

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie



Bakalářská práce

Prototypová výroba pomocí 3D tisku

Petr Šesták

© 2024 ČZU v Praze

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Petr Šesták

Technika a technologie v dopravě a spojích
Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Prototypová výroba pomocí 3D tisku

Název anglicky

3D printing in prototyping

Cíle práce

Cílem práce je provést literární rešerši v oblasti zkoušení 3D vytištěných objektů. Popis základních zkoušek mechanických vlastností, způsoby tisku a zkoušení zkušebních objektů metodou 3D tisku. Popsat samotný postup i výhody a nevýhody různých metod 3D tisku.

Metodika

- 1) Úvod
- 2) Stavba polymerních materiálů
- 3) Filamenty pro 3D tisk a jejich vlastnosti
- 4) Mechanické zkoušky 3D výtisků
- 5) Porovnání nákladů na prototyp z 3D tisku oproti jiným metodám
- 6) Závěr

Doporučený rozsah práce

40 stran

Klíčová slova

3D tisk, filament, prototyp, náklady

Doporučené zdroje informací

- DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Vysoká škola chemicko-technologická, 1995.
- EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. Scientia, 2009.
- FERRY, John D. Viscoelastic properties of polymers. John Wiley & Sons, 1980.
- GARCÍA-DOMÍNGUEZ, Amabel, et al. Considerations on the applicability of test methods for mechanical characterization of materials manufactured by FDM. Materials, 2020, 13.1: 28.
- GARZON-HERNANDEZ, S., et al. Design of FDM 3D printed polymers: An experimental-modelling methodology for the prediction of mechanical properties. Materials & Design, 2020, 188: 108414.
- LANDEL, Robert F.; NIELSEN, Lawrence E. Mechanical properties of polymers and composites. CRC Press, 1993.
- MLEZIVA, Jaroslav. Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití. Sobotáles, 2000.
- VAN KREVELEN, Dirk Willem; TE NIJENHUIS, Klaas. Properties of polymers: their correlation with chemical structure; their numerical estimation and prediction from additive group contributions. Elsevier, 2009.
- WARD, Ian M.; HADLEY, Dennis W. An introduction to the mechanical properties of solid polymers. John Wiley & Sons Ltd.; John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- WARD, Ian M.; SWEENEY, John. Mechanical properties of solid polymers. John Wiley & Sons, 2012.
-

Předběžný termín obhajoby

2023/2024 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Rostislav Chotěborský, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 19. 1. 2022

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2022

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 14. 03. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci " Prototypová výroba pomocí 3D tisku " jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31.3.2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu doc. Ing. Rostislavu Chotěborskému, Ph.D. za odborné vedení práce, věcné připomínky, rady a trpělivost při zpracování bakalářské práce.

Prototypová výroba pomocí 3D tisku

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou prototypové výroby pomocí 3D tisku. 3D tisk se v posledních letech stal stěžejní technologií v oblasti prototypování díky své schopnosti rychle a efektivně vytvářet komplexní a přesné objekty. Cílem práce je provést analýzu současných metod a technologií využívaných v prototypové výrobě pomocí 3D tisku a zhodnotit jejich přínosy a omezení.

Klíčová slova: 3D tisk, využití, výhody, metody, filament, prototyp

3D printing in prototyping

Abstract

This bachelor thesis deals with the issue of prototype manufacturing using 3D printing. In recent years, 3D printing has become a key technology in prototyping due to its ability to rapidly and efficiently create complex and precise objects. The aim of the thesis is to conduct an analysis of current methods and technologies used in prototype manufacturing using 3D printing and to evaluate their benefits and limitations.

Keywords: 3D printing, utilization, advantages, methods, filament, prototype

Obsah

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1 | Úvod | 1 |
| 2 | Cíl práce a metodika | 2 |
| 2.1 | Cíl práce | 2 |
| 2.2 | Metodika..... | 2 |
| 3 | Historie | 3 |
| 4 | Využití | 5 |
| 4.1 | Strojírenství | 5 |
| 4.2 | Zdravotnictví | 7 |
| 4.3 | Design a architektura..... | 9 |
| 5 | Výhody a nevýhody 3D tisku | 11 |
| 5.1 | Výhody | 11 |
| 5.2 | Nevýhody | 12 |
| 6 | Stavba polymerních materiálů | 13 |
| 6.1 | Rozdělení a charakteristika polymerů | 14 |
| 6.2 | Základní způsoby výroby polymerů..... | 16 |
| 6.3 | Tvary polymerů | 17 |
| 7 | Filamenty pro 3D tisk a jejich vlastnosti | 18 |
| 7.1 | ABS | 19 |
| 7.2 | PLA | 20 |
| 7.3 | Nylon..... | 21 |
| 7.4 | TPE..... | 22 |
| 7.5 | PC..... | 23 |
| 8 | Mechanické zkoušky 3D výtisků | 24 |
| 8.1 | Zkouška tvrdosti..... | 24 |
| 8.2 | Zkouška tahem | 25 |
| 8.3 | Zkouška houževnatosti | 27 |
| 9 | Porovnání nákladů na prototyp z 3D tisku oproti jiným metodám | 28 |
| 10 | Závěr | 30 |
| 11 | Bibliografie | 31 |
| 12 | Seznam obrázků | 36 |
| 13 | Seznam tabulek | 36 |

1 Úvod

V dnešní době v průmyslovém a technologickém odvětví hraje prototypová výroba klíčovou roli ve vývoji a inovaci produktů. S nástupem nových moderních technologií se metody stále vyvíjejí a 3D tisk se stává důležitým nástrojem ve vývoji všech produktů. Tato metoda má významný dopad a přináší řadu výhod a inovací napříč různými odvětvími. Tato bakalářská práce se zabývá několika základními aspekty spojenými s 3D tiskem a jeho aplikací.

Tato bakalářská práce je rozdělena do teoretické a praktické části. Na začátku teoretické části je historie, následně využití a poté výhody a nevýhody 3D tisku a stavba polymerních materiálů. V další části jsou popsány Filamenty pro 3D tisk a jejich vlastnosti. Tato část se zabývá rozdělením a jejich specifickými vlastnostmi, jako je pevnost a flexibilita.

V poslední teoretické části této části práce se zabýváme mechanickými zkouškami 3D výtisků. Tato sekce analyzuje různé postupy a metody. V praktické části této práce je porovnání nákladů 3D tisku oproti jiným metodám. Zde je porovnání a zhodnocení nákladů spojené s výrobou 3D tisku ve srovnání s tradičními metodami výroby prototypů.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Cílem práce je provést rešerši v oblasti 3D tisku. Popsat výhody a nevýhody této technologie, historie, možnosti využití, podívat se na základní stavbu a rozdělení polymerů, na některé základní filameny pro 3D tisk, mechanické zkoušky a v posledním případě porovnat náklady na 3D tisk oproti jiným metodám.

2.2 Metodika

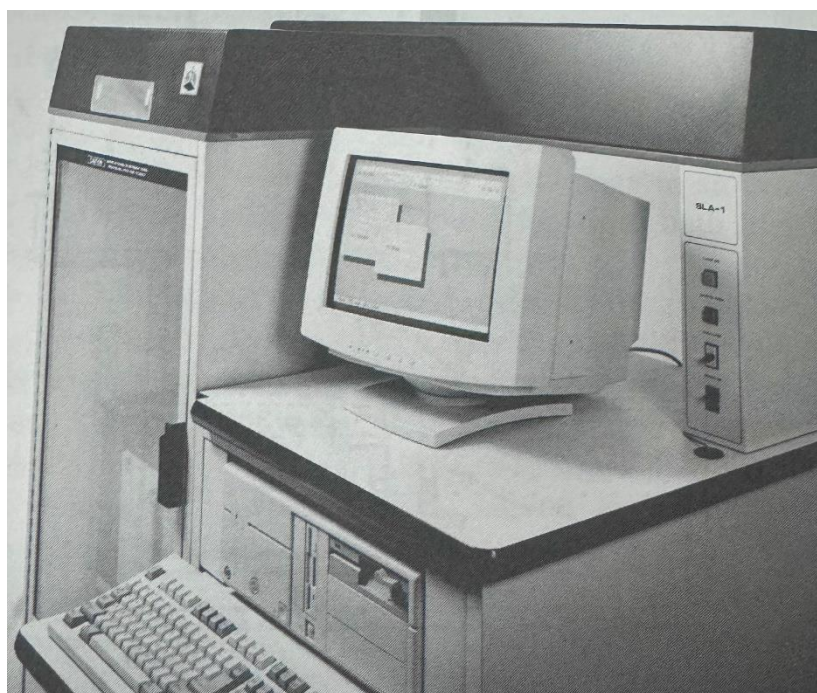
Je vypracována systematická literární rešerše, ve které je zmapován a popsán současný stav možností 3D tisku a způsoby jeho využití, Rešerše je doplněna o celkové výhody a nevýhody 3D tisku, ale také o vybrané filameny. Je vysvětlena základní stavba rozdělení polymerů.

3 Historie

Historie 3D tisku sahá až do poloviny 80. let 20. století a je spojena s různými vynálezy a inovacemi v oblasti aditivní výroby.

V roce 1980 Hideo Kodama podal jako první žádost o patent, objevil fotopolymerní rychlý prototypový systém (Rapid Prototyping). Účel spočíval ve využití fotopolymerního materiálu vystaveného UV záření, které tento materiál vytvrdilo. Bohužel kvůli nedostatečné specifikaci patent nedostal.[1]

O šest let později Charles Hull dostal patent, který nazval stereolito-grafií. Využíval tekutého polymeru s laserovým paprskem. Poté založil firmu s názvem 3D Systems a vyrobil první komerční přístroj pro 3D tisk. Nazval ji „stereolitografní aparát SLA-1“ (Obrázek 1), název 3D tiskárna byl v té době ještě neznámý. Tento přístroj nebyl volně prodejný, byla to úplně nová technologie, a sloužil jen pro pár vybraných zákazníků.[2]



Obrázek 1- První komerční tiskárna SLA-1 [3]

Díky novým poznatkům od zákazníků firma 3D Systems vyrobila nový prototyp 3D tiskárny a pojmenovala ho SLA-250 (Obrázek 2). Tato tiskárna byla k prodeji široké veřejnosti od roku 1988. První provizorní tiskárnu firmy 3D Systems si můžeme prohlédnout ve Fordově muzeu v Dearborn v Michiganu. V roce 1996 měla tato firma prodaných 600 SLA přístrojů a patřila mezi největší na trhu.[4]



Obrázek 2- 3D Tiskárna SLA-250 [4]

Počátky 3D tisku byly, podobně jako u všech nových technologií, pomalé. Používaly se jednoduché materiály a vytvářely se pouze základní objekty. Využívání 3D tiskáren bylo finančně náročné a samotný tisk trval velmi dlouhou dobu, často i několik dní. Postupně se však 3D tisk začal rozvíjet a šířit a dnes je široce přístupný i pro domácí použití.

