

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV ŘÍZENÍ A EKONOMIKY PODNIKU



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Charakteristika aditivních technologií a jejich využití z hlediska
ekonomické výhodnosti

Characteristics of additive manufacturing and its use in terms of
economic benefits

AUTOR: Jiří Vondruš

STUDIJNÍ PROGRAM: TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Miroslav Žilka, Ph.D.

PRAHA 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vondruš** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **493568**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav řízení a ekonomiky podniku**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Charakteristika aditivních technologií a jejich využití z hlediska ekonomické výhodnosti

Název bakalářské práce anglicky:

Characteristics of additive manufacturing and its use in terms of economic benefits

Pokyny pro vypracování:

Úvod – úkoly a cíl bakalářské práce
Historický vývoj a charakteristika existujících metod aditivních technologií a materiálů
Souhrn a analýza vstupních nákladů výroby pomocí aditivní technologie
Ekonomické srovnání s konvenčním výrobním procesem
Závěr – výsledné zhodnocení práce

Seznam doporučené literatury:

- [1] CHUA, C. K., K. F. LEONG a C. S. LIM. Rapid prototyping: principles and applications. 2nd ed. Hackensack: World Scientific, 2005. ISBN 981-238-120-1
- [2] KHORRAM NIAKI, Mojtaba a Fabio NONINO. The Management of Additive Manufacturing: Enhancing Business Value. Boston: Springer, 2018, 243 s. ISBN 978-3-319-85882-1
- [3] GIBSON, Ian, David W. ROSEN a Brent STUCKER. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. Boston: Springer, 2010, 459 s. ISBN 978-1-4419-1119-3
- [4] Wohlers Report 2022: 3D Printing and Additive Manufacturing - Global State of the Industry. Colorado, USA: Wohlers Associates, 2022. ISBN 978-0-9913332-9-5

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Miroslav Žilka, Ph.D. ústav řízení a ekonomiky podniku FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **31.03.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **22.07.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **29.09.2023**

Ing. Miroslav Žilka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Miroslav Žilka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne 20. 7. 2022

.....

Podpis

Abstrakt

Tato bakalářská práce zkoumá vybranou metodu aditivní technologie FDM (Fused Deposition Modeling) z hlediska ekonomické výhodnosti. V teoretické části je popsána historie a charakteristika nejčastěji používaných aditivních technologií včetně dostupných materiálů. Pro metodu FDM jsou podrobně rozebrány investiční náklady včetně nákladů na materiál. Práce se pomocí počítačových simulací dále zabývá různými možnostmi nastavení tisku a jejich vlivu na výsledné výrobní náklady. Za účelem co nepřesněji provedené předběžné kalkulace autor zhotovil ilustrační propagační předmět, který sloužil pro vyčíslení nákladů na výrobu. V rámci analogického srovnání s konvenční metodou byla také vyčíslena předběžná nákladová kalkulace předmětu obdobných rozměrů vyrobeného na vstřikovacím lisu. Pro vyhodnocení míry vlivu jednotlivých parametrů vstupujících do nákladů byly pro obě technologie provedeny citlivostní analýzy. Na základě provedených předběžných kalkulací a citlivostních analýz bylo vyhodnoceno, že metoda FDM je v dané aplikaci ekonomicky výhodná pouze u malých objemů výroby.

Klíčová slova

3D tisk, aditivní technologie, FDM, materiály, nákladová kalkulace, parametry tisku, ekonomické zhodnocení výroby

Abstract

This bachelor's thesis examines selected FDM (Fused Deposition Modeling) additive technology method in terms of economic benefits. The theoretical part describes history and characteristics of the most commonly used additive technologies, including available materials. For the FDM method, investment and material costs are analyzed in detail. With a help of computer simulations, the thesis further deals with various options of printing settings and their effect on resulting production costs. In order to make the calculation as accurate as possible, the author made a illustrative promotional item, which was used to quantify manufacturing costs. As part of a comparison with the conventional method, a cost calculation for an object of similar dimension produced with an injection molding machine is made. To evaluate the degree of influence of individual parameters entering into the costs, sensitivity analyses were performed for both technologies. Based on performed cost calculations and sensitivity analyses, it was concluded that the FDM method is economically viable only for small production volumes.

Keywords

3D printing, additive manufacturing, fused filament fabrication, materials, cost calculation, printing parameters, economic evaluation

Poděkování

Mé poděkování patří Ing. Miroslavu Žilkovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady a čas, který mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval.

Obsah

Úvod.....	9
1. Charakteristika aditivních technologií	10
1.1. Historie.....	10
1.1.1. Vývojová fáze I.	10
1.1.2. Vývojová fáze II.	11
1.1.3. Vývojová fáze III.	11
1.2. Metody	11
1.2.1. Fused Deposition Modelling (FDM).....	12
1.2.2. Selective Laser Sintering (SLS).....	13
1.2.3. Stereolithography Apparatus (SLA).....	15
1.2.4. Digital Light Processing (DLP).....	15
1.2.5. Direct Energy Deposition (DED).....	16
1.2.6. Laminated Object Manufacturing (LOM).....	16
1.3. Materiály	17
1.3.1. Polymery a kompozitní materiály	17
1.3.2. Kovy a jejich slitiny	19
1.3.3. Betony	22
2. Metoda FDM a ekonomická náročnost.....	23
2.1. Dostupné FDM tiskárny na trhu	24
2.2. Základní materiály pro FDM	26
2.2.1. PLA	27
2.2.2. PETG	27
2.2.3. ABS	28
2.3. Pokročilé materiály pro metodu FDM	29
2.3.1. PC.....	29
2.3.2. Nylon (PA).....	30
2.3.3. FLEX.....	30
2.3.4. PVA a BVOH	31
2.4. Kompozitní materiály	31
2.5. Nastavení tisku.....	34
2.5.1. Výška vrstev a velikost trysky.....	34
2.5.2. Množství výplně	37
2.5.3. Struktura výplně.....	39
2.6. Spotřeba energie.....	40
2.7. Náklady na obsluhu tiskárny	41
2.8. Údržba a opotřebení.....	42
2.9. Náklady na prostory	43

3. Kalkulace a porovnání metody FDM s technologií vstřikování	44
3.1. Celkové náklady na výrobu pomocí 3D tisku	45
3.2. Celkové náklady na výrobu pomocí vstřikovacího lisu	48
3.3. Srovnání nákladových kalkulací obou technologií	51
3.4. Zhodnocení metod kalkulací	52
4. Citlivostní analýza vstupních parametrů	54
4.1. Citlivostní analýza metody FDM	54
4.2. Citlivostní analýza technologie vstřikování	55
4.3. Výsledné zhodnocení obou technologií	56
4.3.1. Využití metody FDM	57
4.3.2. Využití vstřikolisové technologie	57
Závěr	59
Seznam použitých zdrojů	61
Seznam použitých zkratk a symbolů	65
Seznam obrázků	66
Seznam tabulek	67
Seznam grafů	68
Seznam příloh	68

Úvod

Významné události posledních let jako je pandemie COVID-19 nebo ruská invaze na Ukrajinu silně ovlivňují jak světový průmysl, tak světovou ekonomiku a zcela převrací zaběhnutý způsob uvažování. Nejen v důsledku těchto událostí sílí tlak na výstavbu a budování průmyslu, který je schopný pružně reagovat na měnící se poptávku nebo na nedostatečnou dodávku komponentů. Aditivní technologie tyto vlastnosti poměrně dobře splňuje, a proto se stále více potvrzuje její nepostradatelnost téměř ve všech průmyslových odvětvích. Díky tomu i v současné době zažívá tento technologický postup velmi dynamický vývoj.

Technologie 3D tisku otevírá dveře mnoha možnostem výroby, které by byly konvenční cestou nemyslitelné nebo extrémně neekonomické. Původně byla tato technologie využívána primárně pro takzvaný Rapid Prototyping. Tento pojem je spojený s velmi rychlou a flexibilní výrobou prototypů, které sloužily především k designovým a rozměrovým studiím. Dnes je její využití mnohem širší, a proto je již častěji souhrnně označována jako technologie aditivní.

Bakalářská práce se zabývá charakteristikou a vhodným použitím dostupných metod aditivní technologie a materiály, které lze při těchto metodách využívat. Stěžejní část práce je zaměřena na ekonomické srovnání a zhodnocení vybrané nízkonákladové metody FDM, kterou lze v současnosti považovat za nejrozšířenější aditivní technologii na světě. Právě díky dobré cenové dostupnosti a snadné obsluze se tento výrobní postup úspěšně dostal do povědomí široké veřejnosti.

Zásadní otázkou metody FDM je její ekonomická náročnost a využitelnost. Tyto aspekty jsou silně provázané s kvalitou vytištěných výrobků, která zásadně ovlivňuje časovou náročnost výroby. V bakalářské práci jsou proto podrobně specifikovány dostupné stroje, materiály a možnosti nastavení tisku. Na základě těchto informací a s využitím simulací jsou vyčísleny hlavní nákladové skupiny. Z dat je následně možné vytvořit předběžné nákladové kalkulace a citlivostní analýzy, které slouží k ekonomickému srovnání s nejbližší konvenční technologií.

Cílem této práce je seznámit čtenáře jednak s komplexní charakteristikou aditivních technologií a jejich vhodných aplikací, tak s kritickým zhodnocením vybrané metody FDM. Citlivostní analýzy slouží ke srovnání dopadu vstupních parametrů na ekonomickou stránku této technologie. Ze závěru bakalářské práce vyplývá, v jakých případech je ekonomicky výhodné zvolit výrobu pomocí aditivní technologie metodou FDM nebo pomocí vstříkovaní plastů.

1. Charakteristika aditivních technologií

Tato práce je věnována aditivní technologii 3D tisku, která za velmi krátkou dobu své existence zažívá velký rozmach. V posledním desetiletí je to zapříčiněno mnohem lepší cenovou dostupností. Princip zhotovení výrobku pomocí aditivní technologie je založen na postupném vrstvení materiálu, dle předem připraveného a zpracovaného 3D modelu dané součásti či objektu. Tímto způsobem je možné vrstvit veškeré tavitelné a tekuté materiály, například kovy, plasty, sklo a také různé druhy polymerů. Mnoho technologických firem stojí před rozhodnutím, zda je pro jejich danou aplikaci ekonomicky výhodnější zvolit technologii konvenční, anebo již zmíněnou technologii aditivní. Aditivní metoda se vyznačuje velkou úsporou materiálu a váhy, v některých případech i větší pevností výrobků. Na druhou stranu je velmi problematické vyrábět díly s vysokou rozměrovou přesností a v nejvyšší kvalitě povrchu. Z toho důvodu takto vyrobené díly často vyžadují dokončovací operace pomocí konvenčních strojů.

1.1. Historie

Technologie 3D tisku je poměrně mladá. Její prvopočátek lze datovat okolo roku 1980, kdy Hideo Kodama a Alan Herbert podali přihlášku k patentu, který spočíval ve vrstvení a následném vytvrzování fotopolymeru pomocí UV záření [1]. Nepodařilo se však splnit všechny požadavky k úspěšnému schválení patentu, a ten byl proto zamítnut.

Další významný průkopník Chuck Hall byl již úspěšnější a v roce 1986 si nechal patentovat 3D stereolitografii pod názvem Stereolithography Apparatus (SLA) [1]. Tato a veškeré následující metody aditivních technologií jsou podrobně popsány v nadcházející kapitole 1.2 *Metody*. O několik let později již pod novou firmou 3D Systems vytvořil zařízení *SLA-250*, jež bylo jako první dostupné i pro veřejnost. Cena této tiskárny se v té době pohybovala okolo 300 000 USD [2]. Taktéž vyvinul stále hojně využívaný formát STL (*Standard Tessellation Language*), který slouží k převodu 3D digitálního souboru na tištěný objekt.

Ve stejném roce bylo dalším důležitým posunem patentování prvního přístroje svého typu SLS (*Selective Laser Sintering*) Carlem R. Deckardem. O tři roky později Scott Crump vyvinul první tiskárnu typu FDM (*Fused Deposition Modelling*) [3]. Tato metoda aditivní technologie je momentálně jedna z nejrozšířenějších.

1.1.1. Vývojová fáze I.

Období mezi lety 1991–2000 lze považovat za první významnou vývojovou fázi aditivních technologií. Dostupné stroje do té doby měly mnoho limitujících skutečností, které bránily v masivnějším rozvoji na trhu. Bylo tedy nutné řešit jak technologická omezení, tak velkou ekonomickou náročnost. Dynamickým vývojem procházely také materiály. Díky tomu bylo možné tisknout například průhledné

nebo flexibilní materiály. Zlepšení technických výkonů a vlastností pomohlo vzniku nových typů tiskáren, například na kov nebo vosk. V této době rovněž vznikly první vytištěné orgány [4].

1.1.2. Vývojová fáze II.

Období v letech 2001–2010 se vyznačuje rozmachem vývojem v oblasti kvality, provedení, flexibility a dostupnosti tiskáren. Nově vynalezená technologie EBM (Electron Beam Melting) posunula tisk kovů zase o krok dál. Velký rozruch zejména ve zdravotnictví způsobila první vytištěná ledvina nebo krevní céva [1],[4]. Zajímavou událostí bylo vypršení patentu metody FDM, která otevřela globální dostupnost a měla za následek masivní rozšíření tohoto výrobního postupu.

1.1.3. Vývojová fáze III.

Vývoj od roku 2011 až do současnosti je nejzásadnější ve vytváření povědomí o 3D tisku mezi širokou veřejností. Technologií se ve velkém také začaly zabývat kosmické společnosti jako NASA (National Aeronautics and Space Administration) a ESA (European Space Agency). Tehdejší americký prezident Barack Obama taktéž zaregistroval zvýšený zájem o aditivní technologii a schválil výzkumný grant za 30 000 000 USD pro NIIAM (National Additive Manufacturing Innovation Institute) [1].

Nejen tato zásadní událost, ale i spousty dalších úspěchů se podepsaly na značné medializaci aditivních technologií. Díky velkému výzkumu se výrazně zlepšila i jejich dostupnost. Téměř 10x nižší cena za posledních 30 let způsobila, že se aditivní výroba stává profitabilní i pro střední a malé podniky. Obrovský rozmach zažily i tiskárny pro domácí použití. Nejmenší z nich lze v dnešní době pořídit již od 5 000 Kč.

1.2. Metody

Aditivní technologie 3D tisku se dělí na velmi širokou škálu různých metod. Odlišují se od sebe způsobem, jakým se materiál nanáší a vrství. Dále je lze dělit podle způsobu přetváření materiálu, které probíhá nahříváním, tavením, případně vytvrzováním. Velké rozdíly lze nalézt v typech použitých materiálů a jejich form. Některé z metod taktéž vyžadují určité nezbytné součásti a technologické postupy, od nichž se následně odvíjí i náročnost samotné aditivní výroby. V této části budou uvažovány pouze ty hlavní a nejčastěji používané metody, které jsou uvedeny v Tab. 1.

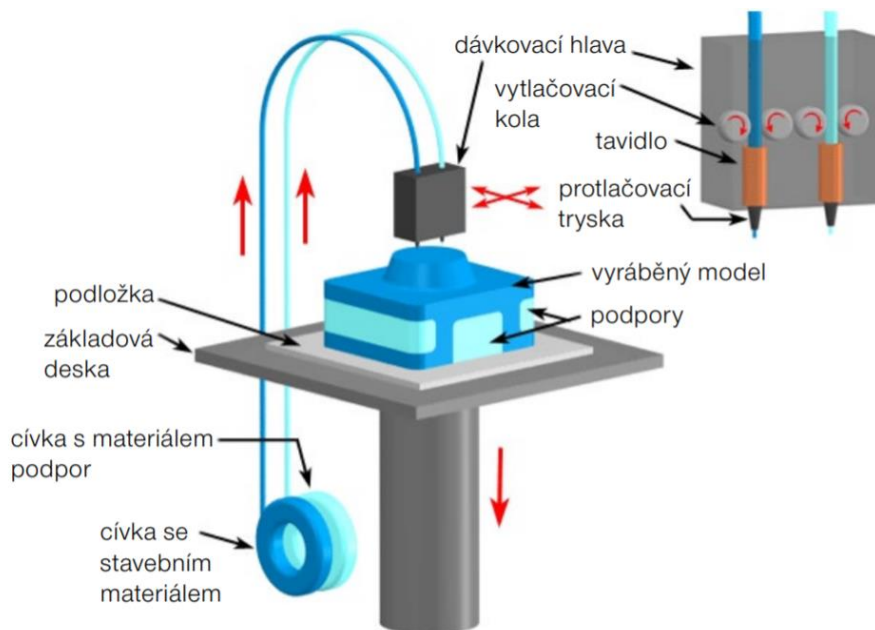
Tab. 1 Nejběžnější metody 3D tisku a jejich základní specifikace

Metoda	Tloušťka vrstvy [mm]	Rychlost tisku [mm/s]	Materiál	Způsob přetváření	Kombinace materiálů
FDM	0,05	150	termoplasty ve formě strun – filamentů	teplota a tlak v trysce	bezproblémový tisk více druhů filamentů
SLS	0,1	48	kovy, slitiny, polymery, keramika ve formě jemného prášku	laserový paprsek	pouze jedna směs prášku
SLA	0,025	36	fotopolymer ve formě tekutiny	UV záření	pouze jeden typ tekutého polymeru
DLP	0,015	36	fotopolymer ve formě tekutiny	UV záření	pouze jeden typ tekutého polymeru
DED	0,25	10	kovy, slitiny, polymery, keramika ve formě jemného prášku nebo strun	laserový paprsek	pouze jeden typ prášku/drátu
LOM	0,05	-	papír, kovové folie, kompozity ve formě archů nebo pásů	laserový paprsek	možné použití více druhů archů

1.2.1. Fused Deposition Modelling (FDM)

Metoda FDM, také známá pod pojmem Fused Filament Fabrication (FFF), je momentálně nejčastěji používanou metodou [6]. Pro tuto metodu je charakteristický filament, obvykle termoplast ve formě tenké struny, který je z cívky pomocí kladek dodáván do tiskové hlavy. Ta má za úkol materiál natavit a rovnoměrně jej extrudovat na modelovací desku pohybem po osách X a Y. Zde materiál postupně chladne a tvrdne. Jakmile je vytisknutá jedna celá vrstva, modelovací deska se posune směrem od tiskové hlavy po ose Z a je možné tisknout další vrstvu. U jiných tiskáren se můžeme setkat s provedením, kdy tisková hlava vykonává pohyb po ose Y a Z. Základová deska vykonává pohyb po ose X. Pohyb součástí je umožněn pomocí přesných krokových motorů. Vhodnou volbou vstupních parametrů lze nastavit například tloušťku vrstvy, šířku, orientaci jednotlivých vrstev, mezery nebo dobu tuhnutí materiálu. Díky úspěšnému vývoji různých druhů filamentů již FDM metoda zvládá i tisknutí transparentních, flexibilních či vodou rozpustných materiálů. Schematické zobrazení funkce lze vidět na Obr. 1.

V současnosti je na trhu nabízena široká škála druhů FDM tiskáren. Zásadním parametrem je velikost modelovací komory. Velké množství výrobců nabízí také větší množství trysek v jedné tiskové hlavě, což umožňuje použití více druhů filamentů najednou v různé barevné nebo materiálové kombinaci. Dalším parametrem může být možnost rotace samotné modelové desky podle os X a Y zajišťující stabilitu tisknutého výrobku bez nutnosti použití podpěr. Taktéž existují tiskové hlavy, které pracují v pěti osách.



Obr. 1 Metoda FDM [5]

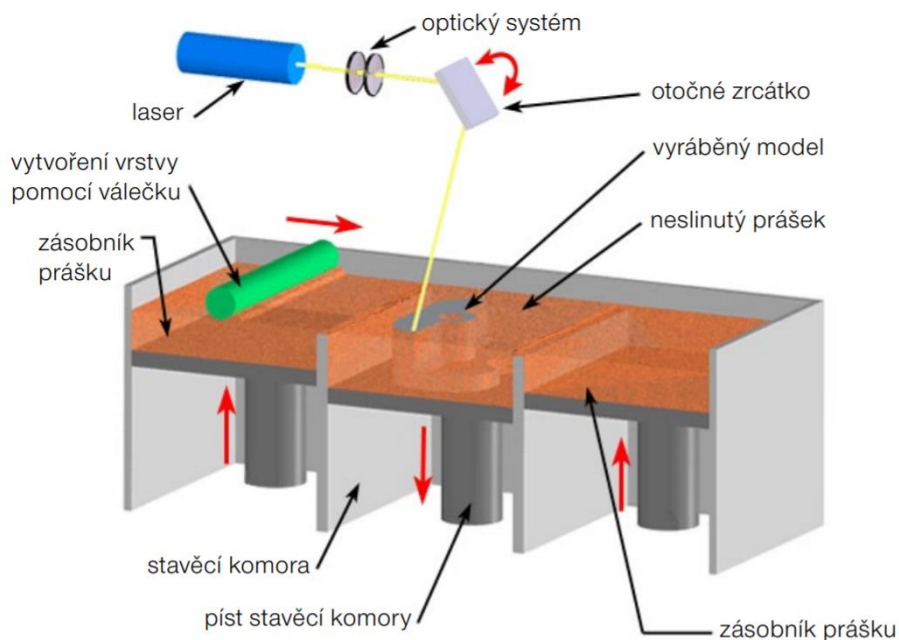
Pracovní komory lze dělit na uzavřené nebo otevřené. Tiskárny s uzavřenou pracovní komorou zaručí stálou teplotu prostředí a vlhkost. Modelovací deska bývá obvykle vyhřívaná. Tím se zajistí, že filament bude chladnout pomaleji, povrch součásti bude kvalitnější a předejde se tak odlepování prvních vrstev z povrchu tiskové podložky. Některé uzavřené komory mají také možnost vyhlazování výsledného modelu pomocí acetonových výparů.

Metoda FDM je hojně rozšířená právě díky své ceně a jednoduchosti. Je určena jak pro profesionální využití, tak pro individuální zákazníky. V závislosti na konfiguraci se cena těchto tiskáren pohybuje od pěti tisíc do několika set tisíc korun. Mezi hlavní nevýhody této metody patří malá mezivrstevní pevnost, která vzniká větším teplotním rozdílem mezi nanášeným a již naneseným filamentem.

1.2.2. Selective Laser Sintering (SLS)

Metoda Selective Laser Sintering (SLS) je jednou z metod spadající pod Powder Bed Fusion (PBF), která využívá buď elektronový paprsek, nebo laser k roztavení a sloučení jemného práškového materiálu. Ten je postupně nanášen na pracovní desku nebo již tvořenou součást. Samotný vyráběný model (viz Obr. 2) se s celou pracovní deskou po každém spečení jednotlivé vrstvy posune směrem dolů a celý proces se opakuje. SLS spadá mezi nejstarší metody, které vznikly v polovině 80. let. Nejčastěji využívané materiály jsou kovy a jejich slitiny.

