



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBO-
TIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND
ROBOTICS

3D TISKÁRNY
3D PRINTERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUKÁŠ GÖBEL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JOSEF PAVLÍK, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systému a robotiky

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Lukáš Göbel

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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

3D tiskárny

v anglickém jazyce:

3D printers

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

3D tiskárny jsou nejmodernějšími výrobními stroji. Používají se především pro rapid prototyping a některé speciální typy malosériové výroby.

Cíle bakalářské práce:

Je třeba vypracovat rešerši na dané téma a v ní shrnout, jaké metody 3D tisku se používají a jaké jsou používané koncepce 3D tiskáren z hlediska jejich konstrukčního řešení.

Seznam odborné literatury:

<http://www.3d-tisk.cz/>

<http://www.tctmagazine.com/>

<http://reprap.org/>

<http://3dprint.com/>

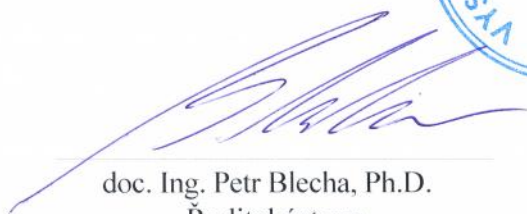
a jiné internetové zdroje

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Josef Pavlík, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 21.11.2014




doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Ředitel ústavu


doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan

ABSTRAKT

GÖBEL Lukáš: 3D tiskárny

Bakalářská práce je rozdělena na dvě části. První část se zabývá obecným využitím 3D tiskáren v průmyslu, popisuje před-procesní a po-procesní operace a používané materiály. Druhá část je věnována především konstrukčnímu řešení a popsání jednotlivých principů 3D tiskových strojů, včetně jejich výhod, nevýhod a vhodnosti použití. Také jsou zmíněny některé vybrané, běžné tiskové technologie i s příklady jejich parametrů a používaných materiálů.

Klíčová slova: 3D tisk, 3D tiskárny, rychlá výroba prototypů, aditivní výroba

ABSTRACT

GÖBEL Lukáš: 3D printers

Bachelor's thesis is divided into two parts. The first part deals with the general use of 3D printers in the industry, describes the pre-processing and post-processing operations and used materials. The second part is concentrated on the construction solution and describes each principle of the 3D printing machines, including their advantages, disadvantages and applications. Also some selected common printing technologies are mentioned with examples of their parameters and used materials.

Keywords: 3D print, 3D printers, rapid prototyping, additive manufacturing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

GÖBEL, L. *3D tiskárny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 61 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Josef Pavlík, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne

.....
Podpis

OBSAH

ABSTRAKT

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

OBSAH

ÚVOD	13
1 O 3D TISKU	14
1.1 Výroba ve 3 krocích	15
1.2 Používané materiály	16
1.3 Využití a aplikace 3D tiskáren	16
1.3.1 Výroba prototypů – rapid prototyping.....	17
1.3.2 Výroba forem a nástrojů – rapid tooling	18
1.3.3 Přímá výroba součástí – rapid manufacturing	18
2 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	19
2.1 Vytlačování roztavené látky	19
2.1.1 Pohyb v kartézském souřadném systému	20
2.1.2 Delta systém	21
2.1.3 Polární souřadný systém.....	21
2.2 Fotopolymerizace	22
2.3 Vázání částic prášku	23
2.4 Laminování	24
2.5 Hybridní stroje	24
3 TECHNOLOGIE A TECHNICKÁ ŘEŠENÍ	25
3.1 Dělení technologií	25
3.2 Vytlačování materiálu – Material extrusion	27
3.3 Fotopolymerizace v nádobě – Vat photopolymerization.....	33
3.4 Nastřikování materiálu – Material jetting.....	37
3.5 Nastřikování pojiva – Binder jetting	40
3.6 Tisk v práškovém loži – Powder bed fusion	43
3.7 Směřované nanášení materiálu – Directed energy deposition.....	47
3.8 Laminování – Sheet lamination.....	50
ZÁVĚR	53
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	
SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK	
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	

ÚVOD [4], [12], [22], [47], [62]

Rychlá a levná realizace konstruktérových tvůrčích myšlenek do výrobku, pomocí počítačového zpracování, je jedním z hlavních cílů moderní techniky a vývoj tisku třírozměrných objektů ji k tomuto cíli značně posouvá. Pro běžné zpracování kovů a plastů je zapotřebí velkého množství nástrojů, forem a řady jednoúčelových a víceúčelových strojů. Pro kusovou a malosériovou výrobu se mnohdy výroba nástroje nemusí vyplatit. Toto dává prostor pro vývoj a využití technologií 3D tisku.

3D tisk označuje výrobu trojrozměrných modelů vyrobených podle softwarové předlohy, je to také nejsnazší cesta jak z počítačových dat vytvořit reálný model. 3D tisk je možný z mnoha různých materiálů jako jsou například plasty, kovy, keramika, beton nebo třeba i čokoláda. Charakteristickým prvkem 3D tisku je, že se součást buduje postupným přidáváním materiálu a tím nedochází, u většiny technologií, k žádnému odpadu. Ve srovnání s konvenčními způsoby obrábění, u kterých je materiál naopak odebírán, lze s pomocí 3D tisku snáz vytvářet složitější tvary i konstrukce. Celý proces trvá od několika minut až po několik hodin či dnů, a s vývojem technologií se tato doba stále zkracuje.

Časová úspora a možnost vyrobit během krátké chvíle téměř cokoliv a z jakékoliv oblasti průmyslu jsou důvody, proč je 3D tisku předpovídaná velká budoucnost a již nyní je často označován jako počátek „třetí průmyslové revoluce“. Ta první je spojována s vynálezem parního stroje, se kterým se zásadně změnilo zemědělství, výroba, těžba a doprava. Druhá průmyslová revoluce nastala s příchodem internetu, který umožnil sdílení informací po celém světě. [12], [22]

Technologie 3D tisku ale není žádnou novinkou, již v roce 1986 získal Charles Hull patent na svou technologii zvanou stereolitografie, která je považovaná za první 3D tiskovou technologii.



Obr. 1 Ukázka vytištěných objektů 3D tiskovou technologií [47]

1 O 3D TISKU [7], [12], [53]

Zpočátku se 3D tisk označoval často jako rapid prototyping neboli výroba prototypů. Stále se s tímto označením lze setkat, nejedná se ale o správné označení 3D tisku. Před příchodem dostupných tiskáren se totiž tyto technologie používaly primárně pro výrobu prototypů. Také se jedná o technologie aditivní výroby, což je termín, označující tvorbu součástí postupným nanášením stavebního materiálu. Dalšími termíny označující tyto technologie jsou například freeform fabrication, digital fabrication, laser prototyping, layer-based manufacturing, additive manufacturing nebo solid imaging.

Hlavním cílem 3D tisku je dosažení rychlé a zároveň levné výroby jakýchkoliv součástí v nejrůznějších oblastech průmyslu. Do jisté míry tedy tyto technologie konkurují klasickým CNC obráběcím centřům. Jak vůbec 3D tisk funguje? Do značné míry, procesy podílející se na tvorbě objektu nejsou o moc složitější než tiskové technologie inkoustových a laserových 2D tiskáren, která jsou již v provozu ve většině kanceláří a domácnostech, a které produkují většinu dnešních dokumentů a fotografií. Tyto technologie tvoří text nebo obraz tak, že počítačově řídí umístění inkoustu nebo toneru na povrch papíru. Podobným způsobem 3D tiskárny vyrábějí předměty tím, že řídí umístění a přilnavost po sobě jdoucích vrstev v prostoru. U 2D tisku je vždy potřeba mít v počítači například nějaký textový dokument jako vzor pro tisk, stejně tak je potřeba mít při tisknutí prostorových objektů zpracovaný digitální model. Ten je možné vyrobit buď ručně pomocí 3D modelovacích systémů, nebo za pomoci 3D skeneru. Další variantou může být kombinace těchto dvou způsobů.

Bez ohledu na to jak byl počítačový model vytvořen, je potřeba ho podrobit nějakému „porcovacímu softwaru“, který ho rozdělí na mnoho průřezových vrstev jen zlomek milimetru tlusté. Až po tomto procesu může 3D tiskárna začít vytvářet jednu vrstvu nad druhou, dokud nebude vytvořen kompletní objekt. Doba tisku je závislá na požadované přesnosti, použitém materiálu a především na technologii. Všechny technologie pracují na jednom ze 4 základních způsobů.

Prvním způsobem tiskárny budují materiál vytlačováním roztavené látky z trysky tiskové hlavy. Nejběžnějším materiálem u těchto technologií je roztavený termoplast. Jiným materiálem může být roztavený kov, pro stavební průmysl například beton, v potravinářském průmyslu to může být i čokoláda či poleva na dort.

Druhým způsobem se objekt tvoří za pomoci tekuté pryskyřice, která při reakci na působení laserového paprsku tuhne. Tento materiál se také nazývá tekutý fotopolymer. Tyto tiskárny vytváří objekt v nádobě plné tohoto polotovaru.

Ve třetí kategorii 3D tisku se objekt staví spojováním po sobě jdoucích vrstev vytvořených z velmi jemného prášku. Spojení materiálu může být dosaženo tryskáním lepidla na každou vrstvu materiálu nebo roztavením práškových zrn dohromady za pomoci laseru nebo jiného zdroje tepla. Mezi materiály pro tyto technologie lze zařadit téměř jakýkoliv materiál ve formě prášku, například nylon, keramika, vosk, bronz, nerez ocel, kobalt, chrom a titan.

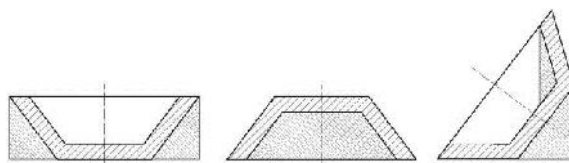
Poslední kategorie 3D tiskáren je založena na myšlence plošného laminování. Tato technologie spočívá ve vrstvení materiálů, které pojí na sebe a následně laserem nebo nožem vyřezává obrysy vrstvy.

1.1 Výroba ve 3 krocích

Celý proces všech 3D tiskáren je rozdělen do 3 částí:

Příprava digitálního modelu [7], [29]

V první fázi je potřeba vytvořit digitální model, k tomu se dá využít většina dnešních 3D softwarů nebo 3D skener. Dále je důležité vhodně nadefinovat orientaci modelu, a to z důvodu potřeby dočasných podpor, které je nutno u některých technologiích vytvořit pod převislou částí. Tyto podpory mohou výrazně prodlužovat dobu tisku a mohou být obtížně odstraňovány. Orientace se musí přizpůsobit funkci a způsobu zatížení vytvořené součásti, protože vytisknutý materiál nemá ve všech směrech stejné vlastnosti. Druhým krokem je převod 3D modelu do formátu, který aproximuje povrchovou geometrii pomocí trojúhelníků, tímto formátem bývá obvykle STL. Třetí fází je převod do formátu, který vytvoří horizontální řezy, podle kterých bude součást vyráběna, tento formát bývá označován slicer (SLI). Tato data se pak kopírují do paměti stroje, pak může začít samotný tisk. Některé z moderních modelovacích systémů, např. SolidWorks, mají funkce pro vytvoření druhého a třetího kroku již integrované.



Obr. 2 Několik variant orientace součásti a z toho vyplývajícího objemu podpor [1]

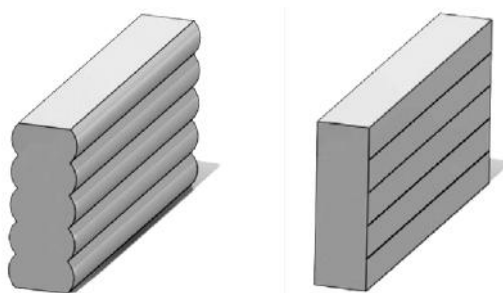
Tisk součásti

Této problematice je věnována celá 3. kapitola.

Čištění a dokončovací operace [7], [12]

Po vytisknutí je součást pouze očištěna od podpor a přebytečného materiálu, to se provádí například ručním odloupenutím podpor, máčením v louhu, otryskáním tlakovou vodou nebo s pomocí čistidel. Takto očištěná součást bývá obvykle velmi hrubá a pro vytvoření požadovaného povrchu je potřeba využít dokončovacích úprav. Tyto úpravy bývají zpravidla prováděny ručně a výroba tvarově složité součástky se může tímto až o několik hodin prodloužit. Používají se tři hlavní postupy dokončovacích úprav:

- broušení
- natavení nerovností
- nanesení povrchové vrstvy (např. lakování, pokovování nebo glazování)



Obr. 3 Před (vlevo) a po (vpravo) obroušení stěn [16]

Dokončovací úprava natavení, čímž se zjemní povrch součásti, se používá u materiálů, které teplem měknou, např. termoplasty. Lakováním se „zaliží“ všechny nerovnosti pryskyřicí či lakem. Broušením, které se provádí nejčastěji, se naopak nerovnosti odstraní a je prováděno nejčastěji ručně s pomocí brusného papíru nebo ruční bruskou.

Dalšími dokončovacími procesy může být barvení, vrtání, obrábění, leštění apod. Pro úpravu povrchu lze využít i obráběcích strojů.

1.2 Používané materiály [12], [41]

Pro 3D tisk se nejčastěji využívají polymery, kovy a keramika. Většina materiálů je běžně dodávána ve formě prášku nebo vlákna. Zde jsou vypsány některé z používaných materiálů:

- **polymery:**
 - ABS, PLA, PC, polyamid, nylon, fotopolymerní pryskyřice
- **kovy:**
 - vysokopevnostní ocel, titanová slitina, nerezová ocel, slitina kobaltu a chromu, hliník, zlato a stříbro
- **keramika:**
 - porcelán, keramika na bázi karbidu křemíku

Dalšími materiály mohou být například beton, vosk, papír nebo i čokoláda. Nejpoužívanějším materiálem je v současnosti plast, konkrétně ABS a PLA.

1.3 Využití a aplikace 3D tiskáren [9], [26], [33], [46]

Základní rozdělení využití technologií 3D tisku:

- rapid prototyping – výroba prototypů při vývoji pro vizualizaci designu, testování tvaru a funkce, k ověřování optimalizace, výrobitelnosti, smontovatelnosti a vhodnosti pro sériovou výrobu, k vizualizaci simulací namáhání, proudění apod., k nalezení chyb ve výrobní dokumentaci či koncepci
- rapid tooling – výroba forem a nástrojů (typické jsou modely pro odlévání)
- rapid manufacturing – výroba součástí sloužících jako finální výrobek

Počátkem 3D tisku se tyto technologie využívaly především pro tvorbu prototypů. S postupem času se ale začínají čím dál tím více využívat i na tvorbu nástrojů, forem nebo k výrobě finálních produktů. Dnešní možnosti využití 3D tisku jsou zatím omezené, existuje již ale několik oblastí, které této technologii věnují velkou pozornost. Jsou to například:

- letectví – výroba komplexních lehkých dílů pro letectví a kosmonautiku
- architektura – tento průmysl využívá technologie 3D tisku především pro ověření struktury, přezkoumání návrhu a tisku zmenšených modelů
- automobilový průmysl – využití technologií 3D tisku pro ověřování návrhů a pro vývoj nových motorů
- obrana – výroba lehkých dílů, např. pro sledovací zařízení
- vzdělávání – 3D tisk poskytuje způsob jak vizualizovat geometrii a design na uměleckých školách. To je také využito v mnoha disciplínách pro výzkumné studie.
- zábava – všechny druhy prototypů hraček, figurek, her, hudebního vybavení a dalších věcí jsou vyráběny s pomocí 3D tiskáren
- zdravotnictví – v této oblasti se zkoumá využití 3D tisku, například pro tisk implantátů, orgánů, či kůže přímo z pacientových buněk.
- průmyslová výroba – Zpracovatelský průmysl využívá 3D tiskárny pro různé účely, včetně vytváření modelů výrobků, před tím, než jsou vyráběny v masovém měřítku. Také se využívá k dosažení rychlejšího vývoje produktů a k řešení konstrukčních problémů.
- osobní výroba – levné a dostupné tiskárny umožňují využívat tyto technologie pro soukromé využití nebo jako hobby

1.3.1 Výroba prototypů – rapid prototyping [5], [9], [12], [29]

V současnosti je 3D tisk nejvíce používán k výrobě prototypů. To je oblast, kde se vytvářejí konceptní modely a funkční prototypy. Konceptní modely jsou obvykle docela základní, nefunkční modely nového designu, které umožňují návrhářům sdělovat své myšlenky ve fyzické podobě. Naopak funkční prototypy jsou sofistikovanější a umožňují posoudit tvar, vhodnost a funkce jednotlivých částí výrobku před samotným zadáním do výroby.