Během této doby vznikla technologie SLS (Selective Laser Sintering), což je metoda 3D tisku s využitím laseru, kterou v roce 1987 vynalezl Carl Deckard. Jeho první zařízení bylo nazváno „Betsy“. V roce 1989 S. Scott Crump přišel s technologií FDM (Fused Deposition Modeling), která využívá polymerní vlákna a je velmi populární i dnes. V roce 1993 Massachusettský technologický institut (MIT) vyvinul techniku tisku s materiálem ve formě prášku a nechal si ji patentovat. Tento patent později odkoupila společnost Z Corporation, a jejich tiskárny se staly základem pro dnešní zařízení.[5]

Teprve v druhé polovině 90. let začal nabývat obliby pojem 3D tiskárna.

V roce 2004 Adrian Bowyer, odborný asistent na University of Bath v Anglii, zahájil projekt RepRap (Replicating Rapid Prototyper). Jeho cílem bylo zpřístupnit 3D tisk pro veřejnost a rozšířit tuto technologii po celém světě. Zlom přišel v roce 2007, kdy 3D tisk získal na popularitě.[6]

Nizozemská společnost Shapeways (následně i v USA) v roce 2008 začala poskytovat služby 3D tisku veřejnosti. Zákazníci mohli poskytnout své vlastní soubory, které tato společnost následně vytiskla.

Až v lednu 2009 se na trhu objevila první 3D tiskárna pro komerční prodej ve formě stavebnice. Tato tiskárna nesla název BfB RapMan 3D. Následně v dubnu téhož roku společnost MakerBot uvedla na trh další tiskárnu založenou na konceptu RepRap. MakerBot také rozšířil online knihovnu souborů Thingiverse, kde zákazníci mohli stahovat a ukládat 3D modely k tisku. Od roku 2009 se na trhu objevovalo stále více 3D tiskáren a tento trend pokračuje dodnes.[5]

Významným hráčem v oblasti 3D tisku je český výrobce Prusa Research, který vytváří populární řady 3D tiskáren. Tato společnost se stala důležitým hráčem v oboru 3D tisku a jejich tiskárny jsou mezi uživateli po celém světě velmi oblíbené pro svou spolehlivost a dostupnost.[3][5]

4 Využití

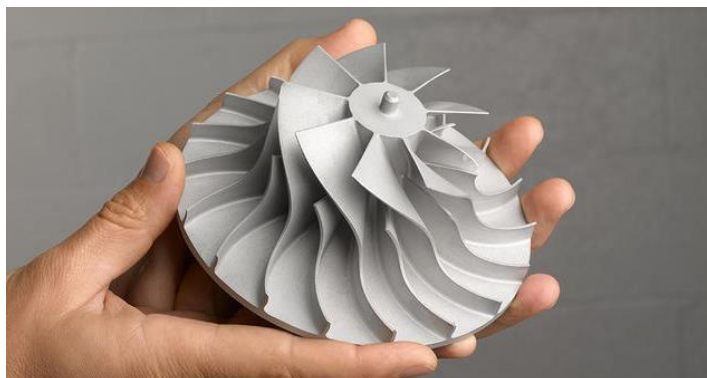
Technologie 3D tisku je v současnosti nedílnou součástí mnoha odvětví díky své flexibilitě vytvářet složité a precizní objekty z široké škály materiálů. Tato inovativní metoda výroby se stala nepostradatelným nástrojem v různých sektorech, kde poskytuje široké možnosti a výhody pro různé aplikace. Níže je popsáno několik oblastí, kde se technologie 3D tisku běžně uplatňuje a zaznamenává významný dopad a inovace.[7]

4.1 Strojírenství

Využití 3D tisku ve strojírenství je široké a mnohostranné, což přináší významné inovace a změny ve způsobu výroby a návrhu v této oblasti. Níže jsou uvedeny některé z hlavních oblastí, kde se technologie 3D tisku využívá ve strojírenství.

Rychlé prototypování (Rapid prototyping)

Umožňuje inženýrům a designérům vytvářet rychlé prototypy nových komponent, dílů nebo celých zařízení s vysokou přesností a relativní rychlostí. To poskytuje možnost testovat a ověřovat nové koncepty a návrhy před jejich výrobou v masovém měřítku a tím dokáže ušetřit mnoho času a peněz. Například výrobu oběžného kola (viz. Obrázek 3), které je na výrobu konvenční technikou (např. CNC) velmi drahé. [7][8]



Obrázek 3- Oběžné kolo [9]

Výroba dílů

V průmyslovém strojírenství se 3D tisk často využívá pro výrobu složitých a specifických dílů nebo součástí, které by jinak byly obtížné nebo nákladné vyrobit tradičními výrobními metodami. Tím se snižují časové a finanční náklady na výrobu a zvyšuje se flexibilita v návrhu dílů.[8]

Optimalizace designu

3D tisk umožňuje vytvářet struktury a geometrie, které jsou obtížné nebo nemožné vyrobit jinými způsoby. Tím se otevírají možnosti pro vytváření lehčích a pevnějších komponent, optimalizovaných pro konkrétní použití.[10]

Nástroje a výrobní zařízení

3D tisk se využívá k vytváření nástrojů, šablon a výrobních zařízení, což zahrnuje formy a další pomocné prostředky potřebné pro výrobu a montáž produktů jako je například kontrola tvaru, jak je vidět na Obrázek 4.[11]



Obrázek 4- Přípravek pro kontrolu tvaru [12]

4.2 Zdravotnictví

Tato technologie prošla rychlým vývojem, kdy ještě nedávno byla v lékařských oborech spíše ve fázi experimentování a objevování možností. Dnes se však stala běžně využívanou metodou nejen v operačních sálech, ale i v zubních ordinacích.[13][14]

Stomatologie

Technologie 3D tisku ve stomatologii umožňuje vytvářet přesné dentální modely podle skenů pacientových úst, což zlepšuje plánování léčby a výrobu zubních náhrad. 3D tisk se využívá i pro výrobu individuálních protetických zařízení, jako jsou implantáty (viz Obrázek 5), korunky nebo snímatelné náhrady, což zvyšuje pohodlí pacientů. Zubaři díky této technologii tak mohou lépe plánovat a vizualizovat i složité chirurgické zákroky. Technologie 3D tisku tak minimalizuje riziko chyb a současně umožňuje vyrábět speciální nástroje pro zvýšení efektivity léčby.[15][14]



Obrázek 5- Model chrupu [16]

Implantáty

Implantáty, klouby a kostní náhrady (viz. Obrázek 6) jsou díky 3D tisku využívány na operačních sálech, kde lékaři vytvářejí a vyrábějí náhrady pro různé anatomické části pacientova těla. Konkrétně jsou tisknuty implantáty pro klouby, jako jsou kolena či kyčle, segmenty lebky a jiné ortopedické prostředky. Přestože klasické výrobní postupy pro výrobu implantátů stále existují, 3D tisk nabízí řadu výhod. Tento způsob výroby umožňuje lékařům relativně rychle navrhnout a vyrobit implantát přizpůsobený specifickým potřebám konkrétního pacienta, což může vést k jeho efektivnímu a plnohodnotnému využití jako náhrady poškozené

části těla. Využití produktů z 3D tisku má vliv i na záchranu pacientů trpících vzácnými onemocněními, kteří by jinak čekali dlouhé období na dodání specifického a přizpůsobeného implantátu. Tato technologie také eliminuje vysoké náklady spojené s ruční výrobou individuálních implantátů, což pacientům přináší efektivní a dostupnou alternativu.[15][4][16]



Obrázek 6- Ukázka 3D vytištěné titanové kyčelní náhrady [15]

Protézy

V oblasti zdravotnického 3D tisku jsou protézy, sloužící jako dlouhodobá náhrada lidské končetiny, považovány za zásadní technologický pokrok. Nejčastěji se tento koncept vztahuje k protézám nohy (Obrázek 7), kdy odborníci vytvářejí na míru přizpůsobenou protézu pro pacienta s hendikepem, s ohledem na jeho specifické potřeby a estetické preference. Využití 3D tisku umožňuje přizpůsobit protézu jednotlivci s ohledem na jeho unikátní anatomii, což vede k maximalizaci funkčnosti a estetické podobnosti s reálnou končetinou. Oproti standardní výrobě se zde uplatňuje výhoda nižších nákladů na výrobu, neboť technologie 3D tisku umožňuje vytvořit protézu za výrazně nižší náklady než tradiční výrobní metody.[15][4][18]



Obrázek 7- Modely dolních končetin [17]

Modely a učební pomůcky

3D tisk přináší významnou pomoc nejen pacientům, ale také lékařskému personálu. Jedna z výhod spočívá v možnosti vytvářet modely anatomických struktur lidského těla (Obrázek 8), které slouží jako výukové a tréninkové nástroje pro studenty medicíny a pro zkušené chirurgy při přípravě na komplexní chirurgické zákroky. Tyto modely poskytují realističtější a detailnější vizualizace než statické obrázky v tradičních učebnicích, což významně zlepšuje vzdělávací proces a přípravu lékařského personálu na praktické lékařské situace. Tato technologie tak překračuje běžné metody výuky a tréninku v lékařském prostředí.[4][16]



Obrázek 8- Učební pomůcka pro výuku [19]

4.3 Design a architektura

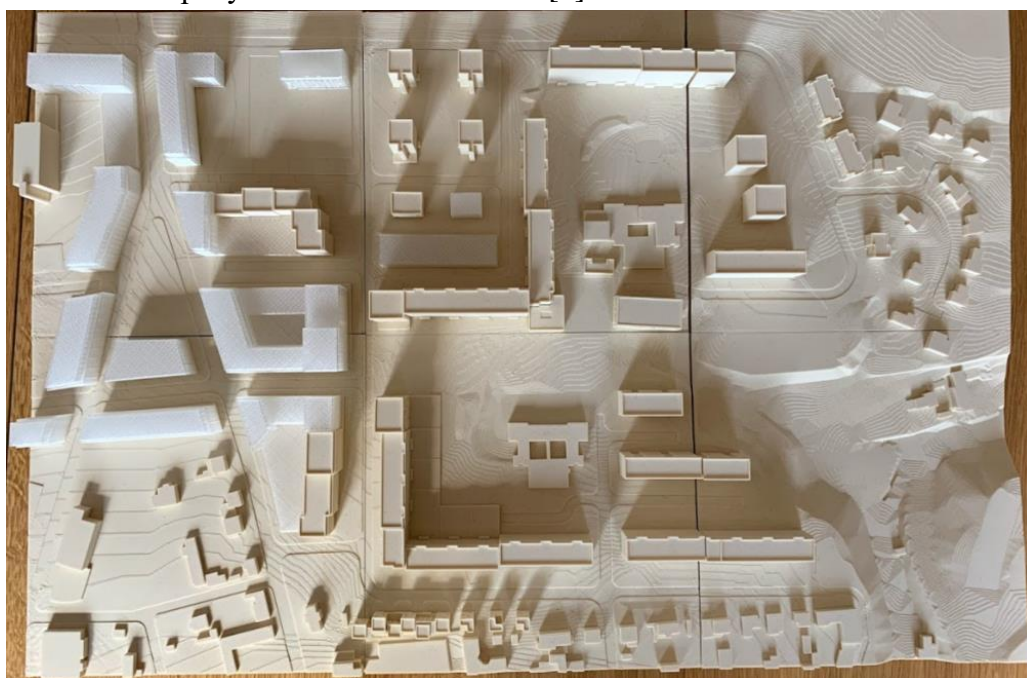
Design a architektura spojené s 3D tiskem představují klíčové oblasti, kde se inovativní technologie stává zásadním prvkem pro kreativitu a efektivitu. Tato spojitost otevírá dveře k novým možnostem ve tvorbě a realizaci projektů, a to jak pro profesionály, tak i pro studenty těchto oborů.[20][4]

