Zlom ve výrobě auxetických materiálů nastal až s nástupem 3D tisku, kdy bylo umožněno tisknout předem navržené geometrie s nastavitelnými parametry, což umožnilo získávat různé mechanické vlastnosti.

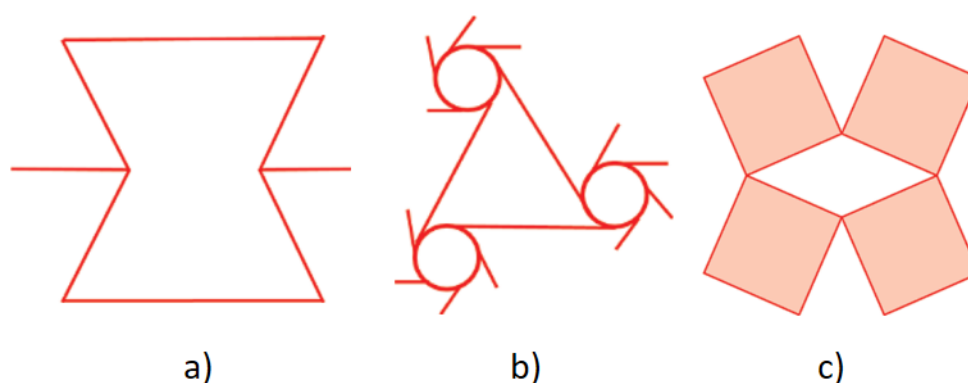
5.2.1 Auxetické struktury

V uplynulých letech byla kromě auxetických pěn navržena i velká řada auxetických geometrických struktur, které lze v základu dělit na dvoudimenzionální (2D) a třídimenzionální (3D). Zpočátku byly zkoumány jen 2D struktury, které vycházejí ze základních geometrických útvarů jako šestiúhelníky, trojúhelníky či čtverce. Ty jsou následně modifikovány tak, aby výsledná vnitřní struktura materiálu vykazovala auxetický efekt a s tím spojené záporné Poissonovo číslo. S pokračujícím výzkumem se začaly vyrábět 3D struktury, které nejčastěji vznikaly prostorovým uspořádáním a propojením 2D elementárních auxetických buněk [32]. Na základě mechanické deformace je možné auxetické materiály dále dělit na:

- **re-entrantní typ** — nejtypičtější typ auxetické struktury. Při zatížení se nosníky pohybují tak, že vytváří auxetické chování;

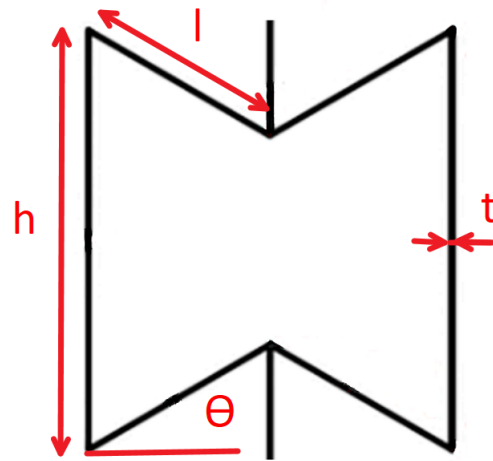
- **chirální typ** — struktury tohoto typu se skládají z nosníků, které jsou připojeny tangenciálně k tuhým prstencům. Auxetické chování vzniká navíjením nebo odvíjením nosníků na prstence, které při zatížení rotují;
- **rotující jednotky** — u těchto typů konstrukcí dochází k auxetickému chování rotací tuhých polygonů, které jsou navzájem spojené klouby. Příkladem polygonů jsou například rotující čtverce, trojúhelníky, obdélníky a další [33].

Příklady jednotlivých typů auxetických struktur podle mechanické deformace jsou zobrazeny na obrázku 5.2



Obrázek 5.2: Typy auxetických struktur podle mechanické deformace a) re-entrantní, b) chirální, c) rotující, převzato z [33]

Nejběžnější a nejtypičtější auxetickou strukturou je struktura známá pod názvem *re-entrant hexagonal honeycomb*, která se skládá z jednotlivých modifikovaných šestiúhelníkových buněk, které způsobují auxetické chování. Jak již název napovídá, tato struktura vznikla na základě inspirace včelí pláství, která se skládá z pravidelných šestiúhelníků. Díky této podobnosti se začala struktura označovat jako *honeycomb*. Modifikace konvenčních šestiúhelníkových buněk spočívá ve změně velikosti vnitřních úhlů a vzniku konkávních úhlů v buňce, což způsobí, že strany svírající tento úhel se prohnou dovnitř do buňky (viz obrázek 5.3). Tento jev je v názvu struktury označen pojmem *re-entrant*. Geometrie buňky je dána čtyřmi základními konstrukčními parametry, a to délkou svislého nosníku (h), délkou šikmého nosníku (l), velikostí úhlu (θ) a tloušťkou nosníku (t). Jednotlivé parametry jsou zobrazeny na obrázku 5.3. U jednotlivých buněk dané struktury lze předpokládat tři druhy deformací: ohyb, prodloužení a vzájemné pootočení stran buňky v bodech jejich spojení [32, 34].



Obrázek 5.3: Jednotková buňka auxetické struktury *re-entrant hexagonal honeycomb* se základními konstrukčními parametry

Kapitola 6

Mechanické zkoušky materiálů

Pro pochopení chování jednotlivých materiálů při zatěžování a volbu jejich vhodného použití je nutné znát jejich vlastnosti. Vlastnosti materiálu lze dělit na fyzikální, mechanické, chemické a technologické, přičemž nejvýznamnějšími jsou mechanické, které označují soubor napěťových a deformačních materiálových charakteristik. Dané charakteristiky hodnotí chování materiálu za působení vnějších sil a jejich konkrétní hodnoty jsou získávány z jednotlivých mechanických zkoušek. Pro zachování reprodukovatelnosti výsledků zkoušek a možnosti jejich porovnávání slouží normy, které definují jejich způsob provedení, rozměry testovacích vzorků a způsoby vyhodnocování výsledků. Je důležité myslet na to, že získané hodnoty mechanických charakteristik materiálu jsou závislé na podmínkách zkoušky, jako například na teplotě okolí, a proto je nelze prohlásit za univerzální [35]. Mechanické zkoušky lze dělit do několika kategorií, a to:

- podle způsobu zatěžování (zkoušky tahem, tlakem, ohybem, krutem apod.);
- podle průběhu zatížení (zkoušky statické, kvazi-statické a dynamické);
- podle zjišťované vlastnosti (zkoušky pevnostních vlastností, tvrdosti, houževnatosti apod.);
- podle teploty a prostředí [35, 36].

Získané hodnoty charakteristik při testování se využívají při vývoji materiálu a jeho zdokonalování, navrhování komponentů a dílů v mnoha průmyslových odvětvích jako automobilovém či leteckém, zajištění požadované kvality materiálu a pro zvyšování bezpečnosti předcházením náhlých deformací a porušení materiálu při běžném používání.

Vzhledem k velkému množství existujících mechanických zkoušek jsou v následující kapitole popsány jen kvazi-statické zkoušky, které jsou použity v experimentální části této práce.

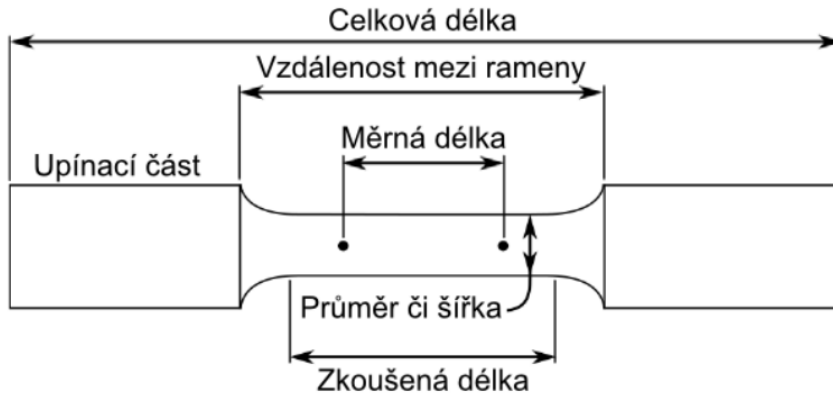
6.1 Kvazi-statické mechanické zkoušky

Kvazi-statické mechanické zkoušky se řadí zpravidla ke zkouškám destruktivním, což znamená, že zkušební vzorek se zatěžuje jen jednou, a to do té doby, dokud nedojde k jeho porušení. Principem kvazi-statických zkoušek je zatěžování zkušebního vzorku pozvolna narůstající reakční silou, přičemž doba zatěžování se pohybuje často v rámci několika minut. Podle způsobu namáhání lze zkoušky rozdělit na zkoušky v tahu, tlaku, ohybu, krutu, stříhu a zkoušky tvrdosti [35]. Jednotlivé zkoušky se provádějí buď na jednoúčelovém stroji, který je navržen pro konkrétní typ zkoušky, nebo na univerzálním, který umožňuje zatěžovat tahem, tlakem i ohybem. Univerzálnost stroje může spočívat buď ve výměně některých jeho částí, např. upínacích čelistí na tahovou zkoušku za válce na stlačování zkušebního vzorku při zkoušce tlakem, nebo v jeho konstrukci, kdy je přístroj rozdělen do více sekcí, které jsou přímo navrženy pro konkrétní typ zkoušky. Stroje lze dále dělit na základě způsobu zatěžování na mechanické nebo hydraulické [37].

Ze zmíněných zkoušek jsou dále popsány zkoušky v tahu a tlaku, které jsou zásadní pro získání pevnostních charakteristik auxetických buněčných materiálů.

6.2 Zkouška tahem

Zkouška tahem je normovaná a řadí se k nejrozšířenějším mechanickým zkouškám pro získání základních mechanických vlastností materiálu. Jedná se o nejstarší prováděnou laboratorní zkoušku, jejíž kořeny sahají až do 15. století, kdy ji Leonardo da Vinci použil při testování pevnosti kopných lan. Zkouška tahem se začala pravidelně využívat pro určování mechanických vlastností konstrukčních materiálů až od poloviny 19. století. Jejím principem je natahování vzorku upnutého do čelistí zkušebního stroje předepsanou rychlostí, dokud nedojde k jeho přetržení. Při zkoušce se typicky používají vzorky, jejichž tvar a rozměry jsou normované, přičemž průřez vzorků bývá nejčastěji kruhový nebo obdélníkový [38]. Příklad vzorku pro tahovou zkoušku je zobrazen na obrázku 6.1.



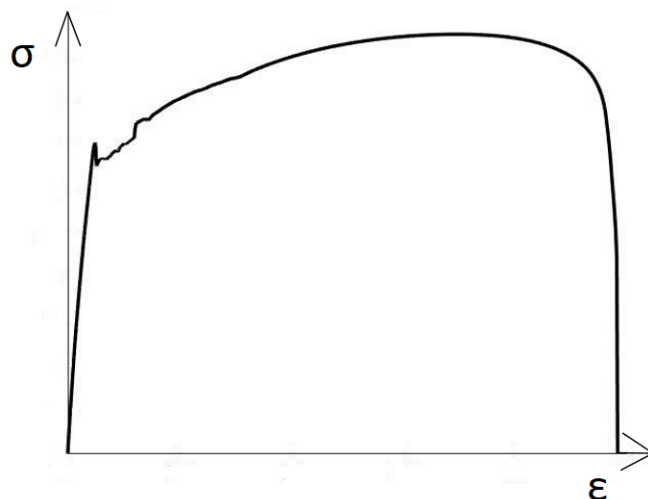
Obrázek 6.1: Schéma zkušebního vzorku pro tahovou zkoušku, převzato z [32]

Při zkoušce se zaznamenává absolutní prodloužení testovaného vzorku ΔL v závislosti na působící zatěžovací osově síle F , které může být zaznamenáváno pomocí extenzometru. Pro potřeby porovnání materiálů z hlediska jejich mechanických charakteristik je nutné naměřené veličiny přepočítat na relativní, které nejsou závislé na geometrii vzorku. K danému účelu se využívá smluvního napětí σ , které se získá vztahem měřené zatěžovací síly F na počáteční průřez zkušební vzorku S_0 , a poměrné deformace ϵ , která se určí ze znalosti výchozí délky vzorku L_0 , měrné délky vzorku po proběhnutí zkoušky L a změřeného absolutního prodloužení ΔL . Dané veličiny je možné určit z následujících vztahů:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (6.1)$$

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (6.2)$$

Závislost smluvního napětí σ na poměrné deformaci ϵ se zakresluje do pracovního diagramu tahové zkoušky, který je označován jako smluvní diagram napětí-deformace [35]. Daný diagram podává souhrnnou informaci o chování materiálu při zatěžování osovou vnější silou. Charakteristické křivky napětí-deformace v diagramu mají pro každý materiál jiný průběh a tvar [39]. Příklad smluvního diagramu napětí – deformace je zobrazen na obrázku 6.2.



Obrázek 6.2: Smluvní diagram napětí – deformace

Obecně lze diagram rozdělit na dvě části – na část přímkovou s pružnou deformací, kde po odtížení deformace vymizí, a na část s plastickou deformací, kde se začínají rozměry vzorku trvale měnit a po odtížení zůstává vzorek deformován. Přímková část je charakterizována Hookovým zákonem (viz rovnice 6.3), který nám říká, že smluvní napětí σ je přímo úměrné relativnímu prodloužení ϵ , přičemž směrnice této části digramu odpovídá Youngovu modulu pružnosti E . Youngův modul pružnosti „vyjadřuje myšlené napětí, které by při neomezené platnosti Hookeova zákona způsobilo prodloužení $\epsilon = 1$, tj. na dvojnásobek počáteční délky.“ [35]

$$E = \sigma \cdot \epsilon \quad (6.3)$$

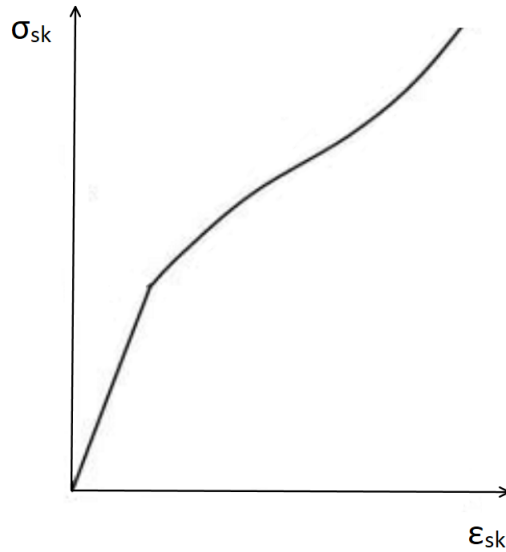
Při zjišťování mechanických charakteristik je důležité myslet na to, že diagram napětí – deformace lze použít jen u malých deformací, kdy nedochází k velkým změnám rozměrů zkušebního vzorku. Pro oblast velkých deformací se využívá skutečného diagramu napětí – deformace, kde jsou tyto veličiny dány vztahy:

$$\sigma_{sk} = \frac{F}{S} = \sigma \frac{S_0}{S} \quad (6.4)$$

$$\epsilon_{sk} = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} = \ln(1 + \epsilon), \quad (6.5)$$

kde σ_{sk} je skutečné napětí, S je okamžitý průřez zkušebního vzorku a ϵ_{sk} je skutečná deformace [40].

Největší rozdíl mezi smluvním diagramem napětí – deformace a skutečným diagramem napětí–deformace spočívá v tom, že reálné napětí oproti smluvnímu roste a končí v místě, kdy došlo k lomu vzorku [40]. Příklad skutečného diagramu je zobrazen na obrázku 6.3.



Obrázek 6.3: Skutečný diagram napětí – deformace

Z naměřených hodnot při tahové zkoušce lze dále určit základní mechanické charakteristiky, kterými jsou:

- **mez kluzu v tahu** – napětí, při kterém se začíná zkušební vzorek plasticky deformovat. Hodnoty meze kluzu jsou závislé na složení materiálu a jeho struktuře. Mez kluzu R_e může být buď výrazná, to znamená, že je dobře rozpoznatelný přechod mezi elastickou a plastickou deformací a odpovídá napěťové prodlevě na křivce v diagramu napětí – deformace, nebo nevýrazná (smluvní mez kluzu). Smluvní mez kluzu reprezentuje napětí, které je potřeba pro dosažení konkrétní hodnoty plastické deformace. Nejčastěji se uvádí napětí odpovídající 0,2 % plastické deformace a značí se $R_{p0,2}$. Meze kluzu je možné získat ze vztahů:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (6.6)$$

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0}, \quad (6.7)$$

kde F_e je síla na mezi kluzu a $F_{p0,2}$ síla, při které plastická deformace dosáhne hodnoty 0,2 % výchozí délky vzorku;

- **mez pevnosti v tahu** R_m – odpovídá nejvyšší hodnotě smluvního napětí σ při zatěžování, než se vzorek poruší. Pro některé materiály s výraznou mezí kluzu se mez pevnosti může rovnat mezi kluzu. Mez pevnosti je definována vztahem:

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0}; \quad (6.8)$$

- **tažnost** A – jedná se o mechanickou charakteristiku, která popisuje plastickou deformaci v tahu a uvádí se v procentech. Je dána poměrem rozdílu délky vzorku po přetržení L_u a počáteční délky L_0 k počáteční délce L_0 :

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100; \quad (6.9)$$

- **kontrakce** Z – stejně jako tažnost popisuje plasticitu materiálu, ale v závislosti na změně plochy průřezu vzorku při zatěžování. Uvádí se v procentech a je dána jako poměr:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100, \quad (6.10)$$

kde S_u je nejmenší plocha průřezu zkušebního tělesa po přetržení [35, 41].

První dvě výše zmíněné charakteristiky jsou charakteristikami napěťovými a určují se pro všechny zkoušené materiály. Veličiny tažnost a kontrakce jsou charakteristikami deformačními a má je smysl určovat pouze u materiálů, u kterých v průběhu zatěžování vzniká těsně před přetržením tzv. krček – v místě přetržení se vzorek začíná zužovat „zaškrcovat“ než dojde k porušení. U materiálů bez změny průřezu v místě přetržení se tudíž kontrakce neurčuje a pro tažnost se používá označení jmenovité poměrné prodloužení při přetržení ϵ_{tb} [35].

6.3 Zkouška tlakem

Zkouška v tlaku se provádí u křehkých materiálů, kde je předpoklad, že v praxi na ně bude vyvíjen tlak. U houževnatých materiálů není potřeba tlakovou zkoušku provádět, protože na rozdíl od křehkých materiálů mají mezní napětí v tahu takřka stejné jako v tlaku. U křehkých materiálů mnoho z nich vykazuje vyšší pevnost v tlaku než v tahu, a proto má smysl zkoušku v tlaku provádět. Jelikož se jedná o podobné zkoušky, porovnání jejich výsledků je poměrně

snadné. Zkušební vzorky pro zkoušku v tlaku jsou nejčastěji válcového nebo krychlového tvaru, přičemž jejich rozměry se pohybují v rámci milimetrů. Zatěžování vzorků probíhá do té doby, dokud není dosažena požadovaná deformace či nejsou vzorky rozdraceny. Z naměřených hodnot lze opět sestavit smluvní diagram napětí – deformace a určit základní mechanické charakteristiky, kterými jsou:

- **mez kluzu v tlaku** – má stejný význam jako mez kluzu v tahu, kdy odpovídá napětí, při kterém dochází k plastickým deformacím. Též je možné určit i smluvní mez kluzu v tlaku odpovídající 0,2 % deformace. Meze kluzu jsou popsány vztahy:

$$R_{et} = \frac{F_{et}}{S_0} \quad (6.11)$$

$$R_{pt0,2} = \frac{F_{pt0,2}}{S_0}; \quad (6.12)$$

- **mez pevnosti v tlaku** R_{mt} – u tlakové zkoušky zpravidla nedochází k porušení materiálu najednou, proto mez pevnosti v tlaku označuje napětí, při kterém se objeví první prasklina materiálu. Je určena vztahem:

$$R_{mt} = \frac{F_{maxt}}{S_0}; \quad (6.13)$$

- **poměrné zkrácení** ϵ_t – mechanická deformační charakteristika daná vztahem:

$$\epsilon_t = \frac{h_0 - h}{h_0} \cdot 100, \quad (6.14)$$

kde h_0 je počáteční výška zkušební vzorku a h je výška po zatížení;

- **poměrné rozšíření** ψ_t – mechanická charakteristika analogická ke kontrakci ve zkoušce v tahu, proto lze pro výpočet použít stejný vzorec 6.10 [35, 42].