Tradičně vyráběné prototypy a konceptní modely jsou tvořeny zkušenými řemeslníky s využitím dílenské techniky a vysokým podílem lidské práce. Proto pro ně není neobvyklé, aby se vyráběly i několik dnů až týdnů a investovalo se do nich mnoho financí. Oproti tomu, 3D tiskárny mohou nyní vyrábět konceptní modely a funkční polotovary během několika dní nebo hodin za zlomek ceny tradičních metod. Kromě úspory času a finančních zdrojů, tiskárny umožňují i lepší finální výrobek, který je uveden na trh, díky možnosti úprav a posudků na prototypu, jako je například snadná změna designu, odstraňování chyb, kontrola smontovatelnosti, opravitelnost, ergonomie nebo provádění funkčních zkoušek.



Obr. 4 Další z možností využití 3D tisku - barevné zobrazení výsledků simulace napětí přímo na součásti [5]

Použití 3D tisku pro vytvoření prototypů je nyní běžné v celé řadě průmyslových odvětví, např. v automobilovém, leteckém, elektrotechnickém, ale také při výrobě spotřebního zboží. Ve všech oblastech dochází ke zkracování vývojových časů, snižování nákladů a zároveň zvyšování kvality výrobku. Nejlepší výsledky v ušetřeném čase se dosahuje při aplikaci RP ve vývoji celých montážních skupin. Například v automobilovém průmyslu, v General Motors tisknou více než 20 000 prototypových dílů ročně. Také Ford dělá velké množství 3D tisku a v prosinci 2013 vytvořil prototyp krytu motoru jako 500 000. vytištěný autodíl. Ve Formuli 1 automobilových závodů je 3D tisk také již běžná věc, například Renault již od roku 1998 tiskne autodíly pro F1 za účelem testování aerodynamických designů.

1.3.2 Výroba forem a nástrojů – rapid tooling [5], [9], [12]

Stejně jako pro výrobu prototypů se 3D tiskárny používají také k výrobě forem, přípravků, příslušenství a dalších výrobních nástrojů. Tyto věci byly tradičně vytvářeny řemeslnou ruční prací. Použití 3D tiskáren pomáhá slévárnám s tradiční výrobou, a proto mohou ušetřit spoustu času i peněz. To také může umožnit výrobcům rychleji měnit své návrhy a vyrábět širší sortiment. 3D tiskárny lze nyní použít k výrobě klasických pískových licích forem. Touto výrobou se dá snížit doba výroba formy až o 70 %, dosahuje se vyšších přesností, a také to umožňuje vyrobít formu složitějších tvarů. 3D tisk také umožňuje nepoužívat model, kolem kterého je forma tvořena, a který se běžně musí odstraňovat před plněním roztaveným kovem. Existují i tiskárny, které mohou stavět objekty z vosku nebo voskové náhražky, s cílem vytvořit vytavitelné modely. Zde je voskový model vytištěn a kolem něj je vytvořena forma nebo skořepina. Forma je potom zahřátá, vosk odlit pryč a je nahrazen tekutým kovem. 3D tiskárny s vytavitelným modelem se dnes běžně používají v zubním lékařství, při výrobě šperků a v jiných průmyslových odvětvích, ve kterých si mohou malé, složité nebo drahé výrobky sami vyrábět.

1.3.3 Přímá výroba součástí – rapid manufacturing [5], [9], [12]

Přímou výrobou součástí je myšleno to, že finální vytisknutá součást má požadované mechanické vlastnosti, není křehká a vydrží mechanické namáhání.

V několika specializovaných trzích se 3D tiskárny používají k výrobě konečného průmyslového komponentu a konečného spotřebitelského zboží. Toto odvětví se obvykle označuje direct digital manufacturing (DDM) a získává uplatnění v různých odvětvích průmyslu, jako například při výrobě automobilů, v kosmonautice, při výrobě hraček nebo módy. V srpnu 2014 firma Mercedes ukázala, že může dobře využít 3D tisku k výrobě jednodílného větracího otvoru nebo vnitřních částí mřížek reproduktoru. Výhodou 3D tisku je, že může být využit k vytvoření objektů, které nemohou být vyrobeny za použití tradičních výrobních technik. Například lze vytisknout náhrdelník nebo řetěz, který nemá přerušené jednotlivé díly, píšťalku s kuličkou uvnitř nebo loď v láhvi. 3D tisk také umožňuje stavět pracovní, vícedílné mechanismy, jako jsou např. převodovky. U tradičních metod se musí tyto mechanismy skládat, u 3D tisku to lze již „poskládané“ vytisknout, viz obr. 5. 3D tištěné plastové a kovové části se již nacházejí v komerčních i vojenských letadlech. Vzhledem k tomu, že klasická výroba vyžaduje velké množství nástrojů, 3D tisk nabízí příležitosti pro jednorázovou nebo nízkorozpočtovou produkci.



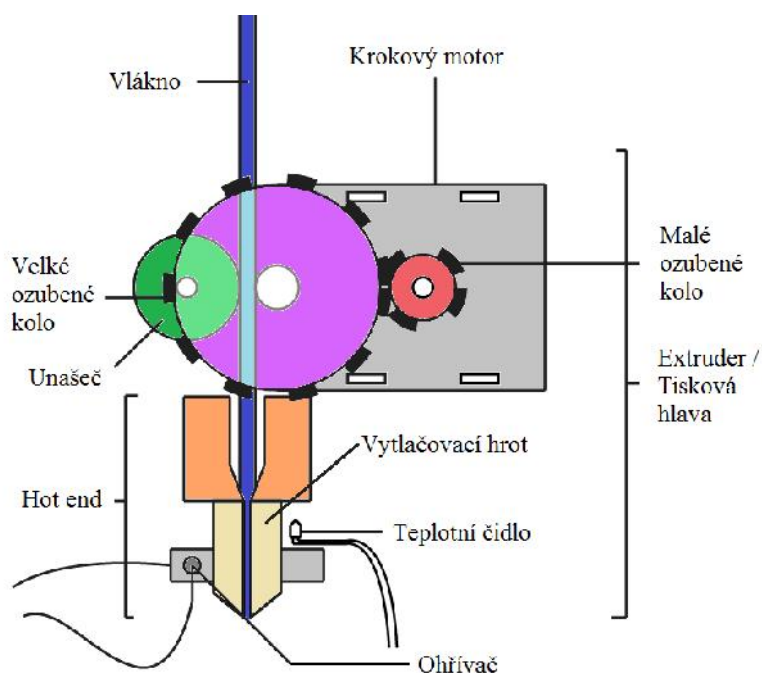
Obr. 5 Ukázka vytištěného mechanismu [44]

Zatímco většina věcí vytvořených pomocí 3D tisku je vyrobena z plastu nebo kovu, vyvíjejí se specializované tiskárny v oblasti medicíny, které mohou tisknout jednoduché léky nebo vytvářet živé tkáně tím, že staví potřebnou „věc“ z živých buněk. Jedná se o tzv. „biotisk“ a má potenciál v mnoha oblastech medicíny díky umožnění tisku náhradní kůže a lidských orgánů s využitím pacientových buněk.

2 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ [12], [14], [27], [32], [50], [63]

2.1 Vytlačování roztavené látky

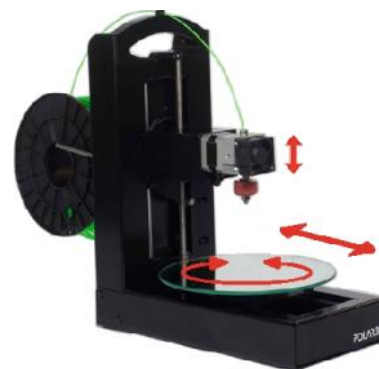
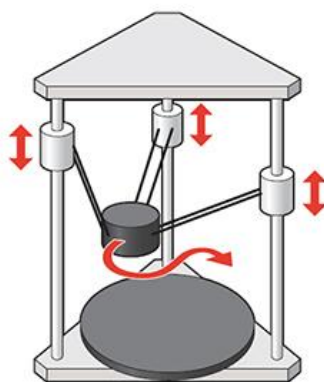
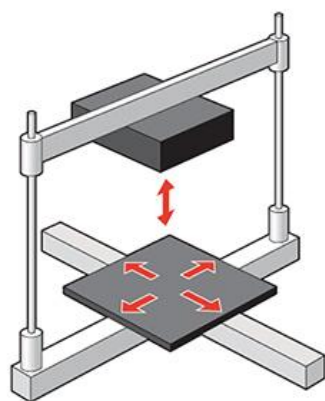
Tato konstrukce využívá k nanášení stavebního materiálu trysky, které jsou umístěné v tiskové hlavě, ta se u těchto technologií označuje i jako extruder. Materiál se odmotává z cívky a je přiváděn pomocí motoru a unášeče do hot endu, jehož součástí je topné těleso (ohřívač), teplotní čidlo a vytlačovací hrot. Hot end bývá navíc často chlazen sérií větráků.



Obr. 6 Schéma tiskové hlavy [69]

Správné místo nanesení materiálu se udává kombinací pohybů tiskové hlavy a nosné desky. Pohyb se u všech těchto 3D tiskáren dělí do tří základních skupin – podle určování souřadnic:

- kartézský
- delta
- polární



Obr. 7 a obr. 8 Schéma pohybů kartézského systému (vlevo), delta systému (uprostřed) a polárního systému (vpravo) [27] [50]

2.1.1 Pohyb v kartézském souřadném systému

V kartézském souřadném systému (dále jen s. s.) jsou všechny pohyby translační, v osách X, Y a Z – osa Z vždy udává vertikální pohyb neboli výšku. Jedná se o nejběžnější variantu většiny technologií. Kartézský s. s. se používá i u ostatních metod; fotopolymerizace, vázání částic prášku i laminování.

Tento systém se dále dělí podle toho, jak se vůči sobě pohybuje nosná deska a tisková hlava. Obvykle používané způsoby:

- **standart** – Nosná deska se pohybuje pouze v ose Y, tisková hlava v osách X a Z. Ke každé z os je přiřazen jeden motor, který zajišťuje pohyb. Pohyb ve směru osy Z může být poháněn i dvěma motory současně. Viz obr. 9
- **cubed shape printer** – v tomto případě se nosná deska pohybuje v ose Z, a v osách X a Y se pohybuje tisková hlava. Ke každé z os je opět přiřazen jeden motor. Viz obr. 10
- **coreXY** – I zde se tisková hlava pohybuje v osách X a Y, ale o jejich pohyb se starají dva spřažené motory, viz obr. 12. Pohyb v ose Z je zajištěn buď tiskovou hlavou, nebo nosnou deskou poháněnou 1-2 motory.
- **coreXZ** – Princip je obdobný jako u předchozího případu, jen v jiných osách.

Další možností může být ale i jakákoliv jiná kombinace pohybů nosné desky a tiskové hlavy.



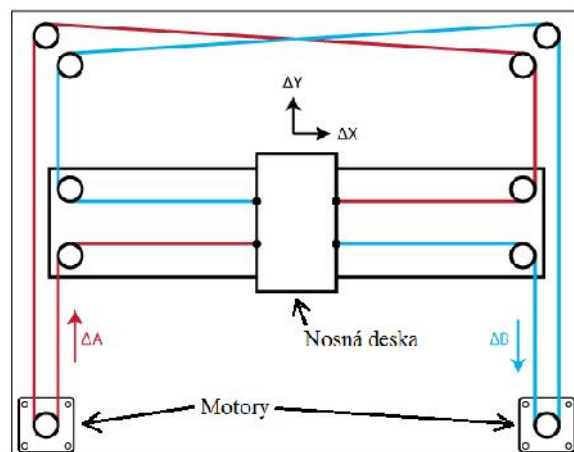
Obr. 9 Ukázka stroje s konstrukčním řešením standart [63]



Obr. 10 Ukázka stroje s konstrukčním řešením cubed shape printer [21]



Obr. 11 Stroj VX4000 [67]



Obr. 12 Schéma nepoužívanějšího spřažení motorů u metody CoreXY [52]

2.1.2 Delta systém

Delta tiskárny jsou vybaveny třemi sloupky, mající mezi sebou stejnou vzdálenost. Na každém sloupku je umístěn jeden motor, který pohání posuv s ramenem ve směru osy Z. Kombinací pojezdů na všech sloupcích se tisková hlava pohybuje nad nosnou deskou. V některých případech se natáčí i nosná deska. Obr. 13

2.1.3 Polární s. s.

V poslední variantě je požadovaná poloha určena natočením „ φ “ a vzdáleností od osy „ r “. Natáčí se vždy nosná deska, ale vzdálenost od osy může vykonávat jak nosná deska, tak i tisková hlava. Pohyb ve směru osy Z obvykle vykonává tisková hlava. Obr. 14. Použití delta a polárního řešení je vhodnější pro rotační díly, zatímco kartézský s. s. je více univerzální.



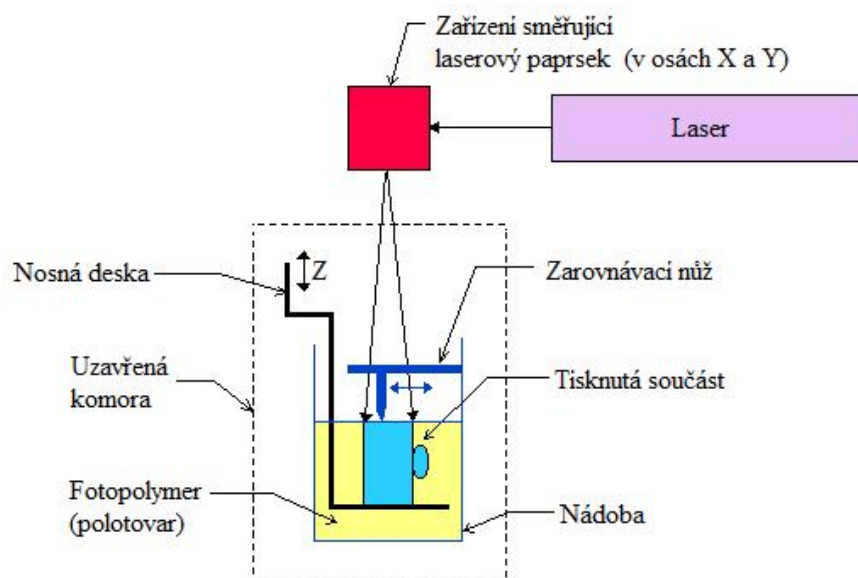
Obr. 13 Konstrukční řešení delta [48]



Obr. 14 Použití polárního systému [13]

2.2 Fotopolymerizace

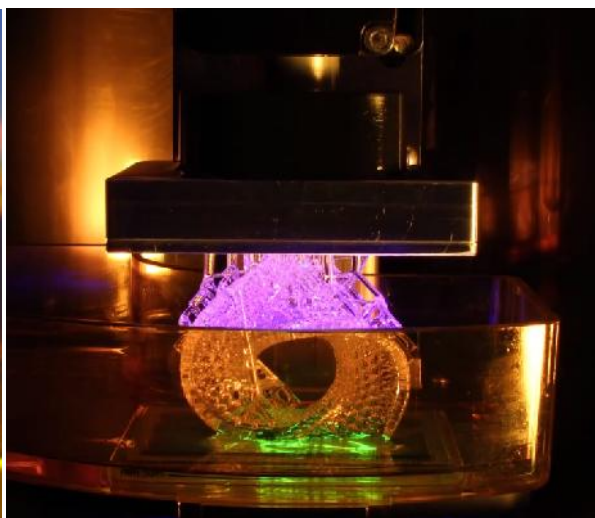
Fotopolymerizace využívá světelný paprsek k vytvrzování fotopolymeru (fotopolymer – tekutina, která v reakci na působení světelného záření tuhne). Jako zdroj světla může sloužit např. laser. Místo dopadu světelného paprsku je určováno soustavou zrcadel a sérií čoček. Ve směru osy Z se v těchto případech pohybuje vždy nosná deska. Je také možnost osvětlovat celou vrstvu najednou, v tomto případě se pak při tisku pohybuje pouze nosná deska. Osvětlování fotopolymeru může probíhat dvěma způsoby; seshora nebo zespod. Při osvětlování seshora se osvětluje hladina materiálu a nosná deska se při vytváření objektu „potápí“ do kapaliny, viz obr. 16. U této metody je důležité udržovat hladinu v konstantní výšce. Při osvětlování zespod je osvětlováno dno nádoby s fotopolymerem (které je obvykle skleněné) a nosná deska se naopak vynořuje, viz obr. 17. Přísun polymeru je zajištěn pomocí čerpadla nebo sérií čerpadel, které obvykle automaticky udržuje i konstantní výšku hladiny polymeru. Při osvětlování seshora je často každá nová vrstva vyrovnávána, např. zarovnávacím nožem.