Kreativní design

3D tisk umožňuje architektům a designérům realizovat své nápady a inovace v tvorbě unikátních a složitých struktur, které byly dříve obtížné nebo nemožné vyrobit tradičními metodami. To zahrnuje organické tvary, geometrické struktury a jiné designové prvky.[16]

Detailní modely a makety

3D tisk umožňuje vytvoření detailních modelů budov, městských plánů, urbanistických a krajinářských návrhů (Obrázek 9) s vysokou přesností. Tato vizualizace pomáhá architektům lépe prezentovat své nápady klientům a investorům.[4]



Obrázek 9- Urbanistický model architekta Pavla Hniličky [21]

Individuální prvky

Architekti mohou využívat 3D tisk k výrobě specifických a přizpůsobených architektonických prvků, jako jsou ornamenty nebo modely interiérů, což přináší unikátní a individualizované designové prvky do stavby.[14]

Udržitelnost a efektivita

3D tisk umožňuje minimalizovat odpad a optimalizovat využití materiálů, což přispívá k udržitelnosti a efektivitě v procesu výroby. Výhodou některých metod tisku je znovu použití materiálu, jako je například Prusament PLA Recycled (Obrázek 10). Tato vlastnost, poskytuje nejen architektům a designérům nástroje pro kreativní vyjádření a inovace v oboru.[22]



Obrázek 10- Výtisky z recyklovaného materiálu Prusament PLA Recycled [23]

5 Výhody a nevýhody 3D tisku

5.1 Výhody

Rychlost a flexibilita

Díky této technologii je možné rychle a efektivně vytvářet různé objekty a prototypy bez nutnosti dlouhého čekání na jejich výrobu. 3D tisk umožňuje snadnou úpravu, což zvyšuje flexibilitu výrobního procesu a umožňuje rychlé reakce na změny požadavků nebo potřeb zákazníka.[4][24][10]

Přizpůsobení výrobků

Díky možnosti využití specifických surovin, moderních 3D tiskáren a přesného modelu je možné vyrábět širokou škálu objektů s ohledem na konkrétní požadavky a preference. Tento proces umožňuje vytvoření produktů s individuálním charakterem a specifikacemi, které jsou plně přizpůsobeny potřebám uživatele. Nezávislost na hmotnosti, tvaru nebo složitosti výrobku umožňuje tisk libovolných forem a uspokojení širokého spektra požadavků zákazníka. Takový přístup k výrobě podporuje inovaci a kreativitu a poskytuje možnost účinného řešení různých problémů v průmyslu a designu.[4]

Ekonomická efektivnost

Přestože počáteční investice do tiskového zařízení mohou být značné, celkové úspory ve formě pracovní síly, času a úsilí jak při malovýrobě, tak při masové výrobě, zajišťují, že celkové výrobní náklady jsou relativně nízké. Tato finanční výhoda 3D tisku vytváří příznivé prostředí pro podnikání a umožňuje firmám efektivně konkurovat na trhu.[24]

Eliminace skladovacích nákladů

Díky schopnosti 3D tiskáren vytvářet produkty na vyžádání a s cenovou konkurenceschopností ve srovnání s hromadnou výrobou není potřeba ukládat zásoby zboží. Tento faktor eliminuje náklady spojené se skladováním a skladovacími prostory, což přináší další úspory a optimalizaci nákladů pro podniky.[4]

Růst pracovních příležitostí

Rozsáhlé využití technologie 3D tisku způsobuje zvýšenou poptávku po odbornících v oblasti designu, konstrukce a technických dovedností potřebných k obsluze 3D tiskáren a tvorbě plánů pro výrobu produktů. Tento trend vytváří nové pracovní příležitosti a stimuluje rozvoj pracovních trhů v oblastech spojených s inovativními technologiemi.[4]

5.2 Nevýhody

Problematika duševního vlastnictví

Jednoduchost, s jakou lze vytvářet repliky pomocí 3D technologie, vyvolává otázky ohledně práv duševního vlastnictví. Snadná dostupnost modelů zdarma přitahuje organizace, které dosud neměly komerční zájmy, k využití této nové technologie pro generování zisku. Tento jev vytváří dilema týkající se ochrany intelektuálního vlastnictví a vyžaduje pečlivé zvážení legislativních a právních opatření k řešení této problematiky.[4]

Neregulovaná výroba nebezpečných předmětů

První funkční zbraň vytištěná pomocí 3D technologie ukázala, jak snadné je vytvořit vlastní zbraň, pokud máte přístup k vhodnému návrhu a 3D tiskárně. Tento případ zdůrazňuje potenciální rizika spojená s neregulovanou produkcí nebezpečných předmětů. V reakci na tuto situaci budou vlády nuceny vypracovat strategie a opatření ke kontrole tohoto rizikového trendu a minimalizaci jeho potenciálních negativních dopadů.[4]

Omezení rozměrů

Jedním z významných omezení současné technologie 3D tisku je její limitovaná schopnost vytvářet velmi velké objekty. Zatímco 3D tiskárny jsou schopny vytvářet komplexní a detailní výrobky, jejich kapacita je omezena velikostí tiskacího prostoru. Tento fakt znamená, že výroba extrémně velkých předmětů, jako jsou například nábytkové kusy nebo stavební komponenty, není s aktuálními 3D tiskárnami možná. Tento limit omezuje rozsah možností využití technologie 3D tisku v oblastech, které vyžadují produkci velkých a objemných předmětů, a vyžaduje další inovace a vývoj ve směru zvětšení tiskacích prostorů a zlepšení schopnosti tiskáren zvládat větší rozměry výrobků.

Omezení surovin

V současné době 3D tiskárny disponují omezeným sortimentem materiálů, které mohou zpracovávat, obvykle se jedná o kolem stovky různých typů. Tento počet je zanedbatelný ve srovnání s bohatým spektrem materiálů používaných v tradiční výrobě. Existuje potřeba dalšího výzkumu a vývoje, který by vedl k identifikaci nových metod a materiálů pro 3D tištěné výrobky, jež by poskytovaly vyšší odolnost a robustnost.[24]

Náklady na tiskárny

I přes pokrok v technologii zůstává počáteční pořizovací cena 3D tiskáren nadále poměrně vysoká. Různé typy objektů vyžadují specifické druhy 3D tiskáren, což dále přispívá k celkovým nákladům. Například tiskárny, které umožňují tisk vícebarevných objektů, jsou obvykle dražší než ty, které pracují s jednobarevným tiskem. Kromě základních FDM tiskáren, které jsou nejběžnější, existují i další technologie, jako jsou SLA, SLS nebo DLP tiskárny, které mají svá specifika a jsou dražší na pořízení.[4]

6 Stavba polymerních materiálů

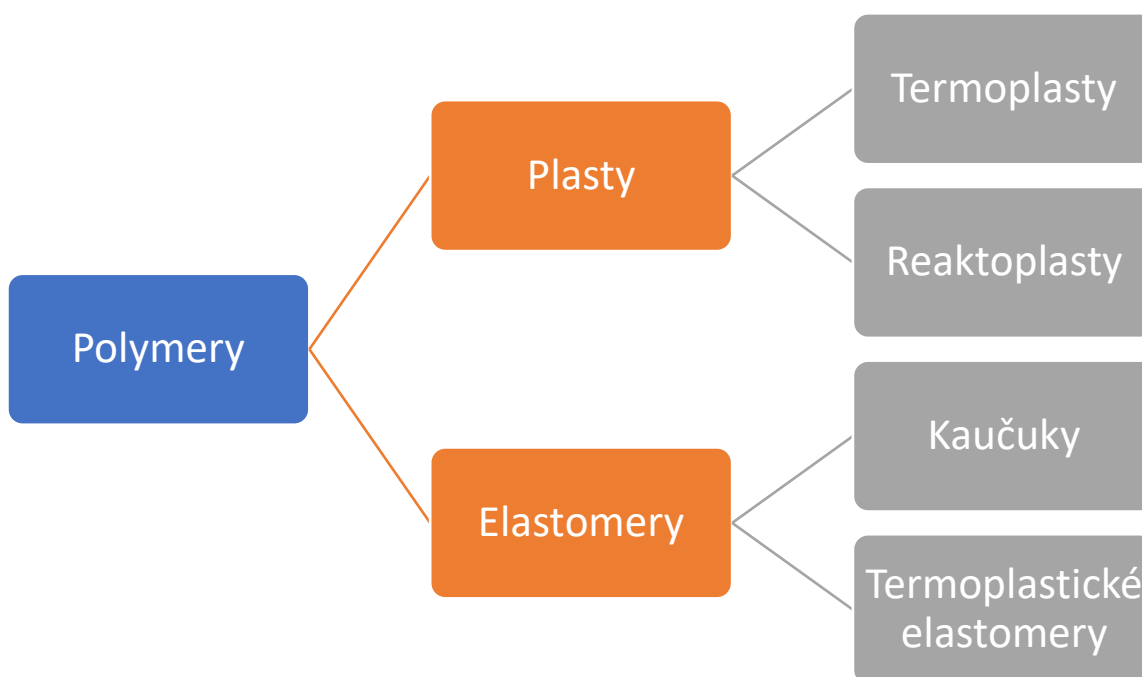
Stavba polymerních materiálů představuje klíčový prvek pro pochopení a aplikaci technologie 3D tisku. Polymerové materiály tvoří základní stavební bloky většiny tištěných objektů a jejich vlastnosti mají významný vliv na konečný výsledek tisku. Syntetické polymery (nesprávně označované jako umělé hmoty) jsou vytvářeny spojením nízkomolekulárních látek nazývanými monomery skrze tři hlavní chemické procesy, známé jako polyreakce. (polymerace, polykondenzace a polyadice) Tyto procesy jsou opakované chemické reakce, ve kterých se monomery spojují, čímž vznikají vysokomolekulární polymery. K polyreakci dochází, když má monomer ve své molekule minimálně dvě funkční skupiny, které mohou

reagovat. Více funkčnost monomeru může být způsobena přítomností násobných vazeb, což umožňuje monomerům reagovat a vytvářet tak násobně dlouhé řetězce za vzniku makromolekul.