II. Praktická část

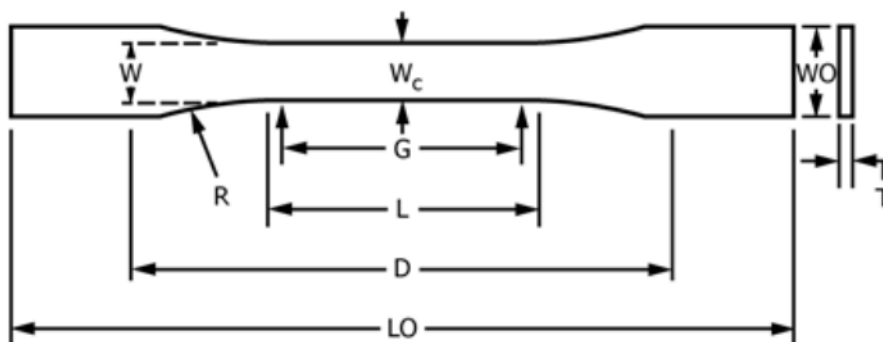
Kapitola 7

Příprava a průběh experimentu

Praktická část bakalářské práce byla zaměřena na osvojení si práce s 3D resinovou tiskárnou a její využití pro výrobu vysoce porézních struktur. Cílem experimentálního měření bylo stanovení základních mechanických vlastností vzorků 3D tištěných materiálů v závislosti na volbě vstupních parametrů výrobního procesu. Dále využití získaných hodnot při výrobě pokročilých celulárních struktur a zhodnocení vhodnosti metody SLA pro výrobu těchto struktur. Za účelem zjištění základních mechanických vlastností a popisu deformačního chování byly vzorky vystaveny kvazi-statickému zatěžování tlakem a tahem.

7.1 Příprava zkušebních vzorků

Pro kvazi-statické namáhání tahem byly vytvořeny vzorky podle normy ASTM D638-14 [43], která se zabývá testovacími metodami k určení mechanických vlastností plastů. Norma definuje čtyři typy vzorků, přičemž při této práci se vycházelo tvarově ze vzorku typu II (viz obrázek 7.1), který je vhodný při tloušťce materiálu 7 mm a méně. Testovací vzorek byl navržen v tloušťce 4 mm a jeho rozměry jsou uvedeny v tabulce 7.1. Model byl navržen pomocí programu Inventor Professional 2022 a tištěn pod dvěma různými úhly. Vytisknutý vzorek je zobrazen na obrázku 7.2.



Obrázek 7.1: Schéma testovacího vzorku na tahovou zkoušku, převzato z [43]

Tabulka 7.1: Rozměry zkušební vzorku na tahovou zkoušku

Název	Zkratka	Rozměry (mm)
šířka úzké části	W	6
délka úzké části	L	48
šířka široké části	WO	19
celková délka	LO	115
měrná délka	G	40
vzdálenost mezi úchyty	D	65
poloměr zaoblení hrany	R	14
tloušťka	T	4

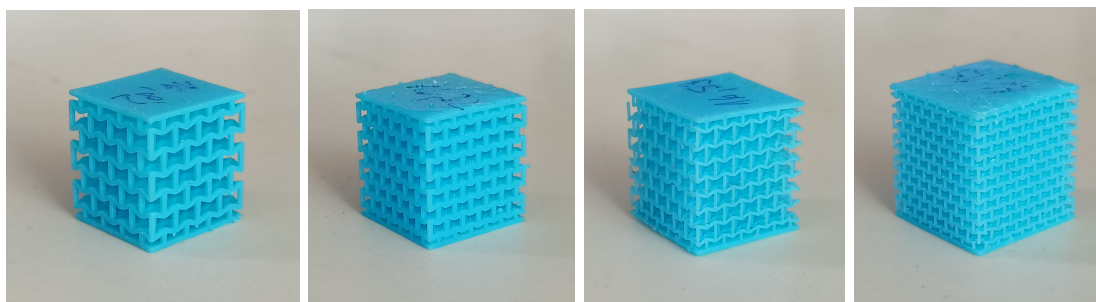


Obrázek 7.2: Vytisknutý zkušební vzorek na tahovou zkoušku

Pro kvazi-statické tlakové namáhání byly vytvořeny vzorky 3D auxetických struktur složené z elementárních 2D buněk *re-entrant hexagonal honeycomb*, které byly blíže popsány v kapitole 5.2.1. Struktura byla navržena ve čtyřech provedeních lišících se od sebe počtem buněk ve struktuře a tloušťkou nosníků buňky, přičemž u všech provedení byla vytvořena horní a dolní kontaktní plocha o tloušťce 0,6 mm pro dobré rozložení zatěžovací síly při měření vzorků. Jednotlivá provedení a rozměry struktur jsou uvedeny v tabulce 7.2 a zobrazeny na obrázku 7.3. Modely struktur byly vytvořeny pomocí modelovacího programu Inventor Professional 2022.

Tabulka 7.2: Testovací vzorky na zkoušku v tlaku

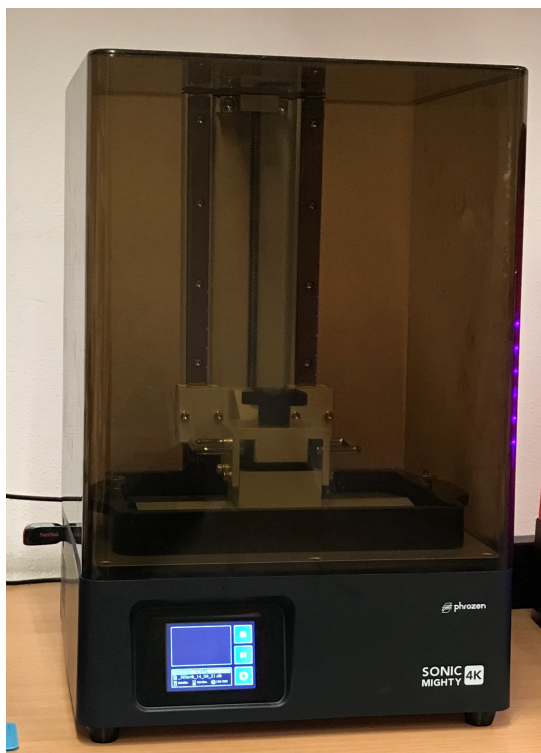
Provedení	Počet buněk	Tloušťka nosníků	Rozměry (š x t x v)
-	-	mm	mm
1	4x3	0,6	15,00 x 15,00 x 16,20
2	6x4	0,5	15,00 x 15,00 x 16,00
3	6x4	0,3	15,00 x 15,00 x 16,00
4	8x6	0,3	15,00 x 15,00 x 16,00



Obrázek 7.3: Postupné zobrazení jednotlivých provedení struktur od 1 do 4

7.2 Příprava resinové 3D tiskárny

Pro výrobu vzorku byla použita 3D tiskárna Sonic Mighty 4K od firmy Phrozen, zobrazená na obrázku 7.4. Jedná se o resinovou tiskárnu s monochromatickým LCD displejem s úhlopříčkou 23,62 cm (9,3 palce) a rozlišením 4K (3840 x 2400 pixelů), která umožňuje vysoké rozlišení tisku 52 μ m. Dále má tiskovou plochu o rozměrech 200 x 125 mm s možností tisku modelu s výškou až 22 cm v ose z. Díky monochromatickému LCD displeji se expoziční čas tiskárny pohybuje v rozmezí 1-2 s na vrstvu.



Obrázek 7.4: Tiskárna Phrozen Sonic Mighty 4K

Tiskárna Phrozen Sonic Mighty 4K se skládá ze dvou hlavních částí – těla tiskárny s podstavcem a krytu sloužícímu proti samovolnému vytvrzování resinu vlivem vnějších podmínek a unikání toxických látek do vzduchu. Konstrukčními částmi tiskárny jsou kuličkový šroub, který slouží k pohybu platformy v ose z , platforma tiskárny, zásobník na resin, fólie, monochromatický LCD displej a podstavec, na kterém je umístěna dotyková obrazovka sloužící k ovládání tiskárny. Uvnitř podstavce se nachází plocha s LED diodami ozařující skrz LCD displej tekutý resin s vlnovou délkou 405 nm a motor pro pohánění kuličkového šroubu.

Před samotným tiskem modelů bylo potřeba 3D tiskárnu připravit pro tisk. Vše, co se týká nastavení a funkčnosti samostatné 3D tiskárny, se nastavuje přes uživatelské rozhraní na dotykové obrazovce. Zde se po zapnutí objeví základní menu s třemi možnostmi volby: *Tisk*, *Nastavení* a *Informace*. Nejdříve je potřeba zkontrolovat nastavení tiskárny. Před úplně prvním tiskem je nutné provést LCD test, kdy se monochromatický LCD displej rozsvítí a je sledováno, zda svítí celý a neobjevují se na něm černá místa. Po ukončení LCD testu je potřeba provést kalibraci osy z . Kalibrace se provádí s odmontovaným zásobníkem na resin, jinak by došlo k jeho poničení. Po zadání kalibrace v nastavení tiskárny je uživatel vyzván k uvolnění čtyř malých imbusových šroubů, které fixují platformu v jedné poloze. Uvolněná platforma sjede k LCD displeji, kde dojde

k její fixaci utažením šroubů. Platforma následně vyjede do startovací polohy. Nastavení tiskárny umožňuje i manuálně pohybovat s platformou nahoru a dolů. Poslední funkcí v nastavení je funkce *Vat cleaning*. Tato funkce slouží k odstranění zbytků vytvrzeného resinu na dně zásobníku, které vznikly v důsledku nepodařeného tisku. Zásobník s resinem je ozářen na pár sekund, čímž dojde k vytvoření tenké vytvrzené vrstvy, jejíž součástí jsou i zbytky nepodařeného modelu. Následně se nechá vrstva působením isopropanolu změkknout a jednoduše se odloupne jako jeden celek, čímž se zmenší riziko poničení fólie v zásobníku.

Dalším krokem, který byl potřeba před tiskem provést, byla aplikace fólie do resinového zásobníku. Fólie je k zásobníku připevněna pomocí rámu s 22 šrouby. Při upevňování fólie je nutné hlídat, aby byla vždy napnutá a nedostaly se na ní žádné nečistoty. Když je zásobník připraven, umístí se na LCD monitor a připevní k podstavci tiskárny pomocí dvou rýhovaných kruhových matic, které se šroubují na závrtné šrouby vyčnívající z podstavce. Tím se při tisku zabrání zvednutí zásobníku do vzduchu vznikem silného podtlaku mezi fólií v zásobníku a platformou, a tak nedojde např. k jeho pádu na LCD monitor či rozlití resinu. Po upevnění zásobníku se do něj nalije resin a tiskárna je připravena k tisku. Po ukončení manipulace s tiskárnou je důležité nezapomenout ji zabezpečit krytem, aby nedošlo např. k úniku jedovatých látek do ovzduší.

Finálním krokem k zahájení tisku bylo vložení USB flash disku. Tento disk obsahuje připravené modely. V uživatelském menu na dotykové obrazovce se zvolí ikonka *3D PRINT*, vybere se z nabídky modelů požadovaný objekt a tiskárna započne tisk.

Mezi hlavní výhody 3D resinové tiskárny Phrozen Sonic Mighty 4K jednoznačně patří:

- **rychlost tisku**, která je až 4x rychlejší než u jiných tiskáren, což se významně projevilo u tisku většího množství vzorků;
- **vysoké rozlišení tisku**, které umožňovalo tisk drobných detailů jednotlivých struktur;
- **velká tisková plocha**, díky které bylo možné tisknout až 4 sady po třech kusech vzorků struktur najednou, tj. 12 kusů vzorků;
- **dobrá odvod tepla**, a tím zvýšení spolehlivosti tiskárny, což umožňovalo nechat běžet tisk např. přes noc bez nutnosti dozoru. Tento fakt zefektivňuje výrobní proces, protože bylo vyrobeno více vzorků, jelikož tisk mohl probíhat po celých 24 hodin s přestávkami na vyndání vzorků a zadání nového tisku;

- **kompatibilita tiskárny**, která umožňuje využívat pro tisk široké spektrum resinů třetích stran.

Při používání 3D resinové tiskárny bylo objeveno i několik nevýhod, které znepríjemňovaly její používání:

- jedním z hlavních problémů bylo umístění vypínače tiskárny na její zadní stranu, čímž se stal vypínač špatně dostupným pro zapínání a vypínání tiskárny;
- dalším významným problémem se ukázal zbytečně velký otevřený prostor kolem kuličkového šroubu a špatné těsnění horní desky podstavce, kudy se v případě uniknutí resinu ze zásobníku dostal resin dovnitř podstavce a motoru tiskárny, což znamenalo kompletní rozebrání tiskárny, její vyčištění, smontování a uvedení do provozu. Po uvedení tiskárny do provozu bylo nutné opět připravit tiskárnu pro tisk, což zahrnovalo vyzkoušení funkčnosti LCD monitoru a znovu zkalibrování osy z a tisk kalibračních vzorků. Uvedené operace znamenaly významnou časovou ztrátu a narušení souvislosti výrobního procesu. Podobná nehoda mohla vést ve svém důsledku až k destrukci celé tiskárny a významným finančním ztrátám. Z důvodu závažnosti uvedeného problému by bylo možným řešením vytvoření zálepky daného otvoru, která by znemožňovala proniknutí resinu do útrob tiskárny pomocí gumového těsnění a vytvoření výškového přesahu;
- uživatelsky nepříjemným řešením se stalo i umístění rukojetí platformy, které způsobují špatnou přístupnost ke šroubům, se kterými je potřeba pracovat při kalibraci tiskárny. Rukojeti brání plynulému rotačnímu pohybu imbusovým klíčem při povolování šroubů;
- další nevýhodou je určitě plastový návrh podstavce, díky čemuž se tiskárna stává náchylnější na rozbití a vznik prasklin při manipulaci. Poškození tohoto dílu by představovalo významný zásah do bezpečného užívání tiskárny. Ve svém důsledku by to znamenalo úplné odstavení tiskárny, jelikož se tento díl jako náhradní nevyrobí;
- problémy nastaly s kruhovými maticemi sloužícími k připevnění zásobníku, které jsou poměrně malé a špatně se nasazují na šrouby. To často vedlo k jejich spadnutí do zásobníku s resinem. Matice se poté musely vyčistit isopropanolem, nechat vyschnout a znovu našroubovat;
- v neposlední řadě je nutné zmínit, že je potřeba pravidelná výměna fólie, u které často docházelo při tisku k jejímu protékání v místech uchycení rámu a vytvrzení resinu přímo na

LCD displeji, což mělo za následek selhání tisku. Vytvrzený resin na LCD displeji bylo následně potřeba opatrně odstranit, aby nedošlo k poničení displeje. Odstranění vytvrzeného resinu zabralo řádově několik desítek minut práce.

7.3 Resiny

K výrobě vzorků byly zvoleny celkem čtyři různé resiny, aby bylo možné prokázat, zda a případně jak velký vliv má volba resinu na chování tištěného vzorku při zatěžování a jak se mezi sebou budou lišit jejich základní mechanické vlastnosti. Kvůli prokázání kompatibility tiskárny s resinou od jiných firem byl použit kromě dvou resinů od firmy Phrozen také jeden resin od firmy PhotoCentric3D a jeden od firmy Formfutura. Vlastnosti jednotlivých resinů jsou uvedeny v tabulce 7.3.

Resiny (pryskyřice):

1. Pryskyřice Aqua Blue a ABS-like Matte Gray od firmy Phrozen

Tyto pryskyřice byly zvoleny hlavně pro jejich vysokou přesnost tisku. Oproti ostatním pryskyřicím se neprojevují silným toxickým zápachem. Tištěné vzorky z těchto materiálů dosahují vysoké tvrdosti a houževnatosti. Spolehlivost tisku je vyšší než u ostatních resinů. Je to způsobeno jejich velmi nízkou viskozitou. Pryskyřice Phrozen ABS-like Resin Grey je díky své matně šedé barvě oblíbená pro jednoduché dotváření modelů po jejich vytvrzení např. jejich pomalováním barvami dle představ uživatele. Naopak pryskyřice Phrozen Aqua Resin Blue je oblíbená pro svoji jasnou světle modrou barvu.

2. Pryskyřice UV DLP Firm Grey od firmy Photocentric3D

Výhodou této pryskyřice je její pevnost s malou poddajností při vysokém namáhání. Této vlastnosti se hojně využívá pro výrobu součástí, které nesmí být křehké a u kterých je při vysokém zatížení potřeba, aby byly houževnaté. Schopnost přesnosti tisku detailů se s velikostí tištěného objektu snižuje. Vytisknuté modely se projevují malou flexibilitou, avšak velmi vysokou houževnatostí, odolností a dlouhou životností.

3. Pryskyřice Engineering LCD Series Tough Resin Natural White od firmy Formfutura

Pro tuto pryskyřici je typická vysoká odolnost proti nárazu a poškrábání, proti únavě materiálů, s čímž je spojená i dlouhá životnost, přesný tisk a tvarová stálost. Stejně jako resiny od firmy

Phrozen má i tento resin minimální zápach a díky své neměnné transparentní barvě je ideální pro následné nabarvení. Vytištěné modely jsou houževnaté, pevné a tuhé. Tato pryskyřice je vhodná pro výrobu součástek, které jsou opakovaně vystaveny krátkým obdobím intenzivního namáhání nebo zátěže.

Tabulka 7.3: Hodnoty vlastností jednotlivých resinů udávané výrobcem

Resin	Phrozen Aqua	Phrozen ABS-like	UV DLP Firm	Engineering LCD
Vlastnosti (Jednotka)	Typická hodnota			
Barva (-)	Blue	Matte Gray	Grey	Natural white
Hustota (g/cm ³)	1,12	1,1	1,18	1,18
Viskozita (N·s/m ²)	0,075-0,175	0,06-0,1	0,56	0,8
Modul pružnosti v tahu (MPa)	588	116	700	1400
Mez pevnosti v tahu (MPa)	24	10	26	28

Při práci s resinou bylo potřeba dodržet několik základních pravidel jak ve smyslu používání resinů, aby nedošlo k jeho znehodnocení, tak ve smyslu zachování bezpečnosti, jelikož se jedná o nebezpečné chemikálie, které by při nedodržení nutných opatření mohly způsobit vážné zdravotní problémy. Z hlediska bezpečnosti při práci s resinou bylo vždy nutné nosit ochranné pomůcky jako jsou rukavice, které chrání pokožku před možnou vyrážkou a nepříjemnou lepivostí pryskyřice, a dýchací maska zabraňující vdechování uvolňujících se toxických výparů. Důležité je, aby byla 3D resinová tiskárna umístěna v dobře odvětrávané místnosti, čímž se předejde hromadění plynů. Doporučené je nosit ochranné brýle. K zabránění poškození oblečení byl používán ochranný plášť.