Obr. 15 Schéma fotopolymerizace seshora [32]



Obr. 16 Osvětlování seshora [2]

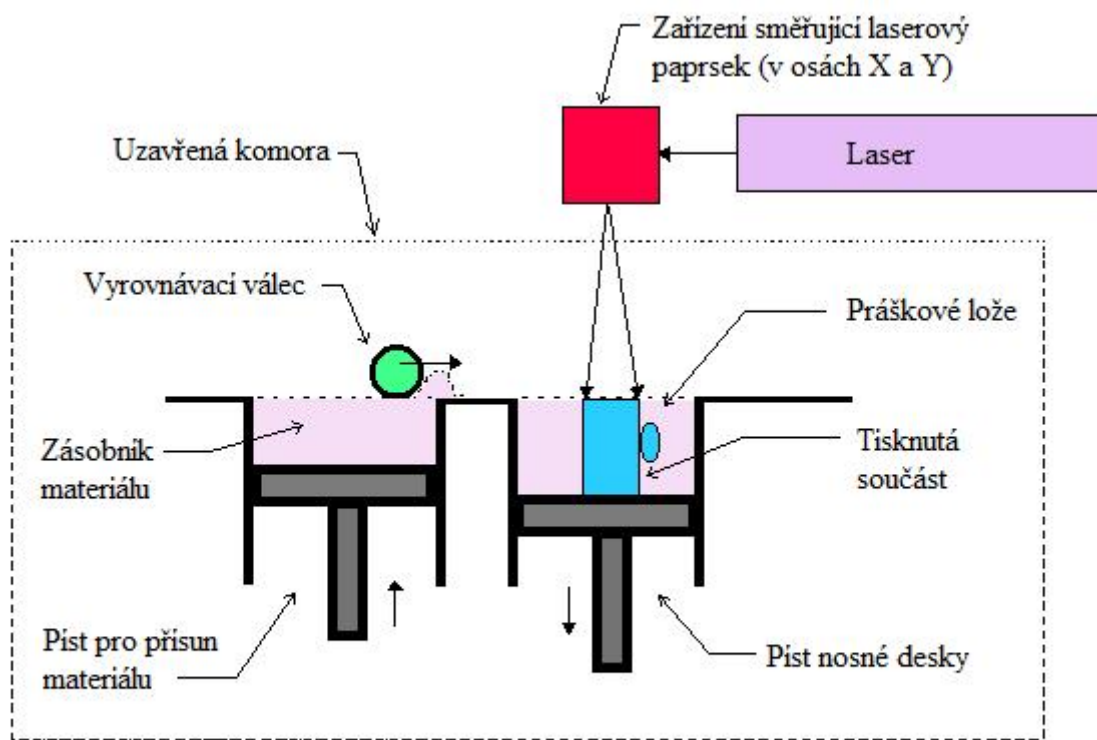


Obr. 17 Osvětlování zespod [11]

2.3 Vázání částic prášku

K vázání částic prášku se nejčastěji používají 2 řešení. Jedním z nich je jejich vzájemné slepení, to je provedeno nanesením pojiva tiskovou hlavou. Některé z tiskových hlav mohou obsahovat i několik trysek uspořádaných vedle sebe, tak že pokryjí celou jednu z os stroje (X nebo Y). V těchto případech pak odpadá posuv v této ose, viz obr. 11, str. 21. Druhé řešení využívá zdroje tepla ke spékání nebo tavení materiálu (může se opět jednat o laserový paprsek – v těchto případech ale výkonnější než u fotopolymeryzace).

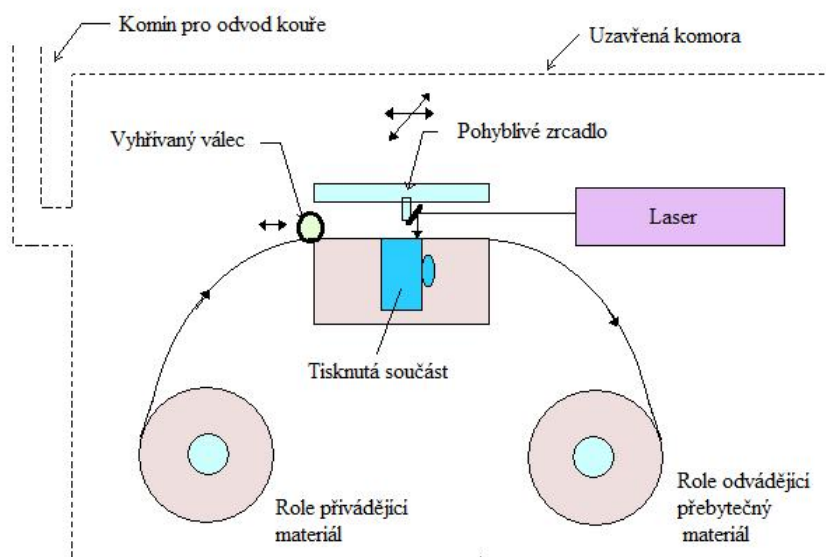
Materiál se obvykle pojí v práškovém loži. Zdroj tepla může být směřován pomocí soustavy zrcadel (např. při použití laseru – podobně jako v kap. 2.2) nebo se může pohybovat v osách X, Y (např. u elektronového paprsku). Prášek je na nosnou desku dopraven zvednutím pístu pod zásobníkem materiálu a následným nahrnutím a srovnáním vyrovnávacím (obvykle protiběžným) válcem. Zásobník materiálu může být nahrazen násypkou (spíše u větších zařízeních) a místo válce je možné použít i zarovnávací nůž. V některých případech je přebytečný materiál nahrnut do druhého zásobníku s materiálem, který bývá umístěn na druhé straně stroje. Posuv v ose Z je obvykle provázen pístem nosné desky.



Obr. 18 Schéma spékání práškového lože [32]

2.4 Laminování

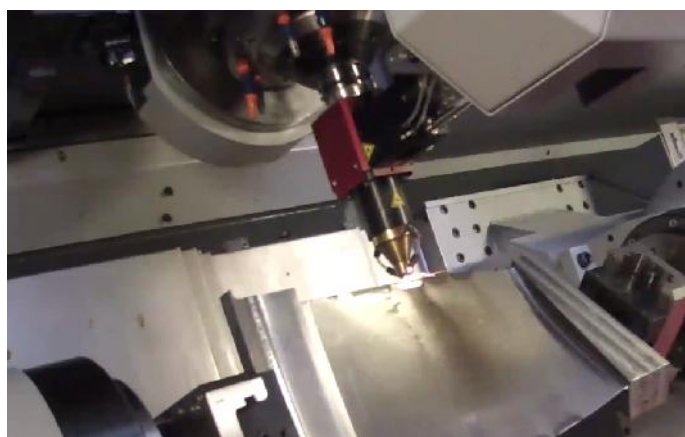
Tento princip využívá ke zpracování materiálu laserový paprsek nebo mechanický nůž. Princip řezání laserem je velmi podobný jako u předchozích případů. V druhém případě je řezání prováděno nožem, pohybujícím se v osách X a Y. Pohyb v ose Z může být vykonáván jak nožem, tak i nosnou deskou. Materiál je přidáván podávacím zařízením (listy, plechy) nebo je odvíjen z role (plastová fólie). Každá nová vrstva je pro lepší přichycení k předchozí vrstvě obvykle válcována vyhřívaným válcem nebo je pomocí zdvihu nosné desky přitlačena k přitlačné desce.



Obr. 19 Schéma metody laminování [32]

2.5 Hybridní stroje

Jedná se obvykle o víceosé zařízení kombinující klasické CNC stroje s 3D tiskovými technologiemi. Existují dvě varianty hybridních strojů. Jednou z nich, že stroj obsahuje zároveň zařízení pro obrábění i zařízení pro tisk. Druhou variantou je, že se ve stroji vymění pouze nástroj – tím je myšleno, že například vřeteno u CNC frézky se vymění za tiskovou hlavu. Některé 3D tiskárny jsou navrženy i jako rozšiřující modul pro některá již existující CNC zařízení. [6] [38]



Obr. 20 Ukázka hybridního stroje (automatická změna procesů CNC a 3D tisku trvá méně než 30 sekund) [14]

3 TECHNOLOGIE A TECHNICKÁ ŘEŠENÍ

[7], [9], [12], [28], [35], [46]

Technologie sloužící k tisku součástí jsou velmi různé a v různých fázích vývoje. Ve snaze používat široké spektrum materiálů, tisknout pevnější výrobky a za kratší dobu se jich objevilo již mnoho. Principy jednotlivých technologií se od sebe liší v používaném materiálu, podobě polotovaru, způsobu spojování stavebního materiálu a výrobního postupu.

3.1 Dělení technologií:

- Podle výrobního postupu:
 - přidávání vrstev s použitím laseru a vytvrzováním bod po bodu
 - přidávání vrstev s použitím laseru a vytvrzováním po vrstvách
 - přidávání vrstev bez použití laseru s vytvrzováním bod po bodu
 - přidávání vrstev bez použití laseru s vytvrzováním po vrstvách
- Podle použitého materiálu:
 - polymery
 - vosk
 - kovy
 - keramika
 - jiné
- Podle konzistence polotovaru:
 - kapalná
 - pevnolátková (vlákno, drát, fólie, plech apod.)
 - prášková
- Podle způsobu spojování materiálu:
 - tavením
 - chemickou reakcí
 - tekutým pojivem
 - elektrickým proudem
- podle designu tiskárny:
 - otevřený – open source
 - uzavřený – closed source

Open source design (někdy jen open design) neboli **otevřený design** značí, že k zakoupenému produktu je přiložena i jeho kompletní dokumentace, schémata a seznam materiálů. Obvykle se k takovému produktu dodává i návod k sestavení stroje a open source software. Open tiskárny je možno snadno opravovat, upravovat nebo rozšiřovat o další hardware, například lze vyměnit celý systém pro přívod jiného typu materiálu. Na druhé straně closed neboli **uzavřený design** tiskáren je jejich přesným opakem, jelikož jsou hlídány autorskými právy. Open design je řešení spíše cenově dostupnějších tiskáren a převážná většina, ne-li všechny profesionální tiskárny jsou dostupné pouze v uzavřeném designu.

Výběr technologie závisí:

- na požadované přesnosti
- na volbě materiálu
- na možnosti dokončovacích operací a obrábění funkčních ploch
- na pořizovacích a provozních nákladech

Průmysl 3D tisku je v současnosti zaplaven mnoha patentovanými postupy a ochrannými známkami. To zapříčinilo vznik velikého množství technologií 3D tisku, které se snaží již patentované postupy obejít. Všechny ale vycházejí z již zmíněných 4 základních postupů, které jsou pouze různě modifikovány:

- fotopolymerace
- vázání částic prášků
- vytlačování roztavené látky
- laminování

Americká společnost pro testování a materiály ASTM se pokusila standardizovat rozdělení technologií 3D tiskáren a rozdělila je do 7 okruhů, které rozšiřují 4 již zmíněné principy. Toto rozdělení využívá již mnoho firem. Jedná se o: [12]

- material extrusion – vytlačování materiálu
- vat photopolymerization – fotopolymerace v nádobě
- material jetting – nastřikování materiálu
- binder jetting – nastřikování pojiva
- powder bed fusion – tavení práškového lože
- directed energy deposition – směrované nanášení materiálu
- sheet lamination – plošné laminování

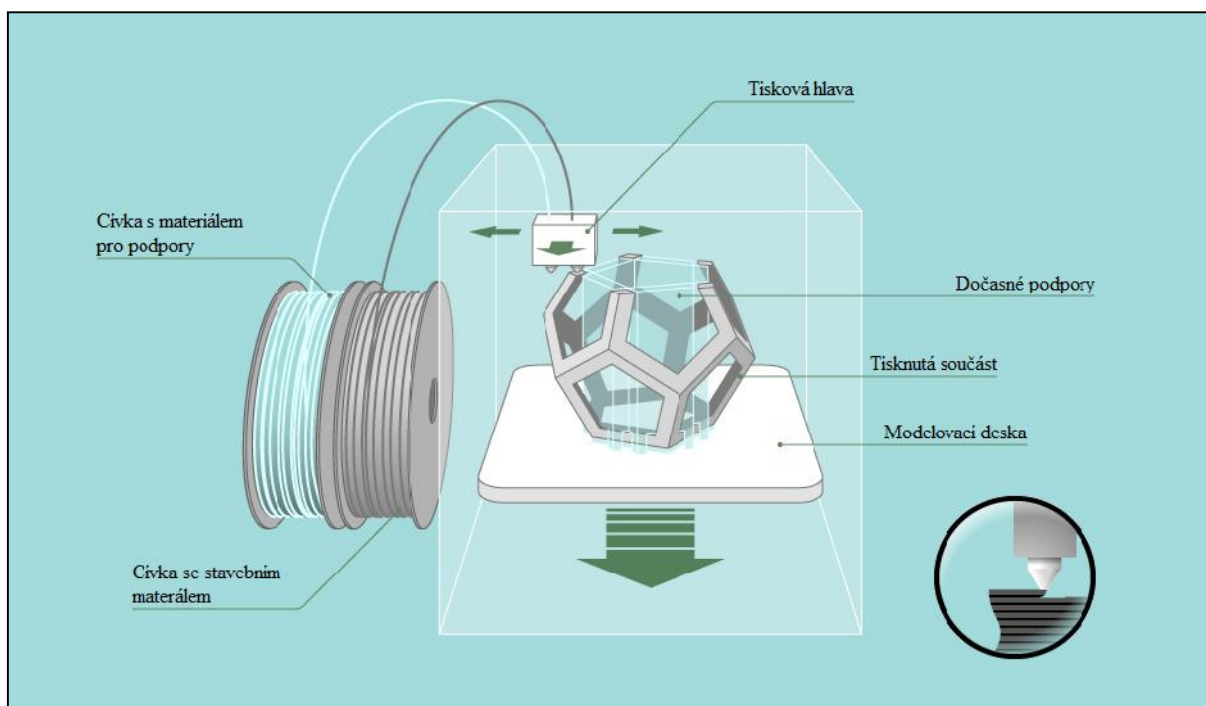
Ne vždy je ale zcela jasné, do které kategorie daná technologie patří, například z důvodu kombinace jednotlivých principů tisku. Také se stále vyvíjejí technologie experimentující s jinou formou polotovaru (např. plyn nebo živé buňky) či vázání materiálu, které nejsou v tomto rozřazení zahrnuty a popsány.

3.2 Vytlačování materiálu – Material extrusion

[1], [10], [12], [18], [26], [32], [40], [42], [58], [65]

První kategorie, material extrusion (ME) neboli vytlačování materiálu označuje všechny 3D tiskové procesy, které vytváří objekt z vrstev vytlačeného polotekutého materiálu. Existuje mnoho různých stavebních materiálů pro tuto metodu. Například to může být beton, keramika, kovy, ovšem nejtypičtější pro tuto metodu jsou plasty v podobě vlákna navinutých na cívce, které mohou být dočasně roztaveny pro výstup tryskou. Nejpoužívanější a charakteristická technologie používající proces vytlačování materiálu se nazývá Fused Deposition Modeling (FDM) a je vyvinuta firmou Stratasys. Zároveň se jedná se o běžně používanou metodu u profesionálních, ale i mnoha levných, domácích a hobby 3D tiskáren.

Princip metody

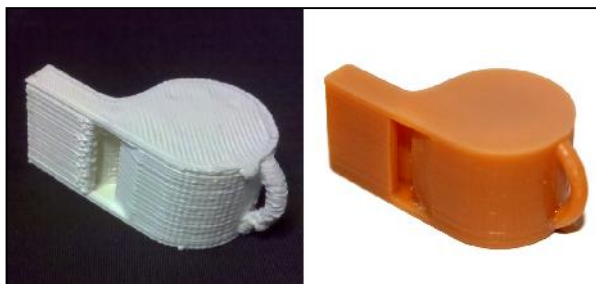


Obr. 21 Schéma technologie vytlačování materiálu [10]

Obrázek 21 ukazuje, jak vytlačování materiálu funguje. Z cívky je odvíjen materiál ve formě vlákna, který se pomalu přivádí do tiskové hlavy, kde je topným tělesem rozežhřáto na teplotu jen o pár stupňů vyšší, než je teplota tavení, následně je za konstantního tlaku a rychlosti vytlačováno přes jemnou trysku, která je obvykle mírně zplošťelá, na plochý vodorovný povrch označený jako nosná nebo modelovací deska nebo platforma. Zde vlákno velmi rychle tuhne. Současně s tiskem součásti se vytváří i dočasné podpory. Možnosti pohybu tiskové hlavy a nosné desky jsou popsány v kap. 2.1. Po vytvoření celé vrstvy se nosná deska sníží o tloušťku vrstvy a další vrstva je okamžitě tištěna na předchozí. Toto se opakuje do vytvoření kompletní součásti. Tento proces má mnoho faktorů, ovlivňující výslednou kvalitu modelu, ale má velký potenciál a tisknuté objekty mají dlouhou životnost, jsou-li tyto faktory kontrolovány. Vytisknutá součást může být po oddělení od podložky a případném odstranění podpor ihned k dispozici pro použití bez nutnosti dalších úprav.

Parametry a technické řešení tiskáren ME

3D tiskárny vytlačující termoplasty jsou již běžně k dispozici. Jejich modely začínají na cenách okolo 12.500Kč, profesionální tiskárny se pohybují okolo 250.000 až 1 250.000Kč. Ty nejlepší tiskárny využívající tuto metodu, někdy se označují jako 3D výrobní systémy, mohou stát až několik desítek miliónů Kč. Tato technologie dokáže poměrně jednoduše tisknout malé, střední, ale i velké komponenty, má ovšem i několik nevýhod a omezení. Zaprvé, v porovnání s ostatními metodami má tato výrazné krokování mezi vrstvami, zejména při tisku zakřivených ploch, viz obr. 22. Stejně jako 2D tiskárny mají i tyto maximální oblast tisku, která určuje největší možný vytisknutelný objekt. Nejmenší osobní tiskárny začínají na velikostech 20×20×20 mm, většina se ale pohybuje okolo 100×100×100 mm. Na druhém konci to může být např. až 914×610×914 mm, tyto tiskárny pak umožňují tisk nejen velkých komponentů, ale i několika menších v jedné tiskové úloze.