Polymer – makromolekulární látka přírodního nebo syntetického původu vytvořená mnohonásobným opakováním malých molekul monomerů vázaných mezi sebou.

Monomer – výchozí nízkomolekulární látka pro výrobu polymeru.[25][26]

6.1 Rozdělení a charakteristika polymerů



Plasty jsou materiály, které se v důsledku vnějších sil deformují a většinou zůstávají deformované trvale, což znamená, že se nevracejí do své původní podoby. Za normálních podmínek jsou často tvrdé a náchylné k lámání. Na základě jejich chování při zahřívání se dělíme na termoplasty a reaktoplasty.[27]

Termoplasty jsou materiály, které se při zahřívání změkčují a stávají se plastickými, což umožňuje jejich tvarování. Při dosažení taveného stavu, který nastává při překročení teploty tání, jsou schopny být formovány. Po ochlazení pod tuto teplotu se znovu stávají tuhými. Během zahřívání neprobíhá žádná chemická reakce a jejich chemická struktura zůstává nezměněna. Změny, které tyto materiály procházejí, jsou pouze fyzikálního charakteru, a proces změkčení a ztuhnutí je reverzibilní, což znamená, že by teoreticky mohl být opakován donekonečna. Mezi typické příklady termoplastů patří polyethylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS), polyvinylchlorid (PVC) a další.[26][28]

Reaktoplasty jsou materiály, které jsou schopny být tvarovány a formovány pouze po omezenou dobu po zahřátí. Po dalším zahřívání nebo za použití katalyzátorů dochází k chemické reakci, během které se původní molekuly spojují do sítě a materiál se stává netavitelným a nerozpustným. Tato chemická reakce, která vede ke vzniku zesíťované struktury, se nazývá vytvrzování. Jedná se o nevratný proces a materiál po vytvrzení nelze opět tvarovat, svařovat ani přeměnit do taveniny. Výrobky z reaktoplastů jsou charakterizovány vysokou chemickou a tepelnou odolností, tvrdostí a tuhostí. V nevytvrzeném stavu se tento typ materiálu obvykle nazývá pryskyřice, například fenol-formaldehydová pryskyřice (PF), epoxidová pryskyřice (EP), polyesterová pryskyřice (UP) a podobně.[26][28]

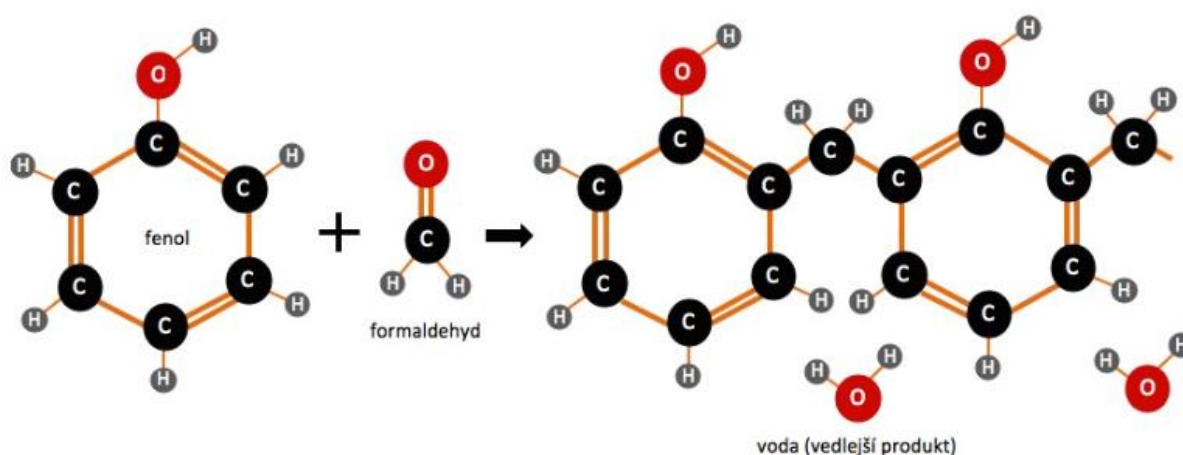
Elastomery jsou materiály, které se vyznačují vysokou pružností a nízkou tuhostí, což znamená, že se za normálních podmínek mohou silně deformovat malou silou bez trvalého poškození. Tato deformace je převážně reverzibilní, což znamená, že se materiál může vrátit do své původní podoby po odstranění síly. Kaučuky jsou typickým příkladem elastomerů, které se při vulkanizaci, (často pomocí síry), mění na pryže. Pryž, jako vulkanizovaný elastomer, obsahuje chemické vazby mezi makromolekulami, které vytvářejí prostorovou síť, což jí dává vysokou pružnost a odolnost proti trvalé deformaci.[27]

Termoplastické elastomery (TPE) mají vlastnosti velmi podobné pryžím. Jejich struktura kombinuje tvrdé a měkké segmenty, kde měkké segmenty tvoří elastomery a tvrdé segmenty termoplasty, vytvářející uzly sítě. TPE obsahují zesíťovanou strukturu, což znamená, že při zvýšení teploty se odlišně od pryží přeměňují do tekutého stavu a mohou být zpracovány podobně jako termoplasty. Klíčový rozdíl mezi TPE a pryžemi spočívá v povaze uzlů sítě; u pryží jsou uzly chemické povahy (po vulkanizaci kaučuku), zatímco u TPE jsou fyzikální a obvykle se skládají z nemísitelných termoplastických segmentů rozptýlených ve spojitě elastomerní fázi. I když termoplastické elastomery nedosahují takové elasticity jako pryže, jejich hlavní výhodou je schopnost být zpracovány pomocí běžných strojů pro termoplasty a také možnost jejich recyklace.[27]

6.2 Základní způsoby výroby polymerů

Polymerace je chemická reakce, při které dochází k přímé reakci malých molekul monomeru, které obsahují dvojně vazby. Tyto dvojně vazby v monomeru jsou rozpojovány, což umožňuje vytvoření monomerní jednotky. Následně se tyto monomerní jednotky spojují a jsou schopny vytvořit velkou řetězovitou molekulu polymeru. Tento proces lze přirovnat k navázání ručiček mezi jednotlivými monomerními jednotkami, které se spojují do dlouhého řetězce. Polymery, které jsou takto vytvořeny, jsou obvykle pojmenovány podle použitého monomeru, s předponou "poly-", například polyethylen, polypropylen, polystyren, polyvinylchlorid atd.[25][27][29]

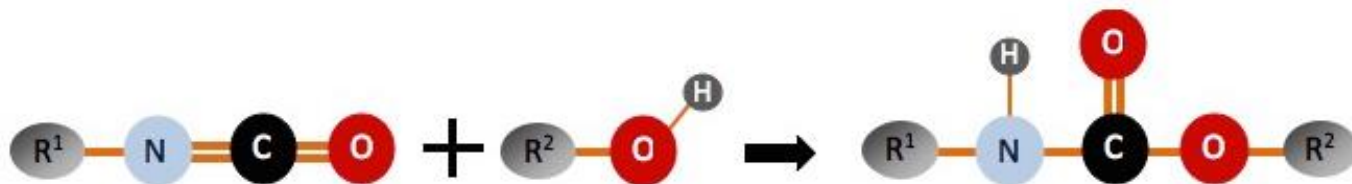
Druhým postupem vedoucím k vytvoření polymerů je proces zvaný **polykondenzace** (Obrázek 11). Během tohoto postupného procesu se molekuly monomerů spojují do dlouhých řetězců, přičemž při každém spojení další monomerní jednotky se uvolní vedlejší produkt, jako je molekula vody, chlorovodík nebo amoniak. V důsledku toho se chemické složení výsledného polymeru liší od výchozích sloučenin, což je odlišuje od procesu polymerace. Rychlost



Obrázek 11- Příklad polykondenzace fenolu a formaldehydu [27]

polykondenzace je obvykle podstatně nižší než rychlost polymerace a může být přerušena v libovolném stádiu, přičemž se může později znovu pokračovat, například při zpracování materiálu na finální výrobek. Takto vytvořené polymery jsou obvykle pojmenovány podle charakteristických chemických skupin, jako jsou polyformaldehydy, polyamidy, polyimidy, polyestery atd.[25][29]

Posledním způsobem tvorby polymerů je **polyadice** (Obrázek 12). Tento postupový proces zahrnuje reakci dvou odlišných typů monomerů obsahujících reaktivní atomové skupiny. Během této reakce není žádný vedlejší produkt, ale vodíkový atom se přenáší z jedné reaktivní skupiny na druhou, čímž dochází k jejich spojování (adici). Polyadice je procesem, který vytváří polymery, jako jsou polyuretany a epoxidové pryskyřice.[27][29]



Obrázek 12- Schéma přípravy polyuretanu (PUR) polyadicí [27]

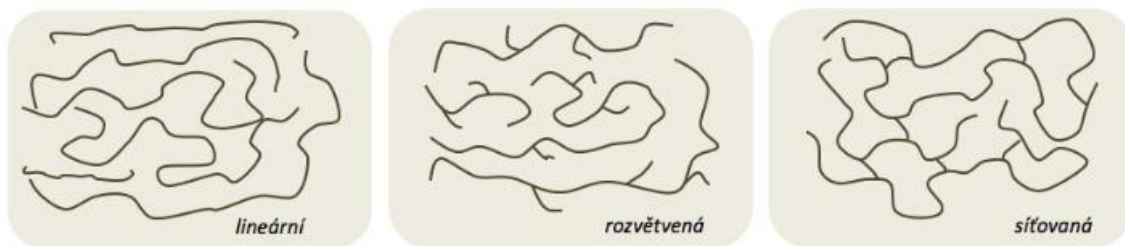
6.3 Tvary polymerů

Makromolekuly mohou mít lineární, rozvětvenou nebo síťovanou strukturu. Lineární struktury jsou podobné nitkám nebo řetězcům perel, zatímco rozvětvené struktury připomínají kořeny stromu. Síťované struktury jsou vzájemně propojeny do trojrozměrné sítě.