Z hlediska používání resinů bylo nutné pro zachování jejich kvality řídit se hlavními pokyny pro práci s nimi. Láhev s resinou před nalitím do zásobníku tiskárny bylo potřeba pořádně protřepat,

aby se resin dobře promíchal a do zásobníku se nedostaly žádné usazeniny. Vlivem třepání vznikly v pryskyřici vzduchové bubliny, a proto se musela pryskyřice nechat několik minut odstát, aby tyto bubliny zmizely. Teprve po zmizení vzduchových bublin bylo možné resin přelít do zásobníku. V případě, že se resin již nacházel v zásobníku z předešlého tisku, byl resin opatrně promíchán speciální plastovou špachtlí se zaobleným okrajem, aby nedošlo k poškrábání nebo protržení fólie na dně zásobníku. Důležité bylo myslet na to, že se jednotlivé typy resinů nesměly smíchat dohromady a ani použitý resin se nesměl smíchat s novým resinem stejného typu, jinak mohlo dojít k jeho znehodnocení, proměnlivým mechanickým vlastnostem v průřezu a v důsledku toho k nemožnosti nastavení ideálních parametrů pro tisk a selhání tisku. Tudíž při změně resinu bylo nutné použitý resin ze zásobníku přefiltrovat a přelít do dobře uzavíratelných neprůhledných lahví, aby pryskyřice nebyla vystavena působení vzduchu a slunečního světla. Při vniknutí světla do láhví či uchovávání resinu v průhledné nádobě by mohlo dojít k samovolnému vytvrzování resinu, vzniku usazenin, oddělení jednotlivých složek resinu či jeho úplné degeneraci. Nejlépe se osvědčily pro uchovávání resinu původní prázdné láhve od již vypořezávaných resinů. I přes neprůhlednost nádob bylo nutné nádoby nevystavovat přímému slunečnímu záření a vysokým teplotám.

7.4 Nastavení parametrů

Příprava 3D tisku a nastavování jednotlivých parametrů tisku probíhaly v profesionálním softwaru CHITUBOX V1.7.0, který byl obdrženo s tiskárnou. Jedná se o nástroj, ve kterém se navržený model z modelovacího programu Inventor upravuje pro 3D tisk – volí se úhel, pod kterým bude model tištěn, přidávají se podpěry modelu a nastavují se základní parametry tisku pro jednotlivé resiny. Po přípravě modelu k tisku dojde k jeho rozřezání na jednotlivé vrstvy a převedení STL/OBJ souboru na soubor CTB, který je podporovaný resinovou 3D tiskárnou Phrozen Sonic Mighty 4K. Více je daná problematika řešena v kapitole 4.5.

7.4.1 Natočení vzorků v souřadnicovém systému XYZ

Po spuštění softwaru CHITUBOX se otevře hlavní okno s virtuálním zobrazením platformy tiskárny. Aby se rozměry virtuální platformy shodovaly s reálnými rozměry platformy tiskárny, bylo nutné v nastavení softwaru vybrat tiskárnu Phrozen Sonic Mighty 4K, čímž došlo k přepočítání virtuálních rozměrů na reálné. Po vybrání tiskárny už bylo možné otevřít soubor s připraveným

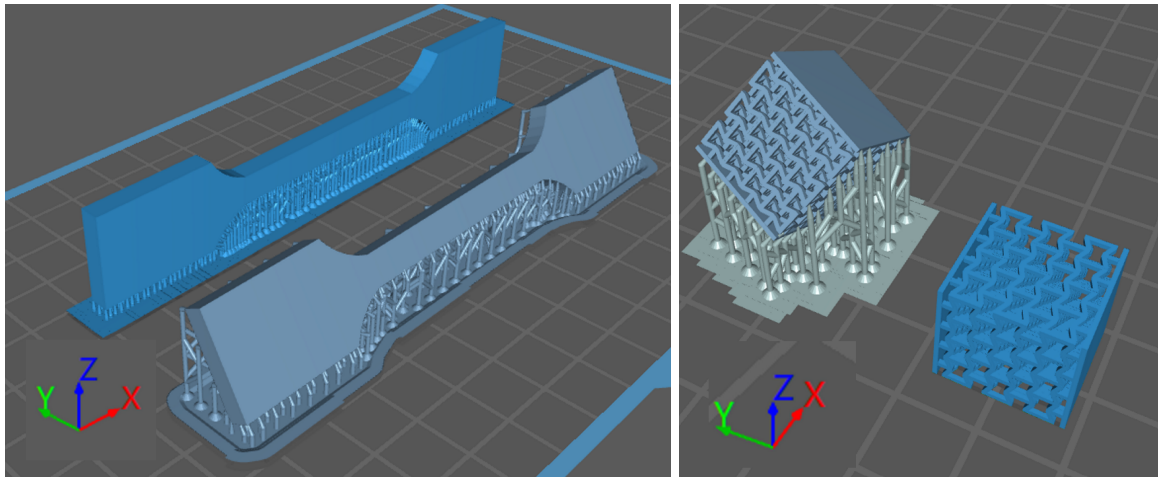
modelem vzorku a umístit ho na platformu. Důležité bylo myslet na to, že virtuální platforma byla zobrazena v programu otočená o 180° , protože skutečné tištěné vzorky byly postupně vytahovány ze zásobníku s resinem a visely dolů směrem z platformy. Proto bylo důležité zvolit správné natočení vzorku, aby jeho váha byla rozprostřena do větší plochy a vrstvy nevytvrzené pryskyřice byly pokládány již na vrstvy vytvrzené, a ne do volného prostoru. Pokud by vrstvy byly pokládány do volného prostoru, neměly by se na co přichytit a došlo by ke zborcení struktury a deformaci celého vzorku. Z tohoto důvodu nešlo vzorky auxetických struktur tisknout v kolmém směru, kdy by kontaktní plocha struktury přiléhala k platformě, protože by došlo ke zhroucení jednotlivých buněk ve struktuře v důsledku komplexní geometrie buněk. Proto byly struktury tištěny ve dvou natočeních, a to:

- o 30° kolem os x a y , kdy byla struktura postavena na hrot, odsazena od platformy a podepřena podpěrami;
- o 90° kolem osy x , kdy struktura byla položena na stranu a umístěna na platformu.

U tisku zkušebních vzorků pro tahovou zkoušku byly též zvoleny dvě varianty umístění na platformu:

- natočení vzorku o 90° kolem osy x , kdy byl vzorek postaven kolmo na platformu, odsazen od platformy a podepřen podpěrami;
- natočení vzorku o 60° kolem osy x , odsazení od platformy a podepření podpěrami.

Všechna výše uvedená umístění tištěných vzorků jsou zobrazena na obrázku 7.5. Volba odsazení vzorků od platformy a umístění vzorků na podpěry se ukázala velkou výhodou při sundávání vytištěných vzorků z platformy. V některých případech došlo k silnému přichycení vytisknutého vzorku k platformě, proto ho bylo náročné od ní oddělit a docházelo tak k poničení vzorků. Tento problém se vyskytl například u tisku auxetických struktur, které byly natočeny o 90° kolem osy x a byly přímo položeny na platformě. Škody při sundávání byly natolik rozsáhlé, že se od tisku takto natočených struktur muselo odstoupit a tiskly se jen auxetické struktury s druhým způsobem umístění, které se osvědčilo. Navíc u položených struktur docházelo v průběhu tisku k závažné deformaci kontaktní strany vlivem spékání struktury. U vzorků, které byly odsazeny a umístěny na podpěry, tudíž se žádnou částí nedotýkaly platformy, nedocházelo ani ke spékání, ani k jejich poničení při oddělování od platformy.

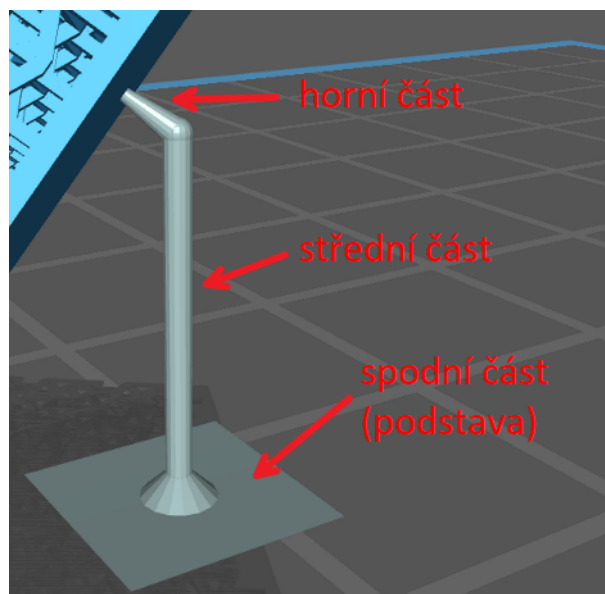


Obrázek 7.5: Zobrazení umístění vzorků na platformu pro tahovou zkoušku (vlevo) a pro tlakovou zkoušku (vpravo)

7.4.2 Podpěrné konstrukce a jejich nastavení

Jedním z největších problémů při 3D tisku je tisk různých převisů či komplikovaných částí modelu. Z tohoto důvodu se přidávají k modelu podpěrné konstrukce, které slouží pro zachování hladkého průběhu tisku bez deformace či poškození tištěného modelu. Konstrukce tvoří základ pro uchycení vrstev nevytvrzeného resinu v místech, kde se zatím nevyskytují žádné předchozí vytvrzené vrstvy a docházelo by k tisku do prázdna. V prostředí CHITUBOX se volí preferovaný typ podpěr, pro které si systém sám vygeneruje základní parametry typické pro daný typ. Tyto parametry je nutné brát pouze jako orientační, protože jsou voleny vždy stejně, nezávisle na tvaru modelu, a tudíž je na uvážení uživatele, zda je ponechá či změní. Nastavování parametrů podpěr je rozděleno celkově do čtyř kategorií, přičemž každá kategorie je zaměřena na konkrétní část podpěry. Jednotlivé části podpěry jsou zobrazeny na obrázku 7.6. Jakmile jsou parametry nastaveny, je možné začít s manuálním umísťováním podpěr. Pokud si uživatel není jistý, jak by měly být rozmístěné, může využít automatického umístění podpěr. U automatického umístění podpěr se navíc volí hustota jejich rozmístění (*Density*), vzdálenost, do které se budou mezi jednotlivými podpěrami vytvářet dodatečné podpěrné konstrukce pro jejich zpevnění (*Cross Width*) a výška, od které se tyto konstrukce budou tvořit (*Cross Start Height*). Dále se mohou jednotlivé podpěry začít větvit, tj. z jednoho těla podpěry vystupovat více podpěr.

Parametry podpěr byly nastavovány zvlášť pro vzorky auxetických struktur na tlakovou zkoušku a pro vzorky na tahovou zkoušku. U obou typů vzorků nešlo aplikovat stejné nastavení vzhledem



Obrázek 7.6: Znázornění jednotlivých částí podpěry

k jejich rozdílné geometrii. Nicméně u obou bylo použito ruční rozmístění podpěrných konstrukcí, protože automatické se ukázalo jako nevyhovující. Při použití automatického rozmístění totiž došlo ke zkroucení vzorků, propadům jejich částí či dokonce k úplné destrukci. Tudíž bylo potřeba brát automatické umístění podpěr s rezervou a v případě nutnosti ho ručně ještě doplnit dalšími podpěrami v místech, kde by jinak podpěry chyběly.

Před nastavováním parametrů podpěr bylo potřeba zvolit vhodnou výšku odsazení v ose z , která byla stanovena na 3 mm. Jedná se o vzdálenost mezi 3D modelem a konstrukční platformou, která je následně vyplněna podpěrami, na které je vzorek umístěn. Po zvolení odsazení byl vybrán typ podpěr pro podepření vzorku. Osvědčil se typ *Light* s malými úpravami vygenerovaných parametrů. Tento typ uspěl jak u vzorků pro tlakovou zkoušku, tak u vzorků pro tahovou zkoušku. Podpěry zvoleného typu dokázaly udržet tištěné vzorky, které se od těchto podpěr navíc daly snadno oddělit, aniž by hrozilo poničení.

Při nastavování jednotlivých parametrů u vzorků auxetických struktur se začalo s parametry týkajícími se horní části podpěry, které byly významné pro úspěšný tisk. Pokud by parametry byly špatně nastaveny, podpěry by neudržely tištěný model, a ten by se od nich oddělil a spadl do zásobníku s resinem. V parametrech pro horní část je možné nastavit např. parametr *Contact Shape*, který řeší způsob zakončení a kontaktu podpěry se vzorkem. Vzhledem k potřebě zachování drobných detailů tištěných struktur byl upřednostněn přímý kontakt podpěra – struktura

v místě dotyku. Následně bylo potřeba nastavit do jaké hloubky má hrot podpěry sahat. Tím se zabývá parametr *Contact Depth*. Kvůli malé tloušťce stran jednotlivých buněk ve struktuře vzorku byla zvolena nízká hodnota daného parametru, aby nedošlo k proniknutí podpěry skrz nosníky struktury, a při následném odstraňování k jejich vytržení. Dále je možné volit *Connection Shape*, který dává na výběr, jaký tvar horní části podpěry je preferován. Zde nebyl zjištěn žádný rozdíl mezi jednotlivými typy tvarů, tudíž byl zvolen nejsnadnější tvar pro tisk – *Cone* (nejhladší struktura povrchu). Posledními parametry, které je možné nastavovat pro horní část, jsou: *Upper Diameter*, *Lower Diameter* a *Connection Length*. První zmíněný parametr řeší, jaký bude horní průměr, tedy průměr průřezové plochy podpěry v místě kontaktu s modelem. U volby hodnoty horního průměru nastal podobný problém jako u nastavování hloubky průniku podpěry do modelu. Bylo nutné zvolit nízkou hodnotu daného parametru, ale zároveň dostačující, aby nedošlo k samovolnému oddělení vzorku od podpěr. Při volbě příliš vysoké hodnoty vznikaly vyšší odporové síly působící v místě kontaktu, a při odstraňování pak docházelo k vytržení částí struktury a poničení vzorku. Parametr *Lower Diameter* nastavuje průměr průřezu horní části podpěry v místě připojení k její střední části. Tento parametr je třeba volit rozumně vzhledem k celkové uvažované velikosti podpěry, aby nebyl nesmyslně velký a zbytečně tak nezatěžoval střední část a nepřidával na celkové hmotnosti vzorku. Parametr *Connection Length* udává celkovou délku horní části, tudíž vzdálenost střední části (stojiny) podpěry od samotného vzorku. Hodnota daného parametru byla zvolena tak, aby po dokončení tisku střední část nebránila pohodlnému oddělení podpěr od vzorku pomocí skalpelu.

Pevnost střední části podpěry určuje její celkovou pevnost. Pokud je střední část moc úzká, nemusí udržet váhu modelu, nebo se na ní nemusí model vůbec přichytit. Naopak, pokud je moc mohutná, je potřeba většího množství resinu na vzorek a zatěžuje se spodní připevňovací vrstva, čímž se zvyšuje šance odtržení modelu od platformy. Pro normální podpěru, která spojuje model s platformou, byl nastaven tvar střední části (parametr *Shape*), u kterého opět nebyl prokázán vliv na kvalitu tisku, a proto byl vybrán válcovitý tvar, který plynule navazuje na horní část. Dále byla zvolena tloušťka střední části (*Diameter*) a minimální úhel, který svírá střední část s horní částí (*Angle*). V nastavení pro střední část je možné nastavovat i parametry pro tzv. „malé pilíře“, což jsou podpěry umísťující se přímo na model do převisů a do prázdných otvorů v modelu, aby bylo možné model vytisknout a předešlo se jeho zhroucení. Zmíněných malých pilířů u vzorků nebylo využito, protože žádné nebezpečné převisy či prázdná místa se nenacházely ve vzorcích, které by potřebovaly tyto speciální podpěry.

Parametry podstavy podpěry se věnují způsobu jejího přichycení k platformě. Jako u předešlých částí se i zde volí její tvar (*Platform Touch Shape*). Za tvar byl vybrán *Skate*, jehož zkosené hrany se ukázaly velkým benefitem při oddělování podpěr od platformy, kdy vzorek šel snáze oddělit. U podstavy byla dále nastavena její velikost (*Touch Diameter*), která ovlivňuje přilnavost k platformě. Čím je hodnota větší, tím je přilnavost lepší, ale zároveň je spotřebováno větší množství resinu. Následně bylo nutné zvolit tloušťku podstavy (*Thickness*), jejíž hodnota byla zvolena raději menší, protože s její zvyšující se tloušťkou dochází ke zvětšování úhlu zkosení hran, což má za následek zmenšení celkové kontaktní plochy podstavy vůči platformě.

V případě, kdy hrozí, že by jednotlivé podstavy podpěr nedokázaly zajistit dostatečnou přilnavost k platformě a mohlo by dojít k odlepení vzorku od platformy, se využívá tzv. „*Raftu*“ neboli upevňovací vrstvy. Jedná se o vrstvu, která se tiskne přímo na platformu a zvyšuje přilnavost vzorku. U této vrstvy se nastavuje několik parametrů, které ovlivňují přilnavost vzorku k platformě: její poměr plochy (*Raft Area Ratio*), tloušťka (*Raft Thickness*) a výška (*Raft Height*). U daných parametrů platí, čím jsou jejich hodnoty vyšší, tím se zlepšuje přilnavost, ale i spotřeba materiálu. Posledním nastavitelným parametrem je sklon upevňovací vrstvy mezi její hranou a platformou. Ten slouží pro snadnější oddělení vzorku od platformy po dokončení tisku. Při 3D tisku auxetických struktur se ukázalo, že parametry pro podstavu podpěr byly dobře nastaveny a dostatečně postačily k udržení vzorků na platformě, proto bylo upřednostněno toto řešení před použitím upevňovací vrstvy.

U nastavování parametrů pro vzorky určené na tahovou zkoušku byl postup stejný, jen bylo potřeba zvolit jiné hodnoty nastavovaných parametrů a množství použitých podpěr. Na množství potřebných podpěr měly vliv jak natočení vzorku v prostoru, tak i jeho váha, která se zde výrazně lišila od malé váhy vzorků auxetických struktur. Navíc u vzorku, který byl natočen o 60° kolem osy x , bylo nutné použít místo podstav *Raft*, a tím zvýšit jeho přilnavost k platformě a díky celistvé ploše a malému použitému sklonu zlepšit jeho následné oddělení od platformy po ukončení tisku.

Všechny výsledné hodnoty použitých parametrů podpěrných konstrukcí pro tisk jsou uvedeny v tabulkách 7.4 – 7.7, přičemž se jako jejich primární jednotka uvažují mm. Pokud má parametr jinou jednotku, je daná jednotka uvedena u parametru v tabulce. Získané výsledné hodnoty byly použity pro všechny resiny. K těmto výsledným parametrům se dospělo postupným nastavováním hodnot, kdy první hodnoty byly zvoleny na základě doporučených a následně upravovány

v závislosti na úspěšnosti a zhodnocení dosažené kvality výtisků. Nastavení pro vzorky na tahovou zkoušku se lišilo pouze hodnotou u parametru *Diameter* ve střední části, která nabývala 0,8 mm.