Obr. 22 Rozdíl mezi povrchy stejných objektů vytisknutých metodou FDM (vlevo) a SLA (vpravo) [18]

Rychlost tisku se obvykle pohybuje v rozmezí 30-300 mm·s⁻¹, je ale závislá na mnoha parametrech, především na použitém materiálu, podporách, požadované přesnosti a orientaci modelu. Rychlost tisku se zvyšuje i použitím více trysek v jedné tiskové hlavě. To přináší kromě zkrácené doby tisku i možnost nanášet několik různých materiálů současně. Rychlost tisku je závislá i na průměru přiváděného vlákna (obvykle je to 1,75 mm nebo 3 mm). To se přivádí přes tzv. extruder a hot end. Extruder „tahá“ materiál z cívky a přivádí jej do hot endu. Součástí hot endu je topné těleso, které zahřívá materiál (u termoplastu je to 180-290 °C), teplotní čidlo a vytlačovací hrot, kterým je už roztavený materiál přiváděn na modelovací desku. Otvory v trysce mají velikost od 0,2 do 0,8 mm. Čím menší bude tento otvor, tím jemnějšího tisku se bude moci dosáhnout, ale prodlouží se celková doba tisku.

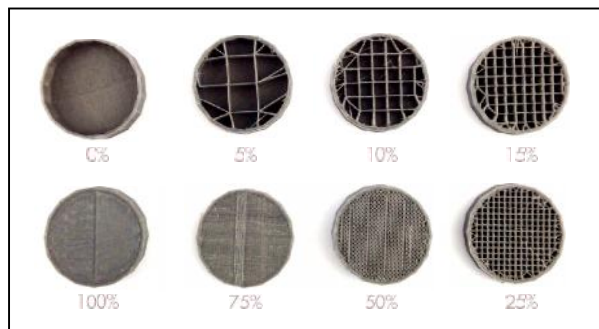
Běžná tloušťka jednotlivých vrstev je určena materiálem a strojem a pohybuje se v rozmezí 0,127-0,33 mm (obvyklé hodnoty jsou 0,127mm, 0,254 mm a 0,33 mm). Tloušťka vrstvy výrazně ovlivňuje kvalitu povrchu součástí, viz obr. 23. Přesnost rozměrů v osách X a Y se liší v závislosti na velikosti dílu, jeho geometrii a orientaci, a především na konkrétním stroji – např. u tiskárny Fortus 360mc od společnosti Stratasys se udává přesnost ±0,127 mm nebo ±0,0015 mm·mm⁻¹ (podle toho, co je větší). S touto přesností se dosahuje poměrně hrubých povrchů, a tak je běžné využití dokončovacích operací. Ne vždy je potřeba využít nejmenších možných vrstev, a tak pro zkrácení doby tisku se volí větší tloušťka vrstvy - při dvojnásobné šířce vrstvy se doba tisku zkrátí na polovinu.



Obr. 23 Ukázka povrchů - výška vrstev: 0,127 mm (vlevo), 0,33 mm (vpravo) [17]

Deformace způsobené chladnutím

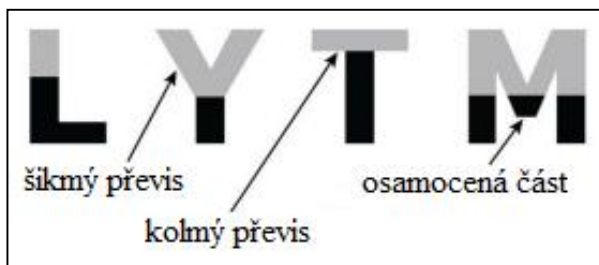
Další nevýhodou, kromě znatelných kroků je, že se součást v průběhu tisku může deformovat, vlnit nebo smršťovat. Tato situace nastává při nerovnoměrném chladnutí materiálu, což může vést k vnitřnímu pnutí v součásti a následné deformaci. K částečné eliminaci tohoto problému se využívá vyhřívaná podložka, která může dosahovat teplot mezi 40-110 °C, a která napomáhá ke kontrole teploty tělesa. Pro další minimalizaci deformace nebo smrštění bývají některé tiskárny vybaveny pracovní komorou, která udržuje teplotu těsně pod teplotou tání. To má za následek, že materiálu je potřeba dodávat velmi málo energie, a zároveň se zabráňuje průvanu. Deformace lze minimalizovat i změnou designu, kdy se například součást nemusí tisknout s plným objemem, ale těleso může být i duté nebo s vnitřní mřížkou, viz obr. 24. To způsobí lepší chladnutí v průběhu tisku, zároveň se sníží celková váha součásti, doba tisku a náklady na tisk. Vnitřní mřížka může mít libovolnou strukturu. Od té se pak odvíjejí mechanické vlastnosti součásti (dobré mechanické vlastnosti má např. šestiboká struktura). Obecně ale platí, že mechanicky namáhané součásti by měly být alespoň ze 75 % plné.



Obr. 24 Výplně součásti 0-100 % [57]

Dočasné podpory

Dalším problémem mohou být dočasné podpory. Tisk podpor ilustrují čtyři písmena L, Y, T, M – viz obr. 25. Písmeno L lze vytisknout bez jakýchkoliv problémů. Písmeno Y má 2 šikmé části, u kterých hrozí odpadávání materiálu u každé následující vrstvy. Obecně se však udává, že šikmou převislou část do 45° lze tisknout bez problémů. To ovšem neplatí u písmene T, kde je převis pod úhlem 90° a přidaný materiál by pravděpodobně odpadával, a písmene M, kde by část tisku probíhala „ve vzduchu“. V těchto případech už je zapotřebí tisk dočasných podpor, které jsou po tisku odstraněny. Tisk podpor je možný dvěma způsoby. Levnějším způsobem je tisk mřížky ze stejného materiálu jako je samotný objekt. Po tisku je tento materiál odstraněn ručně, např. nožem. Poté se oblast začistí např. smirkovým papírem. Druhým způsobem je tisk podpor druhou tryskou, která přivádí jiný materiál, než je použit pro tisk součásti. Po dokončení tisku se podpurný materiál rozpustí v čisticím prostředku na bázi vody. Poté se součást omyje v čisté vodě a osuší. Tímto se dosáhne lepšího povrchu, ale za cenu delší doby tisku.



Obr. 25 Ukázka převislých a osamocených částí [12]

Orientace modelu

Součásti vytvořené jakoukoliv technologií 3D tisku mívají zpravidla mechanické vlastnosti velmi závislé na jejich orientaci, přesněji na orientaci vrstev vůči směru namáhání. Při srovnání stejných součástí s odlišnou orientací vrstev, viz obr. 26, budou naměřeny rozdílné hodnoty. Vyšší pevnost než spoje mají jednotlivé vrstvy a vlákna. To znamená, že u obr. 26 bude při podélném zatížení dosahovat lepších výsledků varianta s podélnými vlákny, naopak nižších hodnot se dosáhne při zatížení kolmo na vlákno. U technologií nevytvářejících vrstvu najednou, ale postupným nanášením jednotlivých vláken může být určení vhodné orientace obtížné.



Obr. 26 Různé směry nanášení vrstev. Vlevo podélný a vpravo příčný. [7]

Stavební materiály

Nejpoužívanějším stavebním materiálem této metody jsou plasty, např., PLA, ABS (z tohoto materiálu je vyráběno např. Lego, cyklistické přilby nebo kryty elektronických zařízení), nylon, PC nebo ABS-PC kompozity. Konkrétně ABS plasty bývají často používány díky své snadné dostupnosti a dobrým strukturním a mechanickým vlastnostem. K výrobě flexibilních, gumě podobných komponentů se používá termoplastický polyuretan (TPU). K dispozici je i materiál nazývaný ABSi, který může být sterilizovaný gama zářením nebo etylenoxidem, pro využití v potravinářském průmyslu nebo ve zdravotnictví. ABSi může být i průhledný, což přináší opět řadu využití, např. u přenášení světla. Materiály PLA se řadí mezi tzv. bioplasty. Jsou vyráběné z biomasy a vypadají jako běžné plasty, mají jim i velmi podobné vlastnosti. Jedním z nových materiálů je tzv. Laywood, jedná se o kompozit složený z dřevěných pilin a polymerního lepidla. Po vytisknutí tento materiál vypadá a voní jako dřevo. Jeho konečná barva je závislá na teplotě tiskové hlavy, která jej taví. Dalším používaným materiálem je Laybrick, což jsou minerální vlákna s kamennou přísadou. Používají se pro hladkou i hrubou strukturu povrchu, což závisí opět na teplotě tiskové hlavy. Další populární materiál pro design je bronzeFill – směs termoplastů a bronzového prášku.

Plastové komponenty, vytisknuté touto metodou mohou dosahovat podobných vlastností jako stejné díly vyrobeny vstřikováním plastů. Při výrobní sérii až do 5000 kusů se vyplatí vyrobit je touto metodou 3D tisku, než platit za formy, kterými by se vyrábělo tradičním vstřikováním.

Název materiálu	PLA	ABS	PC
Hustota (tuhá fáze)	1250 kg·m ⁻³		
Mez pevnosti v tahu	50 MPa	36 MPa	68 MPa
Mez pevnosti v ohybu	80 MPa	61 MPa	104 MPa
Modul pružnosti v tahu	4000 MPa	2300 MPa	2200 MPa
Tažnost	6 %	4 %	5 %

Tab. 1 Příklady materiálových vlastností ABS, PC a PLA [8], [32], [51]

Pro zvýšení pevnosti součásti byly vyvinuty tiskárny, které se do stavebního materiálu současně přivádí např. uhlíkové vlákno, sklolaminát nebo kevlar. Taková tiskárna musí obsahovat alespoň 2 tiskové hlavy a 2 cívky s materiálem. Jednu soustavu pro nanášení polymeru (např. PLA nebo ABS), druhou pro přívod např. uhlíkového vlákna (uhlíkové vlákno je 20× tužší než ABS plast). Nejvyšší dosažená přesnost jedné vrstvy je u těchto materiálů 0,2 mm.

Tyto kompozity jsou lehčí, pevnější, s větší odolností proti ohybu, a jsou využívány především v automobilovém a leteckém průmyslu. Jedna z technologií, která toto umožňuje, se nazývá composite filament fabrication (CFF).

Další možností zvýšení pevnosti je mísení práškového materiálu s pojivem, toho využívá technologie multiphase jet solidification (MJS). Jako pojivo může být použit např. termoplast nebo vosk. Obvyklý poměr je 60 % prášku a 40 % pojiva. Během počáteční fáze je směs zahřátá pro dosažení určité viskozity a tiskovou hlavou nanášena na požadovaná místa. Po vytisknutí objektu se pojivo tepelně nebo chemicky odstraní a zbylý materiál se pro vytvrzení umístí do pece s teplotou přes 1000 °C.

Metodou vytlačování lze zpracovávat materiály, které neumožňují používat žádné jiné technologie 3D tisku. Ve stavebnictví se pro stavbu domů využívají například tiskárny zpracovávající beton, který je při správné viskozitě vhodným materiálem pro 3D tisk. Společnost Winsun vyvinula stroj s rozměry 10×32×6,6 m využívající rychle schnoucí cement a stavební odpad (sutě a recyklovaný stavební materiál). Tento stroj dokázal vytisknout běžně velký dům za 24 hodin, s výrobními náklady cca 120 000 Kč. Tyto technologie mají využití i v chudých oblastech nebo oblastech zasažených přírodní katastrofou ke stavbě domů z jílu, hlíny a pryskyřice z místních zdrojů.



Obr. 27 Pohled na povrch vytisklé betonové zdi [56]

I v potravinářství se využívá technologií 3D tisku a metody vytlačování. Mezi použitelné materiály se řadí sýr, čokoláda, med, krémy, polevy, paštiky, zmrzlina apod. Jedná se ale pouze o dekorativní záležitosti.

Výhody:

- jednoduchý mechanismus
- nízké pořizovací a provozní náklady
- široké spektrum materiálů
- velké množství dokončovacích operací
- snadná výměna komponentů
- rychlý tisk
- možnost tisku dutých předmětů
- nejčastěji využívaná metoda pro open source design

Nevýhody:

- výrazné krokování mezi vrstvami
- z důvodu zaoblení trysky není možné pouhým tiskem dosáhnout ostrých hran
- nutnost udržovat stálý tlak
- přesnost tisku je ve srovnání s ostatními technologiemi nižší
- možné deformace a smršťování během tisku (nutnost vyhřívání)
- občasné ucpávání trysky (snadné čištění)

Aplikace:

- výroba forem a modelů pro slévárenství
- prototypy
- prezentační modely
- dekorativní předměty
- časté využití pro domácí tiskárny

Dalšími nezmíněnými technologiemi jsou např.:

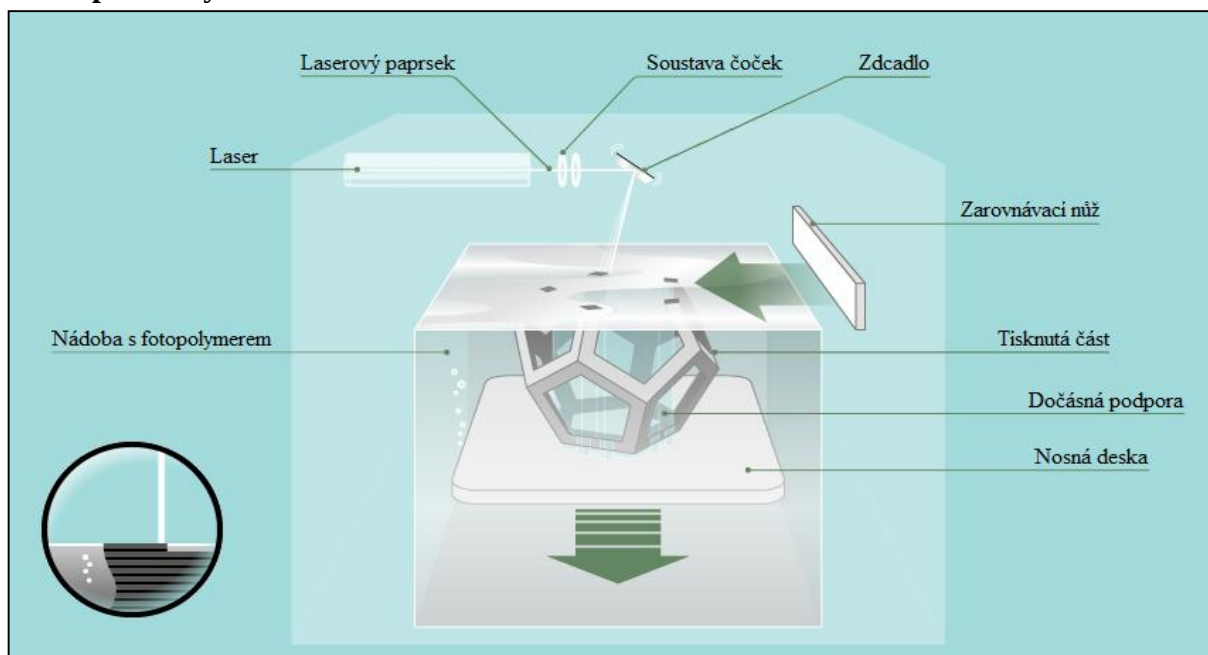
- plastic jet printing (PJP)
- fused filament modelling (FFM)
- fused layer modeling/manufacturing (FLM)
- melted and extruded modelling (MEM)
- fused filament fabrication (FFF)
- fused deposition method (i tato metoda nese zkratku FDM)

3.3 Fotopolymerizace v nádobě – Vat photopolymerization

[1], [3], [9], [12], [20], [39], [40], [60], [62]

Zatímco většina spotřebitelů 3D tiskáren využívá metodu vytlačování, mnoho průmyslových 3D tiskáren využívá přesnější, ale dražší procesy, které vzájemně vážou různé prášky, kapaliny nebo listy papíru. Jedním z nich je vat photopolymerization (VP) neboli fotopolymerace v nádobě, která využívá jako polotovar fotocitlivou polymerní pryskyřici zvanou fotopolymer. Ten je vytvrzován světelným paprskem o určité vlnové délce. Tento materiál byl objeven Charlesem Hallem již už v roce 1984. Dva roky poté vyvinul a patentoval technologii stereolitografie (SLA), která je považována za průkopníka v oblasti 3D tiskáren.