Při této metodě nesmí velikost práškového zrna překročit velikost 0,6 mm. Při větší velikosti by nedošlo k dokonalému spečení a výrobek by nebyl dostatečně pevný. Běžně se tloušťka jedné spekané vrstvy pohybuje v rozmezí 0,3 až 0,05 mm [2].



Obr. 2 Metoda SLS [5]

Výhodou této metody je, že ve velkém množství případů není potřeba použití vzpěr či podpurných konstrukcí, neboť okolní nespečený práškový materiál vlastní tíhu výrobku unese. Ve všech případech však nelze podpurné konstrukce zcela vynechat. Tím, jak spečený výrobek chladne, vznikají v materiálu různá pnutí a hrozí nadzvednutí nebo jiná deformace, která je schopná celý proces výroby zničit. Bohužel i malé nadzvednutí nebo prohnutí způsobí, že nově nanesená vrstva prášku nebude v celé své ploše konzistentní, což je pro tuto technologii zcela rozhodující faktor. V krajních případech může dojít ke kolizi výrobku se samotným strojem. Z toho vyplývá, že funkce podpurných konstrukcí spočívá spíše v odvodu tepla než v podpírání samotného výrobku. Zbytkový materiál v zásobníku je po profiltrování od případných spečených nečistot opět použitelný.

Nevýhodou je velká pořizovací cena samotného stroje i práškového materiálu a energetická náročnost. Metoda SLS je tudíž určena převážně pro profesionální tisk. Tento výrobní postup neumožňuje tisk uzavřených tvarů, například dutin, neboť by nespečený prášek zůstal uvnitř. Výrobky je možné tisknout pouze z jednoho druhu materiálu.

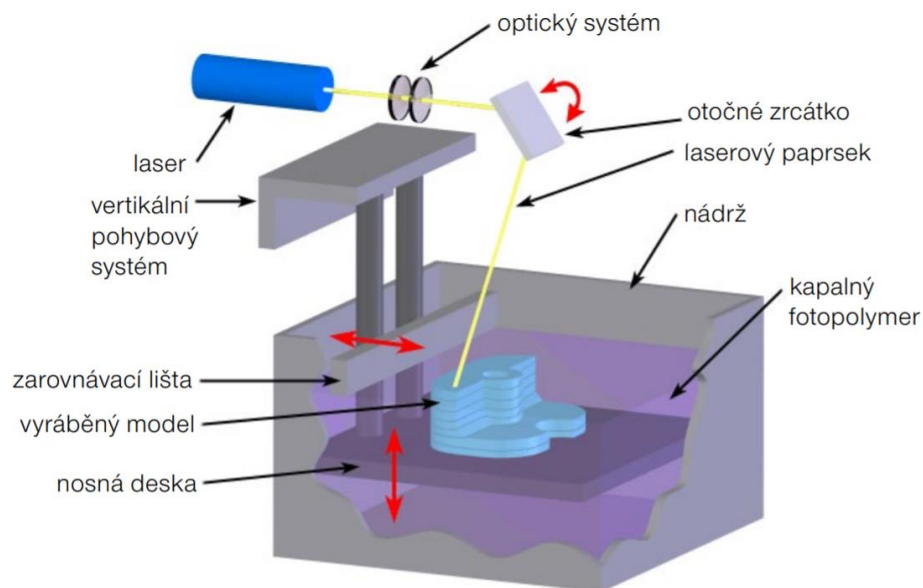
Je nutné brát v potaz, že jednotlivé částice prášku mohou dosahovat i velikostí menších než $10\ \mu\text{m}$, a proto je manipulace s tímto materiálem velice nebezpečná z důvodu možného vdechnutí. U některých materiálů může dojít při kontaktu se vzduchem i k samovolnému vznícení. Proces spékání probíhá v komoře s ochrannou atmosférou inertních plynů jako argon nebo dusík. Obecně jsou kovové prášky označovány výrobci jako zdraví škodlivé. Při manipulaci je proto zapotřebí nosit vhodné ochranné pomůcky. Tiskárny jsou z tohoto důvodu ve většině případů vybaveny odsávací komorou, kde je nejprve nutné nově zhotovený výrobek pečlivě očistit od zbytků nespečeného prášku a až poté je možné jej bezpečně vyjmout z hermeticky uzavřené komory stroje.

1.2.3. Stereolithography Apparatus (SLA)

Stereolitografie je nejstarší metodou 3D tisku. Ta spočívá ve vytvrzování fotopolymeru pomocí UV záření (laseru). Na Obr. 3 je zřejmý princip metody, kdy pracovní deska postupně sjíždí do nádrže s fotopolymerem a na úrovni hladiny se pomocí UV záření postupně vytvrzuje obrazec.

Druhý princip je založen na opačném chodu pracovní desky. Ta je nejprve zcela ponořena do nádoby s polymerem a postupně vyjíždí směrem vzhůru. Laser v tomto případě osvětluje pracovní plochu zespodu a výrobek tak vzniká ve spodní části pracovní desky. Výrobek je tak postupně vytahován z tekutého polymeru. Pro dosažení lepších povrchových a pevnostních vlastností se hotový výrobek zahřívá nebo opětovně ponořuje do polymeru a nasvěcuje.

Finální produkt je možné, stejně jako u metody SLS, tisknout pouze z jednoho materiálu. Výběr fotopolymerů je zatím poměrně omezený. Výhodou je velká přesnost, kde tloušťka jednotlivých vrstev může dosahovat až 10 μm [6]. To je možné ovlivnit pouze dobou osvětlení a množstvím energie světelného zdroje. Celý proces je však relativně velmi pomalý, a tudíž i poměrně drahý. Pomocí metody SLA je možné vytvářet i nanokompozitní struktury.



Obr. 3 Metoda SLA [5]

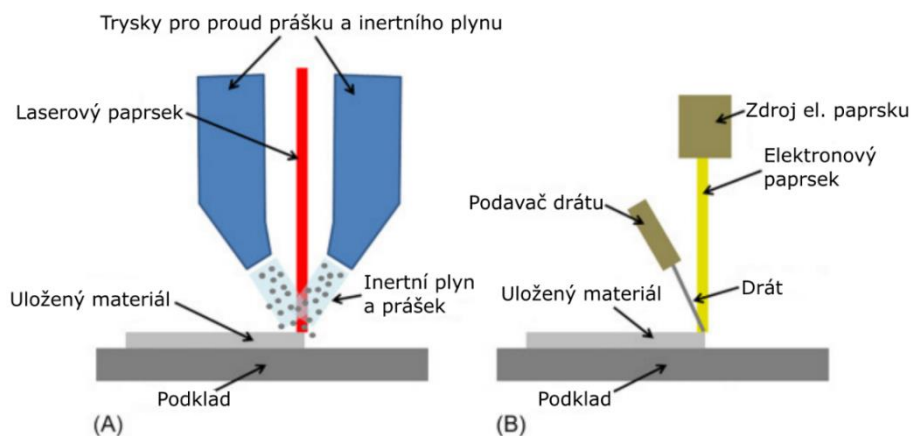
1.2.4. Digital Light Processing (DLP)

Metoda DLP je téměř shodná s předchozí metodou SLA s rozdílem v principu osvětlování. Pro tento výrobní postup je použit speciální projektor, který je schopen vytvrdit fotopolymer v jedné souvislé vrstvě. Zde nejčastěji dochází k osvětlení ze spodní strany a pracovní deska postupně vytahuje výrobek z nádrže s kapalným fotopolymerem [6].

1.2.5. Direct Energy Deposition (DED)

Princip metody DED spočívá v nanášení prášku (viz Obr. 4 A) nebo drátu (viz Obr. 4 B), který je pomocí laseru nebo elektronového paprsku roztaven a spečen na malé oblasti do určitého tvaru. Technologický princip je podobný jako u metody FDM, je však nutno použít mnohem větší množství energie. Takové nanášení materiálu je možné v libovolné poloze.

Nespornou výhodou je, že při této metodě není potřeba žádné uzavřené komory, pracovní desky, nebo práškového lože (jako například u metody SLS). Proto lze opravovat některé defekty bez nutnosti demontáže poškozené části. Mezi nejčastěji používané materiály patří titan, korozivzdorná ocel nebo hliník a jeho slitiny.

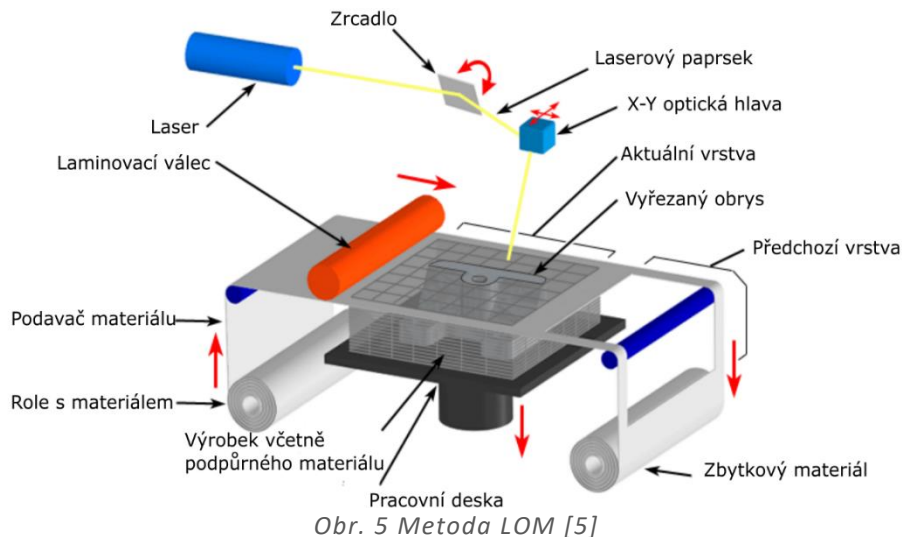


Obr. 4 Metoda DED [5]

Způsob DED je využíván spíše u větších komponentů, neboť povrch není zcela dokonalý a přesnost se pohybuje pouze kolem 0,25 mm. Na druhou stranu je však velmi rychlý. Na stejném principu fungují metody označované například jako Laser Engineered Net Shaping (LENS™), Laser Solid Forming (LSF), Directed Light Fabrication (DLF), Direct Metal Deposition (DMD) nebo Electron Beam AM (EBAM) [6].

1.2.6. Laminated Object Manufacturing (LOM)

Laminační metoda (LOM) funguje na principu slepování přesně ořezaných pásů, které tvoří jednotlivé vrstvy modelu. Speciální pásy, které jsou z jedné strany opatřené lepidlem, se pomocí laseru vyříznou do požadovaného tvaru a nalepí na předchozí vyřezaný pás. Poté se již slepené vrstvy posunou směrem dolů a uvolní prostor dalšímu pásu k vyřezání, jako lze vidět na Obr. 5.



Veškerý ořezaný a přebývající materiál se po celou dobu procesu nijak neodstraňuje a slouží jako podpůrný element pro lisovací pás. Až po dokončení výroby je možné odpadní část odstranit, což bývá časově náročné. Povrch produktu není dokonalý a tato metoda je určena spíše pro jednodušší tvarové struktury.

1.3. Materiály

Výběr materiálů je pro aditivní technologii poměrně rozsáhlý. Zohledněny budou tudíž pouze nejběžněji používané materiály, které jsou pro aditivní technologii a jednotlivé metody typické.

1.3.1. Polymery a kompozitní materiály

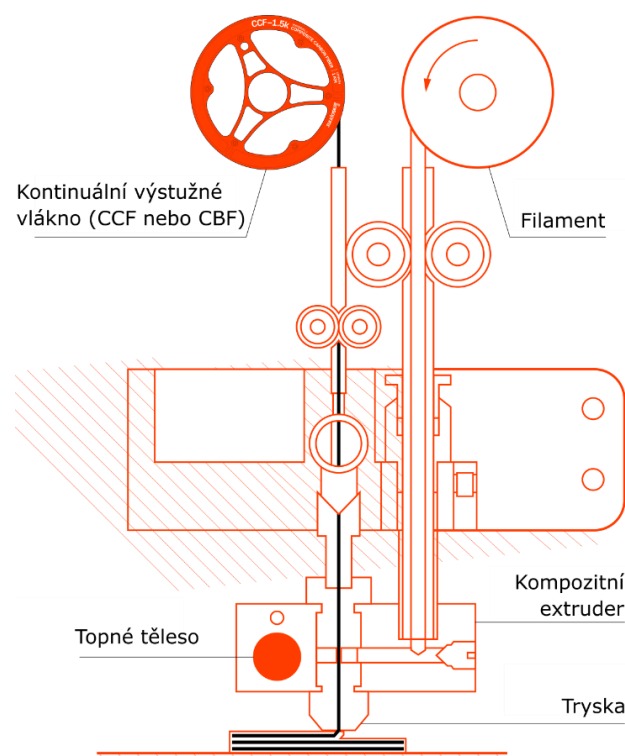
Polymerní materiály jsou převážně využívány u metod FDM, SLA a DLP. Polymery lze rozdělit na dvě základní skupiny: plasty a elastomery.

Plasty jsou polymery, které jsou za běžných podmínek většinou tvrdé a při větším namáhání se obvykle trvale deformují. U výrobků z těchto materiálů je nutné brát zřetel na křehkost materiálu a malou pružnost. Plasty se dále dělí dle chování při vyšší teplotě na termoplasty a reaktoplasty. Termoplasty jsou řazeny mezi polymery, které nabývají s narůstající teplotou na plasticitu a tvárnosti. Tyto vlastnosti mohou nastávat opakovaně, neboť při zahřívání nedochází ke změnám chemickým, ale pouze ke změnám fyzikálním. Termoplastické materiály jsou charakteristické pro tiskárny typu FDM. Naopak u reaktoplastů, při působení teploty, tlaku nebo například záření, dochází k takzvanému vytvrzování. Je to nevratný proces, proto takové výrobky nelze svařovat, tvarovat nebo zpětně zpracovat do taveniny. Surový a nevytvrzený materiál se označuje jako pryskyřice. Pro metody SLA a DLP je obvykle užito speciálního fotopolymeru, který se vytvrzuje pomocí UV záření.

Elastomery jsou vysoce pružné materiály, které lze malou silou značně deformovat bez toho, aniž by došlo k nevratné změně. Elastomery se dělí na

kaučuky a termoplastické elastomery. V oboru aditivních technologií jsou důležité právě termoplastické elastomery. Ty jsou tvořené ze směsi měkkých elastomerů a tvrdých termoplastů, které mají za úkol vytvářet síť celé struktury. Velká výhoda oproti pryžím je, že při zvyšující se teplotě přechází tento materiál do tekutého stavu a lze jej zpracovávat a případně recyklovat jako dříve zmíněné termoplasty.

Z důvodu zlepšení vlastností se tyto polymery mohou mísit s přídatnými složkami, které mají výztužnou nebo kosmetickou funkci. Mohou to být například různé prášky, úlomky, nasekaná vlákna, fibrily a podobně. Kompozitní materiály vykazují významně lepší parametry než v případě použití samotného čistého polymeru. Vlastnosti jsou však závislé na orientaci výztuh v kompozitním materiálu. Touto problematikou se zabývá technologie takzvaných nekonečných vláken [4]. Často se setkáme například s označením Composite Fiber Co-extrusion (CFC), kde je kontinuální výztužné vlákno postupně přidávané do nataveného termoplastu. Vlákna jsou například uhlíková (CCF) nebo čedičová (CBF) [7]. Celý proces tisku kompozitního materiálu za použití nekonečných vláken je schematicky popsán na Obr. 6. V případě metody FDM má použití kompozitních materiálů zanedbatelný vliv na pevnost mezi jednotlivými vrstvami a je zde stále velký dopad anizotropie. Výrobce kompozitních tiskáren Anisoprint udává, že kompozity vyztužené spojitými vlákny jsou až 30x pevnější než čistý plast a 2x pevnější a lehčí než hliník [7].



Obr. 6 Tisk kompozitního materiálu metodou CFC [7]

Velkou výhodou této technologie je možnost rovnoměrné distribuce zatížení do celého materiálu. Největší koncentrace napětí nastává v místech, kde se mění průřez a tvar. Velkými koncentrátory napětí mohou být taktéž konstrukční prvky

jako drážky, otvory nebo zápichy. Aby nedošlo ke snížení pevnosti konstrukčních prvků, obvyklým řešením je zesílení materiálu v daném místě. V důsledku toho dochází ke zvyšování hmotnosti součásti. Jestliže jsou však výztužná vlákna rozložena přesně v trajektoriích největších napětí, je tím dosaženo ideálnějšího rozložení napětí do celého prvku s minimálním navýšením hmotnosti.

Na Obr. 7 lze vidět vhodné rozmístění výztužných vláken kolem kruhového otvoru, kde dochází k největší koncentraci napětí [8]. Takové řešení má velké opodstatnění například v leteckém průmyslu.



Obr. 7 Kompozitní komponent PETG+CCF vyroben metodou CFC [8]

1.3.2. Kovy a jejich slitiny

Aditivní výroba s využitím kovů za poslední desetiletí zažívá zásadní vývoj převážně v leteckém a automobilním průmyslu. Tento technologický postup umožňuje vyrábět složité tvary, které nelze vytvořit pomocí žádné jiné technologie, jako je například odlévání, tváření nebo obrábění. Na rozdíl od polymerů, při použití kovů a jejich slitin výsledný produkt vykazuje diametrálně odlišné mechanické vlastnosti a jejich možný rozsah použití je díky tomu mnohem širší. Taktéž lze vytvářet složité jednodílné komponenty, odlehčené struktury a komplikované duté kanály, které dokáží odolat vysokým teplotám či tlakům. Proto je možné se s touto technologií setkat častěji v leteckém průmyslu. V automobilovém průmyslu je využívána zejména u prototypového vývoje nebo u závodních speciálů. Značný rozdíl je také v ekonomické sféře. Tisk kovových materiálů je finančně mnohem náročnější než tisk polymerů. Na druhou stranu je z hlediska výnosnosti mnohem atraktivnější. Nejčastěji využívané metody pro tisk kovů jsou PBF a DED. Pomocí metod PBF je možné dosáhnout přesnosti až 0,02 mm [9].

Tab. 2 Práškové materiály pro technologie PBF a DED [10]

Materiál	Specifikace	Tvrдост	Mez kluzu [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti [MPa]
M300	Martenzitická nástrojová ocel	675 HV10	2 200	2 270	187
316L	Korozivzdorná a odolná ocel	205 HV10	545	700	194
AlSi7Mg	Lehká Al slitina používaná v letectví	110 HV5	270	340	67
Ti6242	Ti žáruvzdorná slitina	349 HV10	985	1 065	121
INCONEL 718	Ni žáruvzdorná superslitina	480 HV10	1 305	1 495	195
Rematitan	Ti slitina určená pro kostní náhrady	-	950	1 005	115

Mezi nejrozšířenější používané kovové materiály patří nástrojová a korozivzdorná ocel, slitiny hliníku a titanu [11]. Příklady jednotlivých materiálů jsou uvedeny v Tab. 2. Oceli a jejich slitiny jsou nejčastěji používané materiály ve strojírenství, a proto jsou hojně využívány i v rámci aditivní technologie. Materiálové vlastnosti jsou velmi podobné jako u výrobků, které byly vyrobené konvenčními metodami. Značná výhoda je především v úspoře materiálu, a tudíž i ve výsledné hmotnosti a ceně spotřebovaného materiálu. Taktéž lze eliminovat mnoho problémů konstrukčního řešení větších celků. Na druhou stranu jsou vlastnosti těchto materiálů výrazně závislé na způsobu a směru tisku a také na rychlosti ochlazování. Je proto nezbytné tyto aspekty pečlivě kontrolovat [11].

V případě titanu a jeho slitin lze konstatovat, že spojení s aditivní technologií odkrývá velmi zajímavý potenciál. U těchto materiálů jsou známé nevýhody jako vysoká cena, velmi špatná obrobitelnost a velké materiálové ztráty, které vznikají při použití konvenčních technologií. To jsou aspekty, které lze pomocí aditivní technologie víceméně eliminovat. Díky tomu se tento způsob výroby stává ekonomicky výhodnějším. Ve zdravotnictví je možné výrobu přizpůsobit individuálním požadavkům a také zásadně snížit dobu dodání. Často jsou touto metodou vyráběna zubní protetika nebo kostní náhrady s otevřenou porézní strukturou povrchu, která je velmi důležitá pro pevné spojení mezi implantátem a kostí [4]. Velice zdařilý příklad aplikace v praxi vidíme v případě společnosti General Electric (GE) a jejich palivových trysek použitých v leteckých motorech. V současné době je již vyrobených přes 10 000 kusů tohoto komponentu [13]. Komplikovanou strukturu palivové trysky, které nelze dosáhnout žádnou konvenční metodou, lze vidět na Obr. 8. Momentálně se tyto materiály řadí mezi jedny z nejzajímavějších pro výzkum jejich použití v aditivních technologiích.



Obr. 8 Řez palivovou tryskou GE pro letecké motory [13]

Hliníkové slitiny jsou v aditivní technologii zastoupené méně, neboť hliník nepatří mezi drahé kovy a jeho obrábění není příliš náročné, a tak z ekonomického hlediska vychází lépe použití konvenčních technologií. Ještě méně výhod přináší obtížná svařitelnost některých hliníkových slitin z důvodu obsahu zinku. Špatná viskozita a vysoká odrazivost způsobuje obtížné natavení a propojení s okolním materiálem. Nesporná výhoda je však ve vysoké tepelné vodivosti. Díky tomu nevznikají ve výrobku velká tepelná pnutí. Z větší části proto odpadá nutnost použití podpůrných struktur a celý výrobní proces tak lze urychlit [14].

Velké zastoupení mají též superslitiny na bázi niklu známé pod obchodní značkou INCONEL, které jsou velmi odolné proti oxidaci a korozi při vysokých teplotách. To umožňuje použití například v průmyslu tepelného zpracování a v leteckém průmyslu ve výfukových systémech tryskových motorů [15].

Aditivní výroba se také často využívá k výrobě forem pro vstřikovací lisy. Lze tak dosáhnout bohaté struktury chladicích kanálů, které zamezí vzniku přehřátých oblastí. Tím pádem dochází k velkému urychlení výrobního cyklu, zlepšení kvality, a především k razantnímu snížení výrobní ceny produktů.