Tabulka 7.4: Výsledné hodnoty parametrů podpěrných konstrukcí pro horní část

	Contact Shape (-)	Contact Depth	Con- nection Shape (-)	Upper Diame- ter	Lower Diame- ter	Con- nection Length
Horní	žádný	0,3	Cone	0,3	0,6	2,0

Tabulka 7.5: Výsledné hodnoty parametrů podpěrných konstrukcí pro střední část

	Shape (-)	Angle (°)	Diameter
Střední	Cylinder	75	1,0

Tabulka 7.6: Výsledné hodnoty parametrů podpěrných konstrukcí pro podstavu

	Platform Touch Shape (-)	Touch Diameter	Thickness
Podstava	Skate	3,0	1,5

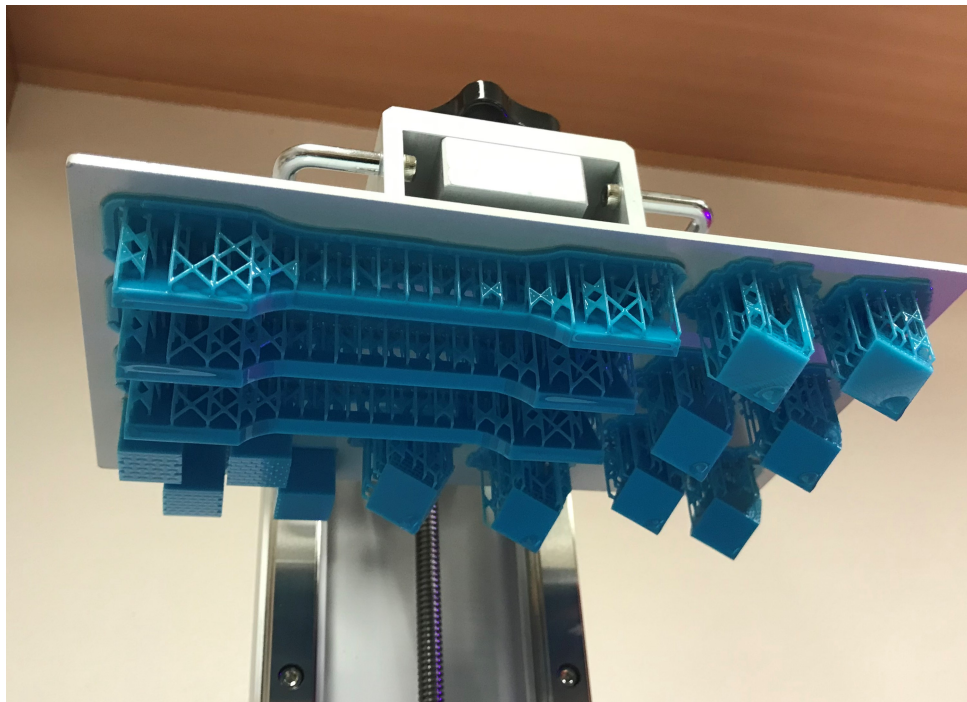
Tabulka 7.7: Výsledné hodnoty parametrů podpěrných konstrukcí pro Raft

	Raft Shape (-)	Raft Area Ratio (%)	Raft Thickness	Raft Height
Raft (tah)	Skate	90	1,0	2,0

7.4.3 Nastavení parametrů tisku

Při nastavování je potřeba zkontrolovat, zda byla vybrána správná tiskárna. Po vybrání tiskárny se v první záložce nastavení s názvem *Machine* objeví základní parametry týkající se zvolené tiskárny – její název, počty pixelů v osách x a y , maximální rozměry tištěného modelu a zrcadlení. U zrcadlení bylo automaticky nastaveno, že se jedná o LCD zrcadlení, což je vázáno na typ architektury tiskárny. Jelikož byla použita tiskárna Phrozen Sonic Mighty 4K, která pracuje na principu architektury *bottom-up* (více v kapitole 4.1), dochází při tisku k zrcadlení obrazu, a proto je nutné ho znova zrcadlit, aby byl vytisknut správně zobrazený. Při využití maximální plochy o rozměrech 200 x 125 mm bylo možné umístit na platformu až 15 vzorků auxetických

struktur nebo 8 vzorků na tahovou zkoušku s natočením vzorku o 90° kolem osy x nebo 5 vzorků s natočením vzorku o 60° kolem osy x . V případě potřeby tisku různých zkušebních vzorků se na platformu umístily současně v požadovaném počtu (viz obrázek 7.7). Dále je zde možné definovat vymezený prostor platformy v případě, že by nešla z nějakého důvodu použít celá plocha. Při změně rozměrů platformy lze definovat, aby se novému rozměru v jedné ose automaticky přizpůsobil i rozměr v druhé. Všechny tyto informace byly vygenerovány programem v závislosti na zvolené tiskárně, tudíž nebylo potřeba je při nastavování zadávat. Další záložkou v pořadí v nastavení je záložka s názvem *Resin*. V této záložce se uvádějí parametry čistě jen pro obecný přehled a nemají žádný vliv na průběh tisku. Byl zde zadán typ resinu, jeho hustota a cena.



Obrázek 7.7: Kombinace umístění tištěných vzorků na platformě

Nejdůležitější nastavitelné parametry se nacházejí v záložce *Print*. Zde se nastavují parametry v závislosti na volbě resinu a pro jednotlivé resiny jsou rozdílné, tudíž pro každý resin bylo nutné parametry postupně upravovat, dokud nebyly vyhovujícími. Program nabízí na výběr několik základních resinů, pro které má předdefinované hodnoty jednotlivých parametrů, ale je potřeba myslet na to, že to nejsou pevně stanovené hodnoty a je nutné s nimi, v případě jejich nevhodnosti, dále pracovat. Nastavení rozlišuje zvláště parametry pro normální vrstvy a spodní vrstvy. Volenými parametry se rozumí:

- **výška vrstvy** (Layer height) – výška vrstvy zásadně ovlivňuje dobu trvání tisku modelu a jeho kvalitu. Čím je menší, tím je povrch modelu hladší, jsou zobrazeny lépe detaily a zvyšuje se celkově kvalita tisku. Ale na vytvoření modelu je potřeba více vrstev a tím se prodlužuje doba tisku. Výšku vrstvy je možné měnit na základě geometrie modelu, ale pro tisk vzorků na kvazi-statické zatěžování se ponechala stejná hodnota, u které byla kvalita tisku dostačující;
- **počet spodních vrstev** (Bottom Layer Count) – určuje počet vrstev, které jsou v přímém kontaktu s platformou a nastavují se pro ně jiné hodnoty parametrů než pro normální vrstvy. Na těchto vrstvách závisí celý tisk, protože spodní vrstvy zajišťují přilnavost vzorku k platformě. Počet spodních vrstev se neukázal jako zásadní parametr, ale jejich pozdější nastavení už ano;
- **počet přechodových vrstev** (Transition Layer Count) – jedná se o vrstvy, které se nacházejí mezi spodními a normálními vrstvami. Při tisku vzorků nebyly tyto vrstvy uvažovány;
- **typ přechodu** (Transition Type) – tento parametr navazuje na předchozí a definuje typ přechodu expozičního času při přechodu ze spodních vrstev na normální. I když při tisku nebyly přechodové vrstvy použity, typ přechodu byl nastaven na lineární;
- **doba expozice** (Exposure Time) – pravděpodobně nejdůležitější a nejobtížněji nastavitelný parametr. Jedná se o čas potřebný na vytvrzení jedné normální vrstvy resinu, tedy čas, kdy je daná vrstva osvětlována světelným zdrojem. Správná volba nastavení hodnoty má velký dopad na kvalitu tisku, respektive rozhoduje o tom, jestli se model vytiskne nebo dojde k jeho zničení. Dále ovlivňuje celkovou dobu tisku modelu. Tento parametr nabývá rozdílných hodnot pro jednotlivé resiny, proto bylo potřeba důkladného ozkoušení jednotlivých hodnot pro použité resiny. K tomu byl využit model kalibrační matice. Podrobněji je kalibrační model popsán v kapitole 7.4.4;
- **doba expozice spodních vrstev** (Bottom Exposure Time) – čas pro vytvrzení spodních vrstev se zpravidla nastavuje 8-12krát delší než běžná doba vytvrzování normální vrstvy. Prodloužení času má pomoci zvýšení přilnavosti mezi modelem a platformou. Pokud je překročen ideální čas expozice spodních vrstev, dojde k jejich přiškvašení k platformě, což má za následek nemožnost oddělení modelu od platformy a může dojít jak ke zničení modelu, tak konstrukční platformy;

- **zpoždění vypnutí světla** (Light off delay) – celková doba pohybu osy z nahoru a dolů (doba zvedání, setrvání a klesání platformy) během tisku jedné vrstvy pryskyřice. Se zvětšující se hodnotou zpoždění dochází ke zlepšení rozlišení tisku, ale zároveň se zvyšuje i celkový potřebný čas na vytištění modelu;
- **zpoždění vypnutí světla pro spodní vrstvy** (Bottom Light off Delay) – celková doba pohybu osy z nahoru a dolů pro spodní vrstvy;
- **vzdálenost zvednutí platformy** (Lifting Distance) – vzdálenost v ose z , kterou urazí platforma při zvedání mezi jednotlivými expozicemi vrstev. Tento zdvih umožní resinu dostat se zpět pod platformu a vytvořit další vrstvu;
- **vzdálenost zvednutí platformy pro spodní vrstvy** (Bottom Lift Distance) – obdobný parametr jako přechodí, jen se jedná o vzdálenost při vytváření spodních vrstev;
- **rychlost zvedání** (Lifting Speed) – rychlost zvedání definuje, jakou rychlostí dochází ke zvedání platformy ze zásobníku s pryskyřicí mezi vytvrzováním jednotlivých normálních vrstev. Nastavení tohoto parametru má vliv na celkovou dobu tisku a na jeho kvalitu. Pokud je rychlost příliš vysoká, může vlivem vzniku podtlaku mezi vzorkem a fólií v zásobníku dojít k deformaci vzorku či poničení uchycení platformy. Naopak s pomalou rychlostí dochází ke znatelnému prodloužení doby tisku;
- **rychlost zvedání pro spodní vrstvy** (Bottom Lift Speed) – rychlost zvedání platformy ze zásobníku s resinem pro spodní vrstvy.

U většiny parametrů se při nastavení hodnot vycházelo z doporučení výrobců jednotlivých resinů. Avšak na základě provedených tisků modelů kalibračních matic byly tyto parametry drobně upraveny, aby se dospělo k co možná nejlepšímu výsledku. V případě, kdy výrobce neuváděl doporučenou hodnotu pro vybraný parametr, byla výsledná hodnota získána pomocí postupného upravování v závislosti na výsledku tisku. Parametry tisku bylo nutné nastavit pro každý ze čtyř použitých resinů zvlášť a jejich vhodnost otestovat při tisku kalibračních matic. Výsledné použité parametry pro jednotlivé resiny jsou uvedeny v tabulce 7.8.

Tabulka 7.8: Výsledné hodnoty parametrů tisku

Parametry	Jednotky	Resiny		
		Phrozen Aqua	Phrozen ABS-like	UV DLP Firm
výška vrstvy	mm	0,5	0,05	0,05
počet spodních vrstev	-	4	4	4
počet přechodových vrstev	-	0	0	0
typ přechodu	-	linear	linear	linear
doba expozice	s	2,5	2	6
doba expozice spodních vrstev	s	30	30	80
zpoždění vypnutí světla	s	11	11	9
zpoždění vypnutí světla pro spodní vrstvy	s	11	11	9
vzdálenost zvednutí platformy	mm	6	6	5
vzdálenost zvednutí platformy pro spodní vrstvy	mm	8	8	6
rychlost zvedání	mm/min	60	60	80
rychlost zvedání pro spodní vrstvy	mm/min	60	60	80

Ve složce *G-Code* je možné vidět automaticky vytvářený kód, na jehož základě 3D tiskárna funguje. Kód obnáší vše, co bylo nastaveno ve složce *Print*, pouze psané v jazyce srozumitelném tiskárně. Do tohoto kódu nebylo zasahováno a byl ponechán v podobě, v jaké byl vygenerován. Poslední složka nastavení *Advanced* se věnuje rozsáhlejšímu nastavení. Je zde možné např. nastavit výkon zdroje světla pro jednotlivé vrstvy nebo stupeň vyhlazení hran objektů. Pro potřeby tisku vzorků byly ponechány hodnoty nastavené softwarem.

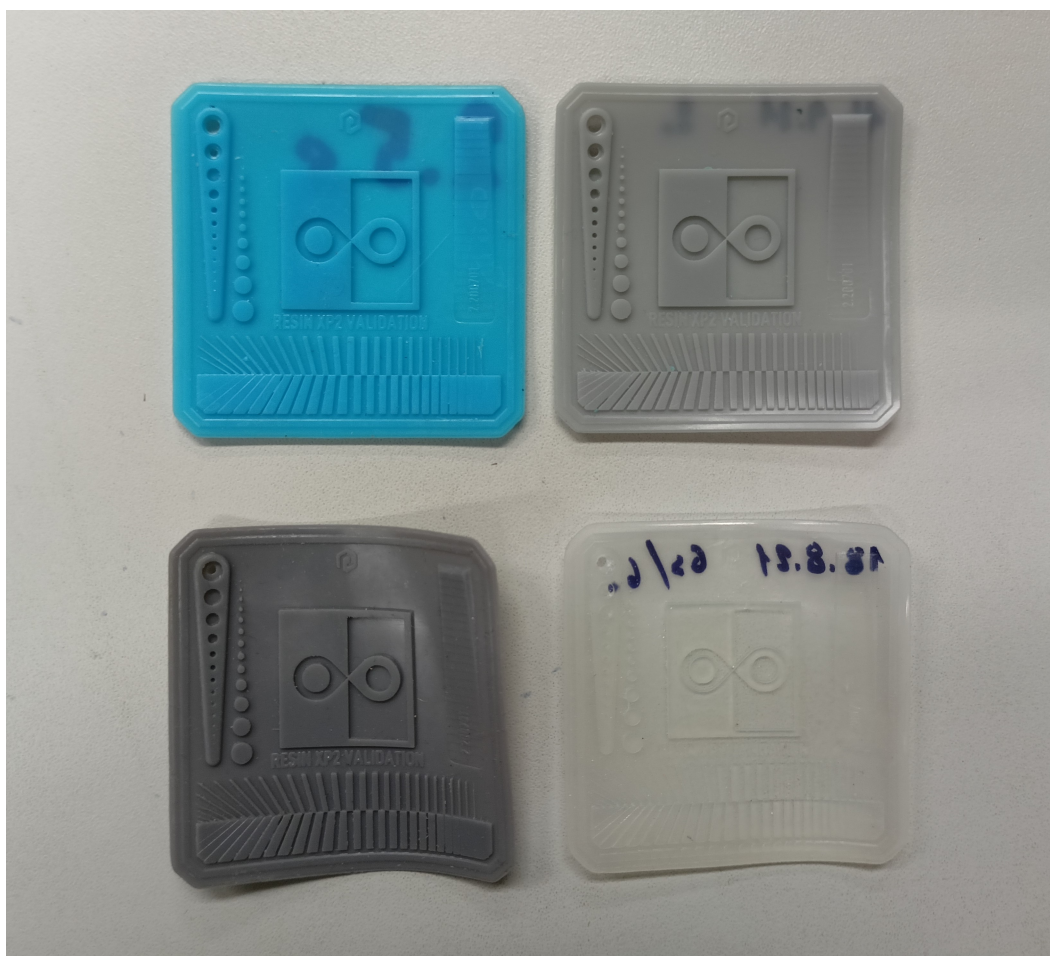
Jakmile byly všechny parametry nastaveny, v pravé části plochy se pomocí posuvníku postupně prošly všechny řezy vzorkem od podstavy až po vršek modelu, aby bylo možné odhalit, zda někde nevznikl přesah, který by nebyl podepřený podpěrrou, a tudíž by došlo k jeho zhroucení. Po kontrole vzorku se model „slicoval“ a došlo k jeho rozřezání na jednotlivé vrstvy. Zároveň nám software pro kontrolu vypsal námi zvolené hodnoty jednotlivých parametrů tisku a na jejich základě byl dopočten celkový čas tisku, potřebný objem resinu, jeho váha a cena výtisku. Po potvrzení vypsaných údajů byl soubor uložen jako CTB, tedy soubor, který dokáže 3D tiskárna zpracovat. Velkou výhodou při tisku na 3D resinové tiskárně bylo, že celkovou dobu tisku neovlivňuje počet vzorků na platformě, ale nejvyšší počet vrstev u vzorku.

7.4.4 Model kalibrační matice

Správně nastavený čas doby expozice jednotlivých vrstev vede k úspěšnému tisku a zaručení potřebné kvality. K jeho určení byl využit model kalibrační matice XP2 s rozměry stran 50 x 50 mm, zobrazen na obrázku 7.8. Výhodou použitého modelu je jeho nízká spotřeba materiálu a relativně krátký čas tisku. Pro každý resin bylo provedeno několik testů kalibračním modelem XP2, než bylo dosaženo uspokojivých výsledků. Během hledání ideální expoziční doby bylo potřeba nejprve stanovit hranice, ve kterých se hledaná hodnota nachází. Proto byla zvolena jedna nižší a vyšší hodnota expoziční doby a byly vytištěny kalibrační vzorky. Výsledkem byly dva nevyhovující kalibrační modely, kdy u jednoho byly pozorovány znaky krátké expoziční doby a u druhého naopak znaky dlouhé. Tímto způsobem byly určeny hranice a s menšími kroky byl hledán ideální expoziční čas pro jednotlivé resiny.

Zda je expoziční doba správně nastavena je možné poznat na základě kombinace několika znaků nacházejících se na vytištěné kalibrační matici:

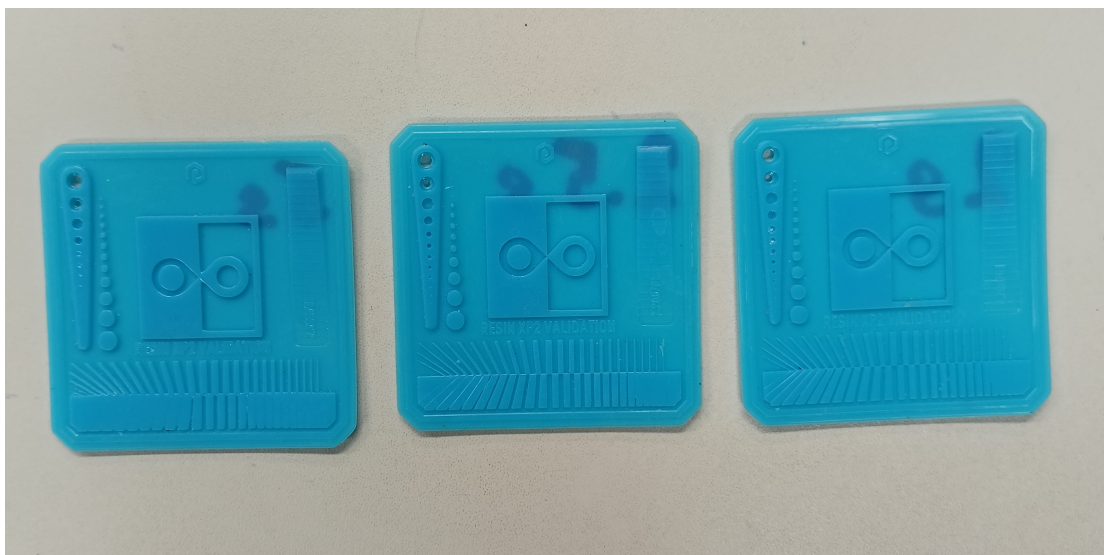
- **symbol nekonečna uprostřed matice** – pokud se špičky jednotlivých polovin symbolu dotýkají, je expoziční čas dobře zvolen. Při nedostatečné expozici se mezi nimi objeví mezera, při nadměrné expozici se budou špičky obou polovin překrývat;
- **obdélníky ve spodní části matice** – při správně nastaveném času expozice horní část obdélníků plynule navazuje na meziprostory spodních částí obdélníků. Při špatně zvolené expoziční době přestávají linie obdélníků na sebe navazovat;



Obrázek 7.8: Kalibrační modely XP2 pro jednotlivé resiny

- **díry a výčnělky v levé části matice** – pokud je čas dobře nastaven, měly by být díry a výčnělky symetrické. Při nevhodném nastavení dochází k asymetrickému uspořádání jednotlivých děr a výčnělků;
- **text uprostřed matice** – pokud text na sebe navazuje a je snadno čitelný, je zvolený expoziční čas správný.

Na obrázku 7.9 je možné vidět, jak vypadají kalibrační matice XP2 v případě, kdy je doba expozice nedostačující a naopak, kdy byla matice vystavena nadměrné expozici. Pro porovnání je zde zobrazen i kalibrační vzorek s přijatelnou expoziční dobou.