Princip metody



Obr. 28 Schéma technologie stereolitografie [10]

Nejznámější technologií fotopolymerace je již zmíněná SLA. Její princip spočívá v řízeném tuhnutí pryskyřice. Nosná deska, na které je objekt vytvářen, je před tvořením první vrstvy umístěna těsně pod hladinu polotovaru tak, aby byla celá zalita polymerem. Za použití počítačem řízeného laserového paprsku nebo světelného projektoru se osvětluje povrch pryskyřice. V důsledku toho pryskyřice do definované hloubky tuhne. Po fotopolymeraci první vrstvy se plošina ponoří a ztuhlá část je zalita novou vrstvou tekutého polotovaru. Před tiskem jednotlivých vrstev zarovnávací nůž hladinu pryskyřice, tak aby bylo dosaženo požadované tloušťky vrstvy. Vzhledem k tomu, že hloubka vytvrzování je o něco větší, než je výška nové vrstvy, je předchozí vrstva vytvrzována i v tomto kroku, tím je zajištěna dobrá přilnavost mezi vrstvami (tzn., že každá vrstva je vytvrzována dvakrát). Tento proces vytvrzení průřezu, vyhlazení vrstvy a ponoření desky se opakuje, dokud není součástí kompletní. Po dokončení tisku se součást vytáhne z kádě a opláchne se od přebytečného nevytvrzeného polymeru. Vytisknutý model není ještě kompletně vytvrzený a pro zlepšení mechanických vlastností se umísťuje do UV pece. Po konečném vytvrzení se odstraní podpora a pro zlepšení kvality povrchu může být použita řada dokončovacích úprav, např. broušení, leštění, lakování, pískování apod. SLA je výhodná především pro tisk menších objektů s vysokým rozlišením. Může jít o oblasti designu, zlatnictví, modelářství, ale také architektury nebo strojírenství.

Technické řešení

Stereolitografická tiskárna se skládá ze 3 hlavních částí:

- z pracovní komory
- řídicí jednotky
- opticko-laserového systému

Největší součástí pracovní komory je nádoba – pracovní vana, ve které je objekt vytvářen. Do ní je před tiskem umístěn polotovar – epoxidová pryskyřice, neboli fotopolymer. Dále se v komoře nachází nosná deska, přes kterou se udává posuv ve směru Z a zarovnávací nůž. Počítač je součástí řídicího systému a ovládá všechny funkce stroje, od nastavení parametrů laseru až po řízení procesu výroby. Poslední částí je opticko-laserový systém, který je složen plynovým nebo pevnolátkovým laserem (rozdíl plyného a pevnolátkového laseru je v použití aktivním prostředí.), soustavou čoček a zrcadel.

Osvětlování fotopolymeru může probíhat jak seshora, tak zespod, viz kap. 2.2. V současnosti je ale používanější varianta osvětlování zespod. Osvětlování seshora má totiž nevýhodu v tom, že výška hladiny polymeru musí být neměnná a větší než výška tisknutého tělesa. To znamená, že se v nádobě musí nacházet velké množství materiálu, který nebude při tisku využit.

Nejčastějším zdrojem světla bývá laser nebo DLP projektor, který bývá častěji umístěn pod nádobou s polotovarem. Příklady technologií využívající DLP projektor: digital light processing (DLP) a digital micromirror devices (DMDs).

VP umožňuje i osvětlovat celou plochu najednou a to tak, že světelný paprsek prochází skrz masku, která má negativní tvar požadovaného průřezu. Použití takových masek zrychluje dobu tisku (obvykle trvá tisk 1 vrstvy 10 sekund). Tato technologie nese označení solid ground curing (SGC).



Obr. 29 Výtisk metodou SLA – ukázka podpor [20]

Dočasné podpory

Dočasné podpory jsou u této metody obvykle řešeny pomocí tenkých trnů, viz obr. 29, které lze po tisku snadno odstranit a jejich „pozůstatky“ zabrousit.

Parametry tiskáren VP

Technologie fotopolymerizace patří k nejpřesnějším technologiím 3D tisku a oproti jiným technologiím umožňují tisknout modely s milimetrovými otvory a miniaturními prvky. Lze tedy vyrábět velice přesné a detailní součásti. Výsledkem bývá plastový model s dobrou kvalitou povrchu, a díky této vlastnosti se v oblasti strojírenství často využívají pro výrobu forem a jader pro odlévání a vstřikování. Díky velké přesnosti mají uplatnění i při kontrole tvaru a smontovatelnosti. Jejich teoretická přesnost a kvalita modelu je závislá na:

- hustotě polymeru
- šířce paprsku
- délce a intenzitě ozařování

Objekty SLA mají na rozdíl od předmětů vytvořených vytlačováním materiálu velmi hladký povrch, viz obr. 22 (str. 28). Největší SLA tiskárny umožňují tisknout až do velikosti 1500×750×550 mm, do hmotnosti 150 kg jednoho dílu. Konkrétně se jedná o tiskárnu 3D Systems ProX 950, která také dosahuje přesností 0,025 mm v osách X a Y a rozlišení laseru 0,00127 mm. Minimální tloušťka vrstvy je 0,05 mm a nejmenší možný bod je 0,4 mm. Ovšem cena této tiskárny je necelých cca 1 milion dolarů a tisk součásti, která by využila celou kapacitu, by mohl trvat až 2 dny. Tiskárny využívající tuto technologii již pár let existují i v nižší cenové relaci. Tyto tiskárny stojí "pouze" několik tisíc dolarů a umožňují tisk max. do velikosti několika desítek centimetrů, obvyklá tloušťka vrstvy se pohybuje v rozmezí 0,025-0,15 mm a přesnost bývá obvykle $\pm 0,025$ -0,1 mm nebo $\pm 0,002$ mm·mm⁻¹ (podle toho, co je větší). Taková přesnost má podstatný vliv na kvalitu povrchu a je to i značná výhoda při tvorbě malých otvorů a detailních prvků. Ovšem materiály pro tyto technologie jsou stále poměrně drahé a stojí od 1.500Kč za 1 litr pryskyřice. Maximální vertikální rychlost tisku (v ose Z) těchto tiskáren je v rozmezí od 12 do 68 mm·hod⁻¹ (většinou okolo 25 mm·hod⁻¹).

Stavební materiály

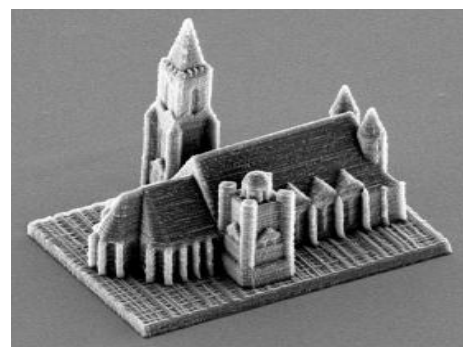
Zpočátku tisk SLA umožňoval používat pouze materiály, které byly po vytvrzení velmi křehké, a měli krátkou životnost. Tyto objekty byly používány především jako modely pro tvorbu forem nebo jako vizualizační model. Dnes už je paleta materiálů daleko větší a patří do ní např. náhražky ABS a jiných termoplastů, plastů zpomalující hoření, odolných proti slané vodě, průhledné pryskyřice a speciální fotopolymery pro zubní lékařství a šperkařství. Materiály mohou být po vytvrzení tvrdé, křehké nebo pružné (materiály simulující vlastnosti gumy). Dalším materiálem je fotopolymerní pryskyřice obsahující keramické částice. S tímto pracuje technologie podobná DLP, která nese označení lithography-based ceramic manufacturing (LCM). I přes širokou paletu materiálů je tento princip vhodný zejména pro tvorbu předvýrobních modelů, ale díky jejich vývoji se začíná používat i pro tvorbu finálních produktů.

Název materiálu	VisiJet SL Flex	VisiJet SL HiTemp	ABS+
Hustota (tuhá fáze)	1190 kg·m ⁻³	1230 kg·m ⁻³	1040 kg·m ⁻³
Mez pevnosti v tahu	38 MPa	66 MPa	37 MPa
Mez pevnosti v ohybu	57 MPa	112 MPa	53 MPa
Modul pružnosti v tahu	1620 MPa	3390 MPa	2320 MPa
Tažnost	16 %	6 %	3 %

Tab. 2 Příklady materiálů pro SLA stroje ve srovnání s běžným ABS+ [3]

Dvoufotonová polymerace

Další významnou technologií je dvoufotonová polymerace (2PP). Jedná se o nanofotonickou metodu 3D tisku, která je velmi podobná SLA, a která má velký potenciál do budoucna v oblastech výroby konečných produktů. 2PP využívá femtosekundového pulzního laseru neboli femtolaseru k vytváření pryskyřice. Touto metodou lze dosáhnout tloušťky tisku mezi 100-200 nm a dosahuje přesností 0,0001 mm ve všech osách, je tedy až 250× přesnější než konvenční SLA stroje. Technologie 2PP je vhodná pro tisk velmi malých objektů a nanostruktur, např. mikroelektronické obvody, ale i pro výrobu větších součástí; ve zdravotnictví to



Obr. 30 Výtisk technologií 2PP. Délka objektu je 0,1 mm. [12]

mohou být implantáty se speciální strukturou povrchu, usnadňující srůstání s živou tkání. Tisk je možný díky speciální pryskyřici, která je vytvrzena pouze při kontaktu se dvěma fotony. Tato situace nastává pouze v přesném středu laseru. Tyto tiskárny bývají vybaveny vysokorychlostním systémem, který udržuje zrcadla v neustálém pohybu, a tím je snížena doba při zrychlování a zpomalování během polohování laserového paprsku.

Výhody:

- hladký povrch
- možnost složité geometrie
- vysoká přesnost
- široká škála materiálů a post procesních možností

Nevýhody:

- pomalý proces tvrzení materiálu
- malá tepelná odolnost vzniklého modelu
- některé tekuté pryskyřice mohou být toxické
- ztráta mechanických vlastností vlivem působení slunce
- nemožnost tisku uzavřených dutin (materiál zůstane po tisku uzavřen)

Aplikace:

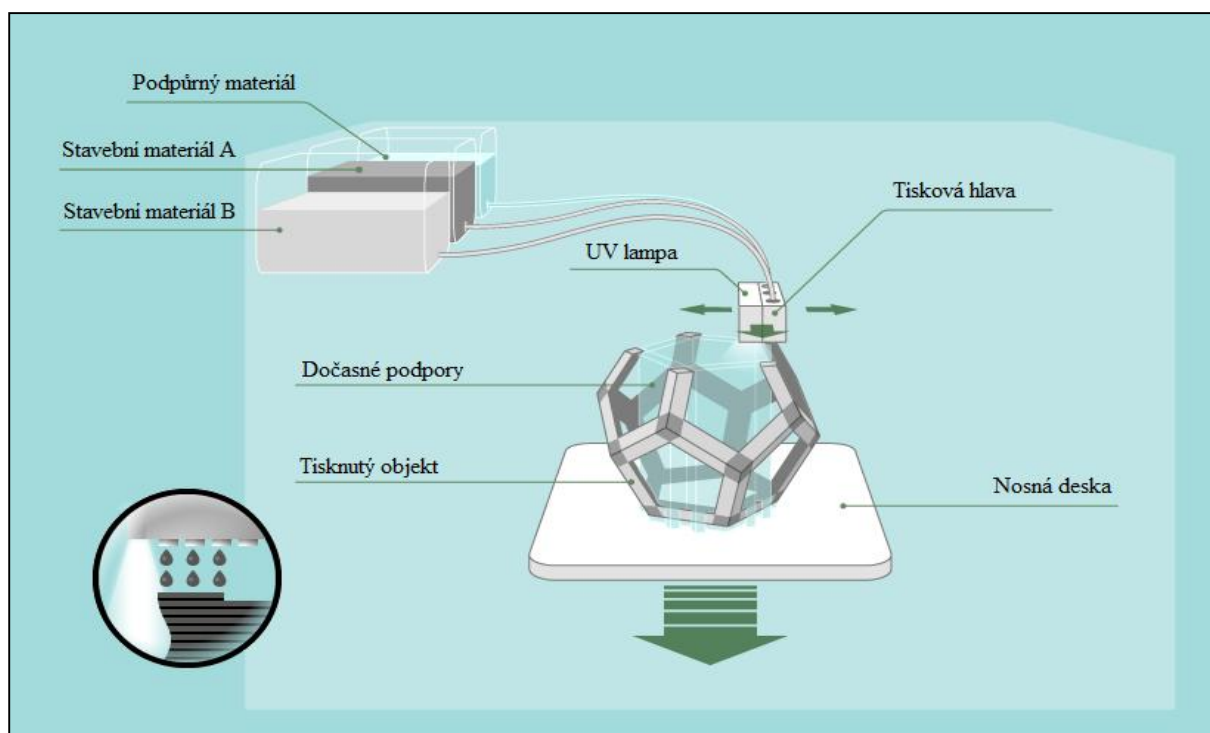
- návrh vzhledu modelu
- výroba prototypů
- ověření koncepce prototypu
- testování aerodynamiky modelu
- návrh slévárenských modelů
- formy pro vstřikování a lití
- výroba integrovaných obvodů

3.4 Nastříkování materiálu – Material jetting

[3], [10], [12], [36], [40], [58]

Material jetting (MJ) neboli nastříkování materiálu vytváří objekty podobně jako u klasických inkoustových tiskáren. Princip je také podobný jako u vytlačování materiálu, s hlavním rozdílem, že se materiál udržuje v kapalném stavu uvnitř zařízení ještě předtím, než je dávkován. Tyto stroje existují ve dvou základních variantách, první využívají tiskové hlavy k nástřiku roztaveného materiálu, který po nanesení chladne a tuhne. Při této metodě se využívá nejčastěji vosk. Druhá varianta používá fotopolymery, které jsou ihned po nanesení vytvrzovány UV lampou.

Princip metody

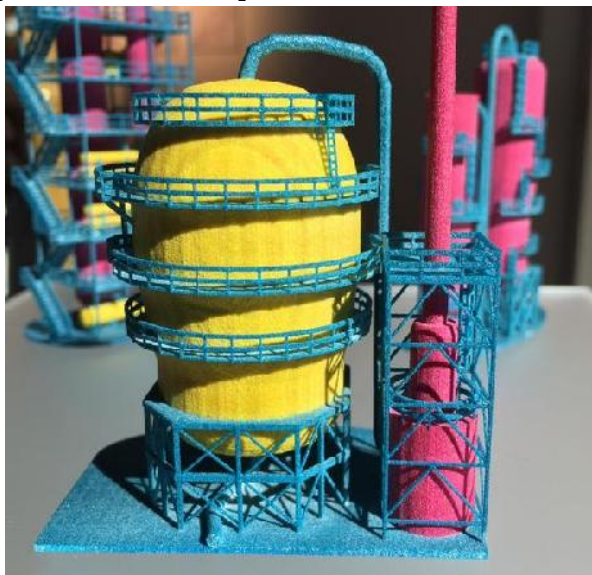


Obr. 31 Schéma technologie nastříkování materiálu [10]

Na obrázku 31 lze vidět schéma, znázorňující nastříkování materiálu. Celý proces tisku lze shrnout do 5 kroků. Zprv je tisková hlava umístěna nad stavební deskou. Poté se na požadovaná místa začne nanášet materiál jak pro samotnou součást, tak i pro stavbu podpor. Materiál ztuhne vychladnutím nebo vytvrzením UV lampou (ta je součástí tiskové hlavy), takto se vytvoří celá vrstva a poté se nosná deska sníží o tloušťku vrstvy. Další vrstvy jsou tvořeny na předchozí a proces se opakuje až do vytvoření celého objektu. Po dokončení tisku se odstraní dočasné podpory, a podle použitého stavebního materiálu lze použít i některé z dokončovacích úprav. Obě tyto metody vyžadují tisk dočasných podpor, které obvykle bývají tvořeny jiným materiálem, než je tisknutý objekt. K tomu je zapotřebí alespoň dvou trysek v tiskové hlavě.

Technické řešení

Nejtypičtějsími technologiemi MJ jsou inkjet, polyjet a multi-jet printing (MJP). Všechny tyto technologie pracují s fotopolymery i vosky a hlavní rozdíl spočívá v tiskové hlavě. Tisková hlava u inkjet tiskáren obsahuje „pouze“ 2 trysky, z toho 1 slouží pro nanášení stavebního materiálu a druhá pro nanášení vosku, sloužícího jako podpůrný materiál (tisk podpor probíhá současně s nanášením stavebního materiálu). Zatímco tisková hlava u polyjet a MJP jich může obsahovat až několik stovek, což rapidně snižuje dobu tisku a umožňuje tisk vícemateriálových soustav vytisknutých v jednom tiskovém procesu, viz obr. 32. Tohoto lze také využít pro tisk tzv. gradientních materiálů¹. Trysky jsou uspořádány rovnoběžně vedle sebe, to zaručuje rychlé a rovnoměrné nanášení materiálu. Tisková hlava se pohybuje nad platformou primárně ve směru osy X. Pokud je součást větší než tisková hlava, posouvá se i ve směru osy Y tak, aby byla tvořena celá součást. O posuv v ose Z se obvykle stará nosná deska. Průtok nanášeného materiálu je řízen pro každou trysku samostatně.