Tento způsob výroby s sebou ovšem přináší také některá úskalí. Jedním z nich je povrchová struktura, která není příliš dokonalá. Vysoká pórovitost vede k možným defektům, jako jsou například mikroskopické trhliny. Dochází také k lokální koncentraci napětí, která způsobuje rychlejší únavové poškození. Na druhou stranu mikrostruktura materiálu vykazuje lepší vlastnosti, než jaké jsou vlastnosti u konvenčně vyrobených dílů. Struktura je každopádně velice anizotropní v závislosti na směru tvorby jednotlivých vrstev.

1.3.3. Betony

V dnešní době se aditivní technologie promítá i do stavebnictví. S tiskem betonu je možné se setkat již relativně často i v běžném životě. Zatím se však jedná převážně o designové prvky a městský mobiliář. Tisk jako takový je umožněn za pomoci roboticky řízených strojů, které velkými tryskami extrudují betonovou pastu do požadovaného tvaru.

Betonová kompozitní směs pro aditivní technologii se obdobně jako u klasického použití skládá z pojiva (obvykle cement), plniva (kamenivo různých frakcí), vody a příměsí. Po smíchání těchto složek a vytuhnutí vzniká pevný umělý slepenec. Tvrdnutí betonu není způsobeno vysycháním, ale chemickým procesem, při kterém dochází k vykrystalizování, díky němuž beton získává svou tvrdost a pevnost. Při tomto procesu se uvolňuje nezanedbatelné množství tepla. Pro zlepšení mechanických vlastností se beton kombinuje obvykle s železnou výztuží. V aditivní technologii se často setkáváme s uhlíkovými vlákny. Nedílnou součástí betonu jsou také jeho přísady a příměsi. Ty slouží k ovlivnění vlastností betonu. Patří mezi ně hlavně urychlovače nebo zpomalovače tuhnutí, provzdušňovače, protizmrazovací přísady a taktéž například barviva.

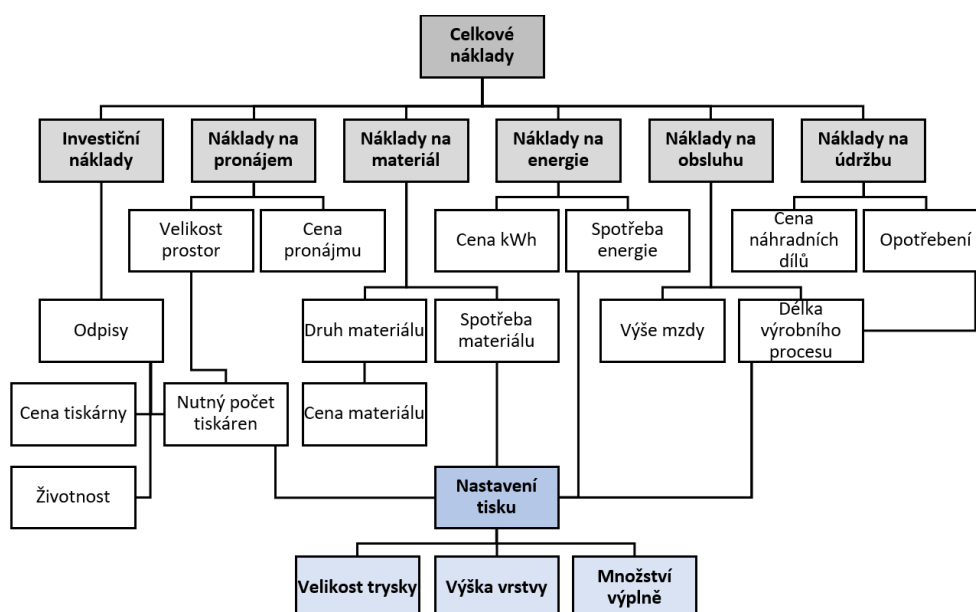
V České republice se tiskem betonu zabývá firma ICE Coral, která momentálně patří mezi 10 největších firem s touto specializací na světě. Podle této firmy lze přesnou aplikací betonu uspořit až 70 % materiálu oproti klasické technologii, kdy je nutné beton lít do předem připravených bednění. Například tak lze budovat duté stavební konstrukce, což by při použití tradičních metod bylo velice neekonomické a časově náročné. Další výhoda spočívá v boření limitů v oblasti designu a architektury [16].

Největší výzvou je však hustota a časově proměnné vlastnosti betonové směsi. Jsou zde 2 aspekty, které mezi sebou navzájem bojují. V první řadě je nutné betonovou směs dobře propojit a zbavit se přebytečného vzduchu. Po tomto procesu je nutné finální směs tekutého betonu co nejdříve vytlačit skrz extrudující trysku, aby nedocházelo například k nadměrnému zanášení trysky a potrubí ztuhlou směsí. Následně je zde druhý problém, kdy je zapotřebí, aby vytlačená směs betonu měla určitou tvarovou stálost a udržela bez velkých deformací následující extrudovanou vrstvu [6]. Jedno z možných řešení je například mixování směsi s akcelerátory tuhnutí až téměř na konci celého procesu, tudíž v tiskové hlavě. Princip je velmi podobný jako u směšovacími nástavců dvousložkových lepidel. V tomto případě zde však vzniká problém mezivrstevní adheze. Rychlé tuhnutí extrudovaného materiálu má za následek tvoření tzv. studeného spoje jednotlivých vrstev nebo jejich nedostatečné propojení.

2. Metoda FDM a ekonomická náročnost

Následující část práce se zabývá ekonomickou náročností metody FDM. Ta byla vybrána zejména z důvodu rostoucí popularity nejen v průmyslovém, ale i domácím použití. Také je zařazena ze všech výše uvedených technologií mezi tu nejméně finančně náročnou jak z pohledu prvotní investice, tak z dlouhodobého provozu. Momentálně ji lze považovat za globálně nejvíce rozšířenou aditivní technologii primárně právě díky její dostupnosti, ale také díky všestrannému použití. Z tohoto důvodu je k tomuto výrobnímu postupu možno dohledat nejvíce veřejně dostupných dat a studií. V opačném případě například u metod SLS nebo DED, kde se investiční náklady pohybují v řádech milionů korun, jsou výrobní data z větší části nedostupná z důvodu ochrany firemních tajemství a know-how. Dalšími důvody výběru FDM metody je dostupnost bezplatných programů pro zpracování modelů a simulací tisků a možnost využití tiskárny *Prusa i3 MK3S+* pro srovnání simulací s reálným tiskem výrobků v této práci.

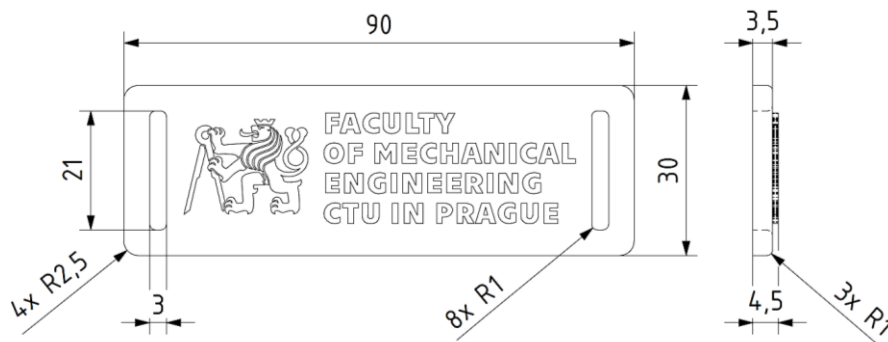
Na následujícím Obr. 9 je znázorněné souhrnné schéma hlavních nákladových skupin vstupujících do kalkulace. Mezi nejvýznamnější patří odpisy strojů, cena materiálu, cena energií, náklady na pronájem a náklady na obsluhu a údržbu.



Obr. 9 Schéma nákladových skupin pro metodu FDM

Ze schématu je patrné, že veškeré nákladové skupiny jsou výrazně závislé na zvolených parametrech tisku. V předběžném kalkulačním srovnání aditivního a konvenčního způsobu výroby není nutné srovnávat úseky, které se od sebe výrazně neliší. V obou případech je nutné zhotovit 3D model a následně jej přes vhodný program zpracovat do konečného souboru o specifickém formátu, určeném pro dané výrobní zařízení. Proto je tato nákladová položka ve srovnání zcela vynechána. Nákladové skupiny jsou podrobně rozebrány v následujících odstavcích.

Srovnání a simulační tisky jsou prováděny na základě výroby ilustračního propagačního předmětu, který je blíže specifikován na Obr. 10. Simulace jsou uskutečňovány v software od firem Průša (PRUSASLICER) a Anisoprint (AURA). Data převzatá ze simulací se od skutečného tisku liší maximálně v řádech procent a lze je tak považovat za reálná a vypovídající. Předmět byl zvolen tak, aby analogicky kopíroval objemové a hmotnostní parametry vzorku pro tahové zkoušky z Obr. 11, neboť pro tento vzorek existují přesné informace z reálné výroby na vstřikovacím lisu *Allrounder 270 C*, který se nachází v laboratořích FS ČVUT. Výrobní informace poslouží zejména pro předběžné kalkulační srovnání metody FDM a technologie vstřikování plastů. Předmět byl zvolen také z důvodu, že u tohoto druhu výrobků souvisejících s propagací nebo s upomínkovými předměty se nepředpokládá objemná produkce a počty kusů se pohybují nanejvýš v řádech tisíců. Taktéž se dá předpokládat nutnost variability výroby například z důvodu změn názvů, adres, čísel nebo jmen na propagačních materiálech. Obě skutečnosti velmi nahrávají výrobě pomocí metody FDM.



Obr. 10 Propagační štítek s logem ČVUT [mm]

2.1. Dostupné FDM tiskárny na trhu

Nejzásadnějším počátečním rozhodnutím je výběr vhodného stroje. Na rozdíl od jiných technologií není u FDM potřeba speciálních přídatných zařízení. Není zde nutnost samostatného odsávání zdraví škodlivých výparů nebo částic, až na výjimky u velmi specifických materiálů. Taktéž není zapotřebí použití speciálních plynů a ochranné atmosféry, omývacích, čistících a vysoušecích zařízení pro odstranění zbytkového materiálu, jako například u technologie SLS nebo SLA. Většina tiskáren využívajících metodu FDM má díky tomu poměrně kompaktní rozměry a lze je, s ohledem na doporučené provozní podmínky, umístit téměř kdekoli. Je nutné brát ohled na zvýšenou hlučnost způsobenou pohybem krokových motorů a ventilátorů. Oproti konvenčním strojům je však i tento aspekt poměrně zanedbatelný.

Při výběru vhodného stroje je potřeba znát základní požadavky. Rozdíly spočívají především ve velikosti tiskového prostoru, počtu extruderů, maximální teploty podložky a trysek a v rychlosti tisku. Dalším rozhodujícím kritériem může být funkce tisku kompozitních materiálů, kdy dochází ke koextruzi termoplastu

a nekonečného výztužného vlákna. Rozdíl lze spatřit také v typu konstrukcí, které se dělí na otevřené a uzavřené. U průmyslových tiskáren je možné se setkat pouze s uzavřenou konstrukcí. To vše se odráží na konečné pořizovací ceně stroje.

V Tab. 3 lze vidět širší výběr FDM tiskáren dostupných na trhu od sedmi různých výrobců včetně základních specifikací. Jsou seřazené od těch nejlevnějších až po ty s nejvyšší pořizovací cenou. Všechny podporují tisk běžných materiálů jako PLA, PETG nebo ABS.

Tab. 3 Dostupné FDM tiskárny a jejich specifikace

Výrobce a typ	Rozměry [mm]	Výška vrstvy [μm]	Rychlost tisku [mm/s]	Konstrukce a počet trysek	Max. teplota trysky [°C]	Cena (včetně DPH)*	
Creality CR-5-PRO	300 × 225 × 380	100-300	80	uzavřená 1	300	24 426 Kč	[17]
Prusa i3 MK3S+	250 × 210 × 210	50-350	až 120	otevřená 1	300	26 990 Kč	[18]
Craftbot FLOW IDEX XL	425 × 250 × 500	50-300	až 200	uzavřená 1	300	137 940 Kč	[19]
Raise3D Pro 3	300 × 300 × 300	10-250	30-150	uzavřená 2	300	150 724 Kč	[20]
Intamsys FUNMAT HT	260 × 260 × 260	50-300	30-200	uzavřená 2	450	169 388 Kč	[21]
Ultimaker S5	330 × 240 × 300	20-600	40-75	uzavřená 2	280	199 771 Kč	[22]
Anisoprint Composer A4	297 × 210 × 140	60-300	10-80/1-10**	uzavřená 2	270	462 825 Kč	[23]
Anisoprint Composer A3	420 × 297 × 210	60-300	10-80/1-11**	uzavřená 2	270	833 085 Kč	[24]

* Platné ceny ke dni 28. 4. 2022

** Pro metodu FDM/CFC

Pokud vezmeme v úvahu pouze tiskárny zaměřené spíše na hobby a domácí využití, mezi ty v Evropě nejrozšířenější výrobce patří česká firma Průša Research a čínský výrobce Creality. Cena odvíjející se od různých specifikací se pohybuje od 5 000 Kč do 60 000 Kč. První dvě tiskárny *Creality CR-5-PRO* a *Prusa i3 MK3S+* jsou poměrně srovnatelné cenové úrovně a liší se hlavně objemem tiskového prostoru. Tiskárna *Prusa i3 MK3S+* vykazuje kvalitnější a rychlejší tisk, bohužel jako jediná ze všech uvedených tiskáren nemá uzavřený tiskový prostor. Ten lze nyní pořídit od výrobce samostatně a vychází přibližně na 9 000 Kč. Vylepšená verze se všemi doplňky, jako je protipožární systém nebo odvětrání, vyjde na 18 000 Kč [25]. Firma Průša se taktéž pyšní velice dobrou technickou podporou a dostupností všech náhradních dílů.

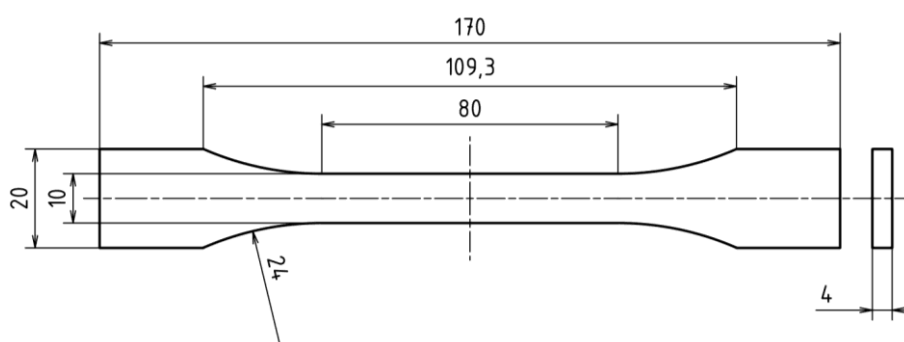
Následující čtyři tiskárny jsou opět poměrně cenově srovnatelné a jsou určeny spíše pro průmyslové použití. Jejich cena začíná zhruba na 130 000 Kč. Nejvýznamnější rozdíl je znatelný u tiskárny *FUNMAT HT* od firmy Intamsys. Ta je schopná dosáhnout teploty tavné trysky až 450 °C, což u ostatních výrobců není

běžné. Díky tomu je umožněn bezproblémový tisk termoplastů typu Ultem, který je schválený pro styk s potravinami. Dále PEEK, nebo například PPSU využívaný ve zdravotní technice. Tyto materiály se právě díky vysoké teplotě při tisku vyznačují velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. Taktéž jsou mnohem více tepelně odolné než jiné termoplasty. Tiskárna *FLOW IDEX XL* od firmy CRAFTBOT nemá dvě extrudující trysky, její cena je dána spíše velikostí tiskového prostoru.

Poslední dvě tiskárny jsou od shodného výrobce Anisoprint. Liší se mezi sebou pouze velikostí tiskového prostoru a celkovým maximálním příkonem. Cenová hladina je diametrálně odlišná od všech předchozích tiskáren. To je dáno především tím, že tiskárny podporují tisk kompozitní struktury metodou CFC. Velikost tiskového prostoru se na ceně také zásadně odráží, tiskárna Composer A3 oproti A4 má pořizovací cenu téměř dvakrát vyšší.

2.2. Základní materiály pro FDM

Výběr materiálů pro metodu FDM je poměrně široký a je prodáván ve formě nekonečných strun takzvaného filamentu. Velké množství firem vyrábějících 3D tiskárny se taktéž specializuje na výrobu filamentů vlastního složení a rozměrů, optimalizovaných právě pro jejich vlastní produkty. Z důvodu velkého množství specifikací jednotlivých filamentů jsou v následujících tabulkách uvedeny pouze ty, které mají nejzásadnější vliv na způsob tisku a následného použití výrobku. Teplotní odolnost dle ISO 75 je vyjádřena teplotou, při které se testovací objekty prohnují při konstantním zatížení 0,45 MPa. Rázová houževnatost materiálu metodou Charpy dle ISO 179-1 je stanovena energií potřebnou ke zlomení testovaného objektu Charpyho kyvadlem. Pevnost v tahu dle ISO 527-1 je stanovena silou potřebnou k přetržení nebo nevratné deformaci testovaného vzorku typu A1. Rozměr použitých zkušebních vzorků je znázorněn na Obr. 11.



Obr. 11 Rozměry zkušebního vzorku A1 dle ISO 527-1 [26]

V následující tabulce Tab. 4 je uvedený výčet tří základních a nejčastěji používaných materiálů. Jejich využití je poměrně omezené, avšak rozhodující je v oblasti FDM metody jejich velmi nízká cena. Jednotlivé materiály jsou podrobně rozebrány v následujících podkapitolách.

Tab. 4 Základní materiály pro FDM tiskárny

Materiál	Výrobce	Teplota trysky	Teplotní odolnost	Rozpustnost	Rázová houževnatost	Pevnost v tahu	Cena (včetně DPH)*
PLA	Prusament	215 °C	55 °C	Toluen Chloroform	12 kJ/m ²	57 MPa	699 Kč [27]
PETG	Prusament	250 °C	68 °C	Dichlormethan	bez zlomení	46 MPa	699 Kč [28]
ABS	Fillamentum	240 °C	81 °C	Voda Isopropylalkohol	32 kJ/m ²	39 MPa	628 Kč [29]

* Platné ceny za 1 kg materiálu ke dni 28. 4. 2022

2.2.1. PLA

Filament PLA (*Kyselina polymléčná*) je biologicky rozložitelný polyester složený z přírodních materiálů. Typově se řadí mezi ten nejlevnější, nejlépe tisknutelný a také nejčastěji používaný. Nejvhodnější je pro detailnější a menší výrobky nebo pro rychlé prototypování. Nehodí se pro mechanicky často namáhané součásti nebo na součásti pro venkovní použití. Nevyžaduje vysokou teplotu při extruzi a tisk je rychlý.

Velkou nevýhodou je malá odolnost vůči mechanickému namáhání. Kvůli jeho tvrdosti a křehkosti velmi lehko dochází k lámání po vrstvách nebo dokonce k úplnému zlomení součásti. Propojení mezi jednotlivými vrstvami není dokonalé. Neodolává vyšším teplotám a při působení UV záření postupně degraduje. Již při 60 °C ztrácí svou pevnost a začíná měknout [27]. Při mechanické povrchové úpravě, jako například broušení, je nutné výrobek chladit. Chemického vyhlazení je možné dosáhnout pouze za použití zdraví škodlivých organických rozpouštědel, jako je například chloroform nebo tetrahydrofuran.

Mezi kladné vlastnosti patří především velmi dobrá rozměrová přesnost. Díky nižší teplotě tání zde tolik nehrozí velké teplotní rozdíly, a tudíž v průběhu tisku nedochází k výrazné změně tvaru. V mnoha případech se díky PLA dá předejít odlepování výtisků od tiskové plochy a k tvarové deformaci celého výrobku. Lze jej považovat za poměrně ekologický. Bohužel i přes to, že je složený z rostlinných materiálů, nelze jej v běžných podmínkách rozložit. Toho lze docílit jen v průmyslových kompostárnách při vyšších teplotách. Materiál je sám o sobě hygienicky nezávadný, nedoporučuje se jej však používat na výrobky určené pro styk s potravinami z důvodu velké pórovitosti vytisknutých struktur [30]. Tento materiál bude pro své vhodné vlastnosti použit pro propagační štítek ČVUT.

2.2.2. PETG

Materiál PETG (*Polyethylentereftalát-glykol*) je také označován jako PET s modifikovaným glykolem. Oproti předešlému PLA vykazuje mnohem lepší mechanické vlastnosti. Právě modifikace glykolu zajišťuje, že materiál není křehký a je snadněji tisknutelný. Díky tomu se hodí i na více zatěžované součásti.

Vlastnosti jsou jinak podobné jako u PET používaného například pro výrobu plastových lahví.

Nesporná výhoda je také v jeho schopnosti přilnout k jakémukoliv povrchu a dokonale spojit jednotlivé vrstvy, což zvyšuje mezivrstevní pevnost a voděodolnost výrobku. Malá teplotní roztažnost zajišťuje, že se podobně jako PLA při chladnutí tolik nedeformuje a nekrotí. Jeho vyšší houževnatost zaručuje, že součást se pouze prohne, ale nedojde k prasknutí. Oproti PLA ztrácí svou pevnost až po překročení teploty 70 °C. Je tedy vhodnější i na venkovní použití. Z důvodu silné přilnavosti je nutné tisknout na speciální drsné tiskové podložky. V případě hladké tiskové podložky je nutné její povrch před tiskem ošetřit speciálními přípravky, aby bylo možné výtisk bez poškození sejmut. Při broušení povrchu není nutné výrobek chladit. Chemická povrchová úprava je možná pouze za použití nebezpečných chemikálií. Například pomocí organického rozpouštědla dichlormethanu [28].

Tento materiál je opět sám o sobě zdravotně nezávadný, ale nedoporučuje se ho používat pro nádoby na jídlo a pití ze stejných důvodů jako u předchozího materiálu. Hygienické nezávadnosti lze docílit následnou úpravou povrchu, například povlakováním. Tisknout je možné i PET, ale oproti PETG je tisk náročnější a materiál nepřináší žádné další výhody. Rozměrová a detailová přesnost zde není tak dobrá jako v případě PLA. Při tisku často dochází ke tvorbě jemných vlásků, které vystupují z výrobku. To je způsobeno únikem materiálu z trysky během přesunu hlavy nad prázdným prostorem. Z důvodu dobré tažnosti však nedojde k přetržení jako u jiných materiálů. Tento problém je často označován jako stringování. Materiál PETG taktéž přináší úskalí při tisku převisů nebo mostů, kdy dochází k propadání a výsledný tisk není kvalitní [31].

