



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

**VLIV POLYMERU NA VLASTNOSTI AUXETICKÝCH
STRUKTUR PŘIPRAVENÝCH 3D TISKEM**

EFFECT OF POLYMER TYPE ON THE PROPERTIES OF 3D PRINTED AUXETIC STRUCTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Roman Zbíral

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1484/2019 Akademický rok: 2019/20
Ústav: Ústav chemie materiálů
Student: **Roman Zbíral**
Studijní program: Chemie a chemické technologie
Studijní obor: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů
Vedoucí práce: **prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.**

Název bakalářské práce:

Vliv polymeru na vlastnosti auxetických struktur připravených 3D tiskem

Zadání bakalářské práce:

Nalezení postupu pro separaci vlivu tiskového polymeru a architektury auxetické struktury na výslednou hodnotu Poissonova poměru.

Termín odevzdání bakalářské práce: 31.7.2020:

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

Roman Zbíral
student(ka)

prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.
vedoucí práce

doc. Ing. František Šoukal, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Brně dne 31.1.2020

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT:

Tato bakalářská práce se zabývá metamateriálovými strukturami jako jsou optické, akustické a mechanické metamateriály, které mají svoje specifické vlastnosti. Dále se zabývá mechanickými vlastnostmi auxetických materiálů, podskupinou metamateriály, které mají speciální strukturu se záporným poissonovým poměrem. S mechanickým zatížením mění svoji hustotu či geometrii a při tahu se ihned netrhají ale spíše mění svoji vnitřní strukturu v závislosti na vnitřním uspořádání buněk daného auxetického materiálu. Většina těchto materiálů je vyráběna s pomocí 3D tiskáren, a tedy z polymerů, které sami o sobě jsou docela pružné a mají jistou mechanickou pevnost.

KLÍČOVÁ SLOVA: 3D TISK, AUXETICKÝ MATERIÁL, MECHANICKÉ VLASTNOSTI, 3D STRUKTURA, METAMATERIÁLY, POKROČILÉ VÝROBNÍ TECHNOLOGIE

ABSTRACT:

This thesis deals with special structures such as optical, acoustic and mechanic metamaterials, which has their own specific properties. Auxetic materials as subgroup of mechanical metamaterials has its own special arrangement of sub-cells, that is bound to negative Poisson's ratio. With mechanical load auxetic materials change its own density, geometry of structure and in thrust only change its internal structure instead of breaking. Most of these materials are made using additive technologies such as 3D print which allows better quality of produced structure and are made of special polymers which provide expected properties.

KEYWORDS: 3D PRINT, AUXETIC MATERIAL, MECHANICAL PROPERTIES OF AUXETIC MATERIALS, METAMATERIALS, ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

V Brně, dne:

Podpis:

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE:

ZBÍRAL, Roman. *Vliv polymeru na vlastnosti auxetických struktur připravených 3D tiskem* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-07-19]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/123829>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce Josef Jančář.

OBSAH

1.	Úvod	9
2.	Metamateriály	10
2.1.1.	Optické metamateriály	10
2.1.2.	Akustické metamateriály	10
2.1.3.	Výzkumy a pokusy	11
3.	Auxetické materiály	12
3.1.1.	Poissonův poměr	12
3.2.	Základní buňky auxetických struktur	13
3.2.1.	Šestiúhelníkové struktury	14
3.2.2.	Čtyřúhelníkové struktury	15
3.2.3.	Trojúhelníkové struktury	15
3.3.	Možnosti využití auxetických struktur	16
4.	Kompozitní metamateriály	17
5.	3D Tisk	18
5.1.	Druhy 3D tisku	18
5.2.	Polymerní materiály pro 3D tisk	22
5.2.1.	Fotopolymerní pryskyřice	23
5.3.	Kovy, keramika, kompozity	24
5.4.	Využití 3D tisku v lékařství	24
6.	Vytváření 3D modelu	25
7.	Závěr:	27
8.	Zdroje:	28

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 3.1: Rozdíl mezi deformací obyčejného materiálu (vlevo) a auxetického (vpravo) při namáhání v tahu</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 3.2: Rozdíl mezi deformací honeycomb struktury (nahore) a re-entrant honeycomb (dole) při namáhání v tahu.....</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 3.3: Příklad chiral honeycomb struktury</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 3.4: Příklad missing-rib foam struktury</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 3.5: Deformační chování trojúhelníkové struktury.....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 4.1: Příklady již fungujících robotických materiálů kombinujících snímání, ovládání, výpočet a komunikaci</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 5.1: Schéma digitálního mikro-zrcadlového zařízení pro stereolitografii.....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 5.2: Schéma SLS tiskárny</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 6.1: Příklad vymodelované 2D struktury „roztážené“ do třetího rozměru, kdy se mění šířka stěn od středu směrem ven</i>	<i>26</i>

CÍLE PRÁCE

Cílem této práce je shrnout dostupné literární poznatky o využití technologií 3D tisku při vytváření speciálních struktur metamateriálů s důrazem na auxetické materiály. Dalším cílem této práce je popsání současného stavu poznání v oboru robotických materiálů se strukturně programovatelnou adaptabilitou na vnější podněty. Literární poznatky budou v práci rozebrány z pohledu umožňujícího odhadnout možnosti praktického využití této zcela nové skupiny materiálů.

1. ÚVOD

Už od počátku se lidstvo snaží co nejvíce zdokonalovat svoje výtvary, výrobky a zároveň i výrobní procesy, jak si zjednodušit práci při jejich vytváření. Stejně, jak jsme vyvinuli nejlepší možné způsoby zpracování kovů a obecně anorganických materiálů, tak se snažíme vylepšit i výrobu organických materiálů, a především výrobu produktů z těchto materiálů. Obdobně jako kovy i polymerní materiály jsme schopni obrábět, což je ale vzhledem k jejich malé tepelné vodivosti málo vhodné. Obrovského pokroku bylo v posledních 15 letech dosaženo při velkosériové výrobě platových produktů technologiemi injekčního vstřikování. Materiálový tisk a speciálně 3D tisk, nanáší vybraný materiál na podložku podle 3D počítačového modelu tvaru konečného produktu, čímž vzniká výsledný 3D objekt. Největší aplikační oblastí 3D tisku je tedy velmi efektivní výroba prototypů či malosériová výroba produktů, u kterých nejsou vyžadovány mechanické vlastnosti (modul pružnosti a pevnost) v hodnotách vyžadovaných konstrukčním využitím. V posledních letech byly vyvinuty technologie umožňující 3D tisk keramických a kovových práškových materiálů, čímž se 3D tisk dostává z kategorie „rapid prototyping“ do kategorie „manufacturing technology“.

Metamateriály, jako zástupci uměle vytvořených kompozitních materiálů mohou mít neobvyklé vlastnosti, například odrážet a ohýbat vlnění ať už se jedná o elektromagnetické (světlo, UV, RTG) nebo mechanické (akustické vlny), či měnit mechanickou energii tlakovou na rotační jako například auxetické struktury řadící se do mechanických metamateriálů. Tyto materiály však nejsou zajímavé tím z čeho jsou vyrobeny, jako je tomu například u slitin kovů ale spíše tím, jak jsou zformovány do jednotlivých útvarů, mikrostruktur. Jedná se totiž většinou o obvyčejné materiály, které však svojí strukturou, uspořádáním jednotlivých vrstev a částečně i mechanickými vlastnostmi umožňují využít spojení kovů, polymerů a keramiky v neobvyklých oblastech.

2. METAMATERIÁLY

Metamateriál je materiál s vlastnostmi, které se v přírodě přirozeně nevyskytují. Metamateriály se dělí podle toho, které jevy ovlivňují – optické, akustické a mechanické. V závislosti na architektuře/geometrii jednotlivých buněk se mění i stupeň ovlivnění chování dopadajícího elektromagnetického záření. V podstatě jsou tyto metamateriály schopny ohýbat elektromagnetické záření a způsobit tak zdánlivou neviditelnost objektu. Akustické metamateriály fungují na podobném principu jako optické metamateriály, ale neohýbají světlo nýbrž zvukové vlny. Mechanické metamateriály by mohly fungovat obdobným způsobem, ale místo elektromagnetických vln by byly schopné konvertovat mechanickou energii ať už z jednoho směru působení na jiný, tlakovou sílu na kroutivý moment, nebo pohlcovat jako například auxetické struktury. V posledních 10 letech se v oblasti metamateriálů dělá veliký pokrok spojený především s pokrokem ve výpočetní technologii, kdy jsme schopni zmenšovat velikost mikroprocesorů, a tedy i zmenšovat robotické metamateriály.