Lineární makromolekuly (polymery) (Obrázek 13) jsou tvořeny spojováním monomerních jednotek, které mají dvě funkční skupiny. Pokud jsou použity monomery s více než dvěma funkčními skupinami, mohou vzniknout rozvětvené nebo síťované makromolekuly. Tyto funkční skupiny se mohou snadno vytvořit například rozštěpením jedné ze dvou vazeb, které tvoří dvojnou vazbu v monomeru. (Tabulka 1)[27][25]

Rozvětvené makromolekuly (Obrázek 13) mají na hlavním řetězci připojeny krátké boční substituenty, které omezují pohyblivost této struktury. Přidání těchto bočních řetězců způsobuje vzájemné oddálení mezi makromolekulami, což vede ke snížení mezimolekulárních sil a následně k poklesu mechanické pevnosti, tvrdosti, modulu pružnosti a dalších užitečných vlastností polymeru. (Tabulka 1)[25][27]

Síťované makromolekuly (Obrázek 13) vznikají spojením sousedních řetězců lineárních makromolekul pomocí příčných chemických vazeb na různých místech. Tímto procesem se omezuje pohyblivost celkové struktury makromolekul. Takovéto polymery ztrácejí schopnost rozpouštění a tavení, a naopak získávají zvýšenou tvrdost, modul pružnosti a odolnost vůči teplu. Výsledné vlastnosti materiálu jsou výrazně ovlivněny hustotou příčných vazeb v síti. Síťovaná struktura může vznikat buď přirozeně během chemické reakce, jako je tomu u reaktoplastů, nebo úmyslným dodatečným vytvářením příčných vazeb, například při procesu vulkanizace kaučuku, vytvrzování polyesterových pryskyřic nebo radiálního síťování termoplastů. Tyto změny v síti polymeru významně ovlivňují jeho vlastnosti ve všech směrech. (Tabulka 1)[27][25]



Obrázek 13- Molekulární struktura polymerů [27]

| Lineární | Rozvětvené | Síťované |
|-------------------------|------------------------------|--|
| Vyšší hustota materiálu | Nižší hustota materiálu | Vlastnosti závisí na hustotě sítě. S vyšší hustotou sítě se materiál většinou vyznačuje: |
| Vyšší pevnost | Nižší pevnost | Vysokou pevností |
| Vyšší modul pružnosti | Nižší modul pružnosti | Vysokým modulem pružnosti |
| Nižší tažnost | Vyšší tažnost | Vysokou teplotní odolností |
| Vyšší teplotní odolnost | Nižší teplotní odolnost | Velmi nízkou tažností |
| Dobrá tekutost taveniny | Nižší tekutost taveniny | |
| Snadná krystalizace | Nižší schopnost krystalizace | |

Tabulka 1- Vlastnosti polymerů v závislosti na tvaru [27]

7 Filamenty pro 3D tisk a jejich vlastnosti

Filamenty představují základní stavební kameny pro celý proces 3D tisku a hrají klíčovou roli v dosahování vysoké kvality a přesnosti vytisknutých modelů. Tyto materiály, v podobě vláken, jsou zásadní pro každého uživatele 3D tiskárny, ať už se jedná o profesionály v průmyslu nebo nadšence v domácím prostředí. Rozmanitost dostupných filamentů, jako je ABS, PLA, Nylon, TPE a mnoho dalších, poskytuje uživatelům širokou škálu možností při vytváření tisknutých objektů s různými vlastnostmi.

7.1 ABS

Akrylonitrilbutadienstyren (ABS) je jedním z nejčastěji používaných materiálů pro 3D tisk, zejména ve FDM technologii (Fused Deposition Modeling). Tento materiál je znám svou vysokou mechanickou pevností, odolností a širokou škálou využití v různých odvětvích. Jednou z klíčových vlastností ABS filamentu je jeho amorfni termoplastická struktura, která umožňuje opakované roztavení a krystalizaci bez ztráty kvality materiálu. ABS se vyznačuje vynikající tepelnou odolností a vyšší teplotou tavení ve srovnání s jinými materiály pro 3D tisk, jako je například PLA. Díky příměsi syntetického kaučuku je ABS odolnější proti opotřebení a nárazům. Je také funkční v širokém rozsahu teplot od -20°C do 80°C a odolává různým chemikáliím, včetně kyselin, zásad, alkoholů a olejů. ABS filament je rozpustný v esterech, ketonech, ethylen dichloridu a acetonu, což umožňuje snadnější zpracování a úpravu tištěných dílů. Využití ABS filamentu je rozmanité. Nachází uplatnění při výrobě funkčních prototypů, koncových výrobků, modelů a uměleckých děl. Jeho pevnost, pružnost a odolnost vůči nárazu z něj dělají ideální materiál pro mechanické opracování a povrchovou úpravu. ABS je běžně používán v automobilovém průmyslu, elektrotechnice, výrobě plastových trubek, domácím spotřebičům a hračkách pro děti, například lego (Obrázek 14). Při tisku s ABS filamentem je však třeba vzít v úvahu některé nevýhody (Tabulka 2), jako je uvolňování toxických látek a smrštění materiálu během tisku. Z tohoto důvodu je doporučeno provádět tisk v dobře větraném prostoru a používat uzavřený tiskový prostor. Nicméně, přes tyto potenciální nevýhody, ABS filament zůstává oblíbenou volbou pro mnoho uživatelů 3D tiskáren díky svým vynikajícím mechanickým vlastnostem a širokému spektru aplikací.[15][30][31]

| Výhody | Nevýhody |
|--|--|
| Nízká cena | Smršťování a deformování při kontaktu se vzduchem |
| Odolný vůči nízkým i vysokým teplotám | Nutnost vyhřívání podložky |
| Odolný a houževnatý | Nevhodný při dlouhodobém vystavení v povětrnostních podmínkách |
| Odolný vůči kyselinám, hydroxidům, uhlovodíkům, olejům | Náchylný na změnu teplot |
| Lehce opracovatelný | Při tavení doporučené větrání, vydává pronikavý zápach |

Tabulka 2- Výhody a nevýhody ABS [30]



Obrázek 14- Příklad využití ABS (lego kostka) [32]

7.2 PLA

PLA filament (Obrázek 15) patří mezi jedny z nejoblíbenějších materiálů pro 3D tisk. Jedná se o biologicky rozložitelný termoplast založený na kukuřičném škrobu nebo cukrové třtině. Tento materiál je známý svou jednoduchou tisknutelností, nízkou zápachovou úrovní a přátelským vlivem na životní prostředí. Jednou z klíčových vlastností PLA filamentu je jeho biodegradabilita, což znamená, že se při likvidaci rozkládá na přírodní složky. To činí PLA ideálním materiálem pro ty, kteří se zajímají o udržitelnost a ekologii. Dále se PLA vyznačuje nízkou teplotou tavení, což umožňuje snadné tisknutí na mnoha typech 3D tiskáren. Při použití PLA filamentu není třeba speciálních ventilovaných prostor, protože materiál neuvolňuje toxické plyny během tisku. PLA filament je také relativně levný a dostupný, což jej činí populární volbou pro začátečníky a pokročilé uživatele 3D tiskáren. Díky své příznivé vlastnosti je PLA filament využíván pro širokou škálu aplikací, včetně výroby prototypů, dekorativních předmětů, hraček, modelů a dalších kreativních projektů. PLA je také oblíbeným materiálem pro tisk prototypů a koncových výrobků díky své vynikající detailní přesnosti a estetickému vzhledu. Nicméně, i přes mnoho výhod (Tabulka 3), PLA filament má některé omezení, jako je nižší odolnost vůči teplu a nárazům ve srovnání s jinými materiály. Při dlouhodobém vystavení UV záření může dojít k degradaci materiálu. Avšak pro většinu běžných aplikací poskytuje PLA filament spolehlivé a efektivní řešení pro 3D tisk.[15][30][33]

| Výhody | Nevýhody |
|---------------------------------|--|
| Nízká cena | Horší mechanické vlastnosti oproti ostatním filamentům |
| Bez škodlivých výparů při tisku | Časová degradace |
| Nedeformuje se při tisku | Méně odolný vůči vysokým teplotám |
| Dobrá trvanlivost | Křehkost |
| Lesklejší a hladší vzhled | |

Tabulka 3- Výhody a nevýhody PLA [30]



Obrázek 15- Cívka s PLA filamentem [34]

7.3 Nylon

Polyamid, známý spíše pod názvem nylon, je materiál vysoce oblíbený v různých odvětvích. Tento syntetický polymer je preferován především pro své vynikající mechanické vlastnosti. Nylon je charakterizován svou vysokou pevností a současně flexibilitou, což ho činí odolným vůči nárazům a každodennímu opotřebení. V porovnání s PLA a ABS vyniká nylon svými mechanickými vlastnostmi. Filamenty z nylonu pro FDM tisk mají výbornou adhezi mezi vrstvami, což přispívá ke zpevnění vytisknutých modelů. Nejběžnějšími druhy nylonových filamentů používaných pro FDM tisk jsou Nylon 6, Nylon 6/6 a Nylon 12. Nylon je známý svým nízkým součinitelem tření a vysokou teplotou tání, což z něj činí ideální volbu pro tisk funkčních a technických dílů (Obrázek 16). Jeho uplatnění lze nalézt v různých odvětvích, jako je například automobilový průmysl, kde slouží jako výztuž pneumatik nebo pro pouzdra převodů.

Při práci s nylonovými vlákny je třeba vzít v úvahu, že minimální teplota tavení se pohybuje kolem 240 °C, což není dosažitelné pro většinu běžných domácích tiskáren. Další výzvou (Tabulka 4) je smršťování materiálu při vycházení z trysky, které lze řešit předehřátím podložky na kolem 80 °C, často vyrobené ze skla pro lepší distribuci tepla.[15][30][31]

| Výhody | Nevýhody |
|-----------------------------------|--|
| Nízká cena | Vysoká teplota tavení |
| Rázová houževnatost | Smršťování při kontaktu se vzduchem |
| Výborné vrstvení | Při tavení vypouští toxické výpary |
| Odolný proti chemikáliím a odření | Nutnost vyhřívání podložky |
| | Absorbuje vlhkost, potřeba kvalitního uskladnění |

Tabulka 4- Výhody a nevýhody nylonu [30]



Obrázek 16- Nylonové ozubené kolo [35]

7.4 TPE

Termoplastické elastomery (TPE) představují skupinu materiálů s výjimečnými vlastnostmi spojujícími v sobě charakteristiky elastomerů a termoplastů. TPE je tvořen kombinací tvrdých a měkkých segmentů, kde tvrdé segmenty zajišťují stabilitu a pevnost struktury, zatímco měkké segmenty přidávají pružnost a flexibilitu. Jedním z hlavních rysů TPE je jeho schopnost měnit svou formu pod vlivem tepla, čímž umožňuje snadné formování a modelování. Tato schopnost z něj činí ideální materiál pro různé aplikace v průmyslu, medicíně, automobilovém průmyslu a dalších odvětvích. Díky své pružnosti a odolnosti vůči opotřebení jsou TPE často využívány v aplikacích, kde je vyžadována dlouhodobá trvanlivost a odolnost vůči nárazům. Jsou oblíbenou volbou pro výrobu různých typů těsnění, hadic (Obrázek 17), gripů a dalších komponent, které vyžadují flexibilitu a odolnost. Další výhodou (Tabulka 5) TPE je jejich schopnost adheze, což znamená, že se dobře spojují s různými materiály, což umožňuje široké spektrum aplikací. TPE jsou také recyklovatelné, což z nich činí ekologickou volbu pro udržitelnou výrobu a snižování environmentálního dopadu.[36][15][30]

| Výhody | Nevýhody |
|-----------------------------|------------------------------|
| Flexibilita | Náchylnost k ohybu při tisku |
| Velmi dobré tlumení vibrací | Špatná přilnavost k podložce |
| Odolný vůči nárazu | |
| Vysoký koeficient tření | |