Obrázek 7.9: Zobrazení kalibrační matice XP2 vystavené nadměrné expoziční době (vlevo), dobře zvolené (uprostřed) a nedostačující (vlevo)

7.5 Post-processing

Dokončením tisku proces výroby vzorků nekončí. Výtisky už mají svoji podobu, ale vyžadují další zpracování, aby bylo dosaženo finálních mechanických vlastností tak, jak je stanovuje výrobce resinu.

Vytištěné vzorky, které po dokončení tisku zůstaly přichyceny k platformě, bylo potřeba vhodným způsobem oddělit. K tomuto účelu byla použita plastová špachtle, kterou výrobce přikládá k tiskárně. Nejlépe se vzorky oddělovaly, když špachtle svírala s platformou úhel 45°. Oddělené vzorky bylo potřeba zbavit zbytkového nevytvrzeného resinu, který zůstal po dokončení tisku přichycený na vzorcích. K tomuto účelu byla využita ultrazvuková čistička Geti GUC 10B (zobrazena na obrázku 7.10) s objemem 10l a možností ohřevu, která je vybavena dvěma digitálními displeji ukazujícími aktuální teplotu ultrazvukové čističky a nastavený čas čištění. Jako pracovní kapalina v ultrazvukové čističce byl použit isopropanol. Než ale byly vzorky vloženy do ultrazvukové čističky, byly důkladně opláchnuty v jarové vodě, čímž došlo k prvotnímu zbavení se nevytvrzeného resinu. Prvotní opláchnutí se aplikuje, aby nedošlo k velkému znečištění isopropanolu v nádrži ultrazvukové čističky tekutým resinem a byla tím zachována delší životnost isopropanolu pro čištění. Při vkládání vzorků do ultrazvukové čističky bylo potřeba hlídat, aby byly vzorky zcela ponořené v isopropanolu. U vyčnívající části z isopropanolu by nebylo zaručeno jeho dostatečné očištění. Doba čištění byla nastavena na 5 minut a teplota ohřevu na 35 °C.

Po uplynutí nastavené doby byly vzorky vyndány z nádrže a nechaly se uschnout. Pro následné vytvrzení vzorků byla použita UV lampa Phrozen Cure Luna, kterou je možné vidět na obrázku 7.10. Daná UV lampa využívá ultrafialových LED diod, které jsou rozmístěny na vnitřní straně rámu konstrukce, a tudíž osvětlují vzorky jak z bočních stran, tak shora. UV lampa je navíc opatřena otočnou plošinou, která umožňuje ozáření vzorků ze všech stran a nedochází tak ke vzniku slepých míst. Na otáčivou plošinu bylo možné umístit až 12 auxetických struktur nebo 4 vzorky určené pro tahovou zkoušku. Po uspořádání vzorků na plošinu bylo potřeba umístit kryt UV lampy, aby bylo zabráněno šíření UV světla do okolí. UV lampa má tři módy nastavení doby vytvrzování: 5, 10 a 20 min. Pokud je potřeba nastavit jinou hodnotu, je možné využít ručního nastavení času. Doba vytvrzování byla zpočátku nastavena na 20 minut a následně byly minuty přidávány, dokud nebyly vzorky dostatečně vytvrzeny. Plně vytvrzený vzorek byl nejlépe poznán podle změny jeho povrchu. Nevytvrzený vzorek má lesklý povrch, zatímco povrch vytvrzeného vzorku je matný. Dílčí čas vytvrzení se ustanovil na 60 minutách, celkový čas vytvrzení dosáhl 120 minut pro všechny použité resiny, protože muselo být provedeno otočení vzorků v UV lampě, aby byl vytvrzen v celé ploše. Důvodem otáčení vzorků bylo jejich množství na otočné plošině, které způsobovalo jejich vzájemné překrývání se vůči světlu z UV lampy. Významnou výhodou při použití ultrazvukové čističky a UV lampy bylo zkrácení času obou procesů a usnadnění čištění, které by jinak muselo být provedeno ručně a nikdy by nebylo dosaženo tak skvělých výsledků jako při použití ultrazvukové čističky. Podrobnějším popisem ultrazvukové čističky a způsobu vytvrzování se zabývá kapitola 4.7.

Posledním důležitým krokem následného zpracování bylo odstranění podpěr od vzorků. Podpěry byly odstraněny ručně za pomoci malého skalpelu, kdy byly postupně odřezávány v místě kontaktu se vzorkem tak, aby byla vyvíjena co nejmenší síla na jednotlivé části vzorků a nedošlo k jejich poškození. Nejproblémovější odstraňování podpěr bylo u auxetických struktur s šířkou jednotlivých nosníků 0,3 mm. V případě, že povrch vzorků byl stále ještě trochu lepkavý, byly vzorky otřeny čistící utěrkou napuštěnou isopropanolem, čímž došlo k úplnému odstranění lepkavosti.

Kromě péče o vzorky bylo důležité také myslet na očistění tiskárny po každém tisku. Po oddělení vzorků bylo potřeba otřít platformu papírovou utěrkou od zbylého resinu a následně očistit isopropanolem, aby na ploše platformy nezůstaly žádné nečistoty a nebyla tak zhoršena přilnavost vzorků k platformě. Dále bylo potřeba odmontovat zásobník s resinem a podívat se, zda nedošlo k úniku resinu. V případě, že k úniku došlo, resin byl setřen a displej opatrně vyčištěn isopropanolem.



Obrázek 7.10: Ultrazvuková čistička Geti GUC 10B (vlevo) a UV lampa Phrozen Cure Luna (vpravo)

7.6 Problémy při tisku

V procesu tisku vzorků byly identifikovány některé nevýhody resinového 3D tisku. Zjištěné problémy by se daly rozdělit do dvou skupin, a to:

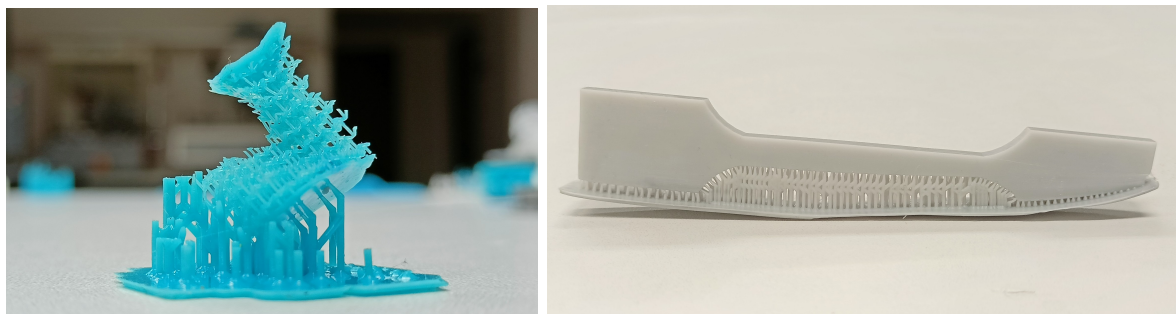
- **technické problémy**, které byly způsobeny samotným provedením konstrukcí jednotlivých přístrojů a náročností práce týkající se používání resinů;
- **problémy spojené s nastavením** jednotlivých parametrů pro tisk a parametrů podpěrných konstrukcí.

Technické problémy neměly závažný dopad na kvalitu tisku, ale značně komplikovaly práci s přístroji. Největším problémem se ukázalo protékání fólie umístěné na dně zásobníku. Pravděpodobným důvodem úniku resinu byl netěsnící rám zásobníku, do něhož se fólie upevňovala. S únikem resinu ze zásobníku byl spojený i další problém, a to proniknutí resinu otvorem u kuličkového šroubu tiskárny do jejích útrob a do motoru, který šroub pohání. Tiskárnu bylo následně potřeba rozebrat a důkladně vyčistit její útroby, aby zde nedošlo k vytvrzení resinu a poničení tiskárny. I přes důkladné vyčištění později nastal problém s pohybem platformy v ose z , tudíž tiskárna musela být znovu rozebrána a motor opět vyčištěn pomocí isopropanolu. Dalším problémem se

stalo postupné odlepování vnější ochranné pásky displeje, která drží LCD displej připevněný na podstavci tiskárny. Ochrannou pásku bude potřeba časem vyměnit za novou. Technické problémy nedoprovázely pouze práci s 3D resinovou tiskárnou, ale jeden problém se objevil i u UV lampy. Rám konstrukce UV lampy byl vychýlen ze své osy, což způsobilo, že kryt UV lampy správně nedoléhal na čidla, která umožňovala její spuštění. Tudíž bylo potřeba kryt v místě čidel zatížit, aby se jich správně dotýkal. Náročnost práce s resiny spočívala v jejich požadavcích na uchovávání. Zpočátku byly použité resiny uchovávány v laboratorních nádobách na vzorky. U toho způsobu uchovávání došlo ke vniknutí světla a vzduchu do nádob, což mělo za následek samovolné vytvrzování resinu a oddělování jeho jednotlivých složek. Proto se začaly použité resiny uchovávat v originálních lahvích od již vypotřebovaných resinů, které zajišťovaly neprůchodnost světla a pomocí zátky i zabránění pronikání vzduchu do nádoby.

Problémy spojené s nastavováním parametrů už měly zásadnější dopady na průběh tisku, kdy ve většině případů jejich špatného nastavení došlo k poničení vzorku (vzorek zobrazený na obrázku 7.11) nebo se vzorek vůbec nevytiskl. U některých parametrů jejich volba vyhovující hodnoty byla jednodušší, protože bylo možné vycházet z doporučených hodnot od výrobce, zatímco u jiných parametrů jejich výsledné hodnoty musely být určeny postupnými úpravami podle toho, jak se tisk vzorku podařil. Tento fakt způsobil, že došlo k mnoha neúspěšným tiskům, kdy bylo spousta vzorků poničeno. Pro zajištění nejvyšší kvality tisku bylo největším problémem nalézt ideální expoziční čas pro jednotlivé vrstvy. K tomu byl použit model kalibrační matice popsany v kapitole 7.4.4. Nejčastějším problémem se ukázala špatná přilnavost vzorku k platformě a tím nevytisknutí modelu a přilepení podstavy nebo raftu k fólii zásobníku. Důvodů, proč k tomu došlo, bylo více. Nejprve bylo zjištěno, že resinová tiskárna nestála na rovné ploše a vlivem toho nebyl resin v zásobníku rovnoměrně rozmístěn. Jakmile byla tiskárna podložena, ukázalo se, že problém stále přetrvává. Dalším důvodem bylo špatné nastavení parametrů pro spodní vrstvy modelu. Byla totiž nastavena krátká expoziční doba spodních vrstev, čímž nebylo dosaženo potřebné přilnavosti k platformě. Naopak při nastavení dlouhé doby expozice nastaly komplikace s vysokou přilnavostí, kdy nebylo možné oddělit bez poničení vzorky od platformy. Vzhledem k možnému riziku poničení platformy při nastavování výše zmíněných parametrů, byla z preventivních důvodů snížena rychlost zvedání platformy. Dalším problémem se stala deformace vzorků (nejčastěji průhyb vzorků na tahovou zkoušku) či jejich úplné oddělení od podpěr (viz obrázek 7.11). To bylo způsobeno absencí podpěr v místech, kde vznikaly přesahy či nebylo kde uchytit nově vznikající vrstvy, a nastavením parametrů podpěrných konstrukcí. Při použití podpěr se

kritickým místem stala horní část podpěry a způsob nastavení parametrů v místě kontaktu podpěry se vzorkem. Zde došlo ke zvětšení parametru, který řeší hloubku zapuštění podpěry vzorku, a zvětšení horního průměru podpěry. Posledním problémem bylo, že u některých vzorků i po vytvrzení přetrvávala jejich lepivost. Ta byla způsobena nedostatečným očištěním vzorků, kdy na povrchu i po očištění zůstal nevytvrzený resin. Problém byl odstraněn výměnou použitého isopropanolu v nádrži ultrazvukové čističky, který obsahoval již příliš velké množství tekutého resinu, za nový.



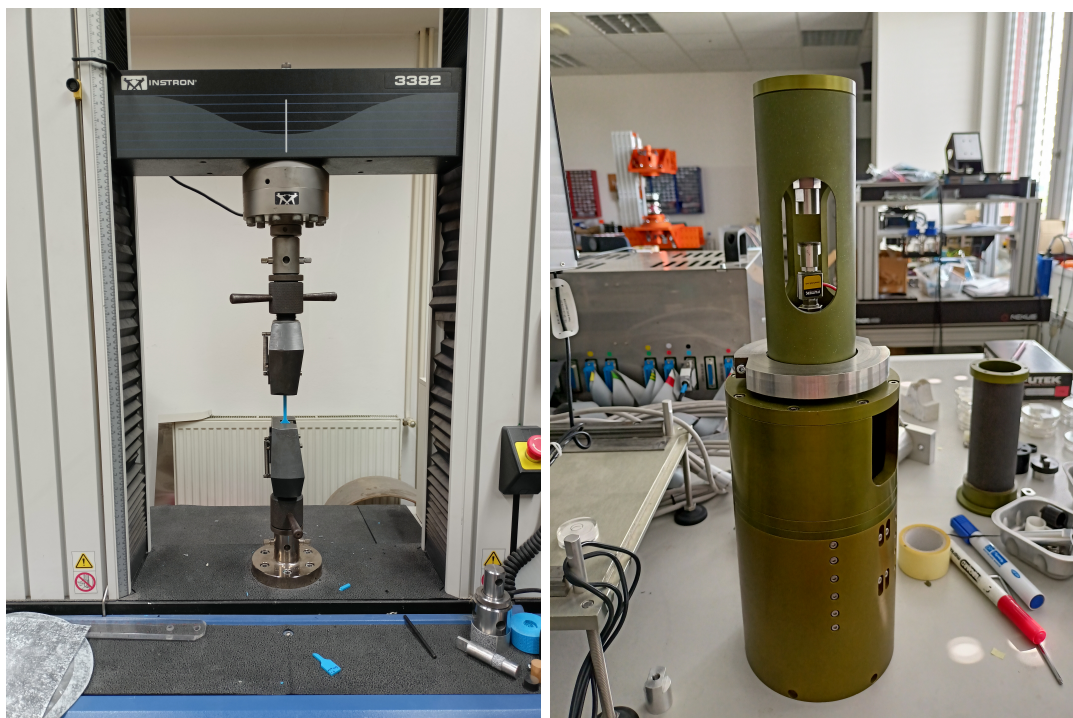
Obrázek 7.11: Ukázka nepovedených výtisků vlivem špatného nastavení parametrů

7.7 Postup měření

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, tištěné vzorky byly vystaveny kvazi-statickému zatěžování v tahu a tlaku pro následné zjištění jejich mechanických charakteristik. Testovány byly pro každý resin tři vzorky od každé sady, aby bylo možné předejít chybám při měření, které díky vyššímu počtu testů mohly být snáze odhaleny. Zkušební vzorky byly před samostatným měřením zváženy a byly zaznamenány jejich počáteční délky a výšky pro potřeby pozdějších výpočtů hodnot mechanických vlastností.

Tahová zkouška byla provedena na univerzálním zkušebním přístroji Instron 3382 (viz obrázek 7.12), který umožňuje provádět jak zkoušky tahem, tak zkoušky tlakem a ohybem s maximálními silami 100 kN. Zkušební vzorek byl umístěn do upevňovacích čelistí a namáhán osovou tlakovou silou rychlostí 0,5 mm/min až do jeho přetržení, přičemž měření probíhalo se vzorkovací frekvencí 100 Hz. V průběhu zkoušky bylo zaznamenáváno posunutí a síla v konkrétním čase. Po dokončení zatěžování byl vzorek znova přeměřen, aby se zjistila jeho délka po přetržení.

Pro provedení tlakové zkoušky nebylo možné využít stroje Instron 3382, jelikož jeho silový rozsah byl příliš velký a docházelo tím k nepřesnému měření. Proto pro účely této zkoušky bylo využito stolního zatěžovacího zařízení, které je určeno ke zkoumání deformačního chování u materiálů se složitou vnitřní mikrostrukturou. Stolní zatěžovací zařízení je zobrazeno na obrázku 7.12. Bližší informace k uvedenému přístroji jsou uvedeny v internetovém článku [44]. Výhodou daného přístroje byl vyměnitelný siloměr, díky kterému bylo možné použít siloměr s odpovídajícím rozsahem sil pro zkoušení jednotlivých provedení struktur. Pro struktury s tloušťkou nosníků 0,3 mm byl použit siloměr o maximální síle 1 kN a pro zbylé dvě struktury o tloušťce nosníků 0,5 mm a 0,6 mm siloměr o maximální síle 2 kN. Měření probíhalo rychlostí 2 mm/min se vzorkovací frekvencí 100 Hz. Zkušební vzorek byl stlačován až do jeho 50% deformace. Po dosažení této hodnoty deformace bylo měření zastaveno.



Obrázek 7.12: Zatěžovací přístroje - Instron 3382 (vlevo), stolní zatěžovací zařízení (vpravo)

Kapitola 8

Vyhodnocení experimentálního měření

Vyhodnocení naměřených dat probíhalo v programovém prostředí MATLAB, přesněji ve verzi MATLAB R2019b. Pro výpočet konkrétních hodnot mechanických charakteristik byl použit vyhodnocovací skript, který obsahoval i část zabývající se vykreslením smluvního diagramu napětí – deformace. Použitý skript funguje poloautomaticky a vyžadoval tak manuální zásahy. V první části skriptu byla načtena experimentálně získaná data (konkrétně záznam zatěžovací síly F a absolutního prodloužení vzorku ΔL) a manuálně byly zadány další hodnoty jako počáteční délka L_0 , délka vzorku po přetržení L_u a parametry průřezové plochy vzorku S_0 . Na základě těchto dat byly stanoveny vektory smluvního napětí a poměrného prodloužení s využitím vzorců uvedených v kapitole 6.2, z nichž byl vytvořen dočasný smluvní diagram napětí – deformace. V další části skriptu byl na základě analýzy zobrazeného dočasného smluvního diagramu stanoven rozsah dat odpovídající lineární oblasti diagramu pro určení Youngova modulu pružnosti. Stanovená směrnice lineární (E) oblasti dále posloužila pro konstrukci rovnoběžky s touto oblastí při stanovování hodnoty smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$. Na zobrazeném smluvním diagramu společně s touto rovnoběžkou byl nalezen jejich průsečík a z něho odečtena hodnota meze kluzu. V další části skriptu byla vyhodnocena mez pevnosti a tažnost resp. jmenovité poměrné prodloužení při přetržení. Na závěr bylo možné využít skript pro vykreslení výsledných smluvních diagramů napětí – deformace.

8.1 Vyhodnocení zkoušky tahem

S využitím výše zmíněného vyhodnocovacího skriptu byly ze zkoušky tahem vypočítány následující mechanické charakteristiky s využitím vzorců v kapitole 6.2:

- **smluvní napětí** σ (vzorec 6.1) – data pro vykreslení do smluvního diagramu napětí – deformace;
- **poměrná deformace** ϵ (vzorec 6.2) – data pro vykreslení do smluvního diagramu napětí – deformace;
- **Youngův modul pružnosti v tahu** E — pro jeho stanovení bylo potřeba nejdříve určit u dočasného smluvního diagramu napětí – deformace lineární oblast. Výběr oblasti se v rámci vyhodnocovacího skriptu prováděl ručně, kdy byl vybrán z diagramu přibližný bod označující konec lineární oblasti. Po získání dané části diagramu bylo možné pomocí lineární regrese dopočítat Youngův modul pružnosti;
- **smluvní mez kluzu v tahu** $R_{p0,2}$ — získána jako průsečík křivky ve smluvním diagramu napětí – deformace s rovnoběžkou s lineární oblastí ve vzdálenosti reprezentující 0,2 % plastické deformace vzorku;
- **mez pevnosti v tahu** R_m (vzorec 6.8);
- **jmenovité poměrné prodloužení při přetržení** ϵ_{tb} (vzorec 6.9).