2.1.1. Optické metamateriály

Tento druh materiálů, ač by se mohlo zdát, že je vcelku nový, doprovází lidstvo již pár století, a to jen z toho důvodu, protože je velmi zajímavý. Připravené optické metamateriály k částečné neviditelnosti vedly, a to díky jejich speciální struktuře, která umožňuje záporný index lomu celé struktury. Mají i jiné nezvyklé vlastnosti, například zápornou magnetickou permitivitu a permeabilitu a rovněž tak záporný Dopplerův posun. Tyto materiály v podstatě využívají optické difrakce čili jevu, kdy se světelné záření ohýbá a zároveň rozkládá na svoje jednotlivé vlnové délky a to tak, že červené světlo se ohýbá nejvíce od osy roviny a fialové nejméně. Pokud bychom použili správný úhel odrazu pro průchod světla mezi dvěma zrcadly jsme schopni světlo ohnout i kolem objektů s větší velikostí, než je vlnová délka. Vytvořit ale materiál, nebo spíše povrch, do kterého bychom byli schopni zabalit celý předmět a ten by následně „zmizel“ není jednoduché už z vícero důvodů. Viditelné světlo má vcelku široký rozsah vlnových délek 350-780 nm, kdy pro každou vlnovou délku je třeba navrhnout určitou strukturu, kolem které by se světlo ohýbalo a zároveň zajistit, aby spolu neinterferovaly jednotlivé vlnové délky čili abychom vytvořili strukturu, neviditelnou pro celé spektrum viditelného světla. Prvním z návrhů o vytvoření optického metamateriálu

2.1.2. Akustické metamateriály

Akustické metamateriály fungují na podobných principech jako ty optické, avšak pro zvukové ekvivalenty tedy efektivní hmotnostní hustota ρ a objemový modul β . Pokud bude index lomu záporný, bude se akustická vlna okolo objektu ohýbat podobně jak je tomu u elektromagnetické vlny. Jedním z příkladů akustického metamateriálu jsou například fononické krystaly, které zabraňují zvukovým vlnám v daném pásmu frekvencí vniknout do materiálu. Jedná se většinou o periodické soustavy, složené z elastické izotropní matrice, do které je periodicky vložena izotropní pevná látka. Fononické krystaly podobně jako fotonické krystaly, jsou pojmenovány podle kvanta mřížkových vibrací, tedy fononů.

Pokud bychom u fononických krystalů nahradili elastické prostředí tekutinou, jsme schopni omezit přenášení vlnění jen na podélné. Tento speciální druh fononického krystalu se díky svým vlastnostem nazývá sonický krystal.

2.1.3. Výzkumy a pokusy

Poslední výsledky pokusů s optickými metamateriály jsou ale poměrně nadějně. Tým, který vedl Xiang Zhang z Berkeley Lab, vytvořil loni plášť neviditelnosti trochu jiného typu. Jednalo se o „koberec“, jímž se zakryl předmět, který bylo třeba schovat. Samotný koberec viditelný byl, ale zmizela výduť, protože vlastnosti povrchu byly navrženy tak, aby se od vyboulení světlo odráželo stejně jako od rovné plochy. Tato technika již funguje pro viditelné spektrum, a dokonce pro všechny jeho délky. Koberec je tvořen křemíkovou deskou, která je dielektrikem v jejíž struktuře je síť polymerů s řetězcí vzdálenými od sebe asi 110 nanometrů. Zneviditelnění předmětu funguje v tomto případě i pro světlo dopadající na povrch pod různými úhly. Zajímavé je, že zatímco předešlé starší metamateriály byly tvořeny střídajícími se strukturami kovů a izolantů, zde je vše složeno výhradně z nevodivých látek. Dalším stupněm má být logicky zneviditelnění samotného koberce.

Podobným materiálem by mohlo být i spojení skla a zlata. Tento plášť se skládá ze dvou vrstev oddělených od sebe vzduchem, kdy spodní vrstva umístěná na předmětu je zespodu pokrytá zlatem, na kterém jsou umístěny dvojité konvexní čočky, a horní vrstva je ze spodu také pokryta zlatem, ale na povrchu je tenká vrstva skla, které vytváří rovinu, vzduchová vrstva mezi nimi slouží jako adiabaticky se měnící vlnovod. Tento způsob tedy reálně neskrývá předmět, ale pouze využívá odrazu a vytváří dojem, že se jedná o rovný povrch.

Akustické metamateriály již nyní mohou být využity ve formě vlnovodů, fungujících na principu odrazu vlny od periodické struktury válečků. Tyto vlnovody mají hlavní výhodu v tom, že díky odrazu vln se zvukový signál nezeslabuje, a tedy jsme schopni vést zvuk na vysokou vzdálenost obdobně jako je tomu u optických kabelů vedoucích světlo.

3. AUXETICKÉ MATERIÁLY

Název auxetický materiál vznikl v roce 1991, čili jako takový se jedná o vcelku nový pojem a vychází z řeckého *auxetos* značící nárůst objemu spolu se změnou šířky či délky. První přírodně objevený auxetický materiál byl monokrystal pyritu, který nabývá hodnoty Poissonova poměru $-1/7$. Negativní Poissonův poměr však nebyl pozorován jen u materiálů ale také u živých tkání, například kočičí kůže vykazuje auxetické chování, podobně jako hovězí kůže. První z uměle vytvořených auxetických materiálů však nemohly být vytisknuty na 3D tiskárně ale musely být vylity do formy případně obrobeny na obráběcích strojích, což jednoznačně zhoršovalo práci s nimi a také zhoršovalo výsledné vlastnosti.

Auxetickým materiálem se dá nazvat materiál, který má záporný Poissonův poměr, popisující závislost mezi podélným poměrným prodloužením a příčným poměrným zkrácením. U přírodních a známých materiálů má hodnoty od 0 do 0,5. Auxetické materiály ovšem mají záporný Poissonův poměr čili při prodlužování v jednom směru se prodlužují i do směru kolmého, samozřejmě až do bodu meze kluzu, kdy začíná vznikat plastická (trvalá) deformace. Této skutečnosti se spíše využívá v opačném směru, kdy se na materiál působí silou, ale místo toho, aby se začal deformovat, se mu zvyšuje pouze hustota opět do bodu, než začne docházet k deformaci auxetické struktury. Tato vlastnost je tedy závislá především na struktuře auxetického materiálu ale zároveň ji mohou ovlivnit i další vlastnosti jako je tloušťka jednotlivých prvků materiálu či porozita struktury. Hlavní využití auxetických materiálů by tedy mohlo být jako tlumící prvky do karosérií aut, či jako ochrana proti rázovým vlnám při výbuchu. Teoreticky by se mohli dát využít i jako jistá forma ochrany proti střelám, ale to spíše pro menší ráže při použití auxetických struktur z polymerních hmot.

3.1.1. Poissonův poměr

Jak již bylo zmíněno, Poissonův poměr nabývá pro auxetické struktury záporných hodnot. Tato konstanta je definována jako záporný podíl příčného zkrácení a podélného prodloužení. Pokud tato prodloužení označíme ϵ_x a ϵ_y potom poissonovo číslo ν_{xy} platí vztah:

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}$$

Dále je elastické chování materiálu možné popsat dalšími veličinami, mezi kterými existují vzájemné vztahy. Těmito veličinami jsou Youngův modul pružnosti v tahu, E . Dále pak Coulombův modul pružnosti ve smyku G a objemový modul pružnosti K . Pro materiál, jehož mechanické vlastnosti jsou shodné ve všech směrech působení (izotropický) platí mezi charakteristikami tyto vztahy.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

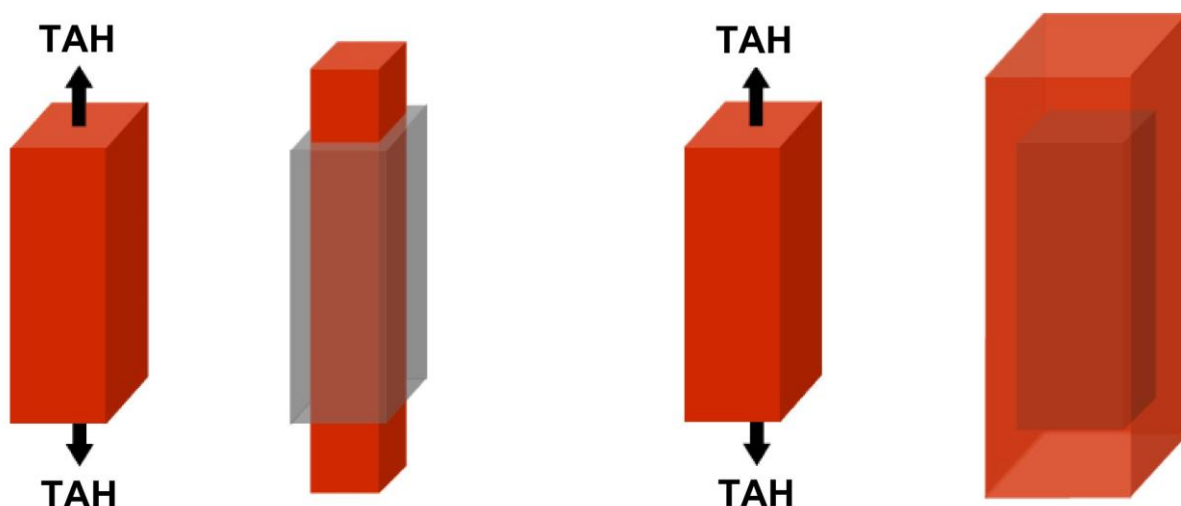
$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

$$G = \frac{9KG}{3K + G}.$$

Pro izotropní materiály může Poissonův poměr nabývat hodnot od 0 do 0,5 ale ve většině případů se jedná pouze o kladné hodnoty, což v praxi znamená, že při podélném protažení dochází k příčnému smrštění a naopak.

Při ohýbání auxetických desek můžeme pozorovat synklastické chování, to představuje schopnost deformovat se do tvaru kopule při ohybu. Auxetické materiály se také vyznačují vysokou schopností tlumení a dobrými zvukovými izolačními vlastnostmi. V neposlední řadě vede záporné Poissonovo číslo k zvýšení odolnosti proti nárazu a k disipaci většího množství energie při rázu.