Tabulka 5- Výhody a nevýhody TPE [30]



Obrázek 17- Příklad využití TPE [37]

7.5 PC

Polykarbonát (PC) je populární materiál pro 3D tisk díky svým vynikajícím mechanickým vlastnostem a odolnosti. Jedná se o termoplastický materiál, který se vyznačuje vysokou pevností, pružností a odolností vůči nárazu, což jej činí ideální volbou pro tisk funkčních prototypů a mechanických dílů (Obrázek 18). PC filament má vysokou teplotní odolnost, což znamená, že je schopen odolávat vysokým teplotám bez deformace nebo ztráty pevnosti. To ho činí vhodným pro výrobu součástí, které jsou vystaveny extrémním teplotním podmínkám. Díky své vysoké pevnosti a odolnosti vůči nárazu je polykarbonát ideální volbou pro výrobu ochranných obalů, pouzder, a jiných prvků, které vyžadují vysokou odolnost proti mechanickému poškození. Jeho transparentnost a schopnost propouštět světlo také umožňuje vytvářet průhledné a esteticky přitažlivé díly. Další výhodou (Tabulka 6) filamentu je jeho schopnost být snadno zpracován a finišován. Je možné ho lehce brousit, řezat a leštit, což umožňuje dosáhnout hladkého povrchu a přesného finálního vzhledu dílů. Nicméně, při použití polykarbonátu je důležité mít na paměti, že vyžaduje vyšší tiskové teploty a správnou přípravu tiskového prostoru. Tento materiál má tendenci k smršťování během tisku, což může vést k deformacím a nepřesnostem ve výtisku, proto je důležité správně nastavit tiskové parametry a zvolit vhodný podklad pro tisk.[15][30]

| Výhody | Nevýhody |
|--|----------------------------------|
| Tuhý a pevný | Hygroskopický |
| Průhlednost | Vyžaduje vyšší teplotu extruderu |
| Lehký | Drahý |
| Možnost být jednoduše dále zpracováván | |

Tabulka 6- Výhody a nevýhody PC [30]



Obrázek 18- Příklad využití PC (Kolečka k ložiskům) [38]

8 Mechanické zkoušky 3D výtisků

Tato část práce se zaměřujeme na popis různých typů mechanických zkoušek. Tyto informace jsou klíčové, protože nám umožňují posoudit, zda jsou jednotlivé materiály vhodné pro konkrétní použití při výrobě. Volba nevhodného materiálu by mohla způsobit vážné problémy, zejména v odvětvích jako je letecký a automobilový průmysl, kde by mohlo dojít k ohrožení životů. Materiály jsou v průběhu zpracování a používání vystaveny různým druhům namáhání, včetně tahového, tlakového, střihového, ohybového namáhání, a jejich kombinacím.

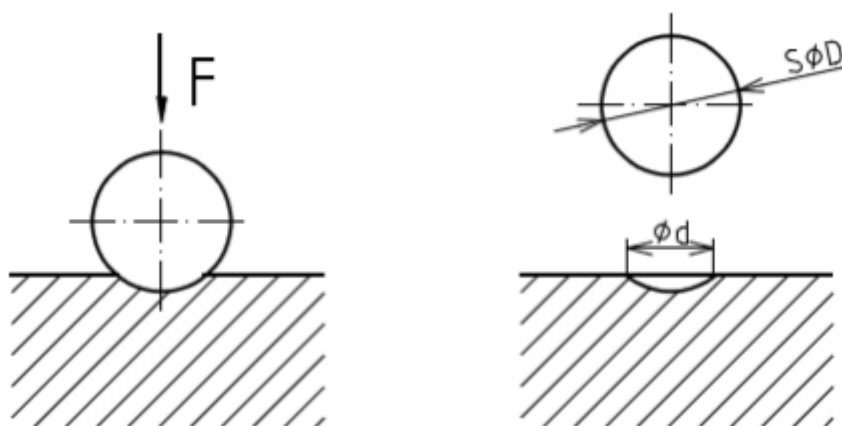
Mechanické zkoušky se obecně dělí na statické a dynamické. Při statických zkouškách je materiál zatěžován postupně narůstající silou, zatímco dynamické zkoušky zahrnují rázové zkoušky, kde je síla působící po krátkou dobu, a cyklické zkoušky, kde je zatížení opakované v cyklech.

Dále se zkoušky dělí podle teplotních podmínek, při kterých jsou prováděny. Mohou to být zkoušky provedené při normálních teplotách (pokojová teplota), zkoušky za snížených teplot (důležité například pro letectví nebo pro zkapalňování plynů) nebo zkoušky za zvýšených teplot (významné zejména v parní a jaderné energetice).[10][39]

8.1 Zkouška tvrdosti

Tvrdot materiálu vyjadřuje jeho schopnost odolávat vnikání cizího tělesa. Pro hodnocení tvrdosti se často používají speciální stroje, které měří odpor, který materiál klade proti vtlačení. Naměřené hodnoty tvrdosti se mohou uvádět buď bez jednotek, nebo se mohou vyjádřit v jednotce Newtonů na čtvereční milimetr (N/mm^2). Pro přesnější interpretaci je však lepší uvádět hodnoty tvrdosti bezrozměrně a specifikovat způsob měření nebo stupnici. Tvrdot se značí písmenem H z anglického "hardness".

Tato mechanická vlastnost je zvláště důležitá u kovových materiálů, protože umožňuje rychlou a ekonomickou charakterizaci jejich pevnosti. Z tvrdosti lze často odvodit další vlastnosti materiálu, jako je pevnost v tahu nebo obrobitelnost. Tvrdot lze zkoušet pomocí různých metod, jako jsou vrypové, vnikací a odrazové zkoušky. Metoda vniku, která se obecně nejvíce používá, spočívá ve vtlačení velmi tvrdého tělesa (kuličky, kuželu, jehlanu) do zkoušeného materiálu, přičemž velikost vzniklého vtisku slouží jako indikátor tvrdosti. Známé typy vnikových zkoušek zahrnují Rockwella, Brinella (Obrázek 19), Vickerse a Shoreho metodu.[40][39]



Obrázek 19- Princip zkoušky dle Brinella [39]

8.2 Zkouška tahem

Zkouška tahem je statickou zkouškou, která je klíčová pro mechanické zkoušení materiálu. Materiál je postupně zatěžován tahem, buď jednou aplikací síly, nebo opakovaně. Hlavním cílem této zkoušky je stanovení pevnosti zkoušeného materiálu.[41]

Zkouška tahem je nezbytná téměř pro všechny technické materiály, protože poskytuje základní údaje nutné pro návrh konstrukčních prvků a volbu materiálů. Principem zkoušky je upevnění zkušební vzorku (Obrázek 20) mezi kleště a postupné natahování. Část zkušební vzorku, která je upevněna v kleštích, se nazývá hlava. Hlava má větší průměr než vnitřní část vzorku, kde dochází k deformaci, což zajišťuje lom materiálu ve stanoveném bodě.

Pro úspěšné provedení tahové zkoušky je nezbytné, aby testované vzorky byly hladké, bez jakýchkoli vad, jako jsou vrypy nebo trhliny. Kromě toho je důležité, aby přechod mezi částmi vzorku, která je uchycena, a měřenou částí byl plynulý, což pomáhá zabránit koncentraci napětí a předčasnému selhání materiálu.[40][42]

Postup tahové zkoušky je následující: po upevnění vzorku do čelistí zkušebního zařízení se na něj nasadí průtahoměr. Během provedení zkoušky je sledována aplikovaná síla F , která je měřena dynamometrem.[10][40]



Obrázek 20- Tvar zkušební tyče pro tahovou zkoušku [40]

Pro stanovení vlastností materiálů jsou použity následující výpočty:

Mez pevnosti v tahu (σ_t): Tato hodnota představuje smluvní napětí odpovídající nejvyšší síle dosažené během provedení zkoušky.

$$\sigma_t = \frac{F_{max}}{S_0} [MPa]$$

F_{max} je příslušná naměřená síla vyjádřená v newtonech [N]

S_0 je počáteční průřez zkušebního tělesa vyjádřený v milimetrech čtverečních [mm^2]

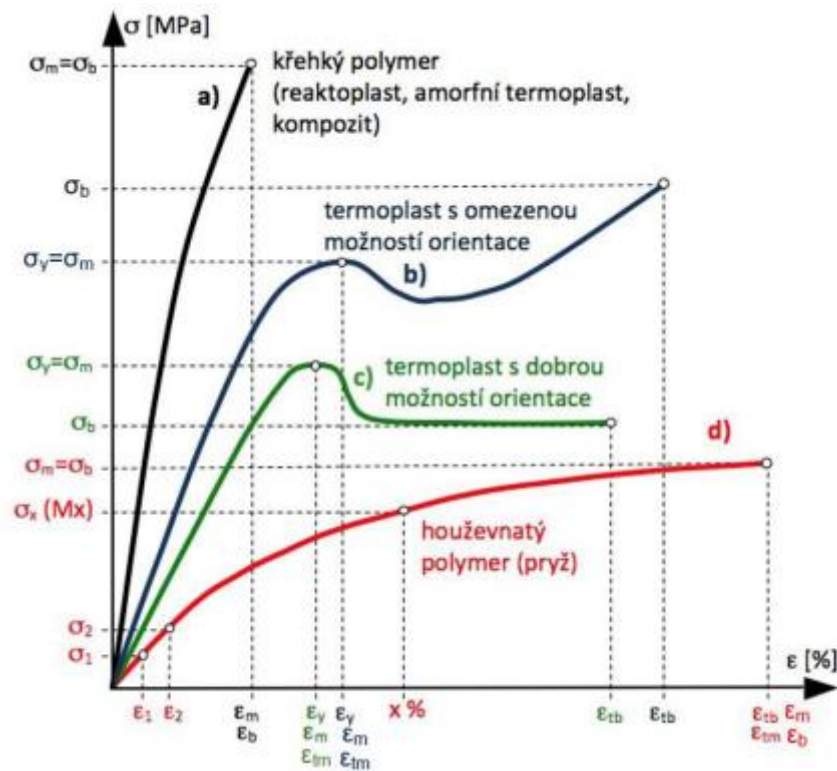
Další významnou hodnotou je poměrné prodloužení ε , které se vyjadřuje jako podíl změny délky a původní délky zkoušeného materiálu, vyjádřený v procentech.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 [\%]$$

ΔL je absolutní prodloužení [mm]

L_0 je počáteční délka zkušebního tělesa [mm]