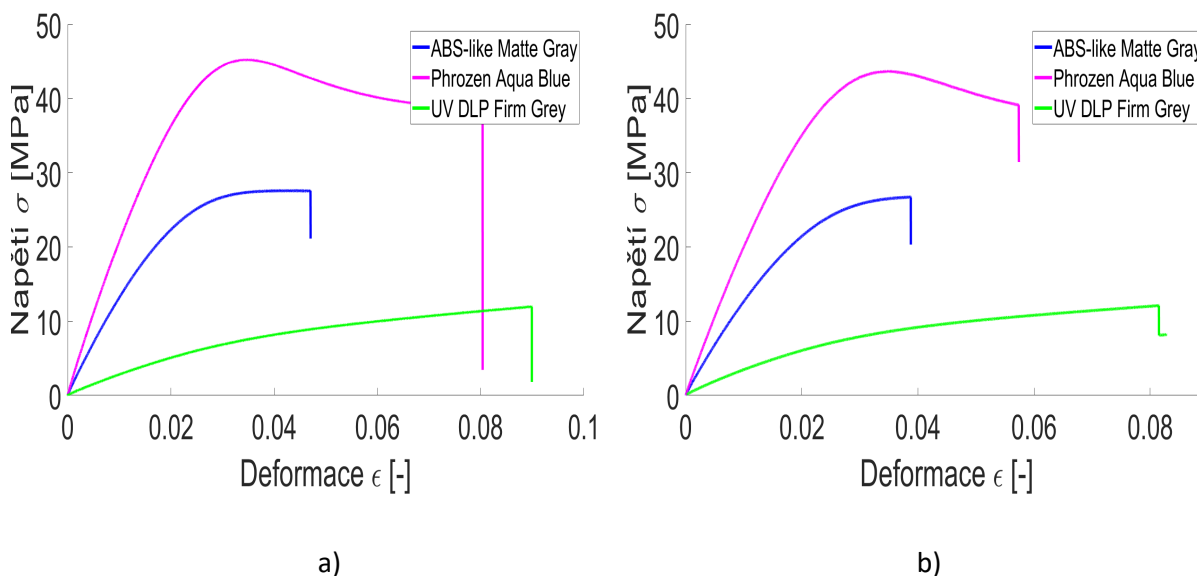
Po vyhodnocení tahových zkoušek všech testovaných vzorků byly získané hodnoty zprůměrovány a výsledné hodnoty mechanických charakteristik jednotlivých typů vzorků jsou uvedeny v tabulce 8.1.

Z tabulky 8.1 vyplývá, že největší Youngův modul pružnosti v tahu E vykazuje resin Phrozen Aqua, přičemž u vzorku s natočením při tisku o 90° kolem osy x je modul pružnosti o něco vyšší. Naopak nejmenší modul pružnosti má resin UV DLP Firm, kde jeho hodnota dosahuje šestiny hodnoty resinu Phrozen Aqua. Z dané charakteristiky vyplývá, že nejvíce tuhým materiálem je resin Phrozen Aqua. Dále je možné si z tabulky všimnout, že resin Phrozen Aqua vykazuje kromě Youngova modulu pružnosti i nejvyšší hodnotu meze kluzu $R_{p0,2}$, pevnosti R_m a jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení ϵ_{tb} , z čehož vyplývá, že lineární oblast pružné deformace je delší než u ostatních resinů a je potřeba vyvinout větší zatěžovací sílu pro vznik plastických deformací a porušení vzorku. Též při zatěžování dochází u vzorků vyrobených z resinu Phrozen Aqua k většímu prodloužení.

Tabulka 8.1: Hodnoty mechanických charakteristik tahové zkoušky

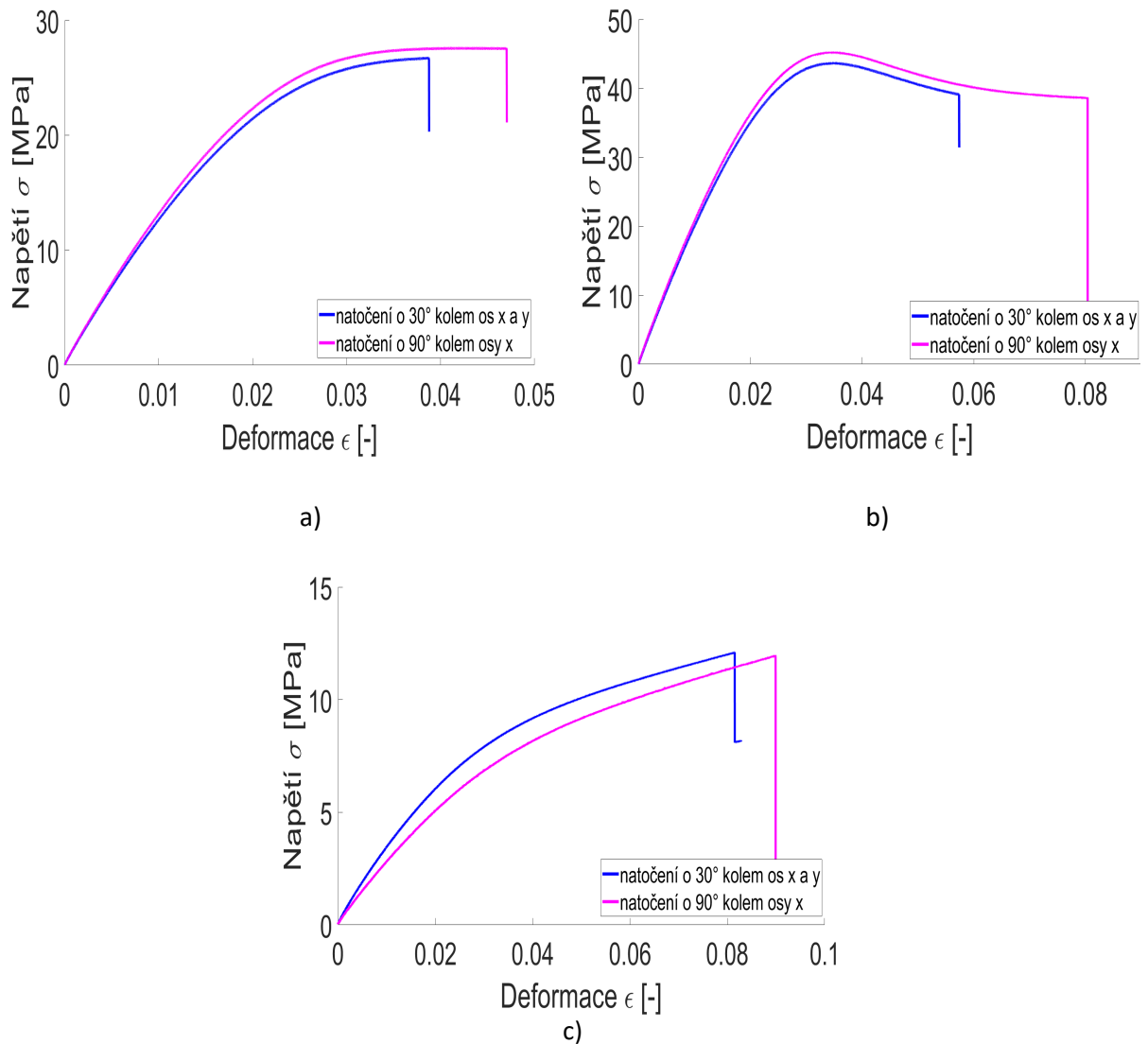
Natočení vzorku při tisku	Resin	Mechanické charakteristiky			
		E	$R_{p0,2}$	R_m	ϵ_{tb}
		MPa	Mpa	MPa	%
o 30° kolem os x a y	Phrozen Aqua	1246,55	30,80	43,75	3,22
o 30° kolem os x a y	Phrozen ABS-like	809,71	17,53	26,85	2,93
o 30° kolem os x a y	UV DLP Firm	212,94	5,20	13,05	1,46
o 90° kolem osy x	Phrozen Aqua	1318,02	32,80	46,66	3,56
o 90° kolem osy x	Phrozen ABS-like	867,09	17,95	28,35	2,11
o 90° kolem osy x	UV DLP Firm	178,64	4,50	11,51	1,47
data od výrobce	Phrozen Aqua	588	-	24	-
data od výrobce	Phrozen ABS-like	116	-	10	-
data od výrobce	UV DLP Firm	700	-	26	-

Průběhy charakteristických křivek napětí – deformace smluvního diagramu jsou pro jednotlivé resiny zobrazeny na obrázku 8.1. Z obrázku je možné pozorovat, že u vzorků vyrobených z resinu UV DLP Firm dochází k velkým plastickým deformacím, zatímco u resinu Phrozen ABS-like je oblast plastických deformací výrazně nižší, naopak oblast pružných deformací se zvětšuje.



Obrázek 8.1: TAH: Smluvní diagram napětí – deformace pro vzorky natočené při tisku a) o 90° kolem osy x , b) o 30° kolem os x a y vyrobené z různých resinů

Při porovnání vlivu natočení vzorku při tisku je na získaných datech zaznamenaných v tabulce 8.1 vidět, že hodnoty nejsou od sebe příliš vzdálené, tudíž analyzované natočení vzorku při tisku nemá zásadní vliv na jeho mechanické vlastnosti. Průběhy charakteristických křivek napětí – deformace vzorků vyrobených z totožného resinu, ale s rozdílným natočením jsou zobrazeny na obrázku 8.2. Průběh křivek je obdobný, jen křivky vzorků s natočením o 90° kolem osy x dosahují větších poměrných deformací.



Obrázek 8.2: TAH: Smluvní diagram napětí – deformace pro vzorky vyrobené z resinu a) Phrozen ABS-like, b) Phrozen Aqua, c) UV DLP Firm s různým natočením při tisku

Při porovnání vypočtených hodnot mechanických charakteristik resinů s hodnotami udávanými výrobcem (tabulka 8.1) bylo zjištěno, že vypočtené hodnoty Youngova modulu pružnosti v tahu u resinů od firmy Phrozen (Aqua Blue, ABS-like Matte Gray) jsou oproti ostatním případům výrazně vyšší, než udává výrobce. Naopak u resinu UV DLP Firm Grey od firmy Photocentric3D je modul pružnosti výrazně nižší. Vypočtené hodnoty s hodnotami od výrobce se rozcházejí i u meze pevnosti v tahu, kdy pro resiny Phrozen dosahují dvojnásobku, zatímco u resinu UV DLP Firm Grey jsou poloviční.

8.2 Vyhodnocení zkoušky tlakem

Pro potřeby pozdějšího porovnání byla nejprve určena porozita 3D tištěných struktur z jednotlivých resinů, která je uvedena v tabulce 8.2. Jak je možné si všimnout z dané tabulky, porozita u resinu Phrozen Aqua se liší od ostatních. To může být způsobeno pravděpodobně hustotou udávanou výrobcem, která neodpovídá reálné. Porozita byla určena na základě rozměrů vzorků, jejich hmotnosti a hustoty 3D tištěného materiálu uvedené výrobcem. Pro získání porozity byl vytvořen výpočetní skript. V první části skriptu byla načtena data s hmotnostmi a rozměry vzorků a následně doplněna o ručně zadané hustoty materiálu udávané výrobcem. V druhé části skriptu byly provedeny výpočty objemů jednotlivých struktur s póry. Následně byly dopočteny celkové objemy plyných vzorků struktur bez pórů. Výsledná porozita byla získána ze vztahu:

$$v = \frac{V_c - V_{vz}}{V_c} \cdot 100, \quad (8.1)$$

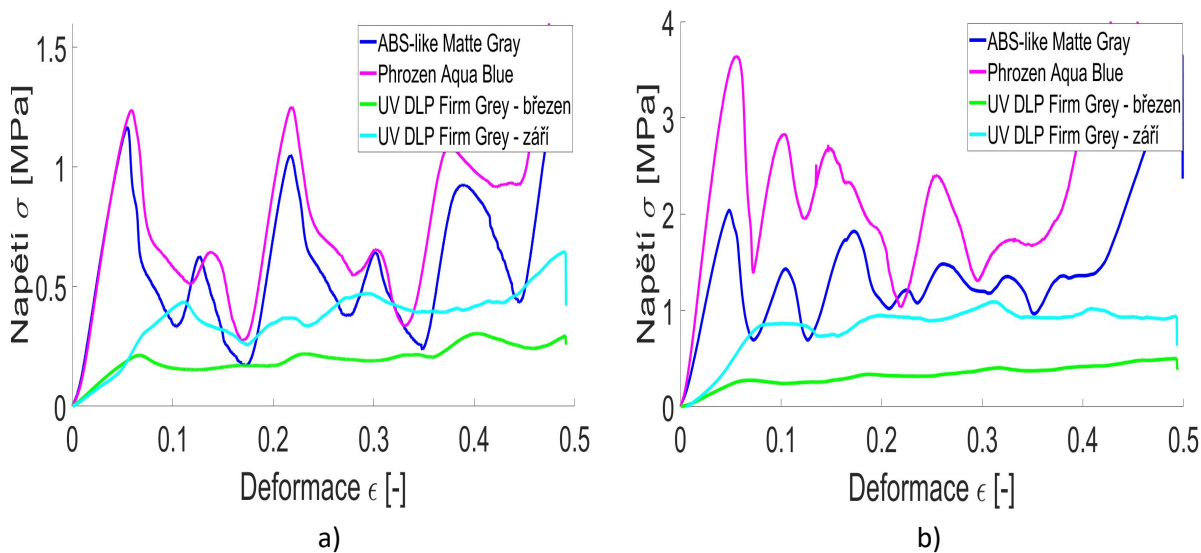
kde V_c je celkový objem struktury bez pórů a V_{vz} objem struktury s póry.

Tabulka 8.2: Porozita uvedená v % pro 3D tištěné struktury

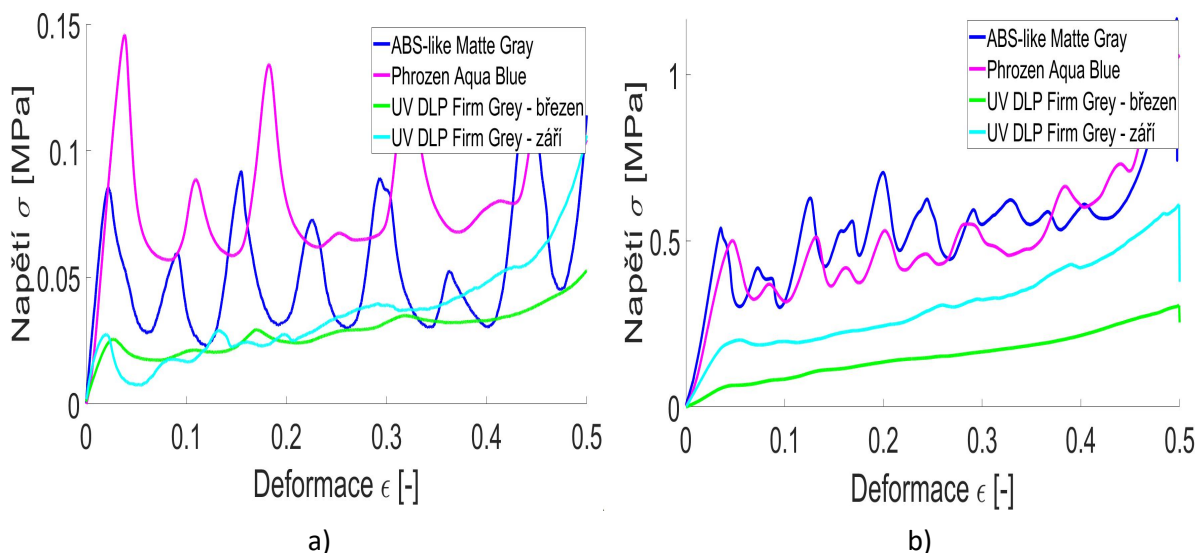
Resin	Provedení struktury			
	4x3, 0,6 mm	6x4, 0,5 mm	6x4 0,3 mm	8x6, 0,3 mm
Phrozen Aqua	64,69	52,28	78,33	62,68
Phrozen ABS-like	70,43	65,40	82,22	69,15
UV DLP Firm	71,98	62,84	82,49	69,17

Následně byl použit vyhodnocovací skript zmíněný v úvodu této kapitoly, ale pro potřeby této práce bylo spočítáno pouze smluvní napětí v tlaku a poměrná deformace, které byly následně zaneseny do smluvních diagramů napětí – deformace, které jsou zobrazeny na obrázcích 8.3 – 8.4

a 8.8–8.10. Jednotlivé nárůsty a poklesy napětí v diagramech znázorňují postupné deformace vrstev struktury. Vzhledem ke zvolené vysoké míře deformace struktury, která činila 50 %, je možné pozorovat vysoký nárůst napětí těsně před ukončením měření, který byl způsoben sesednutím jednotlivých vrstev na sebe a jejich lisováním. Na obrázcích 8.3 a 8.4 jsou vzájemně porovnány konkrétní provedení struktur v závislosti na použitém resinu.

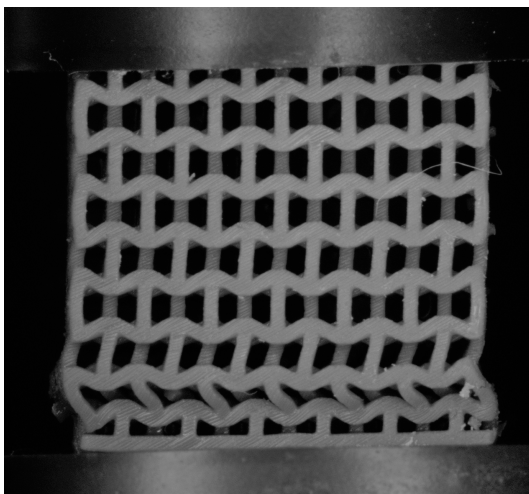


Obrázek 8.3: TLAK: Smluvní diagram pro struktury a) s počtem buněk 4x3 a tloušťkou nosníků 0,6 mm, b) s počtem buněk 6x4 a tloušťkou nosníků 0,5 mm



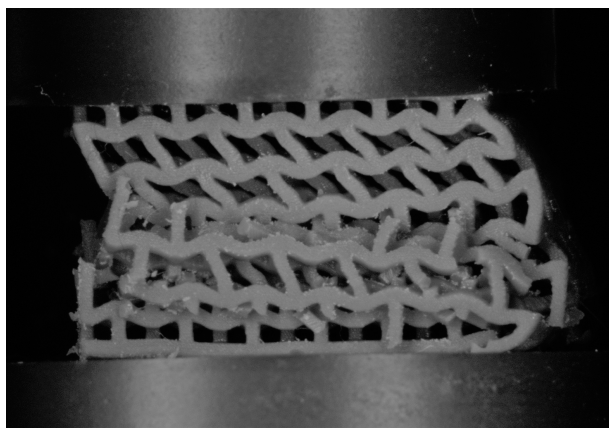
Obrázek 8.4: TLAK: Smluvní diagram pro struktury a) s počtem buněk 6x4 a tloušťkou nosníků 0,3 mm, b) s počtem buněk 8x6 a tloušťkou nosníků 0,3 mm

Dominantními křivkami na obrázcích 8.3 a 8.4 jsou křivky odpovídající vzorkům vyrobeným z resinů od firmy Phrozen, jejichž hodnoty napětí jsou vyšší než u resinu UV DLP Firm Grey. Dosažené nižší hodnoty napětí u resinu UV DLP Firm Grey znamenají, že struktury vyrobené z daného resinu nejsou natolik odolné vůči zatěžování tlakem jako struktury vyrobené z resinů Phrozen Aqua Blue a Phrozen ABS-like Matte Gray. Bližším porovnáním diagramů na obrázcích 8.3a) a 8.4b) lze vidět, že struktury s počtem buněk 4x3 a tloušťkou nosníků 0,6mm a struktury s počtem buněk 8x6 a tloušťkou nosníků 0,3mm, které mají podobné hodnoty porozity, vykazují rozdílné odezvy na zatěžování. Tyto rozdílné odezvy jsou způsobeny odlišným počtem buněk v objemu vzorků, který ovlivňuje počet nárůstů a klesání napětí v diagramu. Při menším množství buněk je počet nástupů a poklesů napětí menší než při větším množství buněk. Příklad deformace první vrstvy struktury, která odpovídá v diagramu prvnímu poklesu napětí, je zobrazen na obrázku 8.5.