Jak již bylo zmíněno, metamateriály obecně jsou zvláštní svým chováním, které je závislé hlavně na uspořádání jednotlivých částic, a tedy i na struktuře jednotek. Jinak tomu není ani u auxetických struktur skládajících se z jednotlivých buněk, které samy o sobě již mají auxetický charakter. Auxetické chování struktury závisí na několika faktorech, jedním z nich jsou vnitřní úhly ve struktuře, které do jisté míry mohou určovat maximální smrštění, či roztažení dané buňky. Ve výjimečných případech, jako jsou právě auxetické materiály, však Poissonův poměr nabývá záporných hodnot, tedy při situacích, kdy se s podélným prodloužením materiál prodlužuje i příčně a při smrštění podobně.



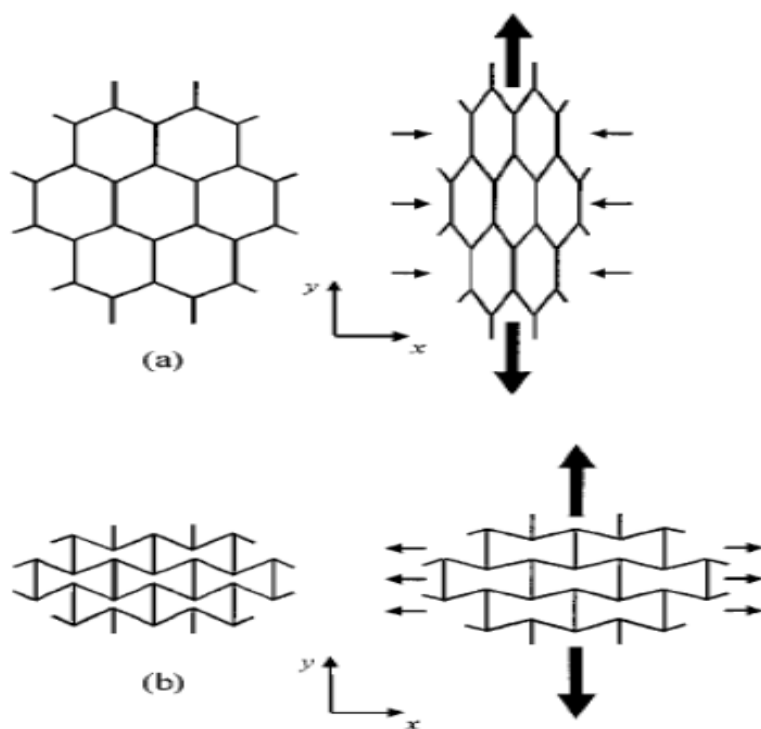
Obrázek 3.1: Rozdíl mezi deformací obyčejného materiálu (vlevo) a auxetického (vpravo) při namáhání v tahu

3.2. ZÁKLADNÍ BUŇKY AUXETICKÝCH STRUKTUR

Základní modely auxetických struktur vychází z jednoduchých geometrických útvarů, trojúhelníky, čtyřúhelníky, šestiúhelníky, které se následně upravují, aby měly požadované auxetické vlastnosti. Z těchto jednotlivých buněk se následně skládá celá síť periodicky se opakujících buněk.

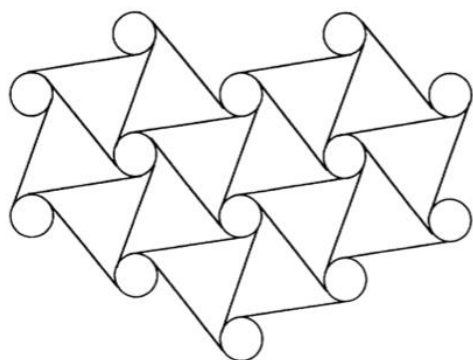
3.2.1. Šestiúhelníkové struktury

Tyto struktury jsou pozorovatelné již v přírodě, například včelí plástve, z angličtiny pak název *honeycomb*, který se pro popis těchto struktur běžně využívá. Šestiúhelníkové buňky však samy netvoří auxetickou strukturu a je třeba je vhodně modifikovat, v tomto případě změnou vnitřních úhlů a vytvoření *inverted honeycomb*, nebo také *re-entrant honeycomb* buňky, která již auxetické vlastnosti má. V šestiúhelníkové struktuře dochází ke třem druhům deformací: ohyb, prodloužení a vzájemné pootočení stran v bodech jejich spojení. Ve všech případech však závisí na poměru rozměrů buňky h a l a vnitřním úhlu θ



Obrázek 3.2: Rozdíl mezi deformací *honeycomb* struktury (nahore) a *re-entrant honeycomb* (dole) při namáhání v tahu.

Dalším typem šestiúhelníkové struktury může být tzv. *chiral honeycomb*, kdy tato struktura není zrcadlově symetrická a dochází zde k rotaci kruhových částí.



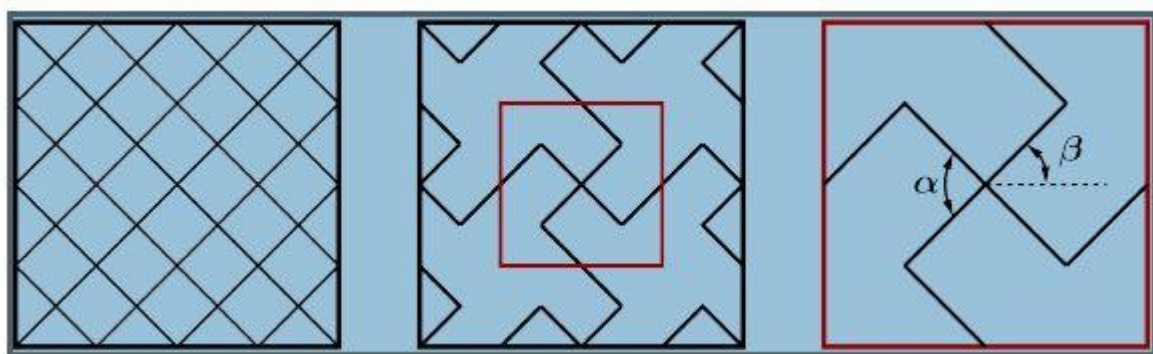
Obrázek 3.3: Příklad *chiral honeycomb* struktury

3.2.2. Čtyřúhelníkové struktury

Tyto struktury vycházejí spíše než z tvaru jednotlivých buněk, spíše z tvaru porézních prostorů mezi buňkami, kdy se jedná o čtyřúhelníky. Jedním z řešení, jak tyto struktury vytvořit je metoda rotujících čtverců, tedy spojení stejně velkých čtverců, které se dotýkají jen svými vrcholy pod určitými úhly od 0° do 90° . V anglické terminologii se tato struktura nazývá *rotating squares*, což souvisí s deformací, která při zátěži vzniká.

Na tomto základě je pak možné využívat i další tvary, jako jsou obdélníky, kosočtverce dokonce i čtverce různých velikostí a na základě rozměrů a vnitřních úhlů tak vytvořit požadovanou auxetickou strukturu s danými vlastnostmi.

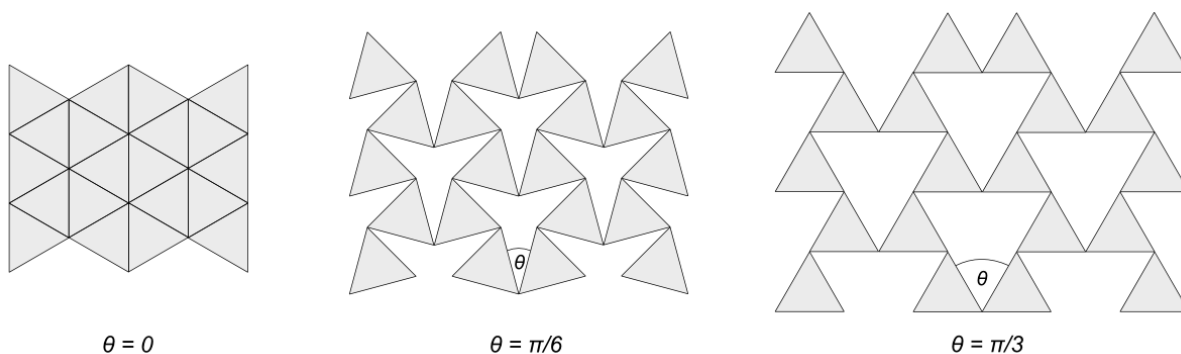
Další strukturou využívající čtyřúhelníky je *missing-rib foam* model, kdy se vychází ze čtvercové mřížky pootočené o 45° , ze které jsou odstraněna „žebra“ abychom dosáhli auxetického chování struktury.



Obrázek 3.4: Příklad missing-rib foam struktury

3.2.3. Trojúhelníkové struktury

Modely založené na trojúhelníkových strukturách vycházejí z metody rotujících čtverců, kdy jsou mezi vrcholy jednotlivých trojúhelníků určité úhly. Deformační chování a velikost poissonova poměru tedy závisí na dílčích rozměrech a vnitřních úhlech.



Obrázek 3.5: Deformační chování trojúhelníkové struktury

3.3. MOŽNOSTI VYUŽITÍ AUXETICKÝCH STRUKTUR

Jedinečné vlastnosti, které auxetické materiály mají, mohou být využity v mnoha oblastech, například v biomedicinském inženýrství, letectví, výrobě automobilů či senzorice. V biomedicinském inženýrství se již nyní využívají pro výrobu chytrých obvazů, které podle úrovně tlaku vyvíjeného ránou mohou využít své deformační mechanismy k určení množství dávky léčiv a tím zefektivnit proces hojení rány. Dalším možným využitím by mohlo být jako náhrada, nebo výstelka cév, které samy o sobě mají částečně auxetický charakter.