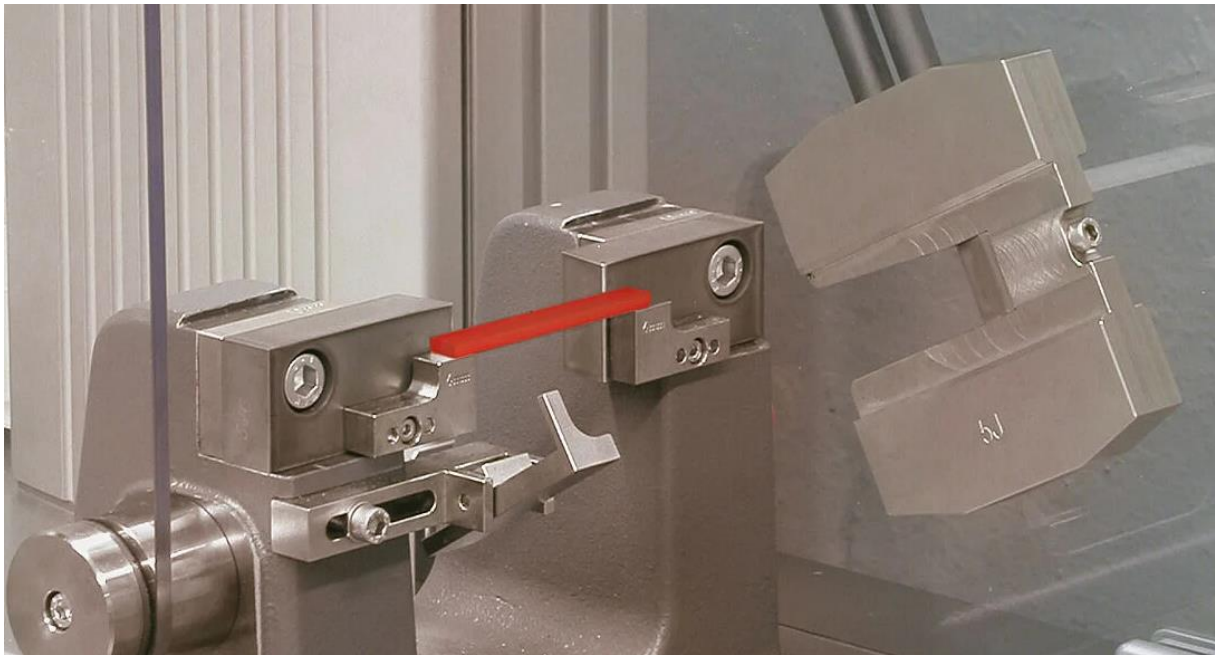
Informace o průběhu tahové zkoušky nám poskytuje deformační křivka (Obrázek 21), která zobrazuje poměrné prodloužení v závislosti na aplikovaném normálovém napětí.



Obrázek 21- Deformační křivky polymerů v tahu [8]

8.3 Zkouška houževnatosti

Houževnatost je jednou z důležitých mechanických vlastností, která spolu s pevností určuje chování materiálu za různých podmínek. Je to schopnost materiálu odolávat vzniku a šíření trhliny. Zkoušky houževnatosti patří mezi dynamické zkoušky. Charpyho rázová zkouška (Obrázek 22) je jednou z nejběžnějších metod pro hodnocení houževnatosti. Při této zkoušce se zkušební těleso umístí vodorovně na dvou opěrách a na střed tělesa je aplikován rázový úder kladivem. Výsledkem zkoušky je hodnota rázové houževnatosti, vyjádřená v J/m^2 , která udává množství energie absorbované před lomem materiálu.[40]



Obrázek 22- Charpyho kladivo [45]

Těžké kladivo, které je schopné otáčet se kolem osy, je zvednuto a upevněno ve své počáteční pozici. Ve spodní části dráhy kladiva je umístěno zkušební těleso z daného materiálu. Když je kladivo spuštěno, pohybuje se po kruhové dráze, narazí na zkušební vzorek, ideálně ho přerazí, a pak se vykývne do konečné polohy, která je nižší než počáteční poloha.[40]

9 Porovnání nákladů na prototyp z 3D tisku oproti jiným metodám

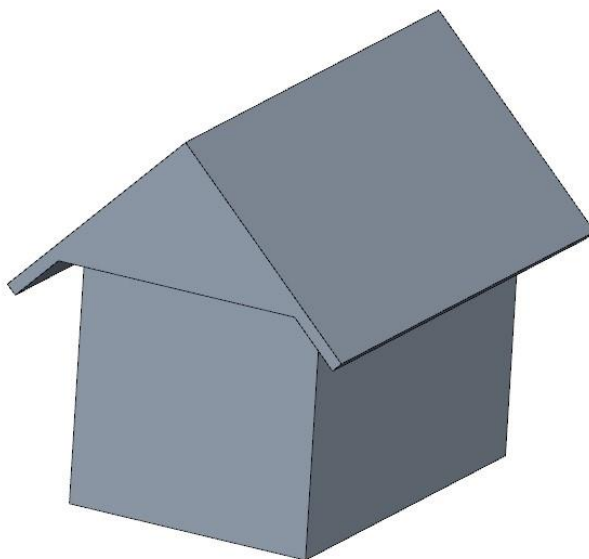
Téma nákladů na výrobu prototypů a v dnešní době klíčovou roli v průmyslu a inženýrství. S narůstající konkurencí a požadavky na efektivitu a ekonomičnost výrobních procesů je nezbytné provést důkladné srovnání nákladů a efektivity různých metod výroby. Tato podkapitola je zaměřená na porovnání nákladů na výrobu jednoho modelu domu pomocí tří různých metod: 3D tisku, kovovýroby a výroby ze dřeva. Každá z těchto metod má své vlastní charakteristiky, výhody a omezení, které mají vliv na celkové náklady a efektivitu výroby. Cílem této podkapitoly je analyzovat a porovnat náklady spojené s každou z těchto metod v kontextu výroby jednoho modelu domu, s důrazem na rozdíly v cenách materiálů, pracovní síly a časových nároků.

Pro podrobnější srovnání jsem vycházel z jednoho zjednodušeného modelu domu (Obrázek 23) pro všechny typy výroby, například architektonického modelu městské zástavby. Uvedené ceny (Tabulka 7) jsou přibližné, s ohledem na možné dodatečné náklady.

U výroby z kovu by model musel být vytvořen z výpalků a následně svařen, což výrazně zvyšuje celkovou cenu. Proto je tato metoda výroby pro toto použití nejen velmi nákladná, ale i zbytečně komplikovaná. Výhodou ale zůstává vysoká pevnost celé konstrukce a při použití povrchové ochrany i vysoká životnost.

Model vyrobený ze dřeva se jeví jako nejrychlejší z hlediska časové náročnosti (při výrobě jednoho kusu), přičemž není vyžadována 3D modelace a s tím spojené náklady na software, a tedy postačuje pouze výrobní výkres, podobně jako u výroby z kovu. Dřevěné desky musí být nejprve přesně nařezány na pile a následně slepeny lepidlem, což by však mohlo prodloužit dobu výroby, nebo spojeny pomocí šroubů a úhelníků. V posledním kroku by bylo dobré ještě hrany zjemnit, aby nedošlo při manipulaci k zadření třísky.

Výhoda 3D tisku spočívá v tom, že poté, co architekt vytvoří model, stačí jej převést do formátu STL a následně lze model vytisknout s minimálními úpravami. Další výhodou oproti jiným metodám je, že pokud je potřeba změnit model, (například domu) je možné snadno upravit postup výroby bez nutnosti vytvářet nové výrobní výkresy. Mezi další výhody patří i mnohem větší úroveň detailu jako by mohli být okna, dveře, komín a další. Nevýhodou tohoto modelu je tvar a z toho vyplývající potřeby podpor při tisku, díky čemuž se prodlužuje doba tisku. Jedním z řešení je model rozložit na dvě části (spodní část a střecha) a poté je slepit. Ideální materiál pro toto řešení se nabízí PLA díky lepší povrchové kvalitě a ceně.



Obrázek 23- Zjednodušený model domu

| | Cena materiálu | Cena práce | Cena celkem | Porovnání ceny s etalonem |
|-------------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|----------------------------------|
| 3D tisk (etalon) | 400 Kč | 450 Kč | 850 Kč | 0 % |
| Dřevovýroba | 350 Kč | 1200 Kč | 1550 Kč | 45 % |
| Kovovýroba | 3000 Kč | 2000 Kč | 5000 Kč | 83 % |

Tabulka 7- Porovnání ceny modelu [43][44]

10 Závěr

Využití 3D tisku k prototypové výrobě nabízí široké spektrum přínosů a představuje zásadní inovaci v oblasti výroby. Historicky se tento postup začal rozvíjet s primárním cílem zkrácení výrobních cyklů a snížení nákladů spojených s vývojem nových produktů. Během této práce jsme se podívali na historii 3D tisku a jeho postupný vývoj od prvních experimentů až po současnou pokročilou technologii.

V rámci zkoumání využití 3D tisku byla prozkoumána jeho aplikace v různých odvětvích, jako je strojírenství, zdravotnictví, design a architektura. Tento technologický nástroj se ukázal jako revoluční ve vytváření prototypů a funkčních dílů v těchto odvětvích, přinášející významné zkrácení času vývoje a možnost rychlé iterace návrhů.

Kromě toho byla rozepsána stavba polymerních materiálů, která je základním stavebním kamenem 3D tisku. Byli rozebrány různé typy polymerů, jejich vlastnosti a způsoby výroby, s cílem porozumět, jakým způsobem ovlivňují výsledné vlastnosti tištěných objektů.

Při analýze výhod a nevýhod 3D tisku byli identifikovali klíčové aspekty této technologie. Bylo zjištěno, že i přes své mnohé přínosy existují také určité omezení a výzvy, které je třeba brát v úvahu při zvažování použití 3D tisku pro prototypovou výrobu.

Detailně byly rozebrány různé typy filamentů pro 3D tisk a jejich vlastnosti, s cílem porozumět, jakým způsobem ovlivňují kvalitu a použitelnost tištěných objektů.

V závěrečné části bylo provedeno porovnání nákladů na prototyp z 3D tisku ve srovnání s jinými tradičními metodami výroby, jako je kovovýroba nebo výroba ze dřeva. Z těchto zjištění vyplývá, že 3D tisk může být ekonomicky výhodnou volbou, zejména v případech, kdy je potřeba rychlá výroba malých sérií s komplexní geometrií. Nicméně je třeba brát v úvahu specifické požadavky každého projektu a zvažovat nejen finanční aspekty, ale i technické a kvalitativní faktory jako je například detailnost modelu.