2.2.3. ABS

Poslední z řady nejběžněji používaných materiálů je ABS (*Akrylonitrilbutadienstyren*). Jedná se o houževnatý a teplotně odolný materiál. Podobně jako PETG jej lze použít na mechanicky namáhané součásti. Nelze však počítat s tvarovou přesností jako má například PLA. Při tisku dochází k velkému kroucení, přičemž hotový výtisk bývá ve skutečnosti až o 2 % menší z důvodu velkého smršťování při chladnutí [32]. Při tvorbě modelu je nutné s touto skutečností počítat a vhodně naddimenzovat jeho velikost. Kroucení lze z větší míry eliminovat vyšší teplotou okolí při tisku. Z toho důvodu je doporučeno ABS tisknout pouze na tiskárnách s uzavřenou konstrukcí.

Při tisku vznikají nebezpečné výpary, které mohou ve větší míře představovat zdravotní riziko. Je nutné mít tiskárnu na dobře větraném nebo odsávaném místě. Materiál ABS není odolný vůči UV záření, po čase zežloutne a ztrácí svou pevnost. Ze všech tří základních materiálů má nejlepší teplotní odolnost, k měknutí dochází až při teplotě kolem 80 °C [29].

Největší předností tohoto materiálu oproti PLA a PETG je jeho velmi snadné vyhlazování pomocí acetonu. To se provádí buď pomocí lázní, nebo výparů. Acetonová lázeň je nevhodná z důvodu poškození rozleptaného povrchu při vyjímání a manipulaci se součásti. Lázeň se velmi rychle znečistí rozpuštěným materiálem a taktéž nelze vyloučit zatečení rozpouštědla do výtisku.

Za modifikovaného nástupce ABS lze považovat materiál s označením ASA (*Akrylesterstyrenakrylonitril*), který se používá například na výrobu levných plastových dílů do automobilů. Ten má oproti ABS mnohem vyšší odolnost vůči UV záření a při tisku uvolňuje méně toxických výparů.

2.3. Pokročilé materiály pro metodu FDM

Ne vždy postačují vlastnosti běžných plastů a je tedy nutné vybrat některé pokročilé například z Tab. 5. Jedná se o filamenty, které jsou náročnější na přípravu a nastavení tiskárny před tiskem a také jsou především výrazně dražší. Některé jejich vlastnosti jsou nicméně nenahraditelné. Například elasticita nebo rozpustnost ve vodě.

Tab. 5 Pokročilé materiály pro FDM tiskárny

Materiál	Výrobce a název	Teplota trysky	Teplotní odolnost	Rozpustnost	Rázová houževnatost	Pevnost v tahu	Cena (včetně DPH)*	
PC	Prusament PC Blend	275 °C	113 °C	Chloroform, DCM	bez poškození	63 MPa	1 399 Kč	[33]
Nylon	Fillamentum Nylon FX256	250 °C	110 °C	Ner rozpustný	bez poškození	45 MPa	1 816 Kč	[34]
Flex	Fillamentum FlexFILL 98A	240 °C	53 °C	DCM	bez poškození	25 MPa	1 780 Kč	[35]
PVA	PrimaSelect PVA+	195 °C	41 °C	voda	23 kJ/m ²	78 MPa	2 598 Kč	[36]
BVOH	Verbatim BVOH	215 °C	44 °C	voda	21 kJ/m ²	45 MPa	3 980 Kč	[37]

* Platné ceny za 1 kg materiálu ke dni 28. 4. 2022

2.3.1. PC

Mezi první náročnější filamenty lze zařadit PC neboli polykarbonáty. Jedná se o velice houževnatý a pevný materiál, který je také i teplotně odolný. Prohýbat se začne až po překročení 113 °C [33]. Další výhodou je jeho transparentnost. Díky tomu se s polykarbonáty můžeme běžně setkat například u ochranných brýlí, štítů nebo světlometů.

Největším problémem je velká tepelná roztažnost. Výrobky se často při tisku odlepují od podložky nebo praskají mezi vrstvami. Výrobci přidávají do PC různá aditiva, která tyto problémy částečně eliminují. Pro tisk tohoto materiálu je potřeba vyšších teplot. Teplota trysky se během tisku pohybuje okolo 275 °C

a je proto nutné, aby i okolní teplota kolem modelu byla vyšší a nevznikaly zde velké teplotní rozdíly. Dalším problémem je hydrofobická vlastnost polykarbonátů. Filamenty je nutné skladovat ve speciálních obalech, aby nedošlo k pohlcování vzdušné vlhkosti. Před samotným tiskem se doporučuje PC filament vyšší teplotou vysušit. Při tisku vzniká nepříjemný zápach [38].

Z předchozích důvodů se proto materiál nehodí pro tvorbu větších výtisků. Větší hustota výplně a tloušťka stěn má negativní vliv na kroucení a při tvorbě finálního tiskového souboru je potřeba s touto skutečností počítat. Vlastnostmi se tento materiál nejvíce přibližuje k PETG, avšak jeho cena je dvakrát vyšší.

2.3.2. Nylon (PA)

Nylon také známý jako polyamid (PA) je dalším pevným a při malých tloušťkách i částečně flexibilním materiálem. Taktéž disponuje malým součinitelem tření a vysokou tepelnou odolností. Lze jej tak použít na technické součásti, u kterých dochází k častému kontaktu, jako jsou například ozubená kola. Vyznačuje se velmi dobrou mezivrstevní přilnavostí [39].

Stejně jako PC je silně hydrofobický a při špatném uskladnění dokáže během jednoho dne pohltit vodu vážící více než je 10 % jeho hmotnosti. Před tiskem je nutné filament vysušit, minimálně čtyři hodiny při teplotě 90 °C [34]. Tisk je možný pouze při vyšších teplotách a dochází při něm k uvolňování nepříjemného zápachu. Nevýhodou je především jeho vysoká cena.

2.3.3. FLEX

Elastické materiály pro FDM jsou termoplastické elastomery (TPE), které se vyznačují mechanickou a chemickou odolností, dobrou mezivrstevní adhezí a lze je velmi dobře vratně deformovat. Často se vyskytují pod obchodními názvy jako TPU nebo TPEE [35].

Zásadní vlastností je elasticita, které jsou ostatní materiály schopny dosahovat pouze ve velmi omezené míře. S filamenty FLEX tak lze tisknout například tlumicí prvky, podložky, ochranné obaly a podobně.

Tisk tohoto materiálu je obtížnější. Z důvodu častějšího ucpávání trysky je doporučována malá rychlost tisku, a to okolo 20 mm/s. Rychlost se samozřejmě odvíjí od použitého druhu filamentu a tiskárny. Kvůli velké adhezi je nutné na tiskovou podložku nanést separační vrstvu nebo použít nehladké povrchy, aby bylo možné výrobek bez poškození sundat. S tímto materiálem se obtížně tvoří převisy a přemostění [40].

2.3.4. PVA a BVOH

Filamenty typu PVA (*Polyvinylalkohol*) a BVOH (*Butenediol vinylalkoholový kopolymer*) jsou speciální druhy biodegradabilních netoxických materiálů, které jsou vodou rozpustné. Vhodné jsou především pro specifické a komplikované podpěry, které nelze vytisknout ze základních materiálů, například z důvodu obtížného odstraňování. Toto řešení bývá však z důvodu ceny materiálů velice nákladné [36],[37].

Tisk materiálů PVA a BVOH probíhá společně se standardním materiálem za pomoci dvou oddělených extruderů nebo trysek. Díky tomu lze tisknout i velmi složité tvary, bez potíží s deformací převisů nebo mostů. Vhodná teplota pro tisk vodou rozpustných filamentů je okolo 215 °C a ideálně je tak lze kombinovat například s materiálem PLA. Rychlost rozpuštění podpěr závisí na množství a teplotě vody. Jeden gram materiálu BVOH je rozpustný přibližně ve 20 ml vody. BVOH oproti PVA lépe drží na tiskové podložce a méně způsobuje ucpání trysky. Poměrně značný rozdíl je však v ceně. Cena jednoho kilogramu BVOH stoupá až na 4 000 Kč. Z toho důvodu je vždy nutné posoudit, zda je použití těchto filamentů opravdu nezbytné a nelze se jim vyhnout například jinou geometrií výtisku [41].

Podobně jako Nylon nebo PC, vodou rozpustné materiály silně pohlcují vzdušnou vlhkost. Je důležité je uchovávat v suchém prostředí a před tiskem je důkladně vysušit. Zvlhlý filament zanáší trysku, má velmi špatnou adhezi a tisk je nekvalitní.

2.4. Kompozitní materiály

Nejatraktivnější průmyslové a prototypové využití mají v aditivní FDM technologii kompozitní materiály. Existují dvě metody tisku kompozitního dílu. První případ je možný i na běžných tiskárnách za použití speciálního filamentu, který již obsahuje přídavné složky smíchané s termoplastem. Přídavný materiál je obsažen buď ve formě malých částic různých tvarů, nebo vláken. Díky tomu kompozitní materiál získává různé mechanické i vzhledové vlastnosti. V tomto případě bohužel nelze ovlivnit natočení jednotlivých částic a působí zde velký vliv anizotropie. Použití prášků má funkci spíše kosmetickou, neboť tyto částice vnášejí do výtisku velkou nehomogenitu a výrazně tím snižují mechanickou odolnost a zvyšují křehkost výtisku. Některé přídavné složky bývají poměrně abrazivní a je proto nutné použít tvrzenou trysku. Také se doporučuje použití většího průměru trysky, aby se předešlo ucpávání. V Tab. 6 jsou uvedeny příklady dostupných kompozitních filamentů. Ceny kompozitních filamentů jsou jedny z nejvyšších.

Tab. 6 Kompozitní materiály pro metodu FDM

Výrobce a název	Teplota trysky	Teplotní odolnost	Rozpustnost	Rázová houževnatost	Pevnost v tahu	Cena (včetně DPH)*	
Prusament PCCF	285 °C	114 °C	nerozpustný	35 kJ/m ²	65 MPa	1 874 Kč	[42]
Fiberthree F3 PA-GF Pro	275 °C	90 °C	nerozpustný	22 kJ/m ²	43 MPa	4 741 Kč	[43]
Anisoprint Smooth PA	265 °C	135 °C	nerozpustný	12 kJ/m ²	71 MPa	4 450 Kč	[44]
Fiberthree F3 PA-CF Pro	275 °C	120 °C	nerozpustný	47 kJ/m ²	61 MPa	4 876 Kč	[45]

* Platné ceny za 1 kg materiálu ke dni 4. 6. 2022

Pokročilejší metoda tisku kompozitů spočívá v použití přídatné nekonečné struny, jež má v tomto případě funkci výztužnou, která se do taveného termoplastu postupně přidává. To je možné pouze na speciálních tiskárnách k tomu určených, které jsou schopny oba materiály vhodně dávkovat a výztužnou strunu stříhat. Výrobce Anisoprint uvedený v Tab. 3 má tento proces spojený uvnitř tiskové hlavy a z jedné trysky vychází výztužná struna obalená filamentem a dochází ke koextruzi. V jiných případech se tento proces může dít odděleně a výztužná struna se do roztaveného filamentu pokládá mimo tiskovou hlavu [7].

Ke koextruzi je zapotřebí dvou cívek. První obsahuje termoplast, například CFC PA v Tab. 7. Nelze použít libovolný materiál, ale nejlépe ten, který je pro tuto metodu přizpůsoben, nebo ten, který disponuje vysokou adhezí. Bez toho by nedošlo k dokonalému přilnutí k výztužnému vláknu a pevnostní vlastnosti kompozitního celku by se tím snížily. Druhá cívka obsahuje výztužný materiál. V případě firmy Anisoprint jsou momentálně na trhu k dispozici nekonečná vlákna karbonová s označením CCF a bazaltová CBF. Specifikace včetně ceny za 750 metrů vlákna jsou uvedeny v Tab. 8. Karbonové vlákno dosahuje obecně lepších pevnostních charakteristik. Bazaltové vlákno se dá považovat za mnohem levnější a výhodnější variantu, pokud nepožadujeme vysoké pevnostní vlastnosti [7].

Tab. 7 Termoplast určený ke koextruzi s výztužným vlákem [46]

Výrobce a název materiálu	Rázová houževnatost	Pevnost v tahu	Cena (včetně DPH)*
Anisoprint CFC PA	11,42 kJ/m ²	56,8 MPa	4 450 Kč

* Platná cena za 1 kg materiálu ke dni 4. 6. 2022

Tab. 8 Výztužná vlákna určená ke koextruzi

Výrobce a název materiálu	Modul pružnosti	Pevnost v tahu	Cena (včetně DPH)*	
Anisoprint CCF -1,5K 750m kompozitní karbonové vlákno	149 GPa	2 206 MPa	9 438 Kč	[47]
Anisoprint CBF 750m kompozitní bazaltové vlákno	67 GPa	1 800 MPa	5 977 Kč	[48]

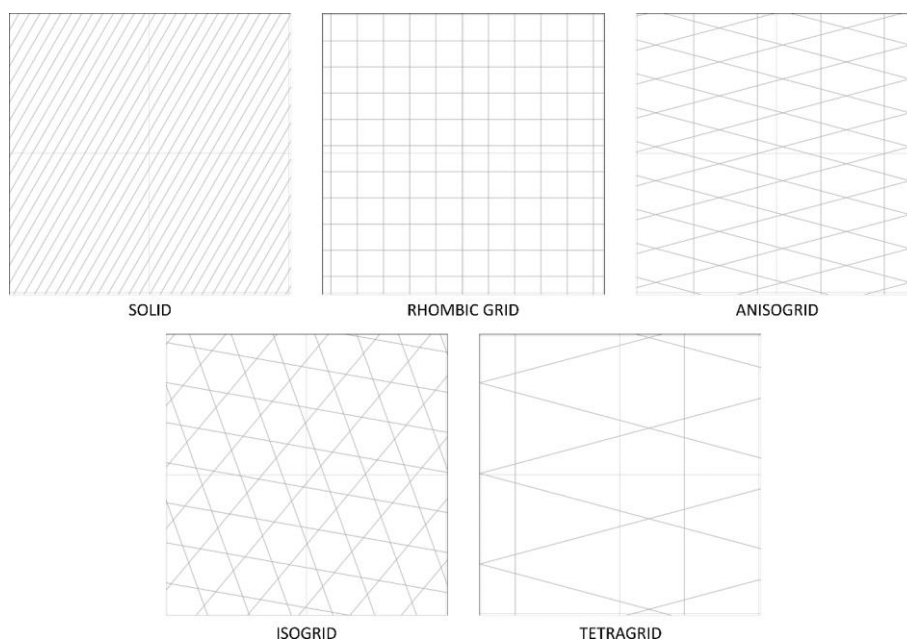
* Platné ceny za 750 m vlákna ke dni 4. 6. 2022

Výsledný výrobek má pevnostní specifikace mnohem nižší, než mají výztužná vlákna samotná [49]. Opět zde figuruje velký vliv anizotropie. Při tvorbě modelu je nutné dbát na to, aby byla výztužná vlákna vhodně orientována vzhledem ke způsobu namáhání. Vlastnosti vzorku vytvořeného pomocí metody CFC, který byl při tahové zkoušce namáhán ve směru vláken dle ASTM D3039, jsou uvedeny v Tab. 9.

Tab. 9 Výsledné vlastnosti kompozitních vzorků [49]

Kompozitní materiál	Hustota ISO 1183	Modul pružnosti ASTM D3039	Pevnost v tahu ASTM D3039
PETG + CCF-1.5K	1,4 g/cm ³	56,6 ± 0,4 GPa	774,4 ± 27,1 MPa
PETG + CBF	1,7 g/cm ³	22,6 ± 0,3 GPa	604,1 ± 16,9 MPa

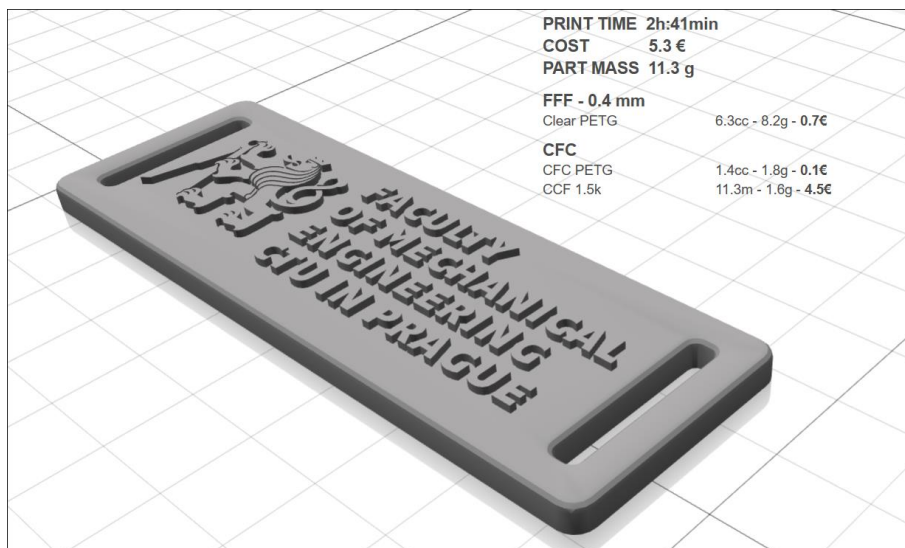
Konečná cena spotřebovaného materiálu výrobku se odvíjí primárně od množství použitého uhlíkového nebo bazaltového vlákna a nelze ji určit pouze z celkové hmotnosti výrobku. Spotřeba vlákna je dána především tím, jaká je zvolena hustota výplně a typ mřížky. Software *AURA* od společnosti Anisoprint nabízí výběr z pěti základních typů vnitřní výplně. Rozdílné geometrie jednotlivých druhů jsou patrné ze simulací na Obr. 12. V případě volby výplně typu SOLID lze očekávat i mnohonásobně větší spotřebu vlákna než například v případě mřížky typu TETRAGRID.



Obr. 12 *AURA*: Volba mřížky výztužného vlákna

Předběžnou cenu materiálu a poměr jednotlivých složek při tisku metodou CFC lze získat provedením simulačního tisku, například propagačního štítku z Obr. 10. V tomto případě byla zvolena mřížka typu ANISOGRID, základní filament Clear PETG, výztužné nekonečné karbonové vlákno CCF 1.5K. Hustota výplně byla nastavena na maximální možnou hodnotu 80 % a výška vrstev 0,4 mm. Z předběžné simulace na Obr. 13 je patrné, že na celkové ceně materiálu se z 85 % podílí pouze

výtuzné vlákno, kterého bude na tento výtisk potřeba přibližně 11 metrů. Uvedená simulační cena za materiál je pouze orientační, neboť neodráží aktuální cenu zboží dostupného na českém trhu. Celková doba tisku by v tomto případě byla přibližně 161 minut.



Obr. 13 AURA: Orientační spotřeba materiálu, váha a doba tisku štítku

2.5. Nastavení tisku

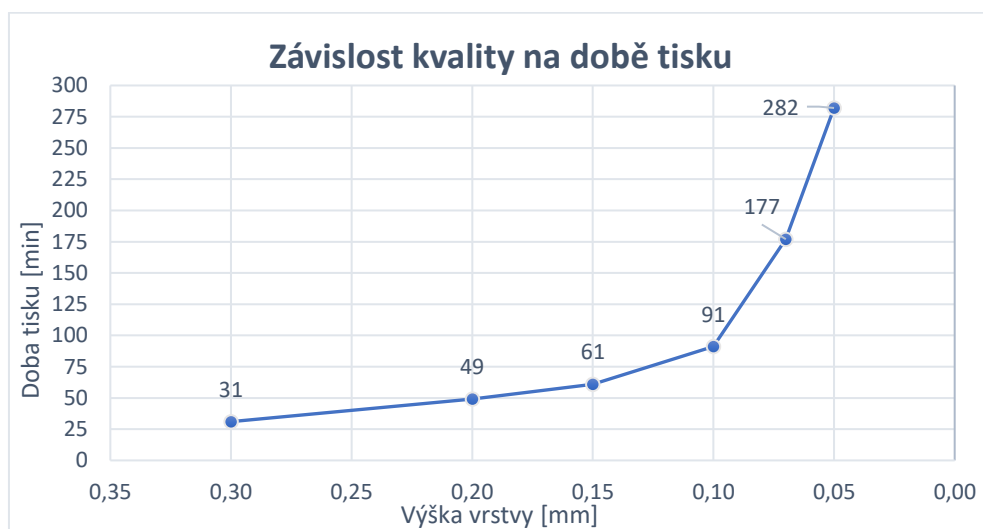
Protože nastavení tisku zásadně ovlivňuje výši celkových nákladů, v této části jsou podrobně rozebrány možné volby parametrů. Pro srovnání jednotlivých parametrů jsou provedeny simulace tisku propagačního štítku ČVUT v software PRUSALICER od firmy Průša. Pro veškeré simulace byl zvolen jednotný materiál Prusament PLA z kategorie základních materiálů. Materiál PETG není pro tento typ výrobku vhodný, neboť kvůli jeho vyšší tažnosti dochází k větší míře stringování. To by mělo velký dopad na čitelnost vystouplého reliéfu na štítku. Materiál ABS nebyl zvolen z důvodu tvarové nepřesnosti a velkého smršťování. Propagační štítek je poměrně tenký a hrozilo by větší nebezpečí prohnutí výtisku a zmaření celého tisku. Jiné materiály z pokročilejších kategorií nebyly vybrány z důvodu vyšších cen a náročnějšího tisku.