Vzhledem ke skutečnosti, že auxetické materiály jsou schopné velmi dobře pohlcovat velké množství deformace, a tedy i nárazů, nabízí se možnost je využívat jako ochranné prvky v karosérii automobilů, či jako balistická ochrana proti tlakovým vlnám či silným nárazům. Je zřejmé, že by bylo třeba použít vhodného plastu k tomu, aby se docílilo co nejvyšší účinnosti pohlcování tlakové energie. Jelikož tyto materiály mají také vysokou pórovitost bylo by možné je využívat i jako tepelnou izolaci pro vesmírné lodě, kdy by auxetický materiál sloužil jako mechanický ochranný prvek a částečně i jako izolace díky zvýšené porozitě.

Auxetické materiály mohou sloužit i jako textilie či obuv kdy oproti obyčejným látkám by poskytovali větší pohodlí, lepší absorpci energie při pohybu (obuv), také částečně lepší odolnost. Auxetické textilie se mohou vyrábět pomocí dvou základních metod. První metodou je použití již auxeticky chovajícího se vlákna, ze kterého se následně šije. Druhou možností potom je využít neauxetické vlákno, které je spleteno do auxetické struktury a má alespoň částečně auxetické vlastnosti.

Kromě vláken se již teď vyrábějí podrážky s auxetickou strukturou například firma Adidas či UnderArmour, které mají lepší pohlcování nárazů při dopadu a jsou tedy vhodné na sport či terénní výšlapy.

Dalším možným využitím auxetických materiálů by mohly být piezoelektrické senzory. Tyto senzory by musely být vytvořeny z vodivého materiálu jako je například Galfenol, spojení železa a gallia, které má dobré magneto-elastické vlastnosti a je tedy schopné převádět mechanické zatížení na elektrický signál.

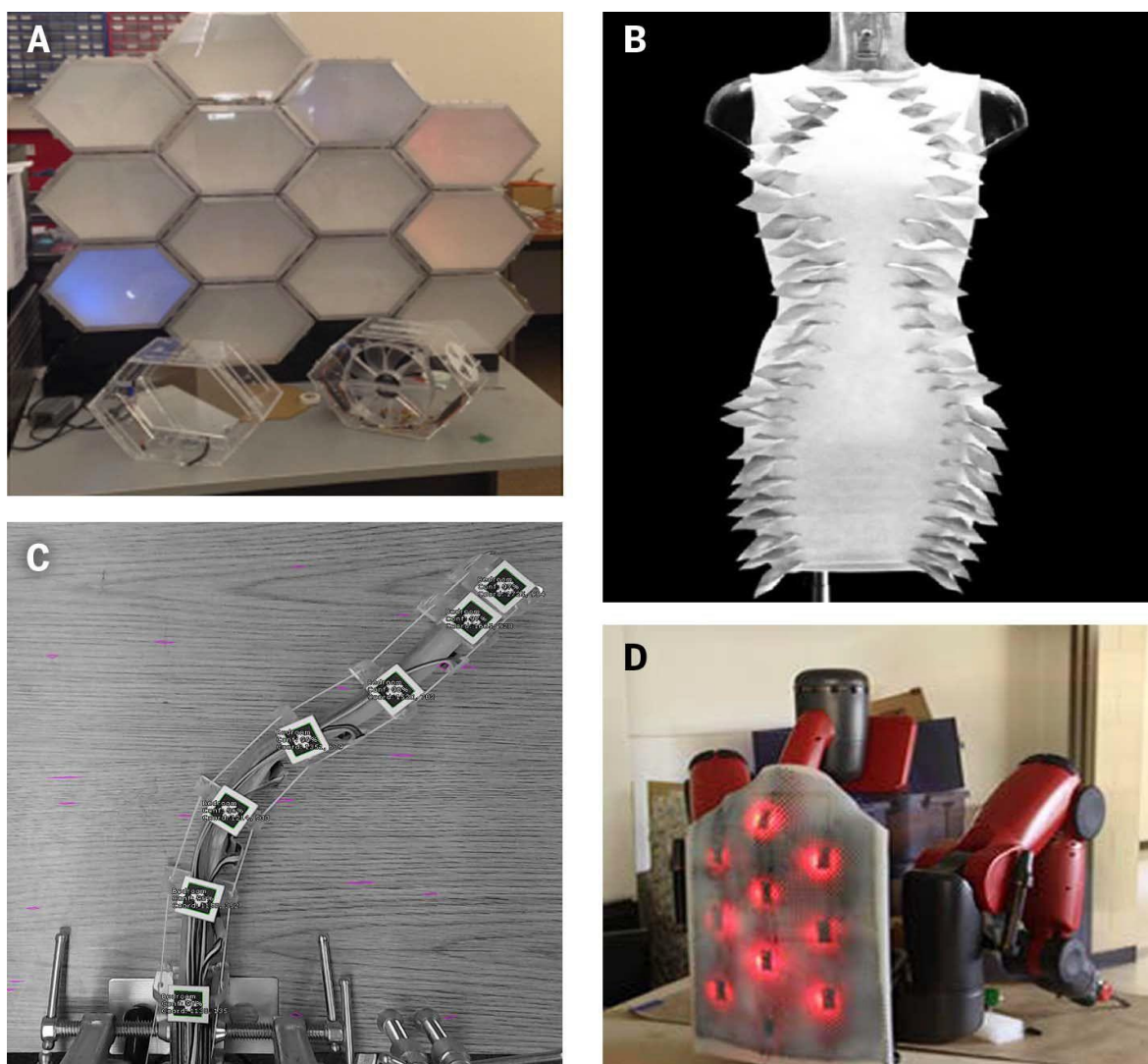
Tabulka s příklady praktických využití auxetických struktur

Oblast	Aplikace
Letectví	Tepelná izolace, zvukové a vibrační tlumiče
Automobilový průmysl	Nárazníky, tlumiče, tepelná izolace
Biomedicinské inženýrství	Obvazy, umělé cévy, umělá kůže, protézy, upevnění vazů
Kompozitní výztuže	Výplně sendvičových kompozitů, vláknové zpevnění (snižující praskání mezi výztuží a maticí)
Senzorika	Hydrofony, piezoelektrické součástky
Osobní ochrana	Textilie, obuv, výplně helem, balistické vesty, chrániče

4. KOMPOZITNÍ METAMATERIÁLY

Kompozitní materiály jsou známy již po mnoho století, protože se jedná o spojení alespoň dvou různých komponent, které společně vytvoří tužší, pevnější a odolnější materiál. Většina kompozitních materiálů se skládá z výztuže a matrice, kdy výztuž vnáší tuhost a pevnost a matrice zase houževnatost, chemickou odolnost a tvarovou stálost. Vnesením metamateriálové funkčnosti, části robotiky a výpočetní techniky můžeme vytvořit materiál, který by se adaptoval na základě okolních vlivů změnou své struktury.

V současné době však nejsme schopni vytvářet dostatečně malé řídicí jednotky, které by dokázali na základě přijetí vnějšího podnětu ať už zvukového, rádiového, nebo světelného, reagovat a pozměnit lokálně strukturu materiálu.



Obrázek 4.1: Příklady již fungujících robotických materiálů kombinujících snímání, ovládání, výpočet a komunikaci A) Fasáda měnící svoji průhlednost na základě gesta. B) Šaty reagující na zvukové vlny změnou struktury směrem, odkud zvuk přichází. C) Maják, který dokáže měnit svůj tvar. D) Robotická kůže rozpoznávající dotyk a texturu předmětu

5. 3D TISK

3D tiskem můžeme nazvat aditivní výrobní technologii, při které je počítačově předpřipravený model přenesen na 3D tiskárnu, kde je vytisknut do výsledné podoby. Jedná se o analogii 2D tisku, kdy je těleso vytvářeno po jednotlivých vrstvách (patrech). Existují různé metody 3D tisku, které podrobněji popíšeme v následujících odstavcích.

3D tisk vznikl ve druhé polovině 20. století na základě výzkumů Chucku Hulla, který si technologii stereolitografie nechal patentovat. Tato technologie je založena na trojrozměrném laserovém tisku, kdy je materiál, v tomto případě fotopolymer, rychle vytvrzen pomocí soustředného prostorově přesného působení několika laserů. Před koncem 90. let byl pak poprvé vytvořen první přístroj tisknoucí ve 3D formátu, dostupný i pro širší veřejnost. Později byly vytvořeny novější technologie stavějící na dalších druzích rychle se tavících materiálů jako například termoplast či selektivní laserové spékání pracující s CO₂ laserem.

V dnešní době jsou ale stále nejvíce používány, a to především kvůli jejich ceně, tiskárny, které nanášejí roztavený polymer vrstvu za vrstvou čímž vzniká výsledný objekt. Problém s malým rozlišením těchto 3D tiskáren je právě způsoben stylem nanášení, a to pomocí trysky. Dalším problémem je skutečnost, že se nedají vytvářet rozvinuté modely, protože musíme stavět vždy na nějakém základě a zatuhnutí polymeru není okamžité. Částečně lze tento problém vyřešit, a to vytvářením pomocných konstrukcí, které se po vychladnutí musí odstranit (odtrhnout či odříznout).