11 Bibliografie

- [1] HALTMAR, Jakub. *Možnosti využití 3D tisku v procesním průmyslu*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2023. Dostupné také z: <https://invenio.nusl.cz/record/530129>
- [2] *3D prototyping mechanismů*. V Praze, 2016. Bakalářská práce. ČVUT.
- [3] GRIMM, Todd. *User's guide to rapid prototyping*. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 2004. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/shqf1Ns>
- [4] ZAJÍC, Zdeněk. *Využití 3D tisku při výrobě výukových modelů*. 2017. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/dKWkvVpD>
- [5] MIN, James K., Bobak MOSADEGH, Simon DUNHAM a Subhi J. AL'AREF. History of 3D Printing. In: *3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine*. United States: Elsevier Science & Technology, 2018. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-803917-5.00001-8
- [6] *3D Printing and Shaping Polymers, Composites, and Nanocomposites: A Review*.
- [7] MIKULÁŠEK, Marek. *Využití 3D tisku při výrobě funkčních prototypů pro automotive*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2022. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/kMy3kCn6>
- [8] JANIŠ, Adam. *Mechanické vlastnosti materiálů pro 3D tisk*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2021. Dostupné také z: <https://invenio.nusl.cz/record/442479>
- [9] *Oběžné kolo obrázek* [online]. 2022 [cit. 2024-03-09]. Dostupné z: <https://for3dtisk.cz/co-je-to-rapid-prototyping-blog/>
- [10] JANIŠ, Adam. *Mechanické vlastnosti materiálů pro 3D tisk*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2021. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/TSWP0899>
- [11] *Zhotovení webové aplikace k výběru polymerních materiálů na základě mechanických vlastností pro 3D tisk*.
- [12] *Přípravek kontroly tvaru* [online]. 2024 [cit. 2024-03-16]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/kontrola-presnosti-vyroby-s-3d-tistenymi-pripravky/>

- [13] KLOSKI, Liza Wallach, Nick KLOSKI a Jakub GONER. *Začínáme s 3D tiskem*. Brno: Computer Press, 2017. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/BsFp7RRG>
- [14] SHCHENNIKOV, Vladislav. *Využití 3D tiskáren v medicíně*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/YdBqnLr6>
- [15] BLECHA, Miroslav. *Posouzení využití technologie 3D tisku v průmyslu*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2023. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/Qz6G1NZr>
- [16] IZDEBSKA-PODSIADŁY, Joanna. *Polymers for 3D printing: methods, properties, and characteristics: methods, properties, and characteristics*. Cambridge, MA;Oxford: William Andrew, 2022. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/bMjZNDKj>
- [17] *Model protézy* [online]. 2022 [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://for3dtisk.cz/3d-tisk-ve-zdravotnictvi-blog/>
- [18] HORNE, Richard a Kalani Kirk HAUSMAN. *3D printing for dummies®*, second edition. 2nd. For Dummies, 2017. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/6F70rNsm>
- [19] *Model lebky* [online]. 2024 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://www.angled.io/products/human-skull-model>
- [20] SIROTEK, Adam. *Nové digitální metody v procesu architektonického navrhování*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta architektury. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/9Bhr5zzV>
- [21] *Od lepenky k 3D tisku. Fyzické modely a skicování nic nenahradí, tvrdí architekt Hnilička* [online]. 2020 [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://www.earch.cz/revue/clanek/od-lepenky-k-3d-tisku-fyzicke-modely-a-skicovani-nic-nenahradi-tvrdi-architekt-hnilicka>
- [22] HELLEBRAND, Martin. *Recyklace plastů pro potřeby 3D tisku*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/TvJsdGlg>

- [23] *PLA Recycled* [online]. 2021 [cit. 2024-03-16]. Dostupné z: https://blog.prusa3d.com/introducing-prusament-pla-recycled_59116/
- [24] 3D Printing in Construction: Benefits and Challenges. *International Journal of Structural and Civil Engineering* [online]. 2020, **2020**(9), 2-4 [cit. 2024-02-29]. ISSN 2315-4462. Dostupné z: <https://www.ijscer.com/uploadfile/2020/1111/20201111052747958.pdf>
- [25] KOLTZENBURG, Sebastian, Michael MASKOS, Oskar NUYKEN, Karl HUGHES a SpringerLink (online SLUŽBA). *Polymer chemistry*. 1. Heidelberg;Berlin: Springer, 2017;2018;. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-662-49279-6
- [26] CHOTĚBORSKÝ, Rostislav. *Nauka o materiálu*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2011. ISBN 978-80-213-2236-3.
- [27] LUBOŠ BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Střední odborné učiliště Svitavy, 2016 [cit. 2024-02-29]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Impresum.html>
- [28] NEUŽIL, Tomáš. *Vliv kondicionování na mechanické vlastnosti polymerů vyráběných technologií vstřikováním*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2018. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/ls3GITKG>
- [29] ŠVORČÍK, V. Struktura a vlastnosti polymerů. *ČVUT fakulta strojní* [online]. s. 3-14 [cit. 2024-03-02]. Dostupné z: https://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/polymvsauto/Struktura%20a%20vlastnosti%20opolymeru%20-%20strucne_Svorcik.pdf
- [30] KUČERA, Jan. *Pokročilé filamenty pro FDM/FFF 3D tisk*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2021. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/RT5rpVTW>
- [31] AMITHEESH, S. R., Balasurya SHANMUGASUNDARAM, Shravya KAMATH, S. S. ADHITHYAN a Ramu MURUGAN. Analysis of dimensional quality in FDM printed Nylon 6 parts. *Progress in additive manufacturing*. 2023, (Journal Article). ISSN 2363-9512. Dostupné z: doi:10.1007/s40964-023-00515-7
- [32] Minifilgs lego kostka. *Minifilgs* [online]. 2024 [cit. 2024-03-02]. Dostupné z: <https://www.minifilgs.cz/lego-kostka-2x4--3001/>

- [33] WACH, Radoslaw A., Piotr WOLSZCZAK a Agnieszka ADAMUS-WLODARCZYK. Enhancement of Mechanical Properties of FDM-PLA Parts via Thermal Annealing. *Macromolecular materials and engineering*. Weinheim: Wiley Subscription Services, 2018, **303**(Journal Article), 1800169-n/a. ISSN 1438-7492. Dostupné z: doi:10.1002/mame.201800169
- [34] Svět 3D tisku filament PLA. *Svět 3D tisku* [online]. 2024 [cit. 2024-03-02]. Dostupné z: <https://eshop.svet-3d-tisku.cz/tiskove-struny-pla/plasty-mladec-pla-metalicka-fialova/>
- [35] *Nylonové ozubené kolo* [online]. 2024 [cit. 2024-03-24]. Dostupné z: https://sharpplayers.cz/pripadove-studie/nylonove-ozubene-kolo/?fbclid=IwAR3LjAi1aa2xnXCKYA0TP5Y5P-MVIYzntaiOW_XD8LXKJCezrtUvs7-pdNI
- [36] AWASTHI, Pratiksha a Shib Shankar BANERJEE. Fused deposition modeling of thermoplastic elastomeric materials: Challenges and opportunities: Challenges and opportunities. *Additive manufacturing*. Elsevier B.V, 2021, **46**(Journal Article), 102177. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2021.102177
- [37] Příklad využití tpe. *Sharpplayers* [online]. 2021 [cit. 2024-03-02]. Dostupné z: <https://eshop.sharpplayers.cz/tpe>
- [38] Využití PC. *Prusa research* [online]. 2024 [cit. 2024-03-02]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/polykarbonat-pc_165812
- [39] MACHÁČ, Miroslav. *Měření tvrdosti materiálů a zpracovávání zjištěných hodnot*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2010. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/H9hFC3Fw>
- [40] BLECHA, Miroslav. *Posouzení využití technologie 3D tisku v průmyslu*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2023. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/cJMmXp5Q>
- [41] MUDRÁK, Michal. *Analýza mechanických vlastností kompozitních materiálů vytisknutých aditivní technologií 3D tisku*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2021. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/3jtpG6Jl>

- [42] DAL MASO, Alberto a Francesca COSMI. Mechanical characterization of 3D-printed objects. *Materials today: proceedings*. Elsevier BV, 2018, **5**(Journal Article), 26739-26746. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2018.08.145
- [43] *Cena kovovýroba* [online]. 2020 [cit. 2024-03-16]. Dostupné z: <https://www.waytech.cz/>
- [44] *Cena dřevovýroba* [online]. 2016 [cit. 2024-03-16]. Dostupné z: <https://www.process.cz/>
- [45] *Charpyho kladivo* [online]. 2024 [cit. 2024-03-09]. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/cs/oblasti-pouziti/zkouseni-materialu/zkousky-razem/zkouska-razem-v-ohybu-metodou-charpy/>

12 Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obrázek 1- První komerční tiskárna SLA-1 [3]..... | 3 |
| Obrázek 2- 3D Tiskárna SLA-250 [4] | 4 |
| Obrázek 3- Oběžné kolo [9]..... | 5 |
| Obrázek 4- Přípravek pro kontrolu tvaru [12] | 6 |
| Obrázek 5- Model chrupu [16] | 7 |
| Obrázek 6- Ukázka 3D vytištěné titanové kyčelní náhrady [15]..... | 8 |
| Obrázek 7- Modely dolních končetin [17]..... | 8 |
| Obrázek 8- Učební pomůcka pro výuku [19] | 9 |
| Obrázek 9- Urbanistický model architekta Pavla Hniličky [21]..... | 10 |
| Obrázek 10- Výtisky z recyklovaného materiálu Prusament PLA Recycled [23] | 11 |
| Obrázek 11- Příklad polykondenzace fenolu a formaldehydu [27]..... | 16 |
| Obrázek 12- Schéma přípravy polyuretanu (PUR) polyadící [27] | 17 |
| Obrázek 13- Molekulární struktura polymerů [27]..... | 18 |
| Obrázek 14- Příklad využití ABS (lego kostka) [32] | 19 |
| Obrázek 15- Cívka s PLA filamentem [34] | 20 |
| Obrázek 16- Nylonové ozubené kolo [35]..... | 21 |
| Obrázek 17- Příklad využití TPE [37] | 22 |
| Obrázek 18- Příklad využití PC (Kolečka k ložiskům) [38]..... | 23 |
| Obrázek 19- Princip zkoušky dle Brinella [39] | 25 |
| Obrázek 20- Tvar zkušební tyče pro tahovou zkoušku [40]..... | 26 |
| Obrázek 21- Deformační křivky polymerů v tahu [8] | 27 |
| Obrázek 22- Charpyho kladivo [45] | 28 |
| Obrázek 23- Zjednodušený model domu..... | 29 |

13 Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 1- Vlastnosti polymerů v závislosti na tvaru [27]..... | 18 |
| Tabulka 2- Výhody a nevýhody ABS [30] | 19 |
| Tabulka 3- Výhody a nevýhody PLA [30] | 20 |
| Tabulka 4- Výhody a nevýhody nylonu [30]..... | 21 |
| Tabulka 5- Výhody a nevýhody TPE [30]..... | 22 |
| Tabulka 6- Výhody a nevýhody PC [30]..... | 23 |
| Tabulka 7- Porovnání ceny modelu [43][44]..... | 29 |