2.5.1. Výška vrstev a velikost trysky

Výška vrstev a velikost trysky úzce souvisí s kvalitou a především s rychlostí tisku. Rychlost do variabilních nákladů vstupuje velkou mírou z důvodu spotřeby elektrické energie a nákladů na údržbu tiskárny. Firma Průša podporuje na svých tiskárnách *i3 MK3S+* použití trysek o průměru 0.25, 0.4, 0.6, a 0.8 milimetrů. Běžně je tato tiskárna dodávána pouze se základním rozměrem 0.4 mm, ostatní velikosti je v případě potřeby nutné samostatně dokoupit. Cena klasických netvrzených trysek pro běžné druhy filamentů vychází na 200 Kč za kus. Čím menší průměr trysky a menší výška vrstvy je zvolena, tím kvalitnější tisk je. Volba těchto dvou parametrů je limitovaná pouze tím, že maximální výška vrstvy by neměla

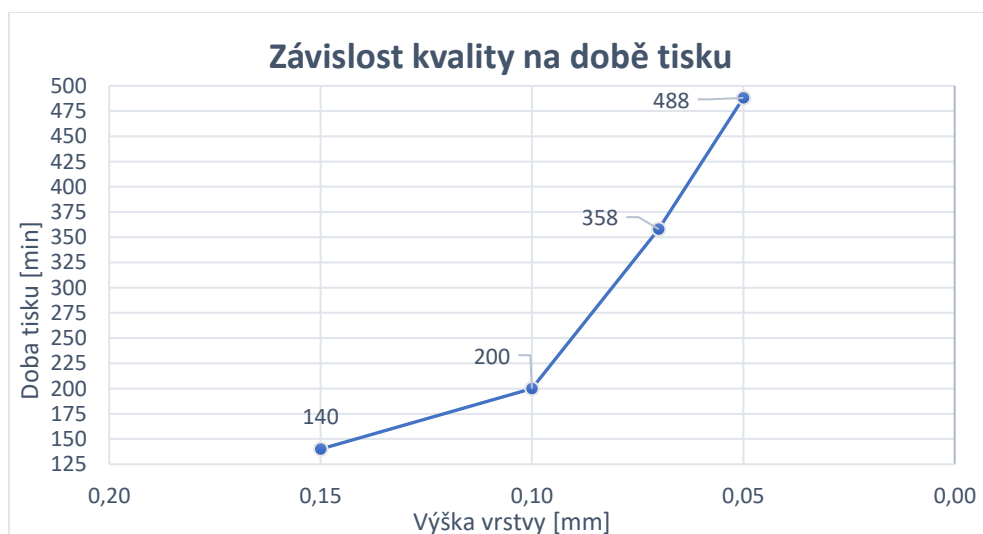
přesahovat 80 % velikosti průměru trysky [50]. Při použití menšího průměru trysky ale stále platí větší riziko ucpání a zmetkovitosti.

Pro srovnání poměru rychlosti a kvality je provedena simulace tisku propagačního vzorku z Obr. 10, který je uvnitř zcela vyplněn. Software *PRUSASLICER* nabízí při použití základního průměru trysky 0,4 mm možnost zvolit tloušťku jedné vrstvy v rozsahu od 0,3 mm až do 0,05 mm. Ze simulace vyplývá, že postupným snižováním výšky vrstvy na minimum celková doba tisku exponenciálně poroste (viz Graf 1). V případě zvolené nejmenší výšky vrstev bude celkový čas 282 minut (téměř 5 hodin). Při výšce vrstvy 0,3 mm bude celkový čas tisku pouze 31 minut. Tento časový rozptyl již vytváří markantní rozdíl v nákladech na jeden vyrobený kus.



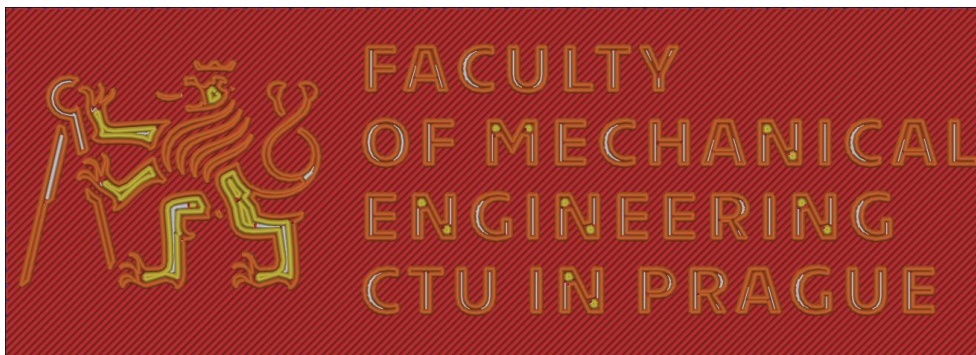
Graf 1 Závislost kvality tisku na době tisku, tryska 0,4 mm

Při použití trysky o průměru 0,25 mm je exponenciální růst stále patrný a čas tisku se při stejných výškách vrstev v průměru zdvojnásobí (viz Graf 2). Při výšce vrstvy 0,05 mm doba tisku vzorku vzroste až na 488 minut (přes 8 hodin).

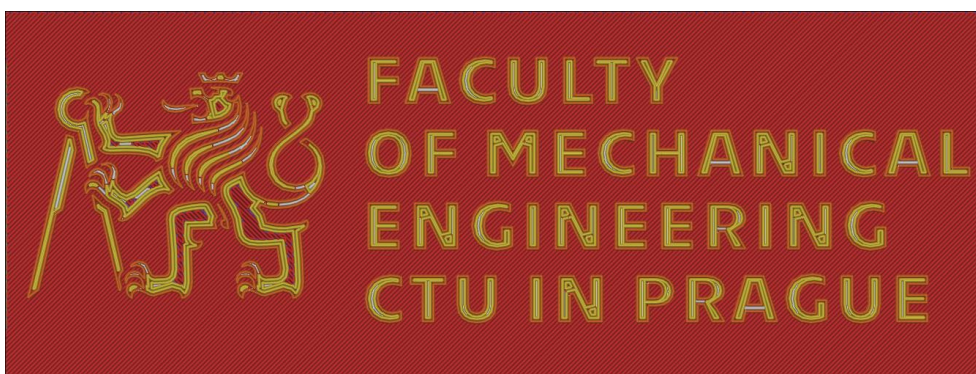


Graf 2 Závislost kvality tisku na době tisku, tryska 0,25 mm

Na následujících snímcích simulací Obr. 14 a Obr. 15 lze vidět rozdílnou kvalitu štítku při použití trysek o průměru 0,4 mm a 0,25 mm. Výška vrstev byla u obou vzorků nastavena na hodnotu 0,05 mm. Při použití menšího průměru trysky je zřetelné zlepšení detailů a mnohem dokonalejší a hustší výplň znaků.



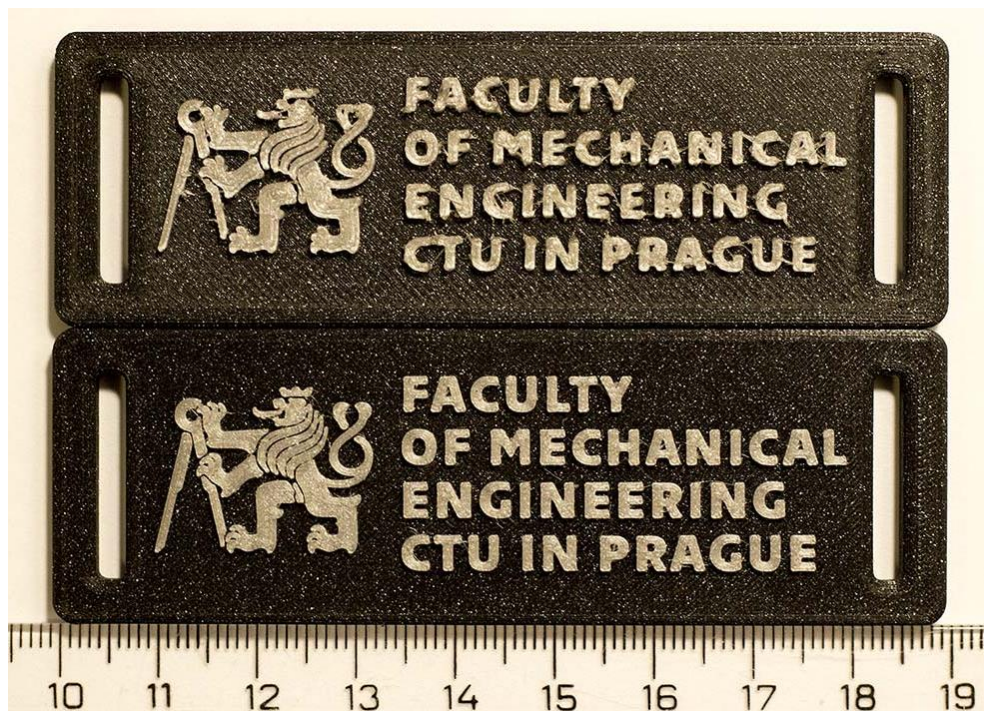
Obr. 14 PRUSASLICER: Propagační štítek, tryska 0,4 mm, výška vrstev 0,05 mm



Obr. 15 PRUSASLICER: Propagační štítek, tryska 0,25 mm, výška vrstev 0,05 mm

Na Obr. 16 lze vidět reálný rozdíl při použití různého průměru trysek. Vrchní štítek byl tisknut při parametrech: průměr trysky 0,4 mm, výplň 100 % a výška vrstvy 0,15 mm. Celková doba tisku 62 minut. Spodní štítek byl tisknut při parametrech: průměr trysky 0,25 mm, výška vrstvy 0,15 mm a výplň 100 %. Celková doba tisku spodního dílu byla 144 minut. Veškeré ostatní nastavení bylo ponecháno v základním stavu.

Na spodním štítku ve znakové části je znatelné zlepšení detailů a prodloužení úzkých reliéfů. Písmo je mnohem lépe čitelné a okraje jednotlivých písmen jsou mnohem ostřejší. Na vrchním štítku je zřetelný problém takzvaného stringování, které nese největší podíl na nedokonalosti písma. Tento problém při použití menšího průměru trysky téměř vymizel. Jednotlivé stopy tiskové hlavy jsou na spodním výtisku mnohem méně zřetelné. Světlé body na černém podkladu nejsou vadou, ale specifickou vlastností vzhledu použitého filamentu PLA Prusa Galaxy Black.

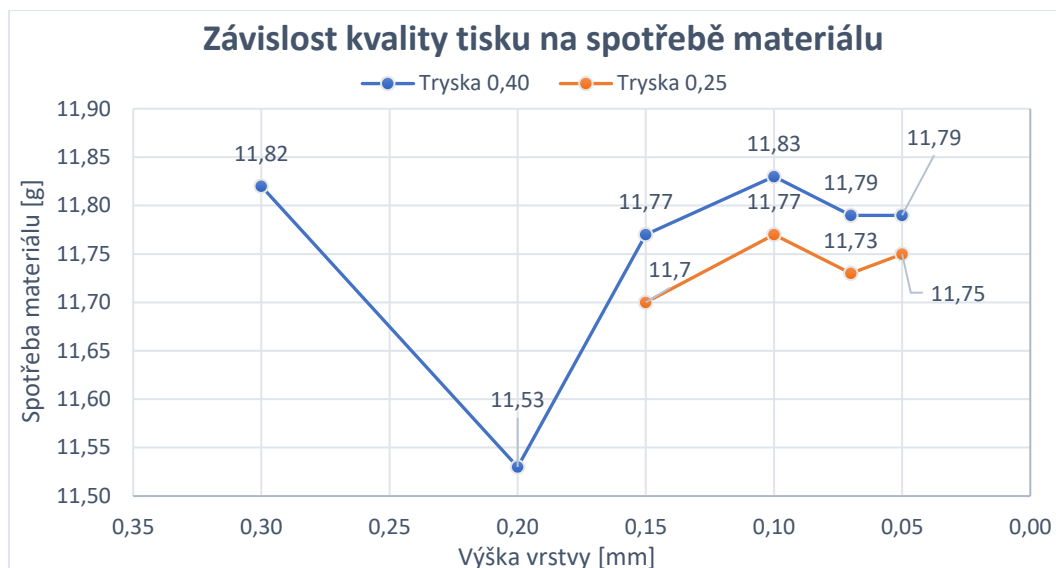


Obr. 16 Závislost kvality výtisků na použité trysce

2.5.2. Množství výplně

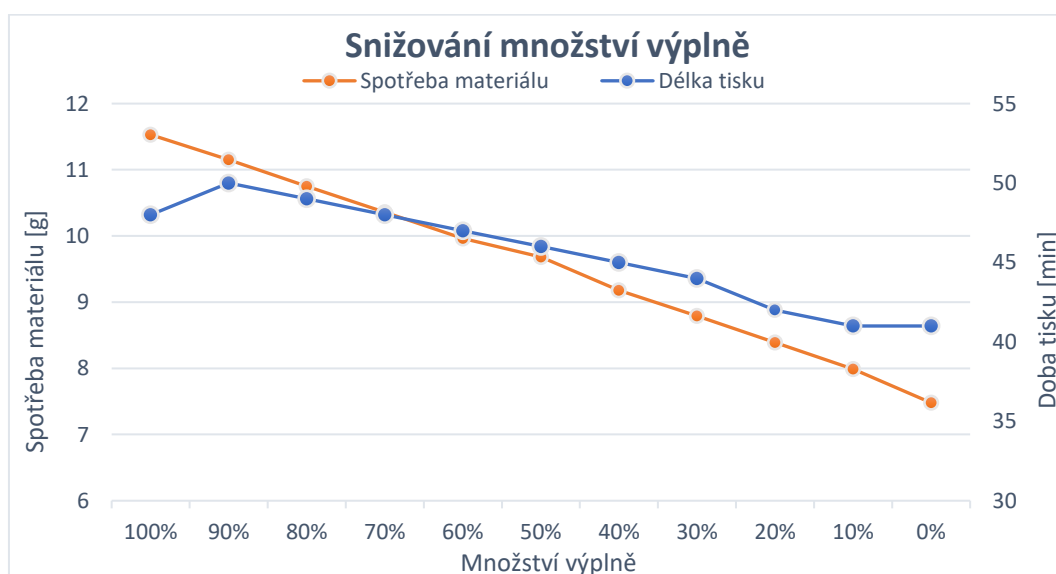
Velkou výhodou aditivních technologií je možnost tisku dutých struktur. Dalším důležitým parametrem je proto nastavení procentuálního množství výplně. To opět souvisí jak s dobou tisku, a tedy se spotřebou elektrické energie, tak s množstvím materiálu, který je na jeden výtisk nutné spotřebovat. V předchozích simulacích byla výplň vždy nastavena na 100 %. V závislosti na změnách parametrů se spotřeba materiálu téměř nelišila.

V následujícím Graf 3 lze vidět hmotnostní rozdíl spotřebovaného filamentu pro tisk s různým nastavením výšky vrstev s tryskou 0,4 mm a 0,25 mm. Z hodnot vyplývá, že rozdíly se pohybují v řádu desetin gramu, tj. odchylka spotřeby materiálu na základě zvolené kvality tisku je maximálně 3 % celkové hmotnosti výtisku. Tento parametr je tudíž při kalkulaci oproti jiným zanedbatelný. Odchylka v hmotnosti je způsobená převážně odlišným naprogramováním posuvů tiskové hlavy, vyplněním v rozích a záhybech.



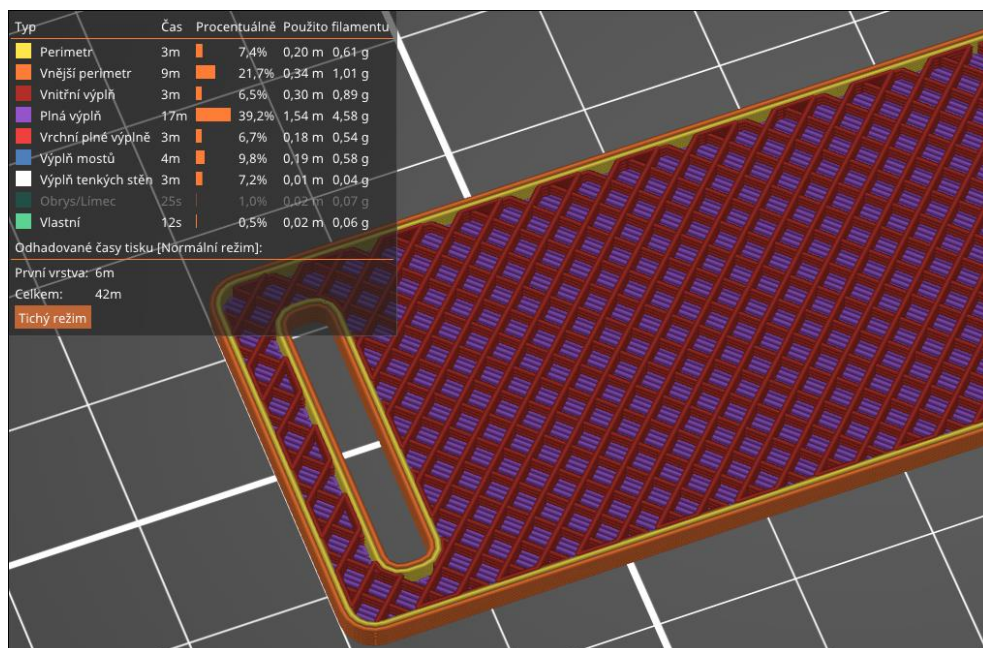
Graf 3 Závislost kvality tisku na spotřebě materiálu pro trysku 0,4 a 0,25 při 100% výplni

Významnější rozdíl nastává v případě, kdy není požadována maximální pevnost výrobku a je tedy možné zvolit nižší hodnotu výplně. V Graf 4 byly jednotlivé simulace prováděny obdobně jako v předchozím případě. Průměr trysky byl zvolen 0,40 mm, výška vrstev 0,20 mm a výplň byla po 10 % snižována na 0 %. Zajímavý je rozdíl mezi hodnotami 100 % a 90 %, kdy i přes snížení výplně dojde k tomu, že doba tisku nepatrně vzroste. To je zapříčiněno tím, že je nutné eliminovat propadání vrchních pohledových vrstev do prázdných prostor výplně. Z tohoto důvodu se nad vnitřní výplni nižší rychlostí tiskne speciální, byť nedokonale rovná mezivrstva, o kterou se všechny nadcházející vrstvy opřou a nevznikne tak viditelná deformace výtisku na povrchu části.



Graf 4 Závislost snižování hodnoty výplně na spotřebě materiálu a době tisku

Ze simulace tisku propagačního štítku vyplývá, že rozdíl v době tisku není tak významný. Podstatnější rozdíl by byl znatelný u větších a masivnějších předmětů. V případě propagačního štítku vnitřní výplň, kterou lze redukovat, zabírá pouze 10 vrstev uprostřed modelu ze 20 vrstev celkových. V případě plného vzorku na ni připadá 5,24 gramů materiálu, který se tiskne 16 minut. S těmito hodnotami je možné v rámci nastavení výplně pracovat a snižovat je. Zbylé vrstvy nad a pod výplní jsou nezměněné z důvodu zachování pevnosti a tvaru výtisku. V případě nízkých až nulových hodnot výplně hrozí vznik prohlubní z důvodu propadání filamentu. Stejným způsobem je důležité zachovat určitou minimální tloušťku bočních stěn, tedy perimetrů (viz Obr. 17). Z toho je zřejmé, že redukování vnitřní výplně nemá například u tenkostěnných předmětů téměř žádný vliv na snížení spotřeby materiálu a úsporu času.



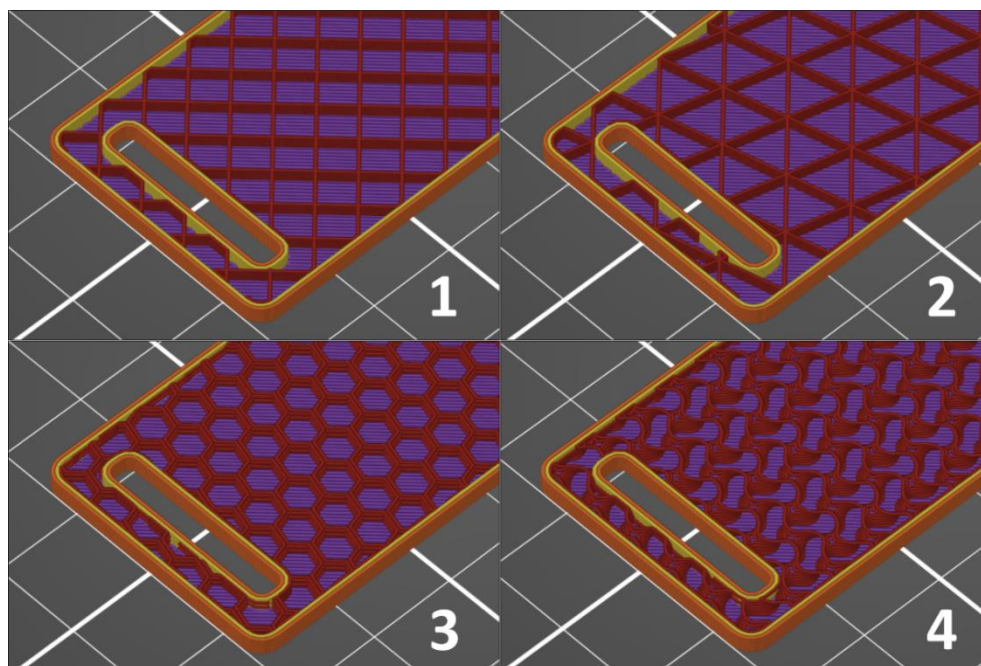
Obr. 17 PRUSASLICER: Struktura vnitřní přímočaré výplně s hodnotou 20 %

2.5.3. Struktura výplně

Volba struktury výplně úzce souvisí s kompromisem mezi spotřebou materiálu, rychlostí tisku a pevností výtisku. Software PRUSASLICER podporuje 16 druhů různých vnitřních struktur [51]. Ty nejběžnější jsou uvedené v Tab. 10 níže. Odpovídající simulační hodnoty a obrázky struktur (viz Obr. 18) jsou pro tisk propagačního štítku s výškou vrstvy 0,20 mm, průměrem trysky 0,4 mm a 20% výplní. První dvě struktury typu trojúhelník a mřížka patří mezi nejjednodušší výplně, které jsou nejméně časově a materiálově náročné. Z tabulky vyplývá, že nejsložitější výplní je struktura plástve, která má nejdelší čas tisku a také je na ni spotřebováno nejvíce materiálu. Výplně typu 3 a 4 se však vyznačují velkou pevností. Typ gyroid má velmi specifickou strukturu, která je oproti plástvi nebo mřížce schopná lépe odolávat namáhání ve všech směrech [51].

Tab. 10 Doba tisku a spotřeba materiálu dle zvolené výplně

Číslo	Typ výplně	Doba tisku [min]	Spotřeba materiálu [g]
1	Mřížka	42	8,33
2	Trojúhelník	43	8,36
3	Plástev	47	8,59
4	Gyroid	45	8,41



Obr. 18 PRUSASLICER: Geometrické struktury vybraných výplní

2.6. Spotřeba energie

Spotřeba elektrické energie závisí na velikosti a typu tiskárny a následně na výběru filamentu. Výrobce Anisoprint udává maximální příkon tiskáren Composer 800 W pro velikost A4 [23] a 1000 W pro velikost A3 [24]. Z dat dostupných pro jiné FDM tiskárny vyplývá, že nejvyšších hodnot příkonu je dosaženo při zahřívání tiskové desky, trysky a případně vzduchu uvnitř boxu, pokud má tiskárna uzavřenou konstrukci. Následně se příkon může snížit až na polovinu podle toho, jaké teploty jsou nutné pro tisk daného materiálu. Bohužel sám výrobce Anisoprint neudává orientační průměrnou spotřebu elektrické energie těchto tiskáren, tudíž je těžké odhadnout reálnou spotřebu při dlouhodobém tisku.