5.1. DRUHY 3D TISKU

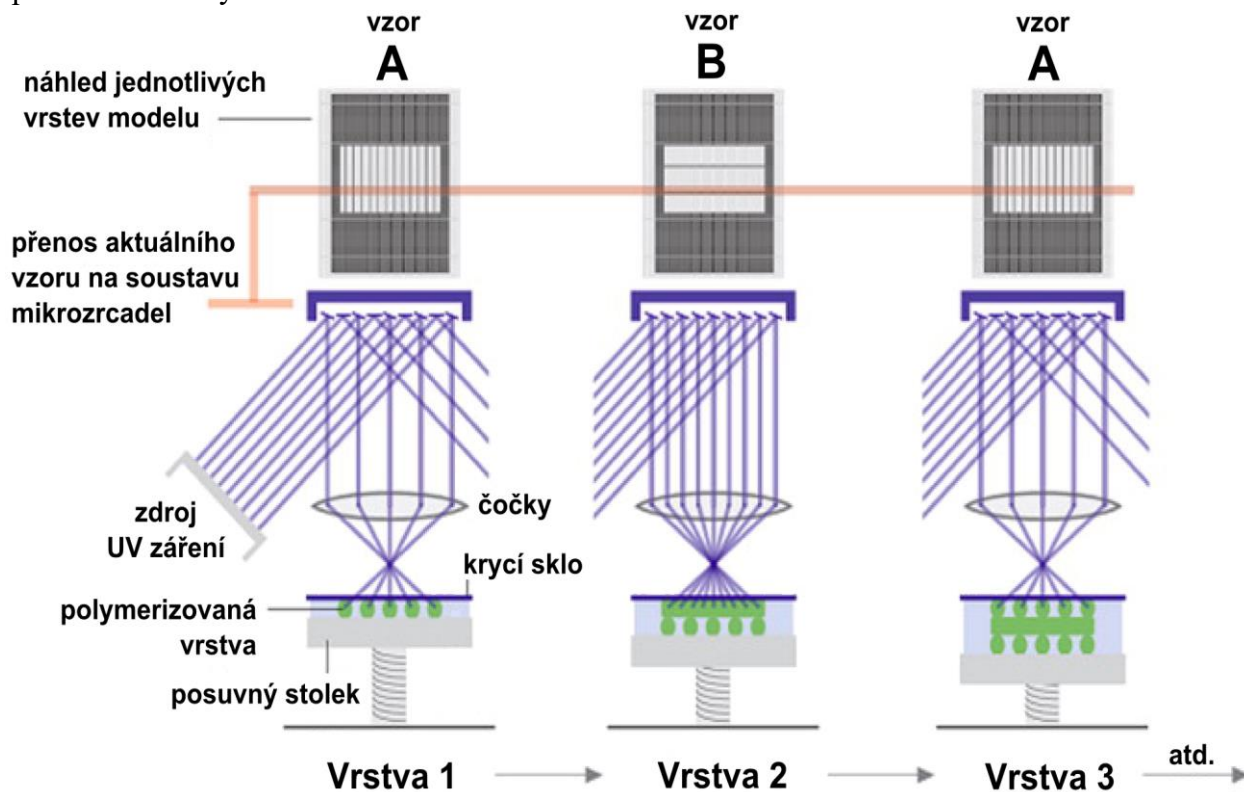
Obdobně jako v jiných výrobních procesech, existuje vícero druhů, jak vytvářet produkty pomocí 3D tiskárny. Tyto druhy výroby jsou závislé na požadovaných vlastnostech produktu, výchozích surovinách, a také na ceně, ať už za tiskárnu nebo i za výsledný objekt.

5.1.1. Fused deposition modeling (FDM)

Tím základním a v dnešní době stále nejvyužívanějším je tisk ze struny, nejčastěji termoplastu. Tato metoda je založená na využívání 3D tiskárny, která má vyhřívanou trysku na teplotu tání daného polymeru a přes tuto trysku je hnán plast, který se průchodem roztaví, nanese se na podložku, či na již hotovou vrstvu a je poté schlazen, kdy vytvrdne do výsledné podoby. Nevýhodou této metody je ovšem fakt, že tryska se může zanášet plastem, a to hlavně v momentě, kdy se přesouvá z jednoho místa na druhé, případně když se končí s tiskem. Další nevýhodou je nemožnost vytvářet složitější tvary, protože je třeba vždy přichytit roztavený plast k jinému kusu plastu, což nám neumožňuje dělat nějaké menší výstupky a pokud chceme vytvářet pórovitější struktury je třeba používat nosných konstrukcí, které se po zatuhnutí musí odstranit. Hlavní výhodou je však cena, která ať už se bavíme o tiskárně samotné, nebo i o použité struně, není tak vysoká v porovnání s jinými druhy tisku, jako je třeba stereolitografie, nebo selektivní laserové spékání.

5.1.2. Stereolitografie (SLA)

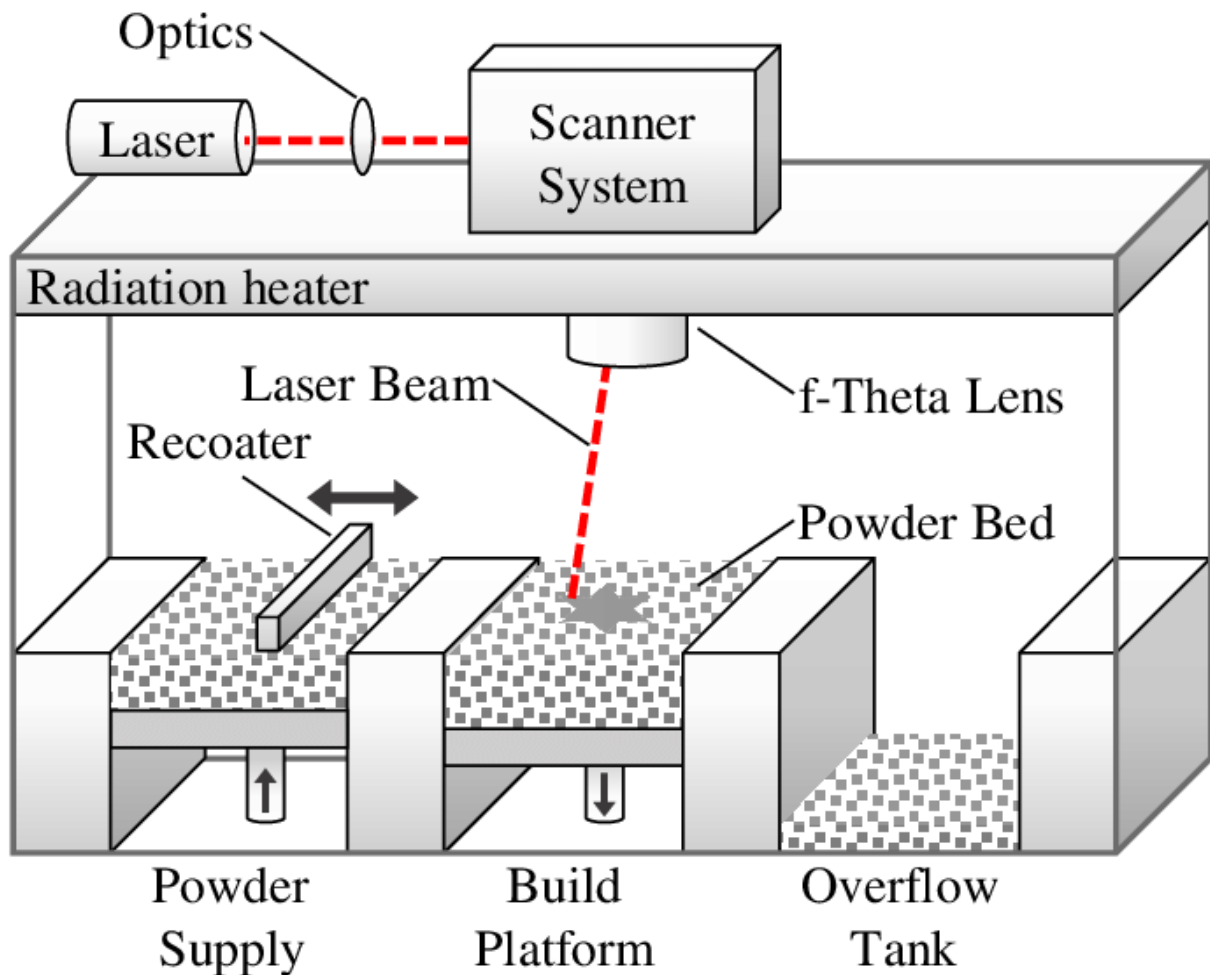
Tato metoda 3D tisku spočívá v nanášení velmi tenkých vrstev (asi 100 μm) fotopolymerního materiálu, například pryskyřice, a následným rychlým vytvrzováním pomocí ultrafialového (UV) záření, nejčastěji z laseru podle přesně počítačem definovaného tvaru. Kromě laseru se využívá také digitální projekce, kdy pomocí mikro-zrcadel se daná vrstva vytvrdí působením UV záření vysílaného z laserů. Nevýhodou této metody je však pomalá rychlost tisku a problematické vytváření vertikálních struktur.



Obrázek 5.1: Schéma digitálního mikro-zrcadlového zařízení pro stereolitografii.