Obr. 32 Vícebarevná součást vytisknutá v jednom tiskovém procesu [19]

Stavební materiál

Pro tyto technologie lze použít široká škála pevných, pružných, průhledných a neprůhledných materiálů všech barev. A díky použití více trysek s různým materiálem lze tisknout i tzv. plastové „slitiny“, které napodobují vlastnosti např. ABS plastů, polypropylenu, polykarbonátu nebo gumy. V současnosti dokážou ty nejlepší tiskárny tisknout až ze 14 různých materiálů najednou. Velmi často je využíván voskový materiál, a to pro tvorbu slévárenských modelů pro stomatologii a šperkařství.

Název materiálu	RWT-FBK 100	RWT-FBK 600	RCL-RWT 100	VeroWhitePlus
Popis	velmi tuhý	pružný	podobný ABS	
Mez pevnosti v tahu	36 MPa	2,8 MPa	56 MPa	55 MPa
Mez pevnosti v ohybu	57 MPa	1,3 MPa	74 MPa	75 MPa
Modul pružnosti v tahu	1960 MPa	14,5 MPa	2500 MPa	2200 MPa
Tažnost	10 %	34 %	8,1 %	10-25 %

Tab. 3 Příklady materiálových vlastností používaných pro MJ [3], [58]

¹ Některými 3D technologiemi lze vyrábět i takzvané gradientní materiály. To jsou materiály, u kterých se v určitém směru vyvíjí či se mění jeho vlastnosti. Tohoto lze dosáhnout mísením různých polotovarů, které se liší např. v chemickém složení či zrnitosti. Takto lze např. vytvořit bronzovou formu, jejíž složení se směrem dovnitř mění na ocel (výhoda pak spočívá v omezení problémů s rozdílnou tepelnou roztažností u forem s ostrým přechodem mezi materiály, zároveň se ale udrží vlastnosti jako otěruvzdornost a dobrý odvod tepla). [12]

Parametry tiskáren MJ

Největší tisknutelný objem umožňuje tiskárna společnosti Stratasys Objet1000, a to 1000x800x500 mm s přesností $\pm 0,025$ mm a minimální tloušťkou stěny 0,016 mm. U těchto technologií lze dosáhnout minimální tloušťky vrstvy 0,0127 mm. Pro dosažení vyšších kvalit může být rovina válcována nebo může být v průběhu tisku ořezáván přebytečný materiál z horní vrstvy. Tím se dosáhne téměř dokonale rovné plochy, ale výrazně se prodlouží doba tisku. Rychlost tisku je velmi závislá na konkrétním stroji a počtu použitých trysek, např. tiskárna ProJet 860Pro s 5 tryskami dosahuje vertikální rychlosti tisku 5-15 mm·hod⁻¹. Tyto technologie jsou vhodné i pro malosériovou výrobu, až do několika set kusů.

Printoptical

Trochu odlišnou technologií MJ je Printoptical, ta je využita především pro tisk funkčních optických komponentů, které mohou být nevyrobitelné jinými způsoby. Princip spočívá ve vytvrzování kapky fotopolymeru, zatímco je vytlačovaná z tiskové hlavy. Tímto se dá dosáhnout velmi přesné a rychlé výroby, s tak hladkým povrchem, že nevyžaduje ani žádné leštění. Například firma LUXeXcel toto využívá na výrobu čoček do osvětlovacích systémů.

Výhody:

- hladký povrch
- vysoká přesnost
- minimální odpad
- snadné odstranění podpor (rozpuštění vosku)
- možnost tisku gradientních materiálů

Nevýhody:

- dlouhá doba tisku při využití pouze 2 trysek (např. inkjet technologie)
- z uzavřených dutin nelze odstranit podpory
- vysoká přesnost je omezena výběrem materiálu

Aplikace:

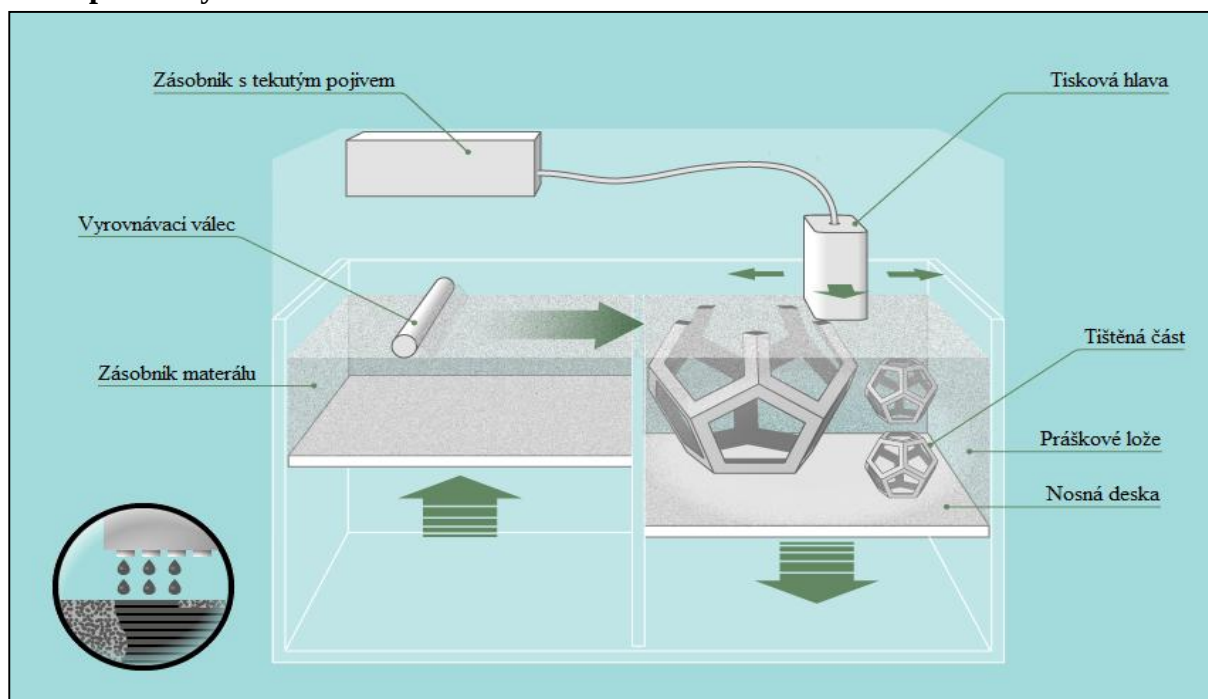
- výroba prototypů
- výroba modelů pro tvorbu forem pro vstřikování a lití
- výroba čoček (technologií Printoptical)

3.5 Nastřikování pojiva – Binder jetting

[1], [10], [12], [24], [40], [68], [66]

Další možností 3D tisku je spojování materiálů ve formě prášku. První z nich binder jetting (BJ) neboli proces nastřikování pojiva. BJ využívá vždy alespoň dvou materiálů. Jedním z nich je práškový stavební materiál a druhým je pojivo, které je obvykle v kapalně formě. Tento způsob se také označuje jako drop-on-powder nebo inkjet powder printing a byl vyvinut již v roce 1993 na univerzitě MIT (Massachusettský technologický institut). BJ dokáže tisknout z téměř z jakéhokoliv materiálu, který je ve formě prášku, používají se např. polymery, kovy, keramika, sklo nebo písek.

Princip metody



Obr. 33 Schéma metody binder jetting [10]

Tisková hlava nanáší tekuté pojivo na tenké vrstvy prášku. Tím lepí částice dohromady, a tak vytváří těleso vrstvu po vrstvě. Stroje BJ nanáší práškový materiál na stavební desku. Poté tisková hlava nanese pojivo, čímž spojí částice dohromady. Nosná deska se sníží a pokračuje se opět nanášením další vrstvy materiálu. Opakováním tohoto procesu se v práškovém loži vytvoří vytisknutá součást. Ta se po jejím vytažení očistí od zbytků práškového materiálu. BJ nevyžaduje žádné podpurné struktury, protože tisknutá část leží pevně v práškovém loži. Takto lze tisknout i několik objektů vedle sebe či nad sebou.

Technické řešení

Proces začíná nanesením materiálu přes celou platformu, to se nazývá práškové lože. Toho se dosáhne vysunutím pístu práškového zásobníku, a pomocí vyrovnávacího válce je prášek nahnut přes platformu. Materiál může být i přisypán násypkou a následně zarovnán válcem (to se obvykle používá u větších strojů, např. u stroje na obr. 34). Tisková hlava s jednou nebo několika tryskami poté „cestuje“ nad povrchem v osách X a Y a selektivně nanáší pojivý roztok tak, aby se vytvořil požadovaný průřez. Některé z tiskáren mají vysoký počet trysek, které jsou uspořádány vedle sebe, tak mohou pokrýt celou šířku platformy, viz obr. 34 – tisková hlava se pak pohybuje pouze v jedné ose. Poté je buď snížena platforma (u menších strojů), nebo se zvýší mechanismus s tiskovou hlavou (u větších strojů, viz obr. 34) a celý proces se opakuje až do vytvoření konečného dílu. Vyhřívání pracovní komora může zkrátit dobu tisku snížením viskozity pojiva. Pro vytvoření plnobarevných dílů může být stroj vybaven druhou tiskovou hlavou, která pak na potřebná místa nanáší barvu. Po dokončení tisku se kolem součásti odsaje okolní nevyužitý materiál, který je opětovně používán.



Obr. 34 Stroj VX4000 [67]

Po vyjmutí z platformy se součást očistí stlačeným vzduchem v podtlakové komoře, která vysaje všechny zbylý nevyužitý materiál. Takto nevzniká téměř žádný odpad. Jelikož je práškový materiál poměrně drahý, tak téměř nulový odpad je velkou výhodou. Hlavní nevýhody BJ jsou špatné mechanické vlastnosti, což je způsobeno hlavně způsobem vázání materiálu. Výhodou je pak tisk plnobarevných a objemných součástí. To je využíváno především ve strojírenství a architektuře. Tato technologie je také obvykle rychlejší než jiné a cena takto vytisknutých součástí je poměrně nízká.

Některé materiály, třeba písek, nevyžadují po tisku žádné další zpracování. Většina materiálů je po tisku ale velmi křehká a lámavá, proto vyžadují následné vytvrzování nebo sintrování. Podle aplikace se může objekt infiltrovat jiným materiálem, to zlepší mechanické vlastnosti, odolnost a kvalitu povrchu. Infiltrace obsahuje postřík nebo povlakování chemickou látkou, která vyplní mikroskopické vzduchové kapsy a uzavře povrch tělesa. Vhodně infiltrované objekty lze pak např. natírat, brousit nebo vrtat. Pro dosažení vysoké hustoty u kovových materiálů se používá i izostatické lisování za tepla, což je forma tepelného zpracování, využívající vysokého tlaku a teploty ke zlepšení vlastností materiálu [34]. Tato metoda umožňuje velké množství dokončovacích operací, včetně pozlacení, proto je také oblíbená mezi umělci a výrobci šperků. Většina předmětů je pro dosažení hladkých povrchů následně leštěna.

Tisk podpor

Podpurné struktury jsou zde ojedinělé, protože každá nová vrstva je podepírána předchozí vrstvou a okolním neslepeným materiálem.

Parametry tiskáren BJ

Velikosti tisknutelných objemů se pohybují okolo 200x250x200 mm, ty největší tiskárny, např. od společnosti voxeljet, jsou schopny tisknout až do velikosti 4x2x1 m. Maximální objem tisku z kovu je v současnosti 800x500x400 mm. Vertikální rychlost tisku je obvykle v rozmezí 10-40 mm·hod⁻¹ a tloušťka vrstvy 0,08-0,3 mm.

Stavební materiály

Jak již bylo řečeno, BJ umožňuje používat celou řadu materiálů, jedním z nich je speciální písek pro tisk slévárenských forem. Hlavní výhodou této technologie je absence jakéhokoliv modelu. Také to umožňuje tisk velkých forem bez nutnosti jejího dělení. To ve slévárenství, které je jedno z nejstarších výrobních odvětví, může ušetřit soustavu času i financí. Občas je výroba forem spojována s označením 3D sandcasting, ale toto označení kromě tisku formy zahrnuje i její vylití tenkou vrstvou lepidla a následné odlití materiálu.



Obr. 35 a obr. 36 Ukázka vytištěné pískové formy metodou binder jetting [23]

Dalším materiálem jsou kovy, především bronz, železné a nerezové oceli nebo slitiny na bázi niklu, zvané Inconel. Při tisku kovových předmětů se dosahuje velice porézních struktur. Přibližně 60 % kovu a 40 % vzduchu, proto se součást umísťuje na 24 hodin do pece, kde se infiltuje bronzovým práškem, který se zkapalní a nahradí volná místa ve struktuře, kde následně ztuhne. Tímto lze dosáhnout téměř 100 % plného materiálu. BJ nabízí levnou variantu 3D tisku z kovu. Součásti vyrobené z Inconelu se používají např. pro výrobu high-endových průmyslových komponentů, pro výrobu turbín nebo v leteckém průmyslu. Také lze používat keramické materiály, které se speciálním pojivem vytváří keramické objekty. Výsledkem bývá vysoce teple odolný materiál. I skelný prach může být využit. Lze vyrábět černé nebo bílé sklo, které je ale porézní a křehké a je zatím využíváno jen pro výrobu soch a dekorativních předmětů.

Výhody:

- díly mohou být vyrobeny v různých barevných kombinacích
- široké spektrum materiálů
- tento proces je obecně rychlejší než ostatní

Nevýhody:

- metoda není nejvhodnější pro konstrukční díly
- vysoká cena práškového materiálu

Aplikace:

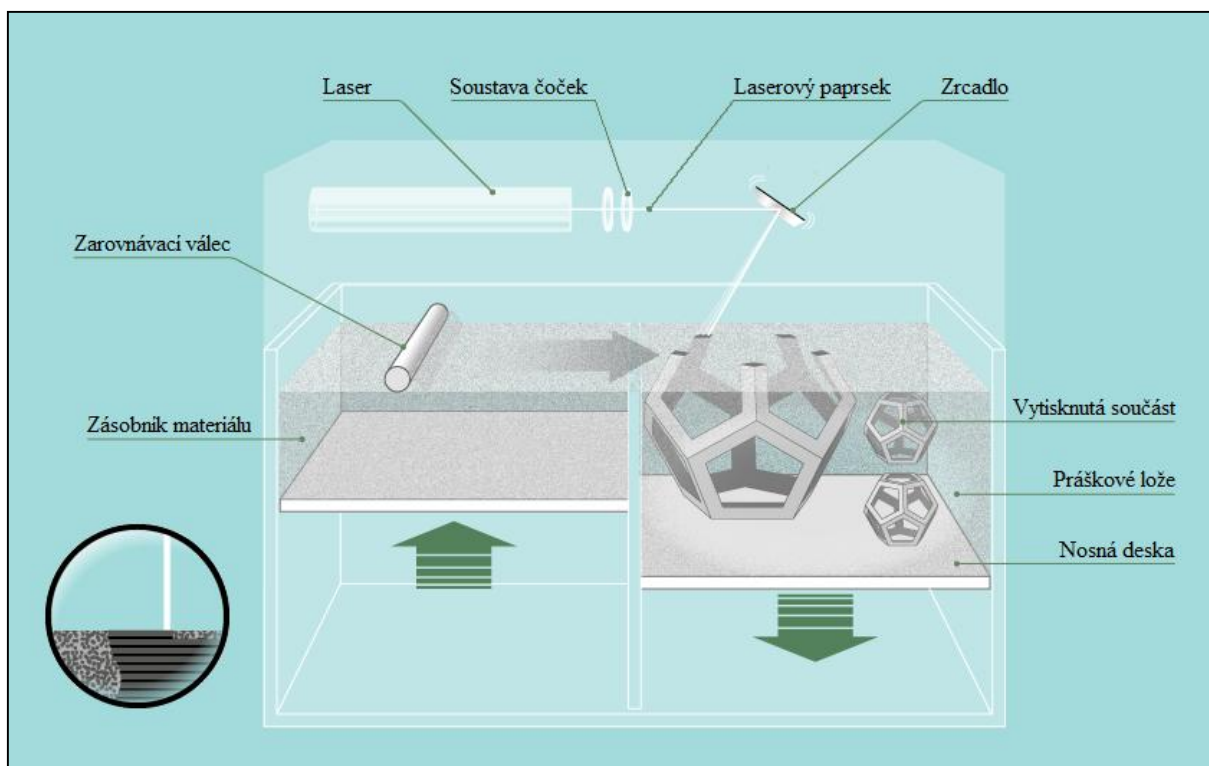
- prototypy
- odlévací formy ze slévárenského písku
- výroba modelů a jader pro odlévací a vstřikovací formy
- architektura a design

3.6 Tisk v práškovém loži – Powder bed fusion

[1], [3], [12], [30], [40], [43], [46]

Technologie powder bed fusion (PBF), neboli tisk v práškovém loži, je podobná technologii tryskání pojiva, ale namísto selektivního nanášení pojiva se využívá selektivního použití tepla k částečnému nebo úplnému tavení práškových zrn. PBF využívá širokého spektra materiálů, např. hliník, karbon, bronz, inconel, kobalt, chrom, titan, ocel, nerezová ocel, guma, nylon, ABS, PC, PP, polyamid, polystyren, kompozitní materiály nebo keramické materiály. První z technologií PBF byla direct metal laser sintering (DMLS) a byla vyvinuta již v 90. letech společností EOS.