U tiskárny *Prusa i3 MK3S+* výrobce udává pro tisk materiálu PLA průměrnou spotřebu 80 W a pro materiál ABS, u kterého je nutná vyšší teplota při tisku (viz Tab. 4), je udaná hodnota 120 W. Opět zde platí, že nejvyšší hodnoty příkonu jsou na začátku tisku při předehřevu všech nutných součástí na stanovené teploty.

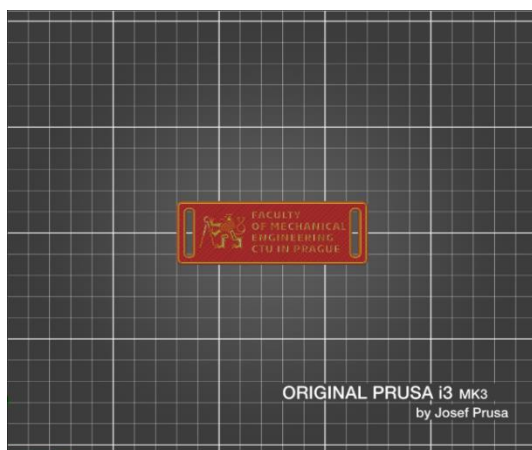
Na základě orientačních měření provedených na přístroji *Elektrobock EMF-1* tiskárna na začátku tisku materiálu PLA dosahuje příkonu 280 W. Poté již hodnota kolísá okolo 80 W.

2.7. Náklady na obsluhu tiskárny

Výdaje spojené se mzdou pracovníka obsluhujícího tiskárnu se taktéž významně propisují do celkových nákladů. Náplň výkonu obsluhy tiskárny lze rozdělit do dvou částí. Příprava tiskárny před nebo po tisku a kontrola tiskárny během tisku. V prvním případě se jedná o prvotní kalibraci, která by se měla provádět nejlépe před každým tiskem. Mezi další úkony patří například zavedení filamentu do extruderu nebo výměna cívek. Dále je před tiskem nutné zkontrolovat povrch tiskového plátu a případně jej očistit od nečistot. Taktéž je nutná kontrola trysky a její průchodnosti. Po ukončení tisku musí obsluha sejmut výtisky z tiskového plátu, opět zkontrolovat stav povrchu a případně jej očistit od zbytků filamentu.

Druhá méně náročná část spočívá v kontrole průběhu samotného tisku. Zejména při dlouhodobém tisku rozsáhlejších struktur může dojít k mnoha chybám. Mezi ty, které vedou k úplnému přerušení tisku, se řadí například částečně nebo zcela neprůchozí tryska, nedokonalé podávání filamentu do extruderu nebo chybné hlášení senzorů. Při tisku velkých objektů může dojít k deformaci výtisku, což v horších případech vede ke kolizi extruderu s objektem. V těchto případech je nutný zásah obsluhy, která problém vyřeší a rozhodne, zda je možné ve stávajícím tisku pokračovat, nebo je nutné spustit zcela nový tisk. Proto je vhodné průběh tisku například každé tři hodiny kontrolovat. Tento parametr je v rámci zjednodušení výpočtu zanedbaný.

Nejnáročnější však bývá fáze přípravy tisku a sejmutí hotových výtisků. Proto je vhodné, jestliže to velikost tiskového prostoru umožňuje, tisknout ve vyšším počtu kusů najednou. Výhodou je taktéž úspora energie, neboť nedochází k velkému chladnutí tiskárny mezi jednotlivými tisky. Na Obr. 19 lze vidět tisk jednoho kusu a na Obr. 20 maximální možné využití tiskového plátu zaplněného třinácti kusy štítků. Parametry tisku lze vidět v Tab. 11. V případě tisku 14 kusů najednou připadá na jeden vzorek přibližně 48 minut času tisku a 11,53 g materiálu PLA. Úbytek celkového spotřebovaného materiálu je dán menším počtem čištění trysky od starého filamentu, které probíhá automaticky pokaždé na začátku tisku na okraji tiskového plátu. Sejmutí výtisků a spuštění dalšího tisku zabírá dle náročnosti okolo 5–15 minut času. V případě tisku 14 kusů najednou lze obsluhu ušetřit 65–195 minut času. Při mzdě 300 Kč/h je tak možné na každých 14 kusech ušetřit v průměru až 650 Kč. Z tohoto důvodu bude v kalkulaci uvažováno maximální možné zaplnění tiskové plochy.



Obr. 19 PRUSASLICER: Tisk 1 kusu



Obr. 20 PRUSASLICER: Tisk 14 kusů

Tab. 11 Parametry tisku 1 a 14 kusů štítků

Počet kusů	Doba tisku [min]	Spotřeba materiálu [g]
1	48	11,53
14	672	159,79

2.8. Údržba a opotřebení

Další významnou položkou, která se propisuje do nákladů, jsou výdaje spojené s údržbou a opotřebením dílů tiskárny. Firma Průša udává pouze doporučené intervaly kontroly a čištění dílů tiskárny. Přesně stanovené intervaly pro výměnu dílů výrobce nemá. Doporučené intervaly kontrol, přibližné výměny spotřebních komponentů a jejich ceny jsou uvedeny v následující tabulce Tab. 12. Za spotřební materiál s nejmenší výdrží se považuje tryska a tiskový plát. Tyto díly podléhají dle zvoleného materiálu největšímu opotřebením. Velkou výhodou tiskáren firmy Průša je možnost objednání jakéhokoliv dílu samostatně. Komponenty, jako jsou hlazené osy, ventilátory a řemeny, jsou nejvíce náchylné na usazování nečistot a je tedy nutné je pravidelně kontrolovat, čistit a prodlužovat tak jejich životnost.

Tab. 12 Doporučené intervaly údržby, výměny a ceny komponentů tiskárny Prusa i3 MK3S+ [18]

Položka	Kontrola a vyčištění po	Doporučená výměna po	Cena (včetně DPH)*
E3D V6 Tryska 0.4 mm	100 h	1 000 h	199 Kč
Tiskový plát	před každým tiskem	1 300 h	899 Kč
Krokové motory (set)	-	20 000 h	3 990 Kč
Lineární ložiska	300 h	dle potřeby	199 Kč
Tištěné díly	-	dle potřeby	99 Kč
Ventilátory	300 h	dle potřeby	349 Kč
Řemeny	300 h	dle potřeby	99 Kč
Sestavený hotend	-	dle potřeby	2 090 Kč
Hlazené osy	300 h	dle potřeby	299 Kč

* Platné ceny ke dni 1. 6. 2022

V rámci zjednodušení předběžné kalkulace budou náklady spojené s opotřebením vztaženy k jedné hodině tisku. Na základě dat výrobce je tato hodnota odhadnuta přibližně na 1 Kč/h. Většinu nákladů tvoří výměna trysek a tiskových plátů.

2.9. Náklady na prostory

Významný výdaj přichází také s pronájmem průmyslových prostor. V posledních letech se ekonomika potýká s velkou nestabilitou ve všech segmentech. Hlavním důvodem je z větší části probíhající pandemická krize a narušení dodávek téměř veškerého zboží. Firmy na toto reagují zvyšováním vlastních skladových zásob, nebo rozšiřováním skladových prostor z důvodu skladování nehotových produktů, které čekají na chybějící komponenty. To má za následek zvyšující se poptávku po průmyslových plochách. Z nejnovější statistiky agentury *Industrial Research Forum* vyplývá, že průměrná cena za pronájem metru čtverečního průmyslových prostor v prvním kvartálu roku 2022 dosáhla hodnoty 6,4 EUR [52].

Při srovnání obou technologií budou uvažovány zabrané prostory nutné pro výrobu danou technologií. Výrobce Průša udává pro tiskárny *Prusa i3 MK3S+* minimální zabranou plochu 500 × 550 mm. Pro snadnou obsluhu je nutné přidat plochu minimálně 0,4 m² před tiskárnou nebo případně za ní. Výsledný prostor zabraný jednou tiskárnou je 0,675 m². Pro zjednodušení nebudou uvažovány instalace více tiskáren nad sebou, jako tomu je u většiny 3D farem.

3. Kalkulace a porovnání metody FDM s technologií vstřikování

Předběžné nákladové kalkulace a porovnání metody FDM s technologií vstřikování jsou sestaveny na základě rostoucího trendu 3D farem. Zatím největší z nich provozuje firma Průša, která čítá přes 600 kusů samostatných tiskáren. Podobnou farmu o 50 kusech od stejného výrobce provozuje již i automobilka *Škoda Auto*. Využívá ji pro rychlou výrobu prototypů, náhradních dílů, nebo nářadí a přípravků.

Jako ilustrační výrobek slouží stejný propagační štítek, který byl použit při stanovení vstupních nákladů v předchozí části práce. Rozměr a objem výrobku analogicky odpovídá vzorku pro tahovou zkoušku, pro který jsou dostupná data z výroby pomocí vstřikovacího lisu. Modelová situace je postavena na základě pevně stanoveného času pro výrobu určitého objemu zakázky. Maximální doba na zhotovení zakázky je omezena na 30 dní. Objemy zakázek jsou rozděleny po 10, 100, 1 000, 10 000 a 54 900 kusech. Poslední množství je maximální počet kusů, které je možné vyprodukovat na jednom vstřikovacím lisu *Allrounder 270 C* při nepřetržitém provozu, včetně nutných servisních odstávek za dobu 30 dní.

Náklady na výrobu pomocí FDM metody velmi závisí na zvolených parametrech tisku. Pro každé nastavení budou mít výrobky jinou kvalitu povrchu a odlišnou pevnost. V kalkulaci jsou pro ilustraci variability výroby stejného štítku použita 4 různá nastavení, ve kterých jsou různě navoleny parametry jako velikost trysky, množství výplně nebo výška vrstvy. Jednotlivá nastavení úzce souvisí se spotřebou materiálu a dobou tisku. Proto se výsledné náklady v závislosti na zvoleném nastavení výrazně mění.

Z tohoto modelu vyplývá, že na úspěšné dokončení zakázky větších objemů pomocí aditivní technologie je nutné pořídit větší počet 3D tiskáren. Úměrně s tím se skokově navyšují celkové fixní náklady na výrobu. Celkové množství potřebných tiskáren také souvisí se zvoleným typem nastavení, které udává časovou náročnost tisku. Hledaným výsledkem kalkulace je hodnota objemu výrobků, při které je již výhodnější zvolit konvenční způsob výroby oproti aditivnímu. Veškeré ceny použité při kalkulaci jsou uvedeny včetně DPH.

Pro tento model předběžných nákladových kalkulací byl vytvořen speciální výpočtový soubor s názvem *Nákladové kalkulace a citlivostní analýzy* dostupný v příloze, ve kterém lze nalézt veškeré níže uvedené tabulky, grafy a také kompletní výpočty. V důsledku velkého rozsahu hodnot (například počáteční investice obou technologií) bylo z důvodu přehlednosti nutné vynést většinu grafických zpracování v logaritmickém měřítku. V listu „*kalkulace 3D tisk, vstřikolis*“ je možné porovnat kalkulace FDM tisku jednotlivých nastavení s kalkulací vstřikovacího lisu. V tomto listu lze také dohledat jednotlivé nákladové křivky obou technologií vynesené v jednom grafu pro snadné určení objemu, při

kterém se celkové náklady pro obě technologie rovnají. Ve výpočtových listech „výpočty vstřikolis“ a „výpočty 3D tisk“ lze měnit jednotlivé vstupní hodnoty a pozorovat jejich dopad na předběžné kalkulace. V listu „výpočty 3D tisk“ je také možné měnit hodnoty jednotlivých nastavení 1, 2, 3 a 4, například pro zcela odlišný typ výrobku.

3.1. Celkové náklady na výrobu pomocí 3D tisku

V Tab. 13 níže jsou uvedené fixní a variabilní náklady na výrobu pomocí FDM metody na tiskárně Prusa i3 MK3S+. Životnost byla dle dostupných informací o nutnosti oprav odhadnuta na 4 roky. Výdaje, vzniklé během životnosti tiskárny, jsou zařazeny v nákladech na opotřebení. V rámci kalkulačního modelu pro třicetidenní zakázku je použit měsíční odpis stroje.

Tab. 13 Fixní a variabilní náklady metody FDM

Fixní náklady	
Investiční náklady	
Cena tiskárny Prusa i3 MK3S+	26 990,00 Kč
Životnost tiskárny	4 roky
Měsíční odpis stroje	562,29 Kč
Náklady na pronájem prostor	
Požadovaný prostor pro 3D tiskárnu	0,675 m ²
Náklady na pronájem 1 m ²	158,43 Kč
Celkové náklady za 1 měsíc	106,94 Kč
Variabilní náklady	
Náklady na energie	
Průměrný příkon pro tisk PLA	80 W
Průměrná cena za kWh	7,15 Kč
Celkem za 1 hodinu	0,57 Kč
Náklady na opotřebení	
Náklady vzniklé za 1 hodinu provozu	1,00 Kč
Náklady na údržbu a obsluhu	
Údržba a obsluha na jeden spuštěný tisk	15 min
Mzda obsluhy za 1 hodinu	300,00 Kč
Celkem za 1 spuštěný tisk	75,00 Kč

Následující variabilní náklady v Tab. 14 souvisí s vybraným typem nastavení tisku a jsou proto uvedeny samostatně. Nastavení 1 a 2 lze v průmyslové praxi považovat za nejčastěji používané, liší se pouze ve zvoleném množství výplně. U metody 1 byla zvolena z důvodu menší časové náročnosti tisku 20% výplň

s geometrií typu mřížka. V případě nastavení 2 byla použita 100% výplň. Nastavení 3 lze považovat za variantu tisku, při které je kladen větší důraz na kvalitu vytištěného výrobku. Nastavení 4 je diametrálně odlišné od předchozích, neboť je namontován menší průměr trysky a zvolena nejmenší možná výška vrstev. Tento typ nastavení je pro tisk časově velmi náročný.

Tab. 14 Nastavení tisku a materiálové náklady

Nastavení	1	2	3	4
Parametry tisku				
Průměr trysky [mm]	0,4	0,4	0,4	0,25
Výplň [%]	20	100	100	100
Výška vrstvy [mm]	0,2	0,2	0,1	0,05
Doba tisku [min]	42	49	91	488
Materiálové náklady				
Váha propagačního štítku ČVUT [g]	8,39	11,76	11,83	11,70
Cena za 1 kg filamentu PLA	699,00 Kč			
Celkem na 1 ks	5,86 Kč	8,22 Kč	8,27 Kč	8,18 Kč

Předběžná nákladová kalkulace pro nastavení 1 je sestavena v Tab. 15. V první části je uveden výpočet potřebného času pro vyhotovení daného počtu kusů. Na základě celkové doby výroby je stanoven nutný počet tiskáren, při kterém je možné splnit objem zakázky do 30 dnů. V této tabulce je zřetelný kompletní výpočet včetně rozložených fixních a variabilních nákladů. Pro nastavení 2, 3 a 4 v Tab. 16, Tab. 17 a Tab. 18 jsou uvedené pouze celkové náklady a celkové náklady na kalkulační jednici pro daný objem výroby.

Tab. 15 Nákladová kalkulace metody FDM, nastavení 1

Počet výrobků [ks]	10	100	1 000	10 000	59 400
Doba tisku [hh:mm:ss]	7:00:00 0	70:00:00 0	700:00:00 0	7000:00:00 0	41580:00:00 0
Doba údržby [hh:mm:ss]	0:15:00 0	2:00:00	18:00:00	178:45:00	1060:45:00
Celková doba výroby [hh:mm:ss]	7:15:00 0	72:00:00 0	718:00:00 0	7178:45:00 0	42640:45:00 0
Celková doba výroby [dny]	0,30	3,00	29,92	299,11	1776,70
Potřebný počet tiskáren	1	1	1	10	60
Celková doba výroby [dny]	0,30	3,00	29,92	29,91	29,61
Fixní náklady					
Měsíční odpis stroje [Kč]	562	562	562	5 623	33 738
Pronájem prostor [Kč]	107	107	107	1 069	6 416
Celkem [Kč]	669	669	669	6 692	40 154

Variabilní náklady

Materiál [Kč]	59	586	5 865	58 646	348 358
Energie [Kč]	4	40	400	4 004	23 784
Údržba, obsluha, opotřebení [Kč]	82	670	6 100	60 625	359 805
Celkem [Kč]	145	1 297	12 365	123 275	731 947
Celkové náklady na výrobu [Kč]	814	1 966	13 034	129 967	772 101
Celkové náklady na kus [Kč]	81,39	19,66	13,03	13,00	13,00

Tab. 16 Nákladová kalkulace metody FDM, nastavení 2

Nastavení 2					
Počet výrobků [ks]	10	100	1 000	10 000	59 400
Potřebné tiskárny [ks]	1	1	2	12	69
Celkové náklady na výrobu [Kč]	839	2 219	16 239	156 661	928 734
Celkové náklady na kus [Kč]	83,92	22,19	16,24	15,67	15,64

Tab. 17 Nákladová kalkulace metody FDM, nastavení 3

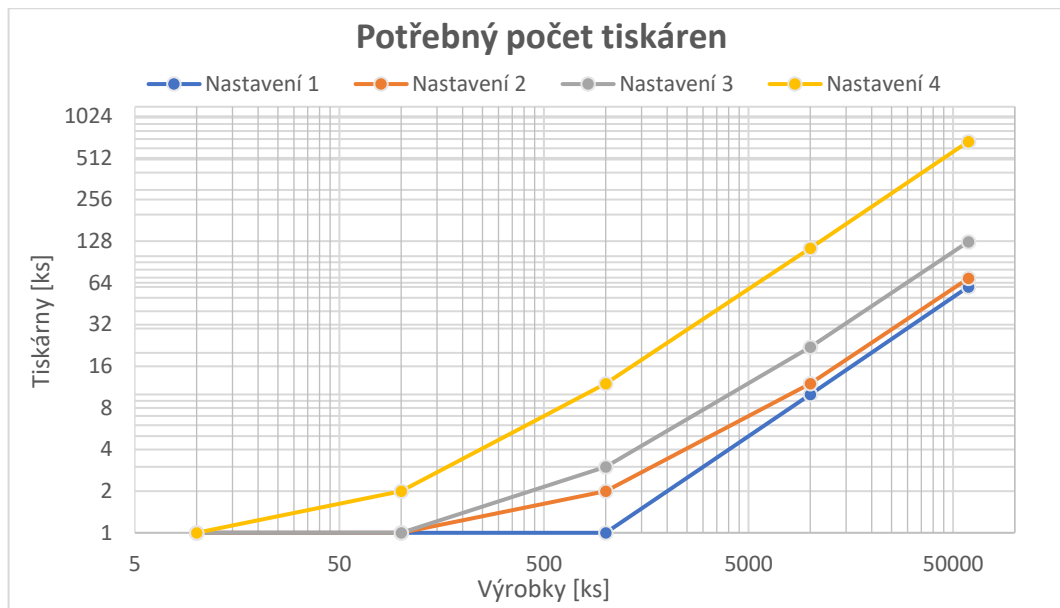
Nastavení 3					
Počet výrobků [ks]	10	100	1 000	10 000	59 400
Potřebné tiskárny [ks]	1	1	3	22	127
Celkové náklady na výrobu [Kč]	851	2 325	17 970	173 973	1 030 630
Celkové náklady na kus [Kč]	85,08	23,25	17,97	17,40	17,35

V případě nastavení 4, kde je požadována nejvyšší kvalita výrobků, lze pozorovat extrémní nárůst potřebných tiskáren. V případě výroby 59 400 kusů za měsíc by 3D farma musela disponovat minimálně 673 kusy tiskáren. Volba právě tohoto řešení pro reálnou výrobu je tudíž nepravděpodobná z důvodu velmi nízké ekonomičnosti.

Tab. 18 Nákladová kalkulace metody FDM, nastavení 4

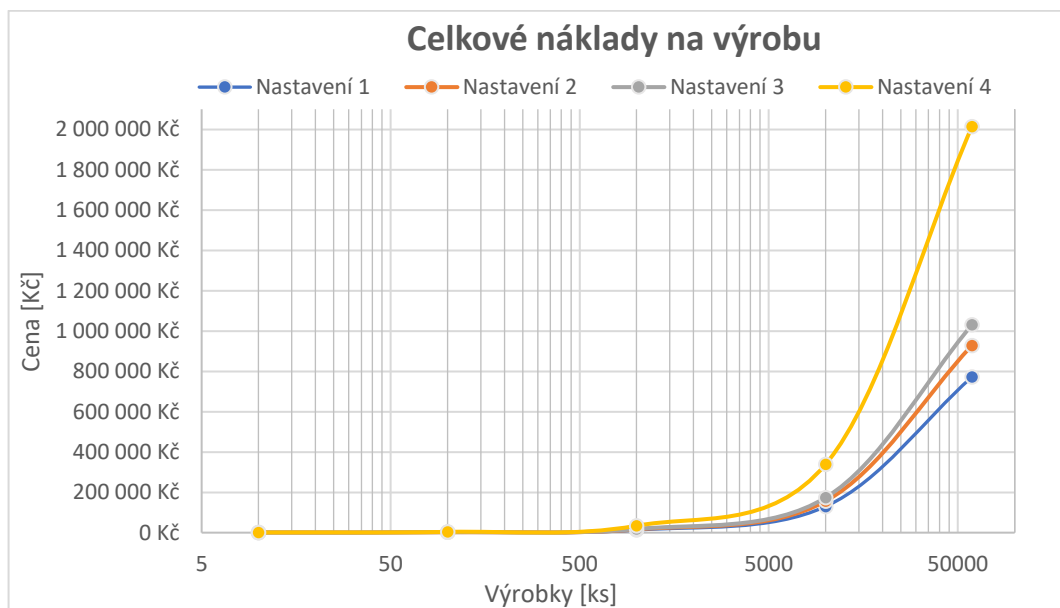
Nastavení 4					
Počet výrobků [ks]	10	100	1 000	10 000	59 400
Potřebné tiskárny [ks]	1	2	12	114	673
Celkové náklady na výrobu [Kč]	954	4 035	34 395	339 556	2 013 874
Celkové náklady na kus [Kč]	95,39	40,35	34,39	33,96	33,90

V následujícím Graf 5 je vynesena závislost nutného počtu tiskáren na základě zvoleného nastavení a počtu vyráběných kusů. Rozdíl potřebného počtu mezi nastavením 1 a 4 při maximální produkci 59 400 kusů štítků činí 613 tiskáren.