5.1.3. Selective laser sintering (SLS)

Při této metodě jsou vrstvy postupně nanášeny na sebe a laser spéká pouze oblasti určené počítačovým modelem. Laserové spékání má tu výhodu, že nejsou třeba žádné podpůrné struktury, jako je tomu u stereolitografie, a tedy odpadáva problém, jak se jich po dokončení tisku zbavovat. Zároveň je možné nevyužitý nanesený prášek opětovně využít. Pro tuto techniku se využívá laser s vysokou energií, například CO₂ laser. Jako práškový materiál může být využit polymer (nylon, polyamid)



Obrázek 5.2: Schéma SLS tiskárny

5.1.4. Direct metal laser sintering (DMLS)

Metoda odpovídající SLS, kdy je namísto polymerního prášku využit kovový prášek, který je pomocí laserového paprsku spékán do určené podoby. Nejprve je nanesen prášek, který je poté rozehrát na teplotu blízkou teplotě tání a následně je pomocí laseru spékána přesně definovaná oblast. Plošina se pak posune níže, je nanesena další vrstva prášku a opět spečena pomocí laseru. Metoda je velmi podobná SLS, avšak se využívá roztavení prášku a je využívána především na kovové materiály a kovové slitiny. Díly vyrobené pomocí DMLS mají totožné vlastnosti jako díly vytvořené obráběním, je tedy možné je řezat, brousit, svařovat či jinak povrchově upravit. Nevýhodou této technologie je vysoká teplota roztavení kovových prášků.

5.1.5. Selective heat sintering (SHS)

Metoda podobná SLS, zde se však nevyužívá laser, ale nahřívá se tisková hlava, která se pohybuje pouze po ploše, a tiskové lůžko se pohybuje ve vertikálním směru. Prášek se nanese na lůžko a poté je pomocí zahřáté tiskové hlavy roztaven v určitém bodě. Pohyb hlavy je pouze v rovině, kdy prášek je nanášen podobným způsobem jako u SLS. Výhodou této metody je nižší cena, protože zde není laserové zařízení.

5.1.6. PolyJet Matrix

PolyJet Matrix je technologie 3D tisku vyvinutá izraelskou firmou Objet. Tato technologie využívá tryskání tekutého fotopolymerního materiálu a stereolitografie. Polymer se nanáší v ultra tenkých vrstvách, pomocí speciálních tiskových hlav. Vrstvy jsou následně vytvrzeny UV lampou. Výhodou je možnost tisku z dvou a více různých materiálů v jednom tiskovém procesu a malá tloušťka vrstvy, která činí 16, či 30 μm .

5.1.7. Digital light procesing (DLP)

Technologie podobná SLA, využívající nádobku s tekutým fotopolymerem, ze které je výsledný objekt vyzvedáván. Rozdílem oproti SLA je však použití projektoru a mikroskopických zrcadel, které odrážejí světlo. Tato technologie je přesná a oproti SLA i výrazně rychlejší, protože projektor zde působí na celou tištěnou plochu. Tato technologie je ovšem omezená rozlišením projektoru, který vytváří obraz, ačkoliv s pokrokem ve výpočetní technologii jsme schopni vytvořit zařízení s velmi vysokým rozlišením. Touto metodou je možné vyrábět i šperky s vysokou přesností.

5.1.8. Electron beam fabrication (EBF)

Metoda vyvinutá v NASA pro práci s jakoukoliv kovovou slitinou. Kovový drátek je pomocí proudu elektronů spojován podobným způsobem jako u svařování. Tato metoda byla vyvinuta pro výrobu součástí ve vesmíru. Nejedná se přímo o technologii 3D tisku, dala by se však zařadit do aditivních výrobních technologií kam patří i 3D tisk.

5.1.9. Electron beam melting (EBM)

Metoda podobná EBF, avšak se využívají především slitiny titanu a také se místo drátku používá prášek. Díly takto vyrobené jsou velmi pevné, a proto se využívají například jako implantáty ve zdravotnictví.

5.2. POLYMERNÍ MATERIÁLY PRO 3D TISK

Každý druh zpracování a výroby materiálu vyžaduje určité fyzikální a chemické výchozí suroviny. S tímto problémem se setkávají i 3D tiskárny, kde pro FDM technologii, je třeba použít strunu z vhodného materiálu, aby se roztavil ale zároveň i rychle zatusnul v krátkém čase. Pro spékání jsou nejvhodnějším materiálem prášky ale v závislosti na druhu laseru je také určit přesné složení. Pro SLA a DLP je zase vhodnější využít fotopolymerní pryskyřice.

Jedním z problémů technologie 3D tisku je tedy, jaký materiál použít na výrobu. Každá metoda 3D tisku vyžaduje specifické vlastnosti na výchozí surovinu, ale obecně by se mělo jednat o stabilní látky, tedy o látky, které se nebudou rozkládat působením okolního prostředí, nebudou toxické a bude možné je bezpečně zlikvidovat případně zrecyklovat.

Podle použití je vhodné zvolit materiál s určitou pevností, mechanickými a chemickými vlastnostmi. Základními materiály používanými pro 3D tisk jsou:

ABS-Akrylonitril butadien styren

Asi jedna z nejvíce používaných látek pro 3D tisk vůbec, a to hlavně díky jeho ceně (asi 1 kg/500 Kč). Má dobrou tepelnou vodivost a stálost, je mechanicky velmi odolný (vyrábí se z něj třeba LEGO) a je schopný odolávat vyšším teplotám, až 100 °C bez větších ztrát pevnosti. Problémem však je jeho velká tepelná roztažnost vytvářející nemožnost tisknout objekty větší než 15 cm.

PLA – Kyselina polylaktová

Tento materiál má výhodu oproti ABS v tom, že je vytvářen z kukuřičného škrobu a je tedy dobře rozložitelný, ne však přímo v přírodě ale ve speciálních kompostárnách, kde je zapotřebí vysoké vlhkosti a teploty okolo 65°C. Má také malou teplotní roztažnost, díky čemu je možné z něj tisknout i objekty větší než 20 cm ale problémem zůstává, že při teplotách vyšších než 60 °C se roztéká, což znemožňuje využití při zvýšené teplotě.

PET – Polyethylén tereftalát

Stejný materiál, ze kterého se vyrábějí lahve na pití. Tento materiál je v podstatě spojením dobrých vlastností dvou předchozích, má nízkou tepelnou roztažnost, je stálý, pevný a výtisky odolají teplotě vyšší, než je 100°C. Ačkoliv by se mohlo zdát, že tento materiál by byl nejvhodnějším pro 3D tisk ve větším množství, není tomu tak, hlavně díky jeho ceně, která je asi o třetinu vyšší než u ABS.

5.2.1. Fotopolymerní pryskyřice

Tiskárny využívající pryskyřici jsou založené především na metodě SLA/DLP, kdy je tato pryskyřice vytvrzována pomocí UV laserů. Většinou se pryskyřice skládají z monomerních jednotek a již přimíchaného iniciátoru, který reaguje na danou vlnovou délku světla a spouští polymeraci. Pryskyřic použitelných pro 3D tisk je velké množství, proto zde budou zmíněny jen základní druhy a jejich specifické vlastnosti. Většina pryskyřic má základ v monomerech akrylátu, methakrylátu případně uretan dimethakrylátu, do kterých jsou přidány dalších látky určující výsledné vlastnosti polymeru.

Pevná pryskyřice (Rigid Resin)

Díky vyztužení sklem je kombinací vysoké tuhosti, přesnosti a lesklého povrchu. Je vysoce odolná vůči deformaci v průběhu času a je vhodná i pro tenké vrstvy materiálu. Využívá se u modelů lopatek turbín, větráků, nebo třeba krytů elektroniky a skříní v automobilovém průmyslu. Jako přídatná složka zde slouží isobornylmethakrylát vytvářející vyšší tuhost výsledného objektu.

Odolná pryskyřice (Durable Resin)

Je schopná nahradit simulovat vlastnosti polypropylenu. Jedná se o houževnatý a odolný materiál, který se dá využít pro díly podrobené deformačním vlivům. Má hladký, lesklý povrch vhodný pro nárazuvzdorné kryty, odolné pohyblivé díly s nízkým třením či u spojek a kloubových spojení. Z chemického hlediska se jedná pouze o monomery akrylátu, methakrylátu a uretan dimethakrylátu.

Pružná pryskyřice (Flexible Resin)

Má vlastnosti podobné gumě a je možné ji uplatnit u ohýbaných a stlačovaných dílů, jemných a ergonomicky tvarovaných dílů. Pryskyřici je možné použít jako madla, úchyty či tlumiče. Díky přídavku difenyl fosfinoxidu získává výsledná pryskyřice specifickou pružnost.

Vysokoteplotní pryskyřice (High Temp Resin)

Odolává teplotě 289 °C při 0,45 MPa je tedy vhodný pro aplikace při vysokých teplotách či pro odlévání a tváření za tepla. Používá se na prototypy forem, odolné tvarovky, přesné součásti rozvodů horkého vzduchu a kapalných látek. Specifickou látkou, která dodává vysokoteplotní odolnost je zde 1,2-ethandiyl triakrylát

Dentální pryskyřice

Pryskyřice využitelné pro modelování zubních náhrad či jako součásti retenčních rovinátek a dalších ortodontických pomůcek, tedy pro fixní, snímací a ortodontickou protetiku. Mají vysokou pevnost a možnosti opracování zároveň však splňují biokompatibilitu jakožto látky v přímém kontaktu s dutinou ústní. Pryskyřice pro dentální použití jsou speciální svojí hlavní složkou, bisfenol A dimethakrylatem a dalšími součástmi. S ohledem na větší množství používaných dentálních pryskyřic je složení různorodé ale vždy jsou základem akrylátové sloučeniny.