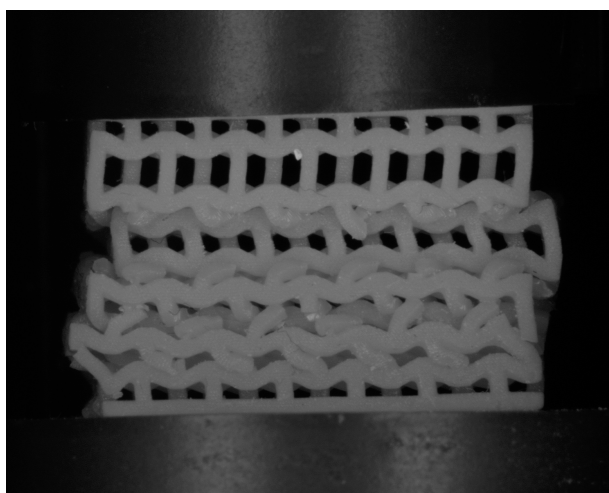


Obrázek 8.5: Zobrazení deformace první vrstvy struktury s počtem buněk 6x4 a tloušťkou nosníků 0,5 mm

Různé průběhy křivek na obrázcích 8.3 - 8.4 znázorňují rozdílné chování struktur při zatěžování v závislosti na použitém resinu. Zatímco u struktur vyrobených z resinů Phrozen jsou jednoznačně patrné nárůsty a poklesy napětí spojené s deformací struktury po vrstvách, u resinu UV DLP Firm Grey je křivka vyhlazenější. To je způsobeno rozložením zatížení do celé struktury, kdy dochází k deformaci struktury spíše jako celku než po vrstvách. Příklad daného chování je zobrazen na obrázku 8.6, kde je vidět, jak dochází k postupné destrukci struktury a jejího vybočení do strany. Struktura skládající se vrstvu po vrstvě je zobrazena na obrázku 8.7.



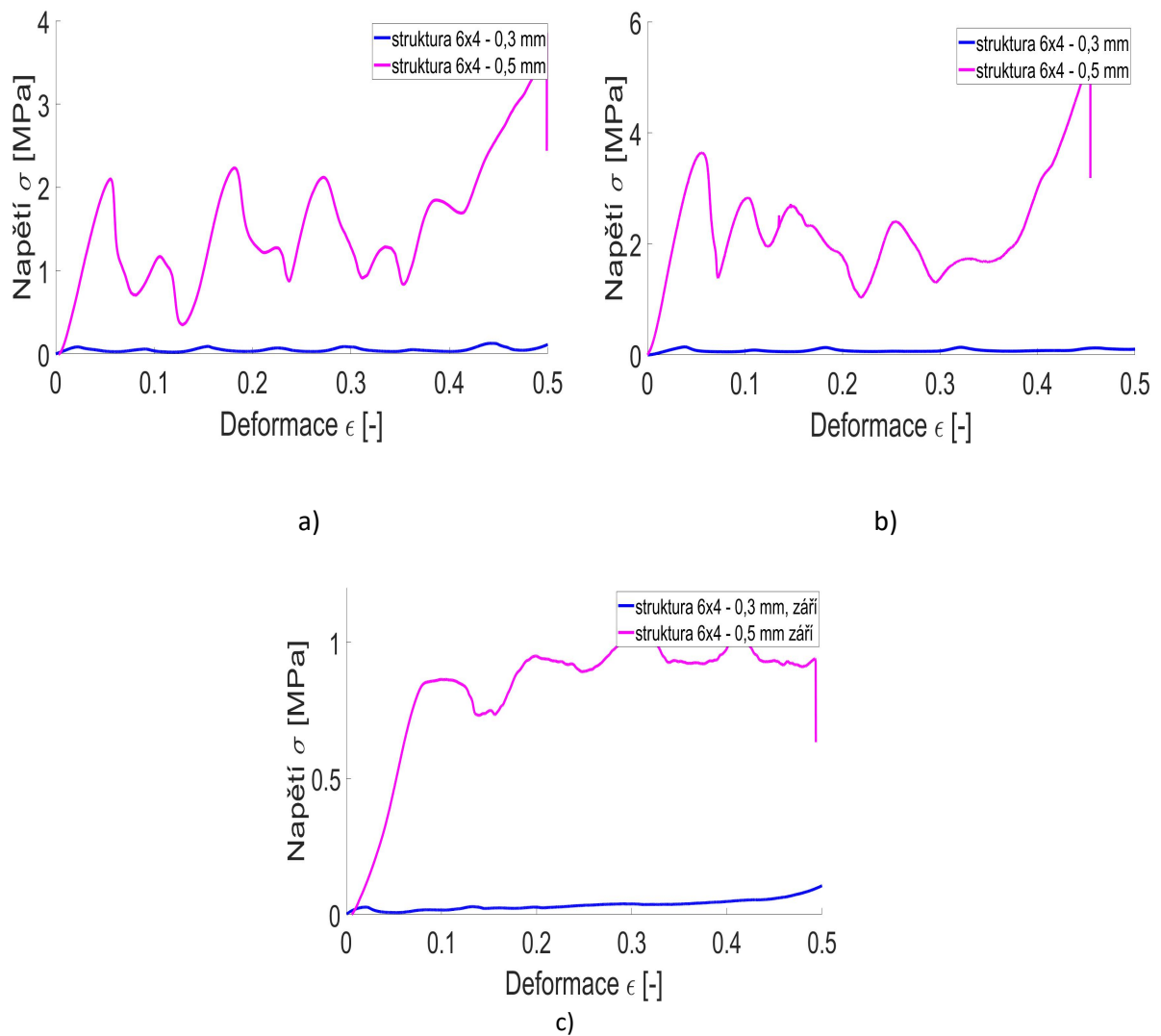
Obrázek 8.6: Deformace struktury 6x4 s tloušťkou nosníku 0,5 mm vyrobenou z resinu UV DLP Firm Grey



Obrázek 8.7: Deformace struktury 6x4 s tloušťkou nosníku 0,5 mm vyrobenou z resinu Phrozen Aqua Blue

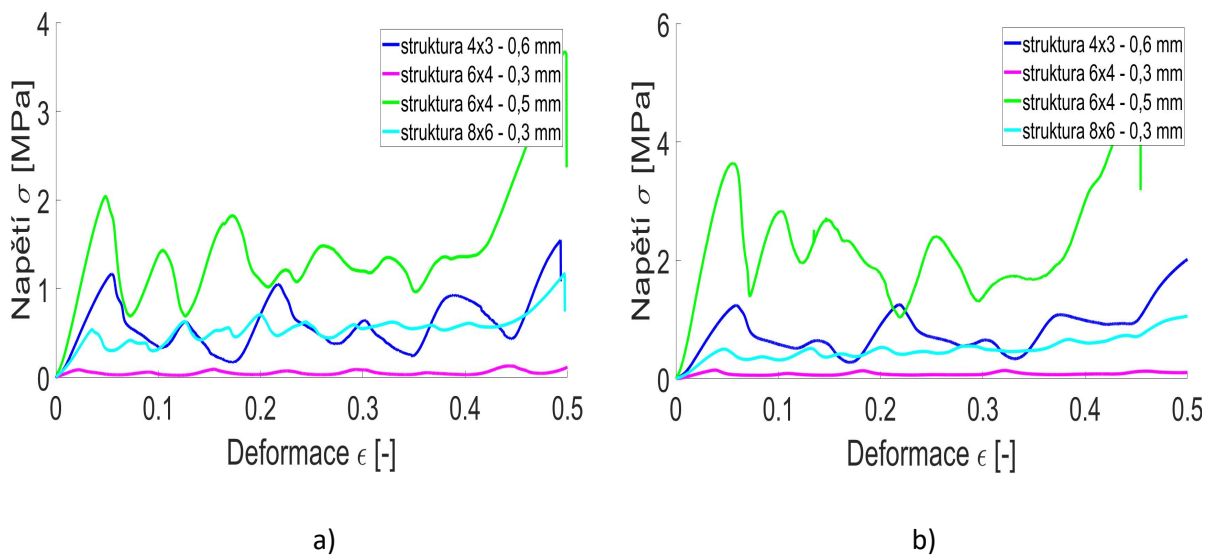
Na obrázcích 8.3 – 8.4 je zároveň možné pozorovat vliv stáří resinu na jeho mechanické vlastnosti. Z resinu UV DLP Firm Grey byly vytisknuty dvě sady vzorků jednotlivých provedení struktur – jedna v době otevření resinu (září 2021), druhá půl roku po otevření (březen 2022). Sada vzorků tištěná půl roku po první sadě vykazuje znatelně menší hodnoty napětí než sada vytištěná těsně po otevření. Tento fenomén by bylo potřeba analyzovat detailněji, ale vzhledem k rozsahu této práce nebyl získán dostatečný statisticky významný vzorek dat, aby bylo možné s jistotou prohlásit, jak moc velký vliv má stáří resinu na jeho mechanické vlastnosti.

Při porovnání vlivu tloušťky nosníků na mechanické vlastnosti bylo zjištěno, že u struktury se stejným počtem buněk a vyrobené z totožného resinu dochází se zvyšující se tloušťkou nosníků k rapidnímu nárůstu napětí. Tento jev je zaznamenán na obrázku 8.8. V důsledku rozdílné tloušťky nosníků se porozita u daných struktur v rámci jednoho resinu lišila o 26 % u resinu Phrozen Aqua, o 16,82 % u resinu Phrozen ABS-like a 19,65 % u resinu UV DLP Firm.

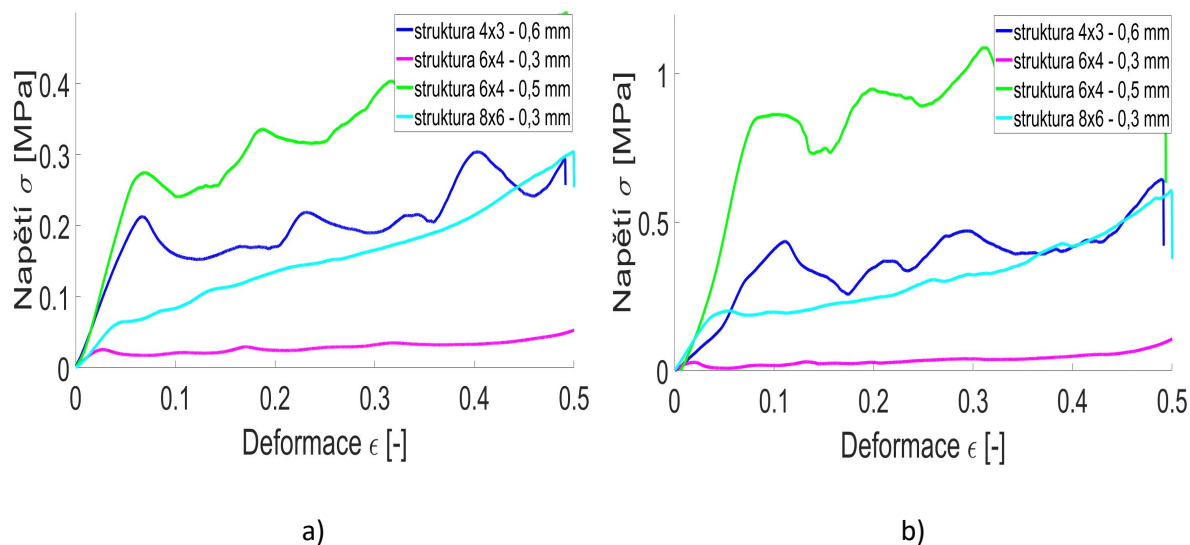


Obrázek 8.8: Vliv tloušťky nosníků u struktury vyrobené z resinu a) Phrozen ABS-like Matte Gray, b) Phrozen Aqua Blue, c) UV DLP Firm Grey

Na obrázcích 8.9 a 8.10 jsou zobrazeny křivky deformačního chování jednotlivých provedení struktur podle použitého resinu. Z uvedených grafů je zřejmé, že nejlépe odolala silovému zatížení struktura s počtem buněk 6x4 s tloušťkou nosníků 0,5 mm, jejíž porozita dosáhla nejnižší hodnoty ze všech. Naopak struktura 6x4 s tloušťkou nosníků 0,3 mm, která dosáhla nejvyšší porozity, zaznamenala nejnižší naměřené hodnoty. Přestože zbylé dvě struktury vykazovaly téměř totožné hodnoty porozity, jejich chování při zatěžování bylo ovlivněno nejenom počtem buněk, ale i tloušťkou nosníků, přičemž nosníky s větší tloušťkou byly tužší a způsobily, že zatěžovaná struktura se deformovala po vrstvách výraznějším způsobem. Se zmenšující se tloušťkou nosníků se nosníky stávají poddajnější a dochází k plynulé deformaci struktury.

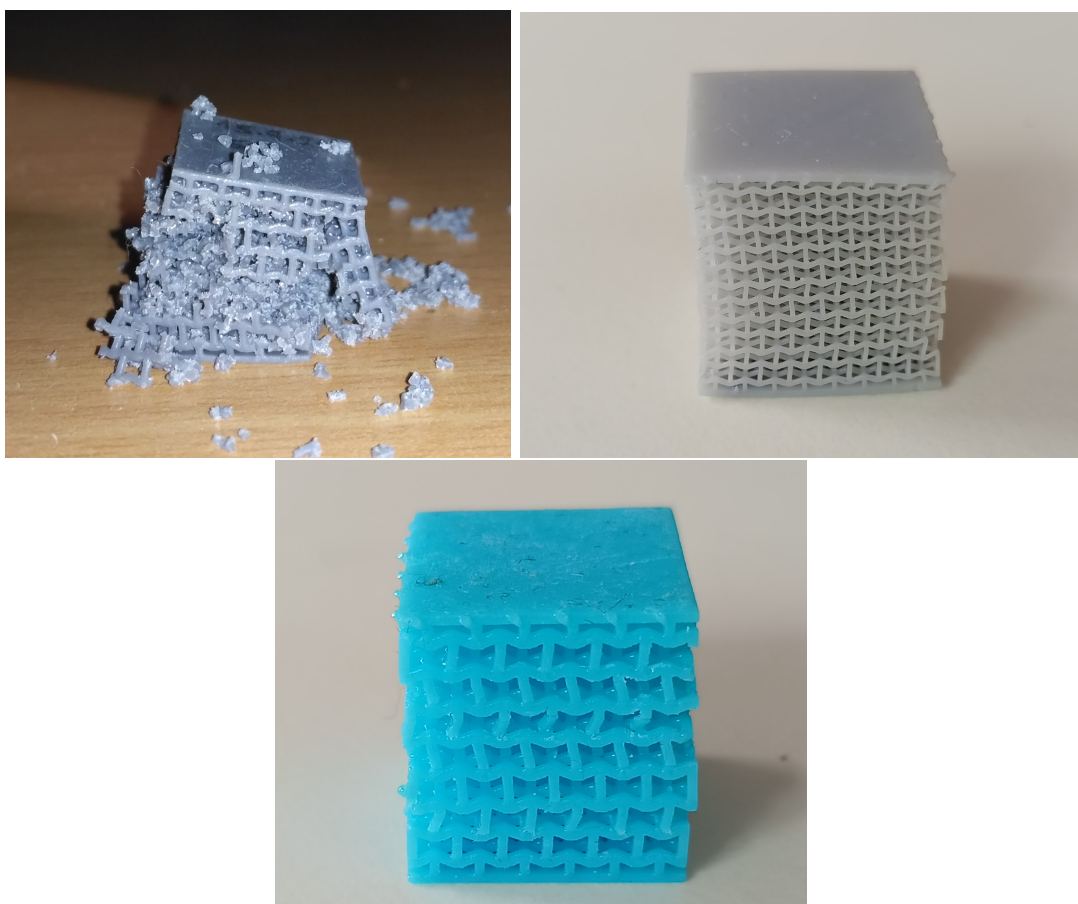


Obrázek 8.9: Porovnání různých provedení struktur vyrobených z resinu a) Phrozen ABS-like Matte Gray, b) Phrozen Aqua Blue



Obrázek 8.10: Porovnání různých provedení struktur vyrobených z resinu UV DLP Firm Grey a) v březnu 2022, b) v září 2021

Po odtížení bylo pozorováno na jednotlivých strukturách jejich odlišné chování. U struktur vyrobených z resinu UV DLP Firm Grey od firmy Photocentric3D došlo v průběhu zatěžování k rozsáhlým plastickým deformacím. Vzorke struktur vyrobené z resinů Phrozen Aqua Blue a Phrozen ABS-like Matte Gray vykazovaly daleko lepší odolnost vůči trvalé deformaci. U struktur s tloušťkou nosníků 0,3 mm po odtížení byly pozorovány jen drobné plastické deformace a byly takřka schopny se vrátit do své původní podoby. U zbylých dvou struktur s tloušťkou nosníků 0,5 mm a 0,6 mm byly pozorovány větší plastické deformace projevující se porušenými nosníky, ale i přes to si struktury dokázaly zachovat integritu. Struktury po odtížení jsou zobrazeny na obrázku 8.11.



Obrázek 8.11: Chování struktur po odtížení - struktura 6x4 s tloušťkou nosníků 0,5 mm z resinu UV DLP Firm Grey (vlevo), struktura 8x6 s tloušťkou nosníků 0,3 mm z Phrozen ABS-like Matte Gray (vpravo), struktura 6x4 s tloušťkou nosníků 0,5 mm z Phrozen Aqua Blue (dole)

Kapitola 9

Závěr

Cílem práce bylo osvojení si ovládání 3D resinové tiskárny a její využití pro výrobu vysoce porézních struktur. Základním předpokladem pro splnění cíle zadání bylo seznámení se s výukovým manuálem, instruktážními videi. Před vlastním uvedením do provozu bylo třeba provést závěrečnou kompletaci tiskárny – upevnění nádrže na resin, přimontování konstrukční platformy. Pro správnou funkčnost tiskárny bylo nezbytné provést test LCD obrazovky, kalibraci osy z , upevnit fólii do nádrže na resin a zadat tisk. Jedním z kritérií úspěšného tisku bylo oddělení vytištěných vzorků od platformy tiskárny a její správné čištění. Při osvojení si práce s 3D resinovou tiskárnou bylo třeba řešit problémy, které nastaly při tisku, např. protékání fólie. Nejvýznamnější problém v průběhu experimentu byl v oblasti natočení vzorků pro tlakovou zkoušku, který vedl k nepoužitelnosti tohoto natočení při výrobě vzorků. U zmíněného natočení došlo k silnému přichycení vytištěného vzorku k platformě. Oddělováním vzorků od platformy docházelo k jejich poničení. Tato orientace při tisku tedy nebyla zahrnuta do měření. Ovládnutí všech uvedených úkonů umožnilo využití tiskárny pro výrobu vysoce porézních struktur, konkrétně pokročilých celulárních struktur. Kromě toho bylo tiskárny využito i pro tisk zkušebních vzorků pro tahovou zkoušku.

Dalším cílem práce bylo definovat parametry 3D tisku metodou stereolitografie a stanovit základní mechanické vlastnosti různých 3D tištěných materiálů. Tento cíl byl řešen v praktické části bakalářské práce. V praktické části se začínalo přípravou vzorků. Pro přípravu vzorků pro tahovou zkoušku se vycházelo z normy zabývající se testovacími metodami k určení mechanických vlastností plastů. Pro tahovou zkoušku bylo vytvořeno jedno provedení vzorku. Pro vzorky na

tlakovou zkoušku byla použita jedna z nejběžnějších auxetických struktur *re-entrant hexagonal honeycomb*. Vzorky na tlakovou zkoušku byly navrženy ve čtyřech provedeních lišících se počtem buněk na zvolené ploše a tloušťkou nosníků. Pro tisk byly navrženy k použití různé resiny, které se lišily výrobcem, mechanickými vlastnostmi a barevným provedením.