Princip metody



Obr. 37 Schéma selektivního spékání materiálu v práškovém loži [10]

Powder Bed Fusion používá při své činnosti (ke spékání práškového materiálu) laserový nebo elektronový paprsek. Nejrozšířenější technologií PBF je selective laser sintering (SLS) neboli spékání laserovým paprskem. Jedná se o velmi podobný proces jako u SLA, s tím rozdílem, že namísto fotopolymerní pryskyřice se využívá práškových materiálů, které jsou spékány dohromady. Pod pojmem SLS lze nalézt 2 trochu odlišné metody, které jsou často řazeny pod jeden název. Jedná se o laserové selektivní spékání (SLS) a selektivní tání (SLM). Hlavní rozdíl mezi těmito metodami je, že v prvním případě se materiál taví pouze částečně, ale při SLM dochází k úplnému tavení. Výraz laserový v názvu napovídá, že proces využívá výkonné lasery pro zpracování materiálu, kterým bývá plastový, kovový nebo keramický prášek.

Technické řešení

PBF stroje se skládají ze tří složek, jsou to: zdroj tepla pro fixaci materiálu, způsob pro řízení tohoto zdroje tepla a mechanismus k přidávání nových vrstev materiálu na předchozí. Tiskový proces začíná přísunem materiálu, o který se stará píst pod zásobníkem materiálu a vyrovnávací protiběžný válec nebo nůž, který materiál nahrne, a zároveň vyrovná na nosnou desku. Zásobník může být nahrazen násypkou, která se pak pro přisypání materiálu pohybuje nad nosnou deskou. Daný průřez je pak do materiálu selektivně vykreslen za pomoci laserového nebo elektronového paprsku. Paprsek se pohybuje v osách X a Y a je směřován přes soustavu čoček a zrcadlo. Po vytvoření vrstvy se nosná deska sníží a proces se opakuje. To vše probíhá v uzavřené komoře, ve které obvykle bývá vakuum nebo je napuštěna inertním plynem (nejčastěji dusík nebo argon). Komora je zahřívána na teplotu trochu nižší, než je teplota tání jednoho z materiálů, to umožní použít méně výkonné lasery (při práci s kovy toto není možné a musí být použity výkonné lasery). Po dokončení tisku se nechá nejprve materiál zchladnout (to u velkých objektů může trvat až 2 dny) a až poté se očistí od okolního materiálu (veškeré zbytky lze recyklovat) a případných podpor. Kvalita povrchu materiálu bývá obvykle lehce porézní a pro jejich zlepšení se využívá dokončovacích úprav. U kovových předmětů lze leštěním dosáhnout až zrcadlového povrchu. Jedná se o velmi přesný proces, kterým se dosahuje vynikajících výsledků z plastových materiálů.

Tato metoda je často využívána pro tvorbu finálních výrobků. Problémem je poměrně velký a drahý hardware. Finančně náročný je i stavební materiál a provoz stroje. Ceny tiskáren se dříve pohybovaly řádově v několika milionech Kč. Nyní se pro komerční využití vyvinuly menší a levnější tiskárny stojící kolem sta tisíc, ale umožňující spékat pouze některé z plastů (např. nylon a vosk).

Dočasné podpory

Při práci s nekovovými materiály nejsou obvykle podpory zapotřebí, ale u kovových materiálů jsou vyžadovány a slouží nejen jako podpora převíslých a osamocených částí (viz kap. 3.1 – dočasné podpory), ale i pro lepší odvod tepla.

Stavební materiály

PBF může ale být využito pro celou řadu materiálů. Patří mezi ně polymery, kovy, keramika, písek a vosk.

Název materiálu	HST Composite	Flex Plastic	PS Plastic
Popis	tuhý	velmi pružný	pro vytavitelné modely
Mez pevnosti v tahu	48 MPa	1,8 MPa	2,8 MPa
Mez pevnosti v ohybu	83 MPa		
Modul pružnosti v tahu	4400 MPa	5,9 MPa	
Tažnost	4,5 %	110 %	8,1 %

Tab. 4 Příklady vlastností polymerních materiálů využívaných PBF (DuraForm od společnosti 3D Systems) [3]

Technologie PBF

Powder bed fusion obsahuje následující, běžně používané tiskové technologie:

- direct metal laser sintering (DMLS)
- electron beam melting (EBM)
- selective laser sintering (SLS)
- selective heat sintering (SHS) – technologie velmi podobná SLS

Direct metal laser sintering (DMLS)

Metoda DMLS využívá speciálně vyvinutých kovových prášků. Vzhledem k dostatečné pevnosti a mechanické odolnosti vyrobených objektů se DMLS využívá především pro tisk forem k výrobě plastových součástek vstřikováním nebo lisováním.

Electron beam melting (EBM)

U této technologie je laser nahrazen elektronovým paprskem (usměrněným proudem elektronů). EBM dosahuje se velmi kvalitních výsledků při stavbě kovových předmětů. Při tvorbě každé vrstvy probíhá více průchodů proudem elektronů. První skenuje práškové lože a předehřívá ho na optimální teplotu. Druhý průchod pak roztaví požadovaná místa. Roztaví se podstatná část materiálu (téměř 100 %), což je jedna z výhod. Tyto technologie vyžadují během svého tisku velký podtlak a omezují se především na materiály vysoké hodnoty, nejčastěji se jedná o titan, dále to může být např. kobalt nebo chrom. Pomocí těchto kovů jsou vyráběny funkční díly především pro letectví. V porovnání s CNC stroji se udává, že titanové výrobky dosahují lepších výsledků, jsou rychleji vyrobené a náklady jsou až o 35 % nižší [3]. Velkou výhodou je výjimečná přesnost a skvělé technické vlastnosti výtisků. Dalším příkladem využívající elektronový paprsek je např. electron beam additive manufacturing (EBAM).

Selective laser sintering (SLS)

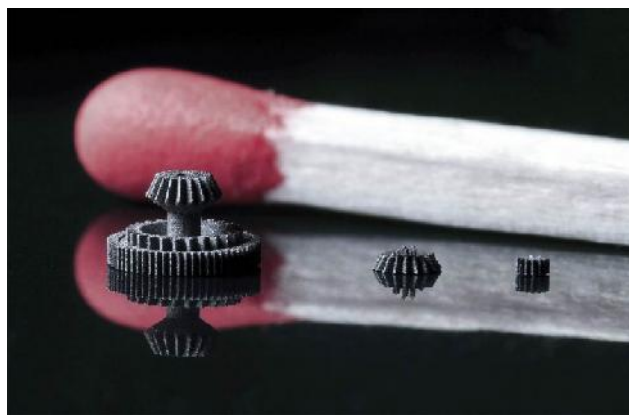
Podle použitého stavebního materiálu se obvykle technologie SLS dělí na:

- laserové sintrování plastů
- laserové sintrování kovů (velmi podobné DMLS)
- laserové sintrování písku
- laserové sintrování keramiky

Využití plastových výtisků je například pro funkční zkoušky nebo testy lícování. Běžným využitím všech modelů je prostorová vizualizace. Upravený slévárenský písek jako stavební materiál využívá technologie direct shell production casting (DSPC), jehož zpracováním a vytvrzením lze vytvořit klasickou formu na lití.

Micro laser sintering (MLS)

Další zajímavou, ale zatím ne tak hojně využívanou technologií je laser micro sintering (MLS) umožňující vytvářet velmi malé, kovové, tvarově složité komponenty, např. součástky do hodinek. Touto technologií lze vytvořit vrstvu tenkou pouhých 0,001-0,005 mm. MLS je ideální pro lékařství, výrobu šperků a hodinek, letecký a automobilový průmysl. Velikost částic prášku ostatních PBF metod je obvykle mezi 30 až 100 μm , zatímco MLS využívá částice do velikosti maximálně 5 μm . Výchozím polotovarem může být wolfram, molybden, nerezová ocel, měď, stříbro apod.



Obr. 38 Ukázka velikosti součásti vytvořené MLS [43]

Výhody:

- široké spektrum materiálů a po-procesních úprav
- není vždy potřeba přídavných podpor
- odolné, funkční díly
- vysoká tepelná a chemická odolnost (jen u některých metod a materiálů)

Nevýhody:

- energetická náročnost
- cena zařízení (především strojů, používající elektronový paprsek)
- cena materiálu je vyšší než u jiných metod
- nemožnost tisku uzavřených dutin (materiál zůstane po tisku uzavřen)

Aplikace:

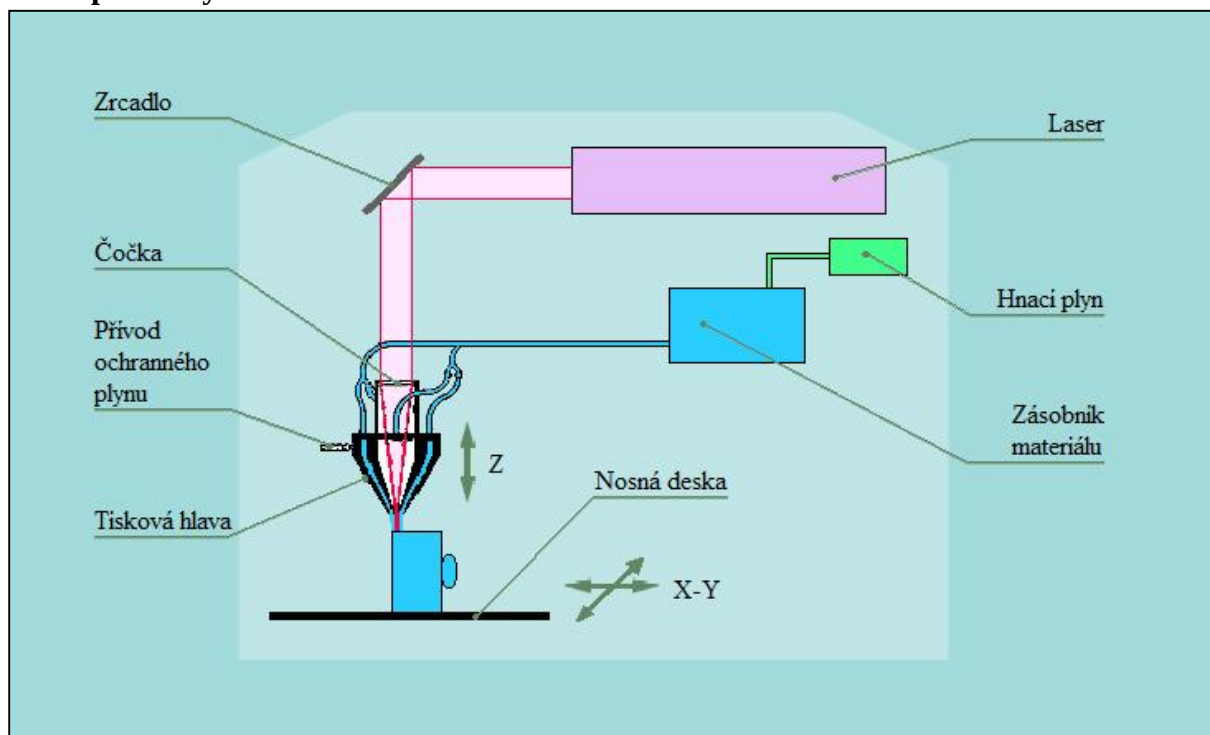
- vesmírné vybavení
- vojenské vybavení
- lékařství a zdravotní péče
- elektronika (kryty, konektory)
- prototypy
- představení produktu a testování
- slévárenské modely a pískové formy
- testování aerodynamiky

3.7 Směřované nanášení materiálu – Directed energy deposition

[1], [12], [25], [32], [38], [40], [59]

Poznávacím znamením directed energy deposition (DED) je nanášení materiálu pod libovolným úhlem. Vyrobené předměty mohou dosahovat stejných nebo dokonce i lepších mechanických vlastností než kované a odlívané objekty. Je to složitý tiskový proces a jako stavební materiál využívá především kovy ve formě drátu či prášku. Postup je obdobný jako u vytlačování materiálu, ale tryska se může pohybovat v různých směrech a v osách, lze tak vyrobit předměty s vlastnostmi, které nemohou být získány s použitím tradičních výrobních postupů. Také to umožňuje kromě tisku nových součástí i opravovat či upravovat již vytvořené díly nebo třeba aplikovat povlaky odolné proti opotřebení a korozi.

Princip metody



Obr. 39 Schéma technologie laser engineered net shaping (LENS) od společnosti Optomec využívající metodu DED [32]

Schéma ukazuje technologii LENS, ta využívá výkonný laser tavení kovového prášku dodávaného koaxiálně k zaměřenému laserovému paprsku procházející skrz tiskovou hlavu hlavy. Laserový paprsek obvykle prochází středem tiskové hlavy, a zároveň prochází jednou nebo více čočkami. Nosná deska se pohybuje v osách X, Y a vytváří tvar každé vrstvy. Typicky se po dokončení každé vrstvy pohybuje tisková hlava nahoru ve svislém směru (osa Z). Laserový paprsek může být přiváděn jakýmkoliv vhodným způsobem, nejběžněji přes soustavu zrcadel. Práškový materiál je přiváděn po obvodu tiskové hlavy buď samospádem, nebo tlakem za pomoci interního plynu. Tento plyn může zároveň sloužit jako ochranná atmosféra roztaveného materiálu. Většina materiálů je dodávána ve formě prášku, je možné jej použít i ve formě drátu. V případě drátu se materiál přivádí podobně jako prášek buď tiskovou hlavou, nebo samostatně mimo osu tiskové hlavy. Obecně je použití drátu méně přesné, ale mnohem účinnější. Výkon laseru bývá od několika set Wattů až po 20kW, je ale závislý především na volbě materiálu a rychlosti posuvu.

Technické řešení

Obecně lze u DED technologií materiál tavit za pomoci laseru, elektronového paprsku nebo pomocí plazmy, to vše v uzavřené komoře, kde je snižena hladina kyslíku. Tisková hlava je řízena víceosým kloubovým mechanismem a objekt je umístěn na otočném pracovním stole, což umožňuje při výrobě složitých tvarů nanášet materiál pod různými úhly. Stroj bývá obvykle se 4 nebo 5 stupni volnosti a pohybovat se může buď rameno s tiskovou hlavou a objekt zůstává v pevné poloze, nebo naopak, rameno je stabilní a pohybuje se nosná deska.

Pro vytvoření přesahů se využívá buď víceosého systému, nebo sekundárního materiálu sloužícího jako dočasné podpory. Pro odstranění podpor a zlepšení kvality povrchu je nutno využít obráběcích strojů.

Vytisklé objekty mají dobré mechanické a strukturní vlastnosti, ale obvykle potřeba je obrábět. Mechanické vlastnosti bývají stejné, občas i lepší než stejná součást vyrobená tradičním způsobem (např. mez pevnosti v tahu u titanových slitin může převyšovat 1000 MPa [51]).

Nevýhodou DED jsou vysoké pořizovací, a v důsledku potřeby velkého množství energie i provozní náklady. Výhoda spočívá ve schopnosti vyrábět v rozumné rychlosti velké, plné, kovové součásti s dobrými mechanickými a metalurgickými vlastnostmi. Další velkou výhodou je, že DED technologie může být „pouhým“ rozšířením pro některá CNC obráběcí centra, viz obr. 40 – to se nazývá hybridní stroj.



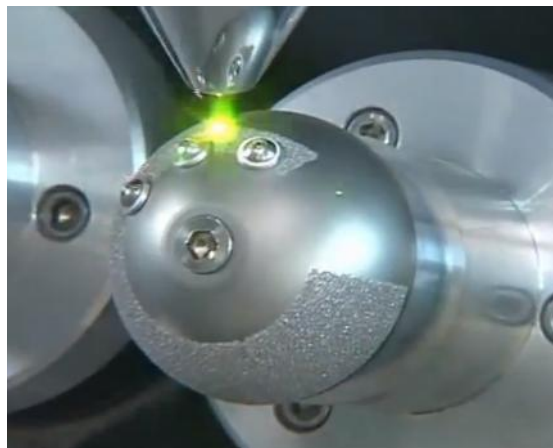
Obr. 40 DED technologie jako příslušenství CNC stroje [31]



Obr. 41 Součást vyrobená na hybridním stroji [14]

Využití DED

Tímto způsobem lze kromě tisku nových součástí i opravovat či upravovat již vytvořené díly nebo třeba aplikovat povrchové úpravy a povlaky odolné proti opotřebení a korozi. Mezi typické aplikace se řadí výroba a oprava vstřikovacích nástrojů a výroba velkých titanových a jiných kovových dílů pro letecké aplikace. Důraz na tyto aplikace je částečně způsoben tím, že odpadá problém s problematickým odstraňováním podpor.



Obr. 42 Povrchová úprava [31]

Příklad parametrů DED tiskárny

Typické tloušťky vrstev jsou 0,25-0,5 mm. Jako příklad parametrů je uveden 5osý stroj LENS 850R, umožňující tisk do velikosti 900×1500×900 mm s přesností $\pm 0,25$ mm, rozlišením $\pm 0,025$ mm a rychlostí $60 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Stavební materiály

Tento proces umožňuje použít širokou škálu kovových materiálů, jako je např. nikl, nerezová ocel, měď, kobalt nebo titan. Ty jsou obvykle ve formě prášku nebo drátu.