5.3. KOVY, KERAMIKA, KOMPOZITY

Vhodným materiálem jsou také kovy zvláště pro svoji vysokou pevnost, avšak horší zpracování z důvodu vyšších tavících teplot, kterých ne všechny tiskárny jsou schopny dosáhnout. Jako první, a tedy nejlevnější z nich by se dala zmínit nerezová ocel, která se používá ve formě prášku, který se nanese a poté se speče či roztaví za pomoci laseru. Je velmi odolná, jak tepelně, tak z ohledu mechanického namáhání, takže se využívá v případech menších součástek, které by bylo téměř nemožné obrábět na CNC stroji. Ocel je možné i obarvit, a to za pomoci pokovení zlatem nebo bronzem. Méně využívanými kovy jsou zlato a stříbro, a to především kvůli jejich ceně, která je vysoká, také kvůli nižší pevnosti především u zlata a sám 3D tisk objektů z těchto materiálů je speciální svojí výrobou, protože se nejdříve vytiskne forma ze speciálního vosku, do které se pak nalije roztavený kov. Nejpevnějším z kovových materiálů je titan. Ten je ovšem drahý, a proto není v běžném průmyslu tolik využíván, ale výsledný vytištěný objekt má vysokou přesnost detailu a pro využití v lékařství či pro vesmírné projekty je velmi vhodný. Keramické materiály by mohly být také tisknuty pomocí 3D tisku, mají však velmi vysokou teplotu tání, a proto je výhodnější za pomoci tiskárny vytvořit jen formu, do které se keramický prášek zalisuje a při vypálení se plastová forma odtaví pryč, kdežto keramika se sline a vznikne pevný materiál. Tohoto postupu výroby keramických dílů se využívá především u součástek se složitým tvarováním, kdy by bylo nemožné vytvořit kovovou formu pomocí CNC stroje. Kompozitní materiály vytvořené pomocí 3D tisku by mohly být jednodušší, například při výrobě sendvičového kompozitu, kdy vnitřní prostor by byl právě vytvořen strukturami na polymerní bázi.

5.4. VYUŽITÍ 3D TISKU V LÉKAŘSTVÍ

Nejen v průmyslu je možné využití 3D tisknutých materiálů. V lékařství se využívají například kloubní náhrady ze slitin titanu, které jsou velmi pevné a s využitím vysoké přesnosti 3D tiskáren je možné vytvořit přesné náhradní části, které daný pacient potřebuje, ať už se jedná o kosterní, či kloubní náhrady, zubní náhrady, nebo i podpůrné části. Pro kosterní náhrady je také možné využít vytisknuté nosné struktury, na kterých by pak následně mohla kost srůst, avšak bez potřeby tyto struktury odstraňovat, jako je tomu nyní například s titanovými šrouby či podpůrnými prvky. Tyto vytisknuté struktury by měly danou porozitu, aby mohly držet kost pohromadě ale přitom jí nebránit ve srůstání. Stejně tak se pomocí 3D modelování vyrábí podpory pro páteř, které mnohem lépe přiléhají k tělu a díky pevným slitinám jsou odolné a zároveň lehké, takže nezatěžují tělo. Dalším příkladem by mohly být zubní náhrady vytvořené přesně podle potřeb jejich majitele, ať už s pomocí naskenování ústní dutiny, či za pomoci přesné práce dentisty. Obdobným způsobem se již vyrábějí naslouchátka, která jsme díky přesnému 3D skenu a následnému vytisknutí schopni vytvořit přímo pro danou osobu, bez nutnosti následných úprav v důsledku otláčení.

6. VYTVÁŘENÍ 3D MODELU

Jak již bylo zmíněno výše, pro vytisknutí předmětu na 3D tiskárně je nejprve vytvořit soubor představující 3D model výrobku, který tiskárna dokáže zpracovat a který slouží k prostorovému řízení depozice nebo místa spékání. Na rozdíl však od obyčejné tiskárny, které počítač přímo pošle, co má vytisknout, má 3D tiskárna vlastní software, který je schopný zpracovat jen soubory určitého druhu (přípony) jako jsou například CAD soubory. Samotná 3D tiskárna však zpracovává STL soubory, do kterých musí být model přetvořen. STL formát je popsán jako množina trojúhelníků s vrcholovými body a danou normálou. Tím je model rozdělen na plátky o tloušťce jedné vrstvy a poté po vrstvách vytisknut.

6.1.1. Modelování 3D objektu

Modelování neboli vytváření určitého modelu ve 3D by se mohlo zdát jako vcelku jednoduchý úkon, ale jak již bylo řečeno, oproti vytváření 2D modelu, tedy obyčejnému kreslení, je tento způsob o něco náročnější. Existuje mnoho způsobů, jak modelovat, ale nejjednodušším je vytvořit základní 2D strukturu, kterou pak stačí „roztáhnout“ do 3D modelu, tato struktura však není izotropní ve všech třech směrech ale pouze ve dvou. Pokud bychom chtěli vytvářet 3D strukturu, která by měla stejné vlastnosti ve třech dimenzích jednalo by se o složitější modelování. Modelování jako takové však vychází z předběžných návrhů struktur, které by mohly vykazovat auxetické, nebo i jiné požadované chování. Při prvotním návrhu se většinou vychází ze základních geometrických tvarů jako je trojúhelník, čtverec, šestiúhelník či kruh. Právě upravený šestiúhelník vykazuje auxetické chování a je tedy vhodné jej využít pro model.

6.1.2. Vytváření funkčních návrhů a simulací

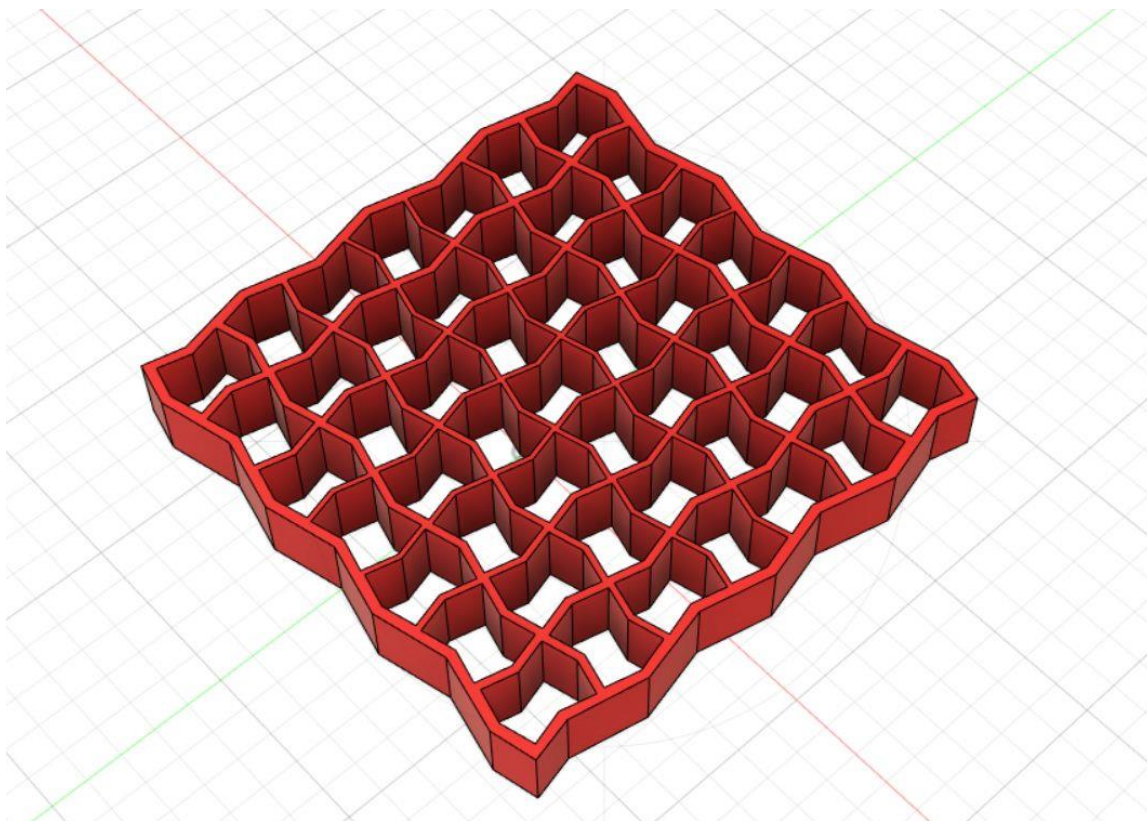
Tvorba návrhů a auxetičnosti je navržena v některém z komerčních CAD (Computer Aided Design) softwarů, jako jsou Autodesk Inventor, CATIA, Solidworks, PTC Creo Parametric, atd. Nejprve je vytvořena základní buňka, která je rozmnožena pro vytvoření celé struktury. Tím je hotov CAD model. Pokud CAD software použitý pro vytvoření modelu přímo disponuje simulací metodou konečných prvků, je možné provést samotný výpočet zde. Případně je nutné použít specializovaný software pro MKP analýzu, např. ABAQUS, Ansys, či Autodesk Simulation. Následně jsou zadány vlastnosti materiálu modelu, ze kterého hodláme tvořit a příslušné okrajové podmínky (vazby, zátěže). Je také nutné vygenerovat síť konečných prvků. Následuje samotná simulace metodou konečných prvků. Z výsledné poměrné deformace se vypočítá Poissonovo číslo. Je možné urychlit výpočet pomocí simulace jen jedné základní buňky, to však vyžaduje přesné zadání okrajových podmínek.