V rámci nastavení parametrů bylo bráno v potaz také natočení vzorků kolem os, podpěrné konstrukce, parametry týkající se tisku a model kalibrační matice. Pro vzorky na tahovou zkoušku byla zvolena dvě natočení z důvodu prokázání vlivu orientace na mechanické vlastnosti. U vzorků na tlakovou zkoušku byla navržena dvě jiná natočení ze stejného důvodu (jedno natočení nebylo použito, viz výše). Parametry podpěrných konstrukcí byly nastavovány s cílem stanovení nejvhodnějšího typu, který by dokázal udržet vzorek při jeho zvoleném natočení při tisku. Změnou parametrů podpěry docházelo ke změnám jejího tvaru, průměru, styčné plochy podpěry se vzorkem, tloušťky podstavy, styčné plochy podstavy podpěry s konstrukční platformou. Parametry tisku určovala volba resinu. Bylo nutné nastavit výšku vrstvy tištěného resinu, počet spodních vrstev, dobu expozice, vzdálenost zvednutí platformy a rychlost jejího zvedání. Pro ověření správně nastaveného parametru tisku zabývajících se dobou expozice bylo využito modelu kalibrační matice XP2. Po vytištění vzorků musel následovat post-processing, který zahrnoval výslednou úpravu tištěných vzorků, což představovalo jejich očištění od nevytvrzeného resinu a následné vytvrzení vzorků pomocí UV lampy pro získání výsledných mechanických vlastností. Vytvrzené vzorky byly podrobeny zkouškám v tahu a v tlaku.

Z provedených zkoušek byla získána data vyjadřující zatěžovací sílu a absolutní prodloužení vzorku. Tato data byla dále zpracována v programovém prostředí MATLAB za účelem stanovení základních mechanických charakteristik, tj. smluvní meze kluzu v tahu, meze pevnosti v tahu, Youngova modulu pružnosti v tahu, jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení, smluvního napětí a poměrné deformace. Smluvní napětí a poměrná deformace byly následně zaneseny do smluvního diagramu napětí – deformace pro porovnání výsledků zkoušek mezi sebou. Získané hodnoty mechanických charakteristik jednotlivých resinů, které byly stanoveny na základě tahových zkoušek, byly porovnány s hodnotami udávanými výrobcem. Porovnáním bylo zjištěno, že experimentálně určené hodnoty Youngova modulu pružnosti v tahu u resinů od firmy Phrozen (Aqua Blue, ABS-like Matte Gray) jsou vyšší, než udává výrobce. Naopak u resinu UV DLP Firm Grey od firmy Photocentric3D byl modul pružnosti výrazně nižší. Vypočtené hodnoty s hodnotami od výrobce se rozcházely i u meze pevnosti v tahu, kdy pro resiny Phrozen dosahovaly dvojnásobku, zatímco u resinu UV DLP Firm Grey byly poloviční. Rozdíly v mecha-

nických vlastnostech stanovených výrobcem lze přisoudit rozdílnému použitému vybavení pro tisk a úpravě vzorků či odlišným parametrům tisku a post-processingu. Z měření a následných výpočtů vyplynulo, že nejvíce tuhým materiálem byl resin Phrozen Aqua. U uvedeného resinu bylo zjištěno, že měl kromě Youngova modulu pružnosti i nejvyšší hodnotu meze kluzu, pevnosti a jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení, z čehož vyplynulo, že lineární oblast pružné deformace byla významnější než u ostatních resinů a bylo potřeba vyvinout větší zatěžovací sílu pro vznik plastických deformací a porušení vzorku. U resinu UV DLP Firm Grey docházelo k velkým plastickým deformacím, zatímco u resinu Phrozen ABS-like byla oblast plastických deformací výrazně menší, naopak oblast pružných deformací se zvětšovala. Výsledky měření ukázaly, že analyzované natočení vzorku při tisku nemělo zásadní vliv na jeho mechanické vlastnosti.

Při zkouškách tlakem bylo zjištěno, že vzorky vyrobené z resinů Phrozen Aqua Blue a Phrozen ABS-like Matte Gray byly odolnější zatěžování tlakem než vzorky vyrobené z resinu UV DLP Firm Grey. Zároveň u prvních dvou zmíněných resinů docházelo k deformaci struktury po vrstvách. Dále byl prokázán vliv tloušťky nosníků na chování struktury v průběhu zatěžování, kdy se zvětšující se tloušťkou nosníků docházelo k výraznému nárůstu napětí. Ze zatěžovaných vzorků vykazovala nejlepší odolnost proti tlaku struktura s počtem buněk 6x4 a tloušťkou nosníků 0,5 mm pro všechny použité resiny, která měla nejnižší porozitu. Nejmenší odolnost měla struktura s počtem buněk 6x4 a tloušťkou nosníků 0,3 mm, jejíž porozita byla nejvyšší. Poddajnost struktury se projevila v závislosti na její tloušťce nosníků, přičemž platilo, čím menší tloušťka, tím poddajnější struktura. Nejvýraznější plastické deformace byly po odtížení pozorovány na strukturách vyrobených z resinu UV DLP Firm Grey, u kterých došlo k úplnému rozpadu struktury. Naopak u vzorků vyrobených z resinů Phrozen Aqua Blue a Phrozen ABS-like Matte Gray si dokázaly struktury udržet integritu, přičemž struktury s tloušťkou nosníků 0,3 mm po odtížení vykazovaly jen drobné plastické deformace a byly takřka schopny se vrátit do své původní podoby.

V průběhu experimentu bylo zjištěno, že vzorky vyrobené v rozmezí půl roku ze stejného resinu vykazovaly různé chování při zatěžování. Sada vzorků vyrobená dříve vykazovala znatelně vyšší hodnoty napětí. Vzhledem k nedostatečnému počtu provedených testů nešlo jednoznačně prokázat souvislost vlivu stáří resinu na chování zkušebních vzorků při zatěžování. Uvedený fenomén by bylo potřeba dále analyzovat, ale to už by bylo nad rámec této práce.

Ze získaných poznatků z provedených zkoušek vyplynulo, že resin UV DLP Firm Grey je nevhodný pro výrobu pokročilých celulárních materiálů, protože vykazoval nejmenší odolnost proti zatěžování tlakem s výraznými plastickými deformacemi. Resin Phrozen Aqua Blue v porovnání s ostatními použitými resiny projevoval nejlepší výsledky.

V průběhu experimentu se objevilo několik problémů, z nichž nejvýznamnější komplikace byla v oblasti natočení vzorků pro tlakovou zkoušku, která vedla k nepoužitelnosti tohoto natočení při výrobě vzorků. U zmíněného natočení došlo k silnému přichycení vytisknutého vzorku k platformě. Oddělováním vzorků od platformy pak docházelo k jejich poničení. Tato orientace tisku tedy nebyla zahrnuta do měření.

Na základě výsledků bakalářské práce lze konstatovat, že metoda stereolitografie pro výrobu pokročilých celulárních struktur se jeví jako vhodná. K danému závěru vedla správná volba resinu a vysoká přesnost tisku 3D resinové tiskárny, díky které bylo možno vytisknout navrženou komplexní geometrii vzorků.

Literatura

- [1] Základní principy aditivní výroby. <https://sharpplayers.cz/support/aditivni-vyroba/>, 2022.
- [2] Guide to stereolithography (sla) 3d printing. <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>.
- [3] Leonard D. Tijing, John Ryan C. Dizon, Idris Ibrahim, Arman Ray N. Nisay, Ho Kyong Shon, and Rigoberto C. Advincula. 3d printing for membrane separation, desalination and water treatment. *Applied Materials Today*, 18:100486, 2020.
- [4] Ismael Romero-Ocaña and Sergio I. Molina. Cork photocurable resin composite for stereolithography (sla): Influence of cork particle size on mechanical and thermal properties. *Additive Manufacturing*, 51:102586, 2022.
- [5] Natalia Fijoł, Andrea Aguilar-Sánchez, and Aji P. Mathew. 3d-printable biopolymer-based materials for water treatment: A review. *Chemical Engineering Journal*, 430:132964, 2022.
- [6] Mattia Mele, Giampaolo Campana, and Giulia D’Avino. Life cycle impact assessment of desktop stereolithography. *Journal of Cleaner Production*, 244:118743, 2020.
- [7] Dlp a lcd 3d tisk. <https://www.cotu.cz/blog/148/dlp-a-lcd-3d-tisk>.
- [8] Yuchen Mao, Takuya Miyazaki, Kohei Sakai, Jin Gong, Meifang Zhu, and Hiroshi Ito. A 3d printable thermal energy storage crystalline gel using mask-projection stereolithography. *Polymers*, 10(10), 2018.
- [9] Vipul Gupta, Pavel Nesterenko, and Brett Paull. *3D Printing in Chemical Sciences*. Royal Society of Chemistry, London, 2019.
- [10] Sla vs dlp: The differences – simply explained. <https://all3dp.com/2/dlp-vs-sla-3d-printing-technologies-shootout/>, 2019.

- [11] Richard Horne. *3D Printing for dummies*. John Wiley & Sons Inc, Hoboken,NJ, 2nd edition edition, 2017.
- [12] Zdeněk Indra. Multifunkční modulární 3d fdm tiskárna. https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=195451, 2019.
- [13] Harsshit Agrawaal and J.E. Thompson. Additive manufacturing (3d printing) for analytical chemistry. *Talanta Open*, 3:100036, 2021.
- [14] Xin Wang, Man Jiang, Zuowan Zhou, Jihua Gou, and David Hui. 3d printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 110:442–458, 2017.
- [15] Anna Kaziunas France. *Make: 3D Printing*. Maker Media, Sebastopol, 1st edition edition, 2013.
- [16] What is a photopolymer? <https://polyspectra.com/blog/what-is-a-photopolymer/>, 2021.
- [17] Co je to fotopolymer? <https://www.netinbag.com/cs/science/what-is-a-photopolymer.html>.
- [18] What is sla 3d printing? <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/#what-materials-are-used-for-sla-printing>, 2022.
- [19] Epoxy resin. <https://www.corrosionpedia.com/definition/1746/epoxy-resin>, 2019.
- [20] T. Takeichi and N. Furukawa. 5.25 - epoxy resins and phenol-formaldehyde resins. In Krzysztof Matyjaszewski and Martin Möller, editors, *Polymer Science: A Comprehensive Reference*, pages 723–751. Elsevier, Amsterdam, 2012.
- [21] Elia Marin, Francesco Boschetto, Matteo Zanocco, Taigi Honma, Wenliang Zhu, and Giuseppe Pezzotti. Explorative study on the antibacterial effects of 3d-printed pmma/-nitrides composites. *Materials Design*, 206:109788, 2021.
- [22] Polymethacrylates (pmma, plexiglas). <http://polymerdatabase.com/Polymer%20Brands/PMMA.html>.
- [23] A Rosochowski and A Matuszak. Rapid tooling: the state of the art. *Journal of Materials Processing Technology*, 106(1):191–198, 2000.

- [24] Jordi Martín-Montal, Jesus Pernas-Sánchez, and David Varas. Experimental characterization framework for sla additive manufacturing materials. *Polymers*, 13(7), 2021.
- [25] 5 settings to improve your sla/dlp/lcd 3d print quality. <https://www.chitubox.com/en/article/support/indepth/technology/22>, 2022.
- [26] Vše o čištění ultrazvukem. <https://www.ultrasonic-cleaner.cz/vse-o-cistení-ultrazvukem/>.
- [27] Ivanka Menken. *3D printing*. Art of service, Brisbane, 2012.
- [28] M. Benedetti, A. du Plessis, R.O. Ritchie, M. Dallago, S.M.J. Razavi, and F. Berto. Architected cellular materials: A review on their mechanical properties towards fatigue-tolerant design and fabrication. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 144:100606, 2021.
- [29] Oraib Al-Ketan, Reza Rowshan, and Abdul Hai Alami. Biomimetic materials for engineering applications. In Abdul-Ghani Olabi, editor, *Encyclopedia of Smart Materials*, pages 25–34. Elsevier, Oxford, 2022.
- [30] Ru Zhong, Xin Ren, Xiang Yu Zhang, Chen Luo, Yi Zhang, and Yi Min Xie. Mechanical properties of concrete composites with auxetic single and layered honeycomb structures. *Construction and Building Materials*, 322:126453, 2022.
- [31] Nejc Novak, Matej Vesenjsek, and Zoran Ren. Auxetic cellular materials - a review. 62:485–493, 09 2016.
- [32] Michaela Neuhäuserová. Mechanické vlastnosti auxetických struktur určené kvazi-statickými zkouškami, 2015.
- [33] Krishna Kumar Saxena, Raj Das, and Emilio P. Calius. Three decades of auxetics research materials with negative poisson’s ratio: A review. *Advanced Engineering Materials*, 18(11):1847–1870, 2016.
- [34] Xin-Tao Wang, Bing Wang, Xiao-Wen Li, and Li Ma. Mechanical properties of 3d re-entrant auxetic cellular structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 131-132:396–407, 2017.
- [35] Jaroslav Pluhař. *Nauka o materiálech*. Nakladatelství technické literatury Alfa, Praha, 1. vyd. edition, 1989.

- [36] Karel Macek. *Nauka o materiálu*. Vydavatelství ČVUT, Praha, vyd. 2 edition, 2002.
- [37] Bohuslav Driml. Základní vlastnosti materiálů a jejich zkoušení. http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf, 2012.
- [38] Luděk Janda. Tahová zkouška trubek. https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=104795, 2015.
- [39] *Nauka o materiálu II*. CERM, Brno, 2. opr. a rozš. vyd edition, 2002.
- [40] Jaroslav Štěrbáček. Tahové a únavové zkoušky tenkých vláken a fólií. https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7550, 2008.
- [41] Jaroslav Pluhař. *Nauka o materiálu*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1999.
- [42] Jan Hladký. Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení. http://www.pf.jcu.cz/structure/departments/kaft/wp-content/uploads/Ing_Hladky_4.pdf.
- [43] *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. Pensylvánie, 2014.
- [44] T. Fíla, J. Šleichrt, D. Kytýř, I. Kumpová, M. Vopálenský, P. Zlámal, V. Rada, D. Vavřík, P. Koudelka, and S. Senck. Deformation analysis of the spongius sample in simulated physiological conditions based on in-situ compression, 4d computed tomography and fast readout detector. *Journal of Instrumentation*, 13(11):C11021–C11021, nov 2018.

Seznam obrázků

4.1	Schéma architektury SLA a) Top-down architektura, b) Bottom-up architektura, převzato z [8]	17
4.2	Schéma typu SLA přímého laserového zápisu (vlevo) a digitální světelné projekce (vpravo), převzato z [12]	18
4.3	Ilustrační schéma konstrukčních částí SLA tiskárny, převzato z [2]	21
4.4	Zjednodušené schéma procesu 3D tisku, převzato z [23]	24
4.5	Detailní zobrazení vlivu výšky vrstvy na povrch tištěného materiálu a) $50\ \mu m$, b) $100\ \mu m$, převzato z [24]	25
5.1	Rozdíl chování a) konvenčního materiálu a b) auxetického při zatěžování v tahu a tlaku, převzato z [31]	31
5.2	Typy auxetických struktur podle mechanické deformace a) re-entrantní, b) chirální, c) rotující, převzato z [33]	32
5.3	Jednotková buňka auxetické struktury <i>re-entrant hexagonal honeycomb</i> se základními konstrukčními parametry	33
6.1	Schéma zkušební vzorku pro tahovou zkoušku, převzato z [32]	36
6.2	Smluvní diagram napětí – deformace	37
6.3	Skutečný diagram napětí – deformace	38

7.1	Schéma testovacího vzorku na tahovou zkoušku, převzato z [43]	43
7.2	Vytištěný zkušební vzorek na tahovou zkoušku	43
7.3	Postupné zobrazení jednotlivých provedení struktur od 1 do 4	44
7.4	Tiskárna Phrozen Sonic Mighty 4K	45
7.5	Zobrazení umístění vzorků na platformu pro tahovou zkoušku (vlevo) a pro tlakovou zkoušku (vpravo)	52
7.6	Znázornění jednotlivých částí podpěry	53
7.7	Kombinace umístění tištěných vzorků na platformě	57
7.8	Kalibrační modely XP2 pro jednotlivé resiny	62
7.9	Zobrazení kalibrační matice XP2 vystavené nadměrné expoziční době (vlevo), dobře zvolené (uprostřed) a nedostačující (vlevo)	63
7.10	Ultrazvuková čistička Geti GUC 10B (vlevo) a UV lampa Phrozen Cure Luna (vpravo)	65
7.11	Ukázka nepovedených výtisků vlivem špatného nastavení parametrů	67
7.12	Zatěžovací přístroje - Instron 3382 (vlevo), stolní zatěžovací zařízení (vpravo)	68
8.1	TAH: Smluvní diagram napětí – deformace pro vzorky natočené při tisku a) o 90° kolem osy x , b) o 30° kolem os x a y vyrobené z různých resinů	71
8.2	TAH: Smluvní diagram napětí – deformace pro vzorky vyrobené z resinu a) Phrozen ABS-like, b) Phrozen Aqua, c) UV DLP Firm s různým natočením při tisku	72
8.3	TLAK: Smluvní diagram pro struktury a) s počtem buněk 4x3 a tloušťkou nosníků 0,6 mm, b) s počtem buněk 6x4 a tloušťkou nosníků 0,5 mm	74
8.4	TLAK: Smluvní diagram pro struktury a) s počtem buněk 6x4 a tloušťkou nosníků 0,3 mm, b) s počtem buněk 8x6 a tloušťkou nosníků 0,3 mm	74

8.5	Zobrazení deformace první vrstvy struktury s počtem buněk 6x4 a tloušťkou nosníků 0,5 mm	75
8.6	Deformace struktury 6x4 s tloušťkou nosníku 0,5 mm vyrobenou z resinu UV DLP Firm Grey	76
8.7	Deformace struktury 6x4 s tloušťkou nosníku 0,5 mm vyrobenou z resinu Phrozen Aqua Blue	76
8.8	Vliv tloušťky nosníků u struktury vyrobené z resinu a) Phrozen ABS-like Matte Gray, b) Phrozen Aqua Blue, c) UV DLP Firm Grey	77
8.9	Porovnání různých provedení struktur vyrobených z resinu a) Phrozen ABS-like Matte Gray, b) Phrozen Aqua Blue	78
8.10	Porovnání různých provedení struktur vyrobených z resinu UV DLP Firm Grey a) v březnu 2022, b) v září 2021	79
8.11	Chování struktur po odtížení - struktura 6x4 s tloušťkou nosníků 0,5 mm z resinu UV DLP Firm Grey (vlevo), struktura 8x6 s tloušťkou nosníků 0,3 mm z Phrozen ABS-like Matte Gray (vpravo), struktura 6x4 s tloušťkou nosníků 0,5 mm z Phrozen Aqua Blue (dole)	80

Seznam tabulek

4.1	Výhody a nevýhody SLA architektur, převzato z [6]	18
4.2	Porovnání výhod a nevýhod technologií SLA, převzato z [9]	19
7.1	Rozměry zkušebního vzorku na tahovou zkoušku	43
7.2	Testovací vzorky na zkoušku v tlaku	44
7.3	Hodnoty vlastností jednotlivých resinů udávané výrobcem	49
7.4	Výsledné hodnoty parametrů podpěrných konstrukcí pro horní část	56
7.5	Výsledné hodnoty parametrů podpěrných konstrukcí pro střední část	56
7.6	Výsledné hodnoty parametrů podpěrných konstrukcí pro podstavu	56
7.7	Výsledné hodnoty parametrů podpěrných konstrukcí pro Raft	56
7.8	Výsledné hodnoty parametrů tisku	60
8.1	Hodnoty mechanických charakteristik tahové zkoušky	71
8.2	Porozita uvedená v % pro 3D tištěné struktury	73