Graf 5 Potřebný počet tiskáren v závislosti na množství produkce, FDM

Růst celkových výrobních nákladů je vyneseny v Graf 6. Celková výše se úměrně zvyšuje s množstvím potřebných tiskáren pro výrobu. Rozdíl nákladů při použití nastavení 1 a 4 na výrobu 54 900 kusů činí celkem 1 241 773 Kč. V tomto případě by náklady na výrobu jednoho kvalitnějšího štítku vzrostly téměř o 21 Kč.



Graf 6 Celkové náklady na výrobu v závislosti na množství produkce, FDM

3.2. Celkové náklady na výrobu pomocí vstřikovacího lisu

Při předběžné kalkulaci nákladů pro výrobu na vstřikovacím lisu bylo čerpáno z reálných dat výroby zkušebních tělísek pro tahovou zkoušku na stroji *Allrounder 270 C* v laboratořích FS ČVUT. Tento typ stroje se již v současnosti nevyrábí, a proto cena nového vstřikovacího lisu obdobného typu byla přibližně stanovena na 1 500 000 Kč. Běžná životnost podobných strojů se udává v rozmezí 10 až 20 let. V kalkulaci byla použita střední hodnota. Forma pro

vstřikování zkušebních tělísek stála v roce 2015 přibližně 150 000 Kč. V kalkulaci je použita výše nákladů na vstřikovací formu 180 000 Kč z důvodu zohlednění rostoucí meziroční inflace. Předpokládaná životnost formy je vyšší než 59 400 kusů.

Při nepřetržité výrobě je nutná odstávka stroje z důvodu obsluhy a údržby, která denně trvá přibližně 2 hodiny. Doba jednoho cyklu výroby zkušebního tělíška pro tahovou zkoušku činí 40 sekund. Veškerá tato data jsou analogicky použita pro výrobu propagačního štítku ČVUT o podobných rozměrech a váze. Náklad na pronájem prostor byl určen ze zabrané plochy samotným strojem a příslušenstvím. Celkový minimální požadovaný zabraný prostor včetně místa pro obsluhu byl odhadnut na 10,6 m².

Náklady na energie byly určeny z celkového instalovaného výkonu. Pro provoz vstřikovacího lisu (výkon 14 kW) je nutné příslušenství jako chladič (výkon 6,2 kW), temperační jednotka (10 kW) a sušička (0,6 kW). V kalkulaci je při kontinuální výrobě použit průměrný příkon 25 kW, neboť ne všechna zařízení pracují nepřetržitě. V následující tabulce Tab. 19 jsou shrnuty fixní a variabilní náklady na výrobu.

Tab. 19 Fixní a variabilní náklady pro vstřikovací lis

Fixní náklady

Investiční náklady

Cena vstřikovacího lisu	1 500 000,00 Kč
Cena vstřikovací formy	180 000 Kč
Životnost vstřikovacího lisu	15 let
Měsíční odpis stroje a cena formy	188 333,33 Kč

Náklady na pronájem prostor

Požadovaný prostor na vstřikovací lis a příslušenství	10,6 m ²
Náklady na pronájem 1 m ²	158,43 Kč
Celkové náklady za 1 měsíc	1 679,36 Kč

Variabilní náklady

Náklady na materiál

Váha propagačního štítku ČVUT	8,41 g
Cena za 1 kg granulátu PP	54,46 Kč
Celkové náklady na 1 ks	0,46 Kč

Náklady na energie

Průměrný příkon	25 kW
Průměrná cena za kWh	7,15 Kč
Celkem za 1 hodinu	178,75 Kč

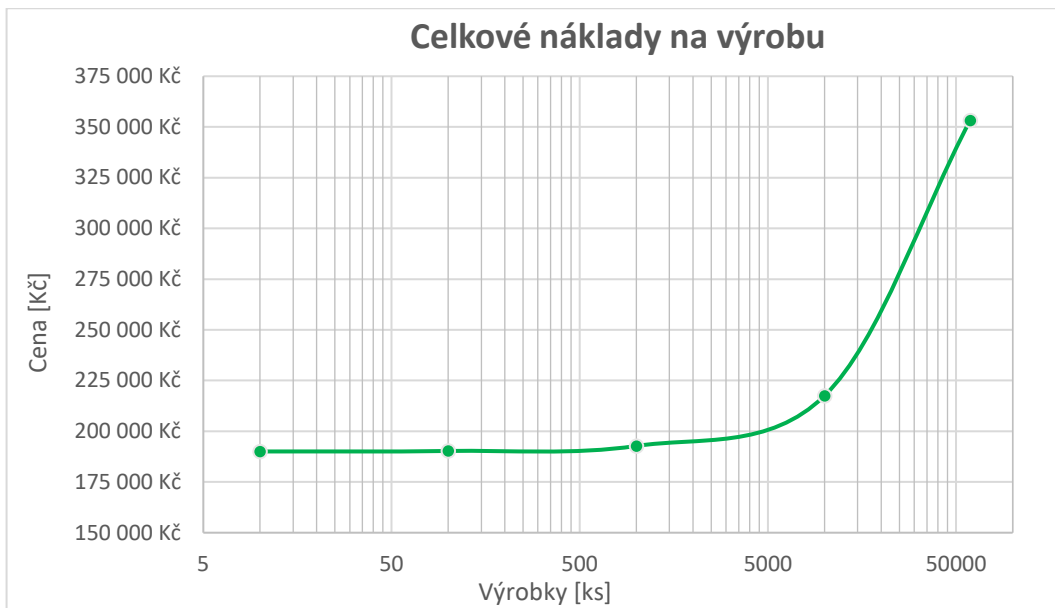
Náklady na údržbu a obsluhu

Denní údržba a obsluha při nepřetržitém provozu	2 h
Mzda obsluhy za 1 hodinu	300,00 Kč
Náklady během 1 dne	600,00 Kč

V případě výroby na vstřikovacím stroji není potřeba uvažovat různá nastavení a kalkulace tím bude mnohem jednodušší než u metody FDM. Celá kalkulace nákladů pro vstřikovací stroj *Allrounder 270 C* je uvedena v Tab. 20. Závislost celkových nákladů na počtu vyráběných kusů je znázorněna v Graf 7.

Tab. 20 Nákladová kalkulace pro vstřikovací lis

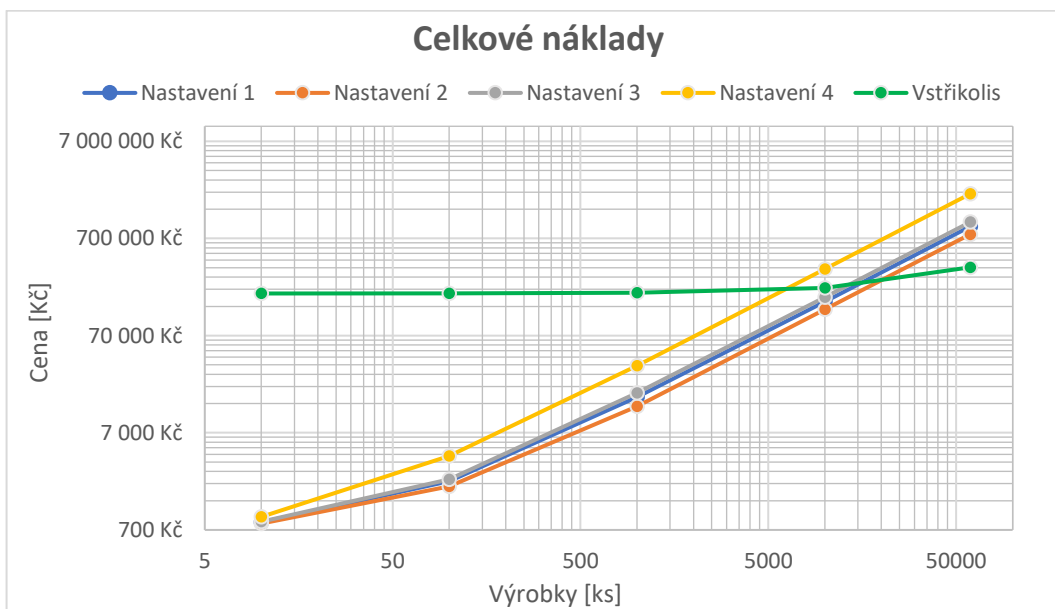
Počet kusů výrobků	10	100	1 000	10 000	59 400
Doba cyklu [hh:mm:ss]	0:06:40	1:06:40	11:06:40	111:06:40	660:00:00
Doba údržby [hh:mm:ss]	0:00:36	0:06:04	1:00:36	10:06:04	60:00:00
Celková doba výroby [hh:mm:ss]	0:07:16	1:12:44	12:07:16	121:12:44	720:00:00
Celková doba výroby [dnů]	0,01	0,05	0,51	5,05	30,00
Fixní náklady					
Měsíční odpis stroje [Kč]			8 333		
Pronájem prostor [Kč]			1 679		
Cena formy [Kč]			180 000		
Celkem [Kč]			190 013		
Variabilní náklady					
Materiál [Kč]	5	46	458	4 581	27 209
Energie [Kč]	20	199	1 986	19 861	117 975
Údržba, obsluha [Kč]	3	30	303	3 030	18 000
Celkem [Kč]	27	275	2 747	27 472	163 184
Celkové náklady [Kč]	190 040	190 287	192 759	217 484	353 196
Celkové náklady na kus [Kč]	19 004,02	1 902,87	192,76	21,75	5,95



Graf 7 Celkové náklady na výrobu dle daného množství produkce, vstřikovací lis

3.3. Srovnání nákladových kalkulací obou technologií

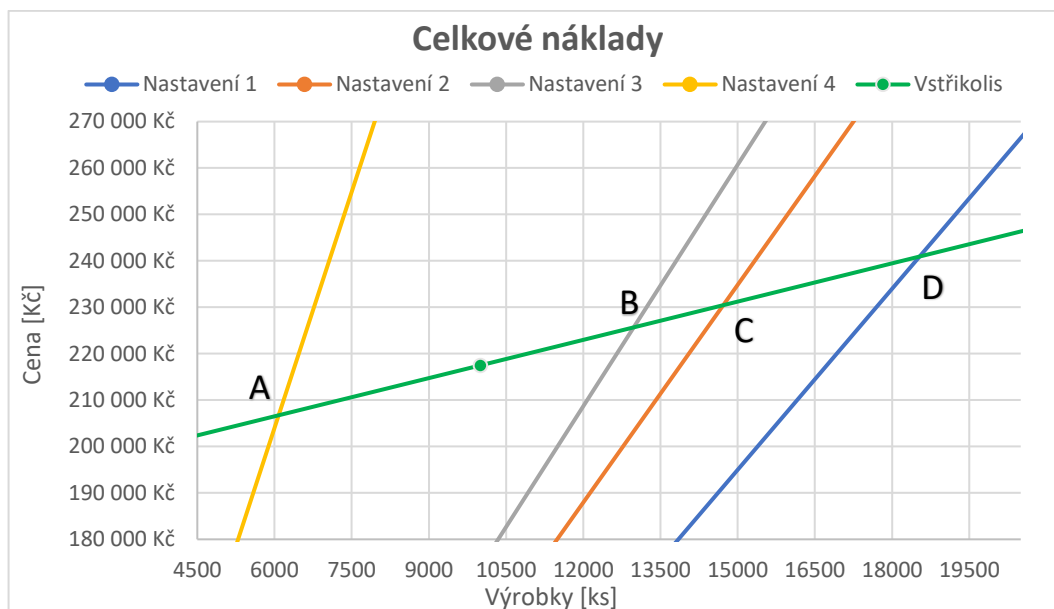
V následujícím Graf 8 je vynesena závislost celkových nákladů na počtu vyrobených kusů pro všechny varianty nastavení tisku, společně s náklady na výrobu pomocí vstřikovacího lisu. Z grafu je patrné, že křivky nákladů pro metodu FDM s počtem kusů rostou mnohem strměji než křivka nákladů pro technologii vstřikování. To je dáno především rostoucími fixními náklady, které jsou zapříčiněny navyšujícím se počtem potřebných tiskáren.



Graf 8 Srovnání celkových nákladů metody FDM a technologie vstřikování

Na následujícím Graf 9 je zobrazena zvětšená oblast, kde se nacházejí průsečíky A, B, C a D nákladových křivek FDM metody s konvenční technologií vstřikování. Z tohoto grafu je patrné, při jakém objemu výroby je již výhodnější zvolit konvenční výrobu nežli složitou 3D farmu.

Největší rozdíl je zřetelný mezi nastavením 1 a 4. V případě nastavení 4, kde je požadováno kvalitnější provedení propagačního štítku, se celkové náklady s konvenční výrobou rovnají již při objemu okolo 6 000 kusů. Při tomto objemu jsou celkové náklady na jeden propagační štítek 33,91 Kč. Při zvoleném nastavení 1, kdy jsou sníženy požadavky na kvalitu a pevnost propagačního štítku, je výhodnější zvolit konvenční výrobu až u objemu vyššího než 19 000 kusů. V tomto případě na kus připadají náklady v hodnotě 12,99 Kč.



Graf 9 Průsečíky křivek celkových nákladů metody FDM a technologie vstřikování

3.4. Zhodnocení metod kalkulací

Při předběžných kalkulacích 3D tisku a technologie vstřikování bylo použito velké množství parametrů závislých na mnoha různých faktorech. Velkou část bylo nutné zjednodušit a některé parametry zcela vynechat.

Vypuštěn byl například koeficient zmetkovitosti a bylo počítáno s nereálným modelem bezchybné výroby. Vznik chyb je především u 3D tisku velmi častým jevem. Koeficient zmetkovitosti je závislý na době tisku, složitosti modelu, podmínkách při tisku nebo na druhu tisknutého materiálu. V méně závažných případech může dojít k nedokonalým místům na povrchu součástí, což je zejména i u propagačních materiálů stále nepřijatelné. V horších případech může být celý cyklus tisku zničený například z důvodu odlepení výrobku v průběhu tisku od tiskového plátu nebo zanesením trysky. Taktéž záleží na množství výrobků během jednoho tisku, které je v tomto důsledku zničeno. Nelze tedy s přesností určit přibližný koeficient zmetkovitosti, neboť je velmi variabilní. Lze však očekávat, že výroba pomocí technologie vstřikování bude mít tento koeficient mnohem menší nežli aditivní technologie FDM.

V momentě, kdy je pro výrobu použito větší množství tiskáren, je nutné vytvořit propojení a složitou komunikační síť, aby bylo snadné celou farmu efektivně ovládat. Náklady spojené s touto problematikou jsou v kalkulaci taktéž vynechané.

V případě výroby pomocí vstřikovacího lisu je u nákladů na formu počítáno s předpokladem, že specifickou formu nebude možné použít na žádnou jinou další zakázku. Celková cena formy je tudíž v kalkulaci rozpočítaná pouze mezi vyráběné kusy výrobků bez ohledu na její životnost. Také nebyla uvažována možnost použití forem pro vícero kusů, tudíž vstřikovací lis vyrobí za jeden cyklus pouze jeden výrobek.

Kvůli výše zmíněným zjednodušením se výsledné náklady mohou od použitého modelu výrazně odlišovat i přes to, že se tato předběžná kalkulace nákladů snaží co nejvíce přiblížit reálné výrobě.

4. Citlivostní analýza vstupních parametrů

V důsledku velkého množství parametrů vstupujících do kalkulace byla provedena citlivostní analýza předběžných nákladů na kus s vybranými parametry pro vyhodnocení míry jejich vlivu. Na základě dat vyplývajících z analýzy je možné rozhodnout, které parametry jsou zásadní a je výhodné se jimi blíže zabývat, a které zásadně výši nákladů neovlivní. Pro každou technologii bylo provedeno 7 citlivostních analýz. Za základní parametr byl vybrán počet vyráběných kusů. Druhým parametrem byla zvolena některá ze vstupních hodnot, která byla použita při předběžné kalkulaci nákladů. Hodnoty byly zvolené pouze ty, které lze při výrobě nějakým způsobem ovlivnit nebo optimalizovat. Toto je v citlivostní analýze simulováno procentuálním snížením nebo navýšením referenční hodnoty parametru. Procento navýšení nebo snížení je pro každou analýzu použito stejné, aby bylo možné jednotlivá data analýz mezi sebou analogicky srovnávat.

Veškeré citlivostní analýzy v následující části včetně výpočtů lze najít v příloze *Nákladové kalkulace a citlivostní analýzy*. V listu „citlivostní analýza“ lze vybrat jednotlivé analýzy pro každou technologii zvlášť a data mezi sebou porovnávat. V listech „výpočty 3D tisk“ a „výpočty vstříkolis“ je možné měnit referenční hodnoty proměnných parametrů citlivostních analýz a pozorovat jejich dopad na celkovou výši nákladů na jeden výrobek.

4.1. Citlivostní analýza metody FDM

V případě metody FDM byla kalkulace provedena pro 4 různá nastavení. Citlivostní analýza je pro zjednodušení vyhodnocena pouze pro nastavení 1. V Tab. 21 je provedena citlivostní analýza celkových nákladů na kus s proměnnou pořizovací cenou tiskárny. Z analýzy je patrné, že největší vliv na výslednou cenu nastává při nízkých objemech výroby, neboť s narůstajícím objemem se fixní náklady lépe rozkládají z důvodu většího využití tiskáren. Citlivost parametru ceny tiskárny se tak s větším počtem kusů snižuje a zastavuje se na hodnotě 0,75 %.

Tab. 21 Citlivostní analýza metody FDM

		Cena tiskárny						Odchylka	
		-30 %	-20 %	-10 %	+10 %	+20 %	+30 %		
		18 893 Kč	21 592 Kč	24 291 Kč	26 990 Kč	29 689 Kč	32 388 Kč	35 087 Kč	
Výrobků [ks]	10	64,519	70,142	75,765	81,388	87,011	92,634	98,257	11,84 %
	100	17,970	18,533	19,095	19,657	20,220	20,782	21,344	4,90 %
	1 000	12,866	12,922	12,978	13,034	13,090	13,147	13,203	0,74 %
	10 000	12,828	12,884	12,941	12,997	13,053	13,109	13,165	0,74 %
	59 400	12,828	12,885	12,942	12,998	13,055	13,112	13,169	0,75 %
Průměr:								3,80 %	

V případě dalších citlivostních analýz jsou pro přehlednost uvedeny pouze výsledné odchylky u jednotlivých proměnných parametrů (viz Tab. 22). Z výsledných dat je patrné, že nejcitlivější parametr je spotřeba materiálu a náročnost na obsluhu a údržbu. Vhodnou úpravou výroby za účelem změny těchto parametrů je možné výrobní náklady poměrně dobře regulovat. Zajímavým výsledkem analýzy je poměrně minimální míra vlivu spotřeby energie, kterou lze přímo ovlivnit použitým materiálem pro tisk. Z analýzy je také patrné, že citlivost fixních nákladů je rozhodující jen při objemu do 100 kusů. Při vyšší produkci již určitá změna těchto parametrů nemá na předběžnou cenu nákladů velký vliv z důvodu plného využití tiskáren.

Tab. 22 Srovnání citlivostních analýz, 3D tisk

Výrobků [ks]	Proměnné parametry						Výrobků na jeden tisk
	Cena tiskárny	Životnost tiskárny	Doba tisku	Spotřeba materiálu	Spotřeba energie	Obsluha a údržba	
	Odchylka [%]						
10	11,84	13,04	0,23	1,24	0,11	1,58	0,00
100	4,90	5,40	0,96	5,11	0,43	5,23	3,89
1 000	0,74	0,81	3,96	7,71	0,65	8,78	6,96
10 000	0,74	0,82	2,21	7,74	0,66	7,24	5,51
59 400	0,75	0,82	2,31	7,73	0,66	7,09	5,34
Průměr:	3,80	4,18	1,93	5,91	0,50	5,99	4,34

4.2. Citlivostní analýza technologie vstřikování

Citlivostní analýzy pro výrobu na vstřikovacím lisu byly vyhodnoceny pro podobné parametry jako v předchozím případě. Rozdílné je zařazení proměnného parametru ceny formy a vynechání možnosti vyrábět vícero kusů najednou během jednoho cyklu.

Z výsledných dat v Tab. 23 je patrné výrazné oddělení citlivosti parametrů spadajících pod fixní náklady, které se při malých objemech nejvíce podílí na celkových nákladech. S rostoucím počtem kusů se tyto náklady upozaďují a při objemu 59 400 kusů již největší rozdíly v nákladech vytváří spotřeba materiálu, energie, doba výroby a délka servisních odstávek. Citlivostní analýza potvrdila předpokládaný význam parametru ceny formy, který má velký vliv na výsledné ceně bez ohledu na množství produkce ve zvoleném modelovém rozsahu. Tento parametr společně se spotřebou elektrické energie a dobou výroby značně ovlivňuje celkovou výši nákladů na jeden kus výrobku.

Tab. 23 Srovnání citlivostních analýz, vstřikovací lis

Výrobků [ks]	Proměnné parametry						
	Cena stroje	Životnost stroje	Cena formy	Spotřeba materiálu	Spotřeba energie	Doba výroby	Doba servisní odstávky
	Odchylka [%]						
10	0,76	0,83	16,38	0,00	0,00	0,00	0,00
100	0,76	0,83	16,36	0,00	0,02	0,02	0,00
1 000	0,75	0,82	16,15	0,04	0,18	0,21	0,03
10 000	0,66	0,73	14,30	0,36	1,58	1,82	0,26
59 400	0,41	0,45	8,78	1,33	5,75	6,63	0,96
Průměr:	0,67	0,73	14,39	0,35	1,51	1,74	0,25

4.3. Výsledné zhodnocení obou technologií

Na základě předchozích nákladových kalkulací a citlivostních analýz je patrné, že ekonomická výhodnost aditivní technologie převažuje u malých a středních objemů výroby, a to maximálně v řádech tisíců kusů. To je dáno zcela odlišným poměrem fixních a variabilních nákladů u jednotlivých technologií. Prvotní investice u výroby pomocí vstřikovacího lisu je nesrovnatelně vyšší než v případě metody FDM. U technologie vstřikování je tudíž opodstatněná snaha investiční náklady rozložit mezi co největší počet vyráběných kusů. Tento problém u aditivní technologie FDM vzhledem k uvažované pořizovací ceně tiskárny není tak závažný. Je nutné podotknout, že nelze vyloučit vyšší pořizovací ceny tiskáren, jako například u výrobce Anisoprint. V tomto případě však není odpovídající srovnávat tiskárnu schopnou kompozitního tisku s konvenční technologií vstřikování, jelikož by adekvátní kalkulační model byl zcela odlišný.