6.1.3. Experimentální měření

Dalším možným přístupem, jak zjistit, zdali je struktura auxetická a případně zjistit její poissonův poměr je experimentální přístup. Struktura se vytiskne na 3D tiskárně a následně je podroben testování. Statické testování se většinou provádí na trhačce, kdy je struktura roztahována v jednom směru a měřena ve směru kolmém.

6.1.4. Využití modelů

Modelování ve 3D prostoru však nemusí být využito jen pro 3D tisk polymerních materiálů či kovů ale bývá použito i pro návrhy budov či venkovních a vnitřních prostor. Toho se již využívá ve stavebnictví pomocí specializované 3D tiskárny, upraveného rychletvrdnoucího betonu a také kovových výztuží na kterých betonová matrice může držet. Návrh takového domu, případně obytné jednotky, není však jednoduchý, protože musí být splněny architektonické a statické náležitosti, aby mohla být budova provozována.



Obrázek 6.1: Příklad vymodelované 2D struktury „roztažené“ do třetího rozměru, kdy se mění šířka stěn od středu směrem ven

7. ZÁVĚR:

V této práci bylo ukázáno, že auxetické struktury, metamateriály i robotické materiály mají velmi slibnou budoucnost a možnosti širokého použití. Zároveň bylo poukázáno na fakt, že při použití metamateriálů se dají upravit přirozené vlastnosti prostředí ať už je to lom světla, permitivita nebo permeabilita a tím i umožnit překrytí či úplnou neviditelnost určitého objektu. Stejně tak bylo dokázáno, že jsme s využitím speciálních metamateriálů, fononických krystalů, schopni odrážet a vést zvuk pomocí vlnovodů. Při použití metamateriálů spolu s výpočetní technikou bychom tedy byli schopni vytvořit uměle fungující receptory, které by zároveň reagovaly na svoje okolí určitou změnou svojí struktury nebo změnou přijímaných signálů. Tento pokrok je však podmíněn výzkumem a vylepšováním výpočetních technologií na úrovni nanočástic, který prozatím není dostačující k používání přizpůsobivých robotických metamateriálů v běžné praxi. Auxetické materiály, jak bylo popsáno mají predispozice k využití v běžném životě a některé jsou již nyní používány například v oděvním průmyslu. Díky jejich variabilitě, lehkosti a relativní pevnosti v tahu i tlaku související s jejich strukturou a výrobním materiálem mohou být použity jak pro bezpečnostní prvky karoserií aut, tak i letadel či vesmírných lodí. Při použití vhodných výchozích materiálů by mohly sloužit i jako senzory pro robotické metamateriály například při reakcích na mechanické vjemy ale i při reakci na rádiové či akustické vlny. Možnosti dalšího využití auxetických struktur jsou ale i nadále cílem výzkumů, ačkoliv jejich poznatky s ohledem na mechanické chování mohou nasvědčovat, že je čeká slibná budoucnost, obdobně jako všechny další druhy metamateriálů.

8. ZDROJE:

JEONG, Claire G. a Anthony ATALA. 3D Printing and Biofabrication for Load Bearing Tissue Engineering. *Engineering Mineralized and Load Bearing Tissues*. Cham: Springer International Publishing, 2015, 2015, 3-14. Advances in Experimental Medicine and Biology. DOI: 10.1007/978-3-319-22345-2_1

LEIGH, Simon J., Robert J. BRADLEY, Christopher P. PURSELL, Duncan R. BILLSON, David A. HUTCHINS a Jeongmin HONG, 2012. A Simple, Low-Cost Conductive Composite Material for 3D Printing of Electronic Sensors. *PLoS ONE*. 7(11), e49365-. DOI: 10.1371/journal.pone.0049365

PRŮŠA, Josef a Michal PRŮŠA, 2014. Základy 3D tisku. *Základy 3D tisku* [online]. 15.12.2014, 2014, 1-12. Dostupné také z: <https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>

3D Tisk, 2001-. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/3D_tisk

Empowering the Medical Device Industry [online], 2015 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <http://www.medicalmodeling.com/solutions-for-engineers/additive-manufacturing-production/polyjet>

Evans, K.E. and Alderson, A. (2000), Auxetic Materials: Functional Materials and Structures from Lateral Thinking! *Adv. Mater.*, 12: 617-628. doi:[10.1002/\(SICI\)1521-4095\(200005\)12:9<617::AID-ADMA617>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4095(200005)12:9<617::AID-ADMA617>3.0.CO;2-3)

SCARPA, F. Auxetic materials for bioprotheses. *IEEE signal processing magazine*. 2008, roč. 25, č. 5, s. 128, 125-126.

Fundamentals and applications of nanophotonics. Editor Joseph W. HAUS. Amsterdam: Elsevier, 2016. series in electronic and optical materials (Woodhead publishing). ISBN 978-1-78242-464-2.

MCEVOY, M. A. a N. CORRELL. *Materials that couple sensing, actuation, computation, and communication*. *Science* [online]. 2015, 347(6228), 1261689-1261689 [cit. 2020-06-12]. DOI: 10.1126/science.1261689. ISSN 0036-8075. Dostupné z: <https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.1261689>

GREGUCIR, Leo. Digital Light Processing 3D Printing Explained. Wevolver [online]. 2019 [cit. 2020-06-30]. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/digital.light.processing.3d.printing.explained>

PENNEC, Yan, Jérôme O. VASSEUR, Bahram DJAFARI-ROUHANI, Leonard DOBRZYŃSKI a Pierre A. DEYMIER. Two-dimensional phononic crystals: Examples and applications. *Surface Science Reports* [online]. 2010, **65**(8), 229-291 [cit. 2020-07-03]. DOI: 10.1016/j.surfrep.2010.08.002. ISSN 01675729. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167572910000555>

MIYASHITA, Toyokatsu. Sonic crystals and sonic wave-guides. *Measurement Science and Technology* [online]. 2005, **16**(5), R47-R63 [cit. 2020-07-03]. DOI: 10.1088/0957-0233/16/5/R01. ISSN 0957-0233. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/16/5/R01>

Bulk modulus. In: Wikipedia [online]. 2016 [cit. 2020-06-29]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Bulk_modulus

Selective Laser Sintering. In: 3D-tisk.cz: Aditivní výroba & Rapid prototyping [online]. Vydavatelství Nová média, s. r. o., 2014 [cit. 2020-06-29]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/selective-laser-sintering/>

FOZDAR, D. Y., P. SOMAN, J. W. LEE, L. HAN a S. CHEN. Three-dimensional polymer constructs exhibiting a tunable negative poisson's ratio. *Advanced Functional Materials*. 2011, roč. 21, č. 14, s. 2712–2720. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adfm.201002022>

REN, Xin, Raj DAS, Phuong TRAN, Tuan Duc NGO a Yi Min XIE. Auxetic metamaterials and structures: a review. *Smart Materials and Structures* [online]. 2018, **27**(2) [cit. 2020-07-04]. DOI: 10.1088/1361-665X/aaa61c. ISSN 0964-1726. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-665X/aaa61c>

SALAH, Muhja, Lobat TAYEBI, Keyvan MOHARAMZADEH a Farhad B. NAINI. Three-dimensional bio-printing and bone tissue engineering: technical innovations and potential applications in maxillofacial reconstructive surgery. *Maxillofacial Plastic and Reconstructive Surgery* [online]. 2020, **42**(1) [cit. 2020-07-11]. DOI: 10.1186/s40902-020-00263-6. ISSN 2288-8586. Dostupné z: <https://jkampr.springeropen.com/articles/10.1186/s40902-020-00263-6>

WANG, Yue, Zhiyao XU, Dingdi WU a Jiaming BAI. Current Status and Prospects of Polymer Powder 3D Printing Technologies. *Materials* [online]. 2020, **13**(10) [cit. 2020-07-11]. DOI: 10.3390/ma13102406. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/10/2406>

TAMAY, Dilara Goksu, Tugba DURSUN USAL, Ayse Selcen ALAGOZ, Deniz YUCEL, Nesrin HASIRCI a Vasif HASIRCI. 3D and 4D Printing of Polymers for Tissue Engineering Applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* [online]. 2019, 7 [cit. 2020-07-11]. DOI: 10.3389/fbioe.2019.00164. ISSN 2296-4185. Dostupné z: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fbioe.2019.00164/full>

WANG, Chong, Wei HUANG, Yu ZHOU, et al. 3D printing of bone tissue engineering scaffolds. *Bioactive Materials* [online]. 2020, 5(1), 82-91 [cit. 2020-07-11]. DOI: 10.1016/j.bioactmat.2020.01.004. ISSN 2452199X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2452199X20300049>

Chiral honeycomb structure. In: *Wikipedia* [online]. Dostupné z: http://soft-matter.seas.harvard.edu/index.php/File:Chiral_honeycomb.png

Selective laser sintering schematic. In: *Researchgate* [online]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-Selective-Laser-Sintering_fig1_329625918

RANT, Darja a Tatjana RIJAVEC. Triangular auxetic structure. In: *SemanticScholar* [online]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Auxetic-textiles.-Rant-Rijavec/dc9f9e1015991ad39d99d5df4aaca6695533f408/figure/1>

Auxetic structure. In: *SemanticScholar* [online]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Review-of-Mechanics-and-Applications-of-Auxetic-Mir-Ali/8b749fb6c6c428cd21a02e6253316c36a9562070/figure/1>