Nutné je také zmínit, že kvalita povrchu součásti vyrobené na vstřikovacím lisu je bez ohledu na dobu cyklu stále velmi vysoká. V případě aditivní technologie FDM se této kvalitě můžeme pouze přiblížit vhodnou volbou parametrů, které zásadně ovlivňují dobu tisku jednoho dílu a následně i celkové náklady na výrobu (viz předchozí Graf 8). Tento rozdíl v nákladech na výrobu se s množstvím produkce zvětšuje.

Zajímavým aspektem je také vytíženost strojů pro FDM a vstřikování. Pro ilustraci je vhodné vzít průsečík křivek s označením A v Graf 9. V tomto bodě se náklady technologie vstřikování a metody FDM pro nastavení 4 protínají na objemu výroby okolo 6 000 kusů. Pro vytisknutí tohoto objemu je zapotřebí 68 tiskáren, které jsou využité téměř ze 100 %. Vstřikovací lis je schopen stejný objem při nepřetržitém provozu s nutnými servisními přestávkami vyrobit během téměř tří dnů. V kalkulaci je počítáno s měsíčním odpisem strojů, a tudíž je předpokládána velmi nereálná možnost, kdy stroj po zbytek měsíce stojí a celý měsíční odpis stroje připadá pouze na jednu danou zakázku. Jestliže by bylo počítáno s denním odpisem vstřikovacího stroje, náklady na výrobu by při objemu výroby 6 000 kusů klesly o 26 haléřů na kus.

V tomto ohledu je také nutné uvažovat v dlouhodobějším časovém intervalu a zvážit, zda pořízení rozsáhlé 3D farmy nebude rizikový krok, protože může dojít k tomu, že většina tiskáren bude v průběhu roku nečinných.

4.3.1. Využití metody FDM

Silnou stránkou aditivní technologie FDM je jednoznačně flexibilita výroby. Díky tomu je snadné rychle adaptovat a modifikovat výrobu požadovaným směrem bez dalších nákladných investic. To lze velmi výhodně využít například při prototypování a u designových studií. V případě nečekaných událostí nebo poruch ve firemním provozu lze díky této technologii taktéž efektivně a rychle vyrobit potřebné přípravky nebo poškozené díly, kvůli kterým by jinak bylo nutné pozastavit výrobu a zdlouhavě čekat na externího dodavatele.

Další výhodou 3D tisku je možnost tvorby velmi komplexních dílů, které by bylo nutné v jiných případech složitě sestavovat a montovat po jednotlivých částech. S tímto také souvisí tisk odlehčených a dutých struktur, díky kterému lze dosáhnout mnohem menší spotřeby materiálu, váhy výrobku nebo lepšího chlazení uvnitř výtisku.

Metoda FDM také umožňuje snadné kombinování jednotlivých barev nebo druhů materiálů. Při použití různých barev tak lze například vytisknout hotový propagační předmět a odpadá nutnost jakéhokoliv následného barvení nebo dalšího nákladného zpracování. Díky možnosti kombinace materiálů při tisku je například umožněna tvorba vodou rozpustných struktur, které výrazně usnadní tisk převisů a urychlí finální dokončení výrobku.

Nevýhodou metody FDM je výrazná závislost kvality na době tisku. Do tisku vstupuje mnoho parametrů a vnějších vlivů, které mohou výslednou kvalitu zásadně ovlivnit a zvýšit tak procento zmetkovitosti. K neprospěchu této metody také přispívá vysoká cena filamentů. Při větším počtu kusů tiskáren je automatizace a zapojení do sériové výroby složitější.

4.3.2. Využití vstřikové technologie

Výroba na vstřikovací lisu přináší značnou výhodu při velkoobjemové produkci identických výrobků. Z důvodu velmi nízké doby jednoho cyklu vstřikování a poměrně velké automatizace lze vyrábět téměř nepřetržitě bez nutnosti velkých zásahů obsluhy. Cena granulátu pro vstřikování je v průměru desetkrát nižší než u filamentů pro metodu FDM.

Nevýhodou výroby pomocí vstřikování jsou vysoké investiční náklady a velmi dlouhý časový horizont návratnosti investice. Z předešlé kalkulace a citlivostní analýzy vyplývá, že nejvýznamnější náklad je spojený s pořizovací cenou formy, která se odvíjí především od složitosti výrobku. Vstřikovací formy lze jen omezeně během výroby modifikovat. Jestliže dojde k větší změně na výrobku, je nutné

vyrobit formu zcela novou, což se výrazně propíše do celkových nákladů, a to hlavně při nízkém množství vyráběných kusů. Výroba dutých struktur nebo složitých komplexních tvarů je pomocí vstřikování téměř nemožná.

Závěr

Tato bakalářská práce se věnovala zhodnocení charakteristik jednotlivých metod aditivní technologie, popsání a definování nákladových skupin pro vybranou metodu FDM, vytvoření předběžné nákladové kalkulace a srovnání metody FDM s technologií vstřikování.

Teoretická část popisovala časový vývoj a zásadní momenty, které zapříčinily velký rozvoj aditivních technologií. Dále byly uvedeny základní specifikace nejčastěji používaných metod a jednotlivé metody byly následně podrobně charakterizovány. Poté byly popsány materiály, které lze v aditivní technologii využívat, a jejich typické použití v různých odvětvích.

Stěžejní část práce se zaměřovala na ekonomickou náročnost vybrané technologie. V úvodu této části byl popsán důvod výběru metody FDM a schematicky zobrazen souhrn všech hlavních nákladových skupin, které byly zohledněny v předběžné kalkulaci nákladů. Za účelem zhotovení simulací tisku byl vytvořen ilustrační propagační předmět ČVUT. Provedené simulace sloužily pro definování základních parametrů vstupujících do nákladů. Dále tato část pojednávala o dostupných FDM tiskárnách na trhu a jejich hlavních specifikacích a výhodách. Následně byly podrobně specifikovány dostupné materiály včetně pokročilých a kompozitních a bylo uvedeno jejich nejvhodnější využití. Dále byly popsány různé možnosti nastavení tisku jako je volba velikosti trysky, výšky vrstvy nebo množství výplně. Na základě simulací a reálných tisků byl zkoumán vliv jednotlivých parametrů na předběžné náklady, kvalitu a dobu výroby.

V předposlední části byly dle popsaných vstupních nákladů vyčísleny předběžné kalkulace pro metodu FDM a technologii vstřikování za účelem srovnání ekonomické náročnosti obou technologií. Kalkulace byla uvažována na základě modelové situace rostoucího trendu 3D farem. Jednotlivé výpočty byly provedeny pro různé objemy výroby propagačních štítků ČVUT. V případě metody FDM byly uvažovány 4 druhy nastavení tisku, které zásadně ovlivnily výši celkových nákladů na výrobu. Z výsledku předběžných kalkulací vyplynula velikost objemu výroby, při kterém se celkové náklady pro metodu FDM a technologii vstřikování rovnají. Na základě těchto výsledků kalkulačního modelu bylo možné rozhodnout, kterou z technologií je při požadovaném objemu výroby výhodnější zvolit.

V poslední části byly v důsledku velkého množství parametrů vstupujících do kalkulací provedeny citlivostní analýzy. Na základě těchto analýz bylo možné vyvodit důležitost jednotlivých proměnných parametrů, které ovlivňují celkové náklady na výrobu. Díky tomu bylo možné posoudit, na které parametry je nutné brát větší ohled a je výhodné pečlivěji zkoumat náklady s ním spojené.

Tato práce může v obdobných aplikacích sloužit jako vodítko při hledání ideálního řešení souvisejícího s volbou nejekonomičtějšího způsobu výroby pro malé a střední podniky. V rámci zachování rozsahu práce však bylo nutné zjednodušit a zobecnit mnoho parametrů a vlivů, které mohou změnit povahu kalkulace a citlivostních analýz. V tomto ohledu by bylo přínosné se těmito aspekty dále zabývat.

Seznam použitých zdrojů

- [1] KABIR, S M Fijul, Kavita MATHUR a Abdel-Fattah M. SEYAM. A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties, *Composite Structures*, *Composite Structures* [online]. 2020, 232 [cit. 2021-11-28]. ISSN 0263-8223. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822319322706>
- [2] WOHLERS, Terry. *The World of Rapid Prototyping* [online]. San Jose, California: Wohlers Associates, 1992 [cit. 2021-11-29]. Dostupné z: <https://wohlersassociates.com/mr.html>
- [3] ZHANG, Jun, Negin AMINI, David A.V. MORTON a Karen P HAPGOOD. 3D printing with particles as feedstock materials. *Advanced Powder Technology* [online]. 2021, (32) [cit. 2021-11-28]. ISSN 0921-8831. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921883121003599>
- [4] BOZKURT, Yahya a Elif KARAYEL. 3D printing technology; methods, biomedical applications, future opportunities and trends. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2021, (14), 14 [cit. 2021-11-29]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785421007134>
- [5] *Additive Fabrication* [online]. 2008 [cit. 2021-11-29]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>
- [6] NGO, Tuan D., Alireza KASHANI, Gabriele IMBALZANO, David HUI a Kate T.Q. NGUYEN. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2018, 172-196 [cit. 2021-11-28]. ISSN 1359-8368. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836817342944>
- [7] Desktop Anisoprinting [online]. Luxembourg: Anisoprint, 2022 [cit. 2022-06-22]. Dostupné z: <https://anisoprint.com/solutions/desktop/>
- [8] Part With the Holes, Kirsch Problem [online]. Luxembourg: Anisoprint, 2019 [cit. 2022-06-22]. Dostupné z: <https://anisoprint.com/cases/parts-with-the-holes/>
- [9] *SLM-Solutions: SLM 800* [online]. Germany, 2021 [cit. 2021-11-29]. Dostupné z: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/Content/Machines/SLM_R_800_Web.pdf
- [10] Souhrnný katalog – Aditivní technologie. Misan s.r.o. [online]. Lysá nad Labem: Misan, 2021 [cit. 2022-06-16]. Dostupné z: <https://www.misan.cz/pdf/-souhrnny-katalog---aditivni-technologie/>
- [11] ZETKOVÁ, Ivana. *Problematika výroby strojních kovových součástí 3D tiskem*. Plzeň, 2017. Disertační práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, Fakulta strojní. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Česánek, Ph.D.
- [12] HERZOG, Dirk, Vanessa SEYDA, Eric WYCISK a Claus EMMELMANN. *Additive manufacturing of metals*. *Acta Materialia* [online]. 2016, 371-392 [cit. 2022-03-04]. ISSN 1359-6454. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645416305158>

- [13] KELLNER, Tomas. *3D PRINTING: All The 3D Print That's Fit to Pitt: New Additive Technology Center Opens Near Steel Town*. General Electric [online]. 6. 9. 2016 [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: <https://www.ge.com/news/reports/all-the-print-thats-fit-to-pitt-new-additive-technology-center-opens-near-steel-town>
- [14] BRICE, Craig, Ravi SHENOY, Milo KRAL a Karl BUCHANNAN. *Precipitation behavior of aluminum alloy 2139 fabricated using additive manufacturing*. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2015, [cit. 2022-03-04]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509315303361>
- [15] *Slitiny Inconel. Neonickel* [online]. [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: <https://www.neonickel.com/cs/slitiny-inconel/>
- [16] Ice Coral [online]. ICE Industrial Services, 2022 [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: <https://www.ice.cz/en/ice-coral>
- [17] Creality CR 5 PRO [online]. Creality, 2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.crealitystore.cz/produkt/creality-cr-5-pro-h/>
- [18] Prusa i3 MK3S+ [online]. Prusa Research, 2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3s-3/>
- [19] Craftbot FLOW IDEX XL [online]. Craftbot, 2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://eshop.3dwiser.com/3d-tiskarny/craftbot-flow-idex-xl/>
- [20] Raise3D Pro 3 [online]. Raise3D, 2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://eshop.3dmanufaktura.cz/raise3d-pro3---3d-tiskarna-s-dvojitym-extruderem/>
- [21] Intamsys FUNMAT HT [online]. Intamsys, 2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://eshop.3dwiser.com/fff-fdm/intamsys-funmat-ht/>
- [22] Ultimaker S5 [online]. Ultimaker, 2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://eshop.3dwiser.com/3d-tiskarny/ultimaker-s5/>
- [23] Anisoprint Composer A4 [online]. Anisoprint, 2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://eshop.3dmanufaktura.cz/anisoprint-composer-a4/>
- [24] Anisoprint Composer A3 [online]. Anisoprint, 2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://eshop.3dmanufaktura.cz/anisoprint-composer-a3/>
- [25] Original Prusa Enclosure [online]. Prusa Research, 2022 [cit. 2022-06-22]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/original-prusa-enclosure-34/>
- [26] ČSN EN ISO 527-1 (640604): Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 1: Obecné principy. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020. Dostupné také z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iso-527-1-640604-211895.html>
- [27] Prusament PLA [online]. Praha: Prusa Research, 2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/product/prusament-pla-gravity-grey-1kg-2/>
- [28] Prusament PETG [online]. Praha: Prusa Research, 2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/product/prusament-petg-urban-grey-1kg/>

- [29] Prusament ABS [online]. Praha: Prusa Research, 2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/stibrna-easyabs-tiskova-struna-filament-1kg/>
- [30] Materiál PLA [online]. Praha: Prusa Research, 2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/article/pla_2062
- [31] Materiál PETG [online]. Praha: Prusa Research, 2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/article/petg_2059
- [32] Materiál ABS [online]. Praha: Prusa Research, 2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/en/article/abs_2058
- [33] Prusament PC [online]. Praha: Prusa Research, 2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/product/prusament-pc-blend-urban-grey-970g/>
- [34] Fillamentum Nylon FX256 [online]. Praha: Prusa Research, 2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://help.prusa3d.com/materials>
- [35] Fillamentum FlexFill 98A [online]. Praha: Prusa Research, 2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://help.prusa3d.com/materials>
- [36] PrimaSelect PVA+ [online]. Praha: Prusa Research, 2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://help.prusa3d.com/materials>
- [37] Verbatim BVOH [online]. Praha: Prusa Research, 2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://help.prusa3d.com/materials>
- [38] Polykarbonát PC [online]. Praha: Prusa Research, 2022 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/article/polycarbonate-pc_165812
- [39] Materiál Nylon [online]. Praha: Prusa Research, 2022 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/article/nylon_167188
- [40] Flexibilní materiál [online]. Praha: Prusa Research, 2022 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/article/flexible-materials_2057
- [41] Vodou rozpustné materiály [online]. Praha: Prusa Research, 2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/article/water-soluble-bvoh-pva_167012
- [42] Prusament PCCF [online]. Praha: Prusa Research, 2022 [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/product/prusament-pc-blend-carbon-fiber-black-800g-2/>
- [43] Fiberthree F3 PA-GF [online]. Praha: Prusa Research, 2022 [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/product/fiberthree-f3-pa-gf-pro-15-glassfiber-filament-500g/>
- [44] Anisoprint Smooth PA [online]. Praha: 3DManufaktura, 2022 [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://eshop.3dmanufaktura.cz/anisoprint-smooth-pa-750cc-1-75mm-filament/>
- [45] Fiberthree F3 PA-CF [online]. Praha: Prusa Research, 2022 [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/product/fiberthree-f3-pa-cf-pro-15-carbonfiber-filament-500g/>
- [46] Anisoprint CFC PA [online]. Praha: 3DManufaktura, 2022 [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://eshop.3dmanufaktura.cz/anisoprint-cfc-pa-750cc-1-75mm/>

- [47] Anisoprint, kompozitní karbonové vlákno [online]. Praha: 3DManufaktura, 2022 [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://eshop.3dmanufaktura.cz/anisoprint-ccf-1-5k-750m-kompozitni-karbonove-vlakno/>
- [48] Anisoprint, kompozitní bazaltové vlákno [online]. Praha: 3DManufaktura, 2022 [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://eshop.3dmanufaktura.cz/anisoprint-cbf-750m-kompozitni-bazaltove-vlakno/>
- [49] MATERIAL DATASHEET [online]. Luxembourg: Anisoprint, 2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: https://anisoprint.com/wp-content/uploads/2022/03/CFC_PETG_datasheet_March_2022.pdf
- [50] ZUZA, Mikolas. Vše o tryskách s různým průměrem [online]. Praha: Prusa Research, 2018 [cit. 2022-06-24]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/vse-o-tryskach-s-ruzny-m-prumerem/>
- [51] Infill Patterns [online]. Praha: Prusa Research, 2020 [cit. 2022-06-24]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/inifill-patterns_177130
- [52] IRF Tisková zpráva Q1/2022 [online]. Praha: Industrial Research Forum, 28. 4. 2022 [cit. 2022-07-02]. Dostupné z: https://www.industrialresearchforum.cz/wp-content/uploads/2022/04/Tiskova_zprava_IRF_2022_Q1_CZ.pdf

Seznam použitých zkratek a symbolů

<i>SLA</i>	<i>Stereolithography apparatus</i>
<i>STL</i>	<i>Standard Tessellation Language</i>
<i>SLS</i>	<i>Selective Laser Sintering</i>
<i>FDM</i>	<i>Fused Deposition Modeling</i>
<i>FFF</i>	<i>Fused filament fabrication</i>
<i>EBM</i>	<i>Electron beam melting</i>
<i>PBF</i>	<i>Powder bed fusion</i>
<i>DLP</i>	<i>Digital Light Processing</i>
<i>DED</i>	<i>Direct energy deposition</i>
<i>LOM</i>	<i>Laminated object manufacturing</i>
<i>CFC</i>	<i>Composite Fiber Co-extrusion</i>
<i>CCF</i>	<i>Composite Carbon Fiber</i>
<i>CBF</i>	<i>Composite Bazalt Fiber</i>
<i>PEEK</i>	<i>Polyetereterketon</i>
<i>PPSU</i>	<i>Polyfenylsulfon</i>
<i>PLA</i>	<i>Kyselina polymléčná</i>
<i>ABS</i>	<i>Akrylonitrilbutadienstyren</i>
<i>PETG</i>	<i>Polyethylentereftalát-glykol</i>
<i>ASA</i>	<i>Akrylesterstyrenakrylonitril</i>
<i>PC</i>	<i>Polykarbonát</i>
<i>BVOH</i>	<i>Butenediol vinylalkoholový kopolymer</i>
<i>PVA</i>	<i>Polyvinylalkohol</i>

Seznam obrázků

Obr. 1 Metoda FDM	13
Obr. 2 Metoda SLS	14
Obr. 3 Metoda SLA	15
Obr. 4 Metoda DED	16
Obr. 5 Metoda LOM	17
Obr. 6 Tisk kompozitního materiálu metodou CFC	18
Obr. 7 Kompozitní komponent PETG+CCF vyroben metodou CFC	19
Obr. 8 Řez palivovou tryskou GE pro letecké motory	21
Obr. 9 Schéma nákladových skupin pro metodu FDM	23
Obr. 10 Propagační štítek s logem ČVUT [mm]	24
Obr. 11 Rozměry zkušební vzorku A1 dle ISO 527-1	26
Obr. 12 AURA: Volba mřížky výztužného vlákna	33
Obr. 13 AURA: Orientační spotřeba materiálu, váha a doba tisku štítku	34
Obr. 14 PRUSASLICER: Propagační štítek, tryska 0,4mm	36
Obr. 15 PRUSASLICER: Propagační štítek, tryska 0,25mm.....	36
Obr. 16 Závislost kvality výtisků na použité trysce	37
Obr. 17 PRUSASLICER: Struktura vnitřní přímočaré výplně s hodnotou 20 % ...	39
Obr. 18 PRUSASLICER: Geometrické struktury vybraných výplní	40
Obr. 19 PRUSASLICER: Tisk 1 kusu	42
Obr. 20 PRUSASLICER: Tisk 14 kusů.....	42

Seznam tabulek

Tab. 1 Nejběžnější metody 3D tisku a jejich základní specifikace	12
Tab. 2 Práškové materiály pro technologie PBF a DED	20
Tab. 3 Dostupné FDM tiskárny a jejich specifikace	25
Tab. 4 Základní materiály pro FDM tiskárny	27
Tab. 5 Pokročilé materiály pro FDM tiskárny	29
Tab. 6 Kompozitní materiály pro metodu FDM	32
Tab. 7 Termoplast určený ke koextruzi s výztužným vláknem	32
Tab. 8 Výztužná vlákna určená ke koextruzi	32
Tab. 9 Výsledné vlastnosti kompozitních vzorků	33
Tab. 10 Doba tisku a spotřeba materiálu dle zvolené výplně	40
Tab. 11 Parametry tisku 1 a 14 kusů štítků.....	42
Tab. 12 Doporučené intervaly údržby, výměny a ceny komponentů tiskárny Prusa i3 MK3S+	42
Tab. 13 Fixní a variabilní náklady metody FDM	45
Tab. 14 Nastavení tisku a materiálové náklady.....	46
Tab. 15 Nákladová kalkulace metody FDM, nastavení 1	46
Tab. 16 Nákladová kalkulace metody FDM, nastavení 2	47
Tab. 17 Nákladová kalkulace metody FDM, nastavení 3	47
Tab. 18 Nákladová kalkulace metody FDM, nastavení 4.....	47
Tab. 19 Fixní a variabilní náklady pro vstřikovací lis	49
Tab. 20 Nákladová kalkulace pro vstřikovací lis	50
Tab. 21 Citlivostní analýza metody FDM	54
Tab. 22 Srovnání citlivostních analýz, 3D tisk	55
Tab. 23 Srovnání citlivostních analýz, vstřikovací lis	56

Seznam grafů

Graf 1 Závislost kvality tisku na době tisku, tryska 0,4 mm	35
Graf 2 Závislost kvality tisku na době tisku, tryska 0,25 mm	35
Graf 3 Závislost kvality tisku na spotřebě materiálu pro různé trysky.....	38
Graf 4 Závislost snižování hodnoty výplně na spotřebě materiálu a době tisku	38
Graf 5 Potřebný počet tiskáren v závislosti na množství produkce, FDM	48
Graf 6 CN na výrobu v závislosti na množství produkce, FDM	48
Graf 7 CN na výrobu dle daného množství produkce, vstřikovací lis	51
Graf 8 Srovnání CN metody FDM a technologie vstřikování	51
Graf 9 Průsečíky křivek CN metody FDM a technologie vstřikování	52

Seznam příloh

1. Nákladový model metody FDM a technologie vstřikování plastů: *Nákladové kalkulace a citlivostní analýzy*