Výhody:

- Plný materiál
- Velké díly
- Velký výběr kovových materiálů
- Úprava/oprava existujících dílů
- Dobré mechanické a strukturální vlastnosti
- Možnost gradientních materiálů

Nevýhody:

- Velmi vysoké pořizovací náklady
- Vysoká energetická spotřeba
- Obtížné odstranění podpor – nutné obrábění

Aplikace:

- Výroba / oprava vstřikovacích forem
- Lehké díly pro letectví
- Povrchové úpravy
- Pokovování součástí

Dalšími nezmíněnými technologiemi jsou např.:

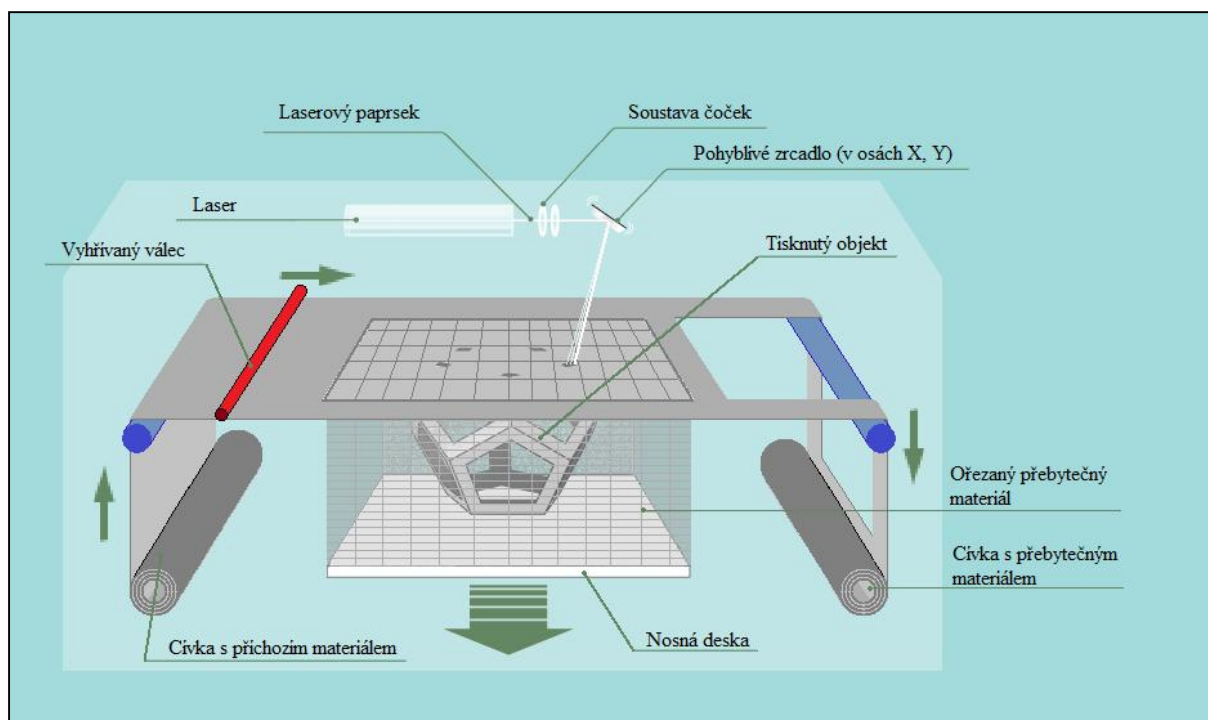
- Directed light fabrication (DLF)
- Direct metal deposition (DMD)
- 3D laser cladding
- Laser generation
- Laser-based metal deposition
- Laser freeform fabrication (LFF)
- Laser direct casting
- LaserCast
- Laser consolidation
- LasForm

3.8 Laminování – Sheet lamination

[1], [12],[30], [32], [36], [40], [45],[54], [55], [64]

Zcela odlišnou metodou než výše zmíněné je sheet lamination neboli laminování. Pracuje na principu spojování listů papírů, plastových folií nebo kovových plátů, do kterých je vyříznut tvar jednotlivých vrstev. Nejtypičtějším zástupcem těchto technologií je laminated object manufacture (LOM) a ultrasonic additive manufacturing (UAM). Tato metoda je méně přesná než ostatní, ale je podstatně levnější.

Princip metody



Obr. 43 Schéma technologie laminování

Na jedné straně mohou být listy papíru (ten může být čistý nebo pokrytý pojivem), kovové pláty nebo plastová folie, namotaná do role a pokrytá lepidlem (podobně jako lepicí páska). Materiál je přesunut na pracovní stůl. Pokud není vstupní materiál již pokryt lepidlem, tak je během přesunu na pracovní stůl polepen za pomoci lišty tryskající lepidlo. Následně je přilepen k nosné desce nebo předchozí vrstvě. Pro vyšší účinnost a správné přilnutí vrstev je obvykle každá vrstva válcována vyhřívaným válečkem nebo pomocí zdvihu nosné desky přitlačena k přitlačné desce. Materiál umístěný na nosné desce je mechanicky nebo laserem ořezán do požadovaného tvaru. Zároveň se nařeže i přebytečný materiál – pro jeho snadnější odstranění po tisku. Poté se nosná deska posune níže o tloušťku vrstvy a proces se opakuje až do vytvoření kompletního dílu. Poslední dva kroky lze provádět v opačném pořadí, to znamená, že ke slepení může dojít až po vyříznutí vrstvy. Po dokončení stavby se odstraní přebytečný materiál a vyjme hotový model.

Technické řešení

Celý LOM stroj (který je charakteristický pro metodu laminování) se skládá ze dvou cívek s materiálem, z toho jedna slouží pro přívod nového a druhá pro odvíjení přebytečného materiálu. Materiál je přiváděn na nosnou desku, u těchto technologií občas označovanou i jako řezací lože. Místa, která nemají být součástí modelu, jsou obvykle pomocí tří per ošetřena speciální tekutinou, která zabrání slepení vrstev. O vyříznutí tvaru se stará buď nůž, nebo laserový paprsek (nejčastěji CO₂), procházející soustavou čoček a směřovaný pomocí zrcadel. Řezací nástroj může občas pracovat i pod libovolným úhlem, což snižuje viditelnost krokování mezi vrstvami. Zatímco u většiny technologií laser opracovává celou vrstvu, tady je to pouze obvod. Tím lze dosáhnout rychlejšího výrobního procesu a díky tomu, že zde nejsou žádné chemické reakce, není nutná uzavřená komora, což umožňuje tisk velkých objektů (ale většina těchto strojů je navržena „pouze“ pro tisk objektů o velikosti cca 200×150×150 mm).

Po tisku je nutné odstranit přebytečný materiál, který již nemá žádné další využití. Tím vzniká vysoké procento odpadu (obecně se udává 50 % odpadu), a také konstrukční kvalita dílů je omezena, ale přidáváním lepidla, barvy, broušením nebo obráběním lze snadno zlepšit jejich vzhled. Tato technologie není ve strojírenství příliš populární a využívají ji především umělci a architekti. Tyto technologie také neumožňují tisk dutých předmětů a hotová součást nemá dobré mechanické vlastnosti; ty jsou trochu podobné dřevu a součást může být i jako dřevo obráběna. Z těchto důvodů se tato metoda nevyužívá pro tvorbu funkčních prototypů, ale díky své přesnosti a možnosti barevných kombinací se používá především pro testování tvaru, koncepce nebo designu.

Dočasné podpory

Metoda je samonosná a není potřeba dočasných podpor. Jako podpora zde slouží předchozí vrstva.

Stavební materiály

Metoda laminování umožňuje tisk pouze z kovových plechů, plastové folie nebo papíru, který je buď speciálně vyvinutý pro tyto technologie nebo obyčejný kancelářský (obvykle formátu A4). V současnosti nejvyužívanější obyčejný kancelářský papír. To hlavně z důvodu jeho dostupnosti. Zpracování ostatních materiálů je nahrazeno jinými metodami tisku.

Tisk z papíru

Selective deposition lamination (SDL) je velmi podobná technologii LOM a umožňuje tisk z běžného kancelářského papíru A4. Některé z tiskáren jsou vybaveny inkoustovou hlavou a umožňují i barevný tisk na jednotlivé vrstvy papíru, tím lze vytvářet plně barevné objekty, viz obr. 44. Po dokončení tisku je potřeba ručně odstranit přebytečný materiál, následně je možné využít dokončovacích úprav – nejčastěji broušení. Technologie tisknoucí z papíru vytváří poměrně hodně kouře (občas i plamen), a proto musí být vybaveny stavební komorou, vybavenou filtračním systémem nebo komínem. Obecně platí, že povrch, přesnost



Obr. 44 Dekorativní váza vytisknutá z papíru technologií LOM [37]

a stabilita papírových předmětů nejsou tak dobré jako u jiných metod 3D tisku. Papír je sice levný, ale není příliš stabilní v průběhu času. Absorbuje vlhkost, takže objekty se mohou vlnit nebo jinak měnit svůj tvar.

Příklad parametrů tiskárny využívající laminování

Tyto tiskárny nedosahují vysokých přesností, například tiskárna od společnosti mcor Matrix 300+, která umožňuje tisk do velikosti 256×169×150 mm s přesností $\pm 0,1$ mm v osách X a Y a tloušťkou vrstvy 0,1 nebo 0,19 mm (podle materiálu).

Tisk z kovu

Dalším příkladem laminačního 3D procesu je ultrasonic additive manufacturing (UAM), ten vytváří objekt z kovových plechů nebo pásů (např. hliník, měď, nerezová ocel nebo titan), které jsou vzájemně spojeny pomocí vibračního svařování, tj. kombinace vibrací o vysoké frekvenci (cca 20.000 Hz) a tlaku. Na rozdíl od zpracovávání plastů a papíru nelze zde tak snadno odstranit nežádoucí materiál, proto je k odstranění přebytečného kovu využito CNC obrábění. Tento proces dokáže spojovat i různé kovy, a protože materiál není roztaven, vyžaduje poměrně málo energie.

Výhody:

- možnost výroby velkých modelů
- není třeba dočasných podpor
- vysoká výrobní rychlost
- nízké provozní náklady
- snadno dostupný polotovár (kancelářský papír)

Nevýhody:

- velké množství odpadu
- možné problematické odstranění přebytečného materiálu
- problémy s dutými díly (obtížné odstranění odřezaného materiálu)
- omezené použití výtisků

Aplikace:

- estetické a vizuální modely

ZÁVĚR

Současné 3D tiskové technologie a procesy se neustále mění a vyvíjejí poměrně rychlým tempem. Všechny popsané technologie 3D tisku jsou zatím v různých fázích vývoje. Některé mají větší potenciál a je jim předpovídána velká budoucnost, jiné jsou již na ústupku a jsou nahrazovány jinými metodami. Velký potenciál mají i hybridní stroje, které spojují technologie CNC strojů a 3D tisku.

Snaha jednotlivých firem obejít patenty a ochranné známky má velký vliv na přibývání nových technologií. To má za následek velké množství, navzájem si velmi podobných technologií, jelikož všechny vycházejí pouze ze čtyř základních principů tisku. Také se vyvíjejí stále nové principy tisku, které experimentují s různými materiály a jejich pojením. Současně s vývojem stávajících i nových metod se vyvíjejí i neméně důležité materiály, které zásadně ovlivňují stavbu i parametry tisknutých součástí.

3D tisk je již nyní využíván v celé řadě oborů; jedná se například o letectví a kosmonautiku, automobilový průmysl, slévárnictví, zdravotnictví, architekturu a potravinářství. A se stále se snižující cenou strojů je 3D tisk čím dál více využíván i pro osobní využití a hobby.

Největší výhodou 3D tisku je, že výroba je možná téměř ihned po vytvoření počítačového modelu. S tímto odpadají zdlouhavé přípravy výrobních procesů před tím, než je návrh poslán do výroby. Tato výhoda je využita především pro výrobu prototypů, které mohou sloužit pro posouzení mnoha aspektů, například posouzení tvaru, smontovatelnosti nebo třeba k vizualizaci napětí. Kromě výroby prototypů se 3D tisk využívá i pro tvorbu forem a nástrojů, ale také k výrobě finálních součástí. Velké uplatnění získává v klasickém slévárnictví. Ať už pro tisk modelu nebo celých pískových forem určených k odlévání. Další velkou výhodou je možnost výroby tvarově složitých objektů. To i takových, které nelze vytvořit jinými běžnými postupy. U většiny technologií nevzniká teoreticky téměř žádný odpad, jelikož je materiál přidáván a ne ubírán. Lze tisknout i plně barevné předměty.

Na druhé straně, 3D tisk s sebou nese i řadu nevýhod. Jednou z nich je dlouhá doba tisku, která prozatím nemůže konkurovat klasickým výrobním procesům. Z tohoto důvodu 3D tisk není úplně vhodný pro sériovou výrobu. Rychlost tisku lze poměrně výrazně urychlit, ale spolu a tím rapidně klesá kvalita výrobku. Většina technologií není vhodná pro výrobu mechanicky namáhaných součástí, to z důvodu buď používaného materiálu, nebo z důvodu jeho pojení. Další podstatnou nevýhodou jsou provozní náklady většiny technologií. To nejen z důvodu vysoké energetické náročnosti stroje, ale i z důvodu ceny některých polotovarů, především polotovarů ve formě prášku.

I když je tisk možný téměř z jakéhokoliv materiálu, a nové stále přibývají, v současnosti převládá tisk z plastů – konkrétně ABS a PLA. Technologie tisknouce kovové součásti vhodné pro konstrukční díly jsou velice finančně náročné, to s ohledem jak na pořizovací, tak na provozní náklady.

Tiskové stroje svými kvalitami již dokáží konkurovat klasickým výrobním technologiím, ale pořízení nových zařízení zůstává z velké části otázkou financí.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

2D	2-Dimensionální/dvojrozměrný
2PP	dvoufotonová Polymerace
3D	3-Dimensionální/trojrozměrný
ABS (ABSi)	AkrylonitrilButadienStyren
ASTM	American Society for Testing and Materials
BJ	Binder Jetting – nastříkované pojiva
CFF	Composite Filament Fabrication
CNC	Computer Numeric Control – počítačově číslicově řízené
DDM	Direct Digital Manufacturing – Přímá výroba součástí
DED	Direct (Directed) Energy Deposition – přímé nanášení materiálu
DLP	Digital Light Processing
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DSPC	Direct Shelt Production Casting
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
	Fused Deposition Method
FFF	Fused Filament Fabrication
FFM	Fused Filament Modelling
FLM	Fused Layer Modeling/Manufacturing
LCM	Lithography-based Ceramic Manufacturing
LOM	Laminated Object Manufacture
ME	Material Extrusion – vytlačování materiálu
MEM	Melted and Extruded Modelling
MIT	Massachusetts Institute of Technology – Massachusettský tech.institut
MJ	Material Jetting – nastříkování materiálu
MJP	Multi-Jet printing
MJS	Multiphase Jet Solidification
MLS	Micro Laser Sintering
PBF	Powder Bed Fusion – tisk v práškovém loži
PC	PolyCarbonate – Polykarbonát
PJP	Plastic Jet Printing
PLA	PolyLactic Acid
PP	PolyPropylen
RP	Rapid Prototyping
SGC	Solid Ground Curing
SHS	Selective Heat Sintering
SLA	StereoLithography Apparatus – stereolitografie
SLI	SLIcer
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
s. s.	souřadný systém
STL	STereoLithography
TPU	Termoplastický PolyUretan
UAM	Ultrasonic Additive Manufacturing
UV	UltraViolet – ultrafialové záření
VP	Vat Photopolymerization – fotopolymerace v nádobě

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [15]

1. 3D Printers: Technology Rundown. *Boots Industries: 3D Printing* [online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <https://bootsindustries.com/portfolio-item/3d-printers-technology-rundown/>
2. 3D Printing (Photolithography). *Youtube* [online]. 2012 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=8ehlWYfdS70>
3. *3D systems* [online]. 2015 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.3dsystems.com>
4. 3D tisk: Obecně o 3D tisku. *o3D* [online]. 2013 [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: <http://www.o3d.cz/3d-tisk/3d-tisk/>
5. 3D tisk-aplikace. *14220* [online]. 2013 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-aplikace/>
6. 3D tiskárna. *CNC frézky* [online]. 2014 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://cnc-frezky.webnode.cz/a3d-tiskarna/>
7. 3D tisk-úvod. *14220* [online]. 2013 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-uvod/>
8. ABS-M30. In: *Evektor* [online]. 2011 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://evektor.cz/Data/Sites/1/Files/pdf/MS-ABS-M30-FORTUS.pdf>
9. Additive Fabrication. *Custompart* [online]. 2009 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>
10. *Additively: your access to 3D printing* [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/3d-printing-technologies>
11. Autodesk Ember Time Lapse (60 FPS). *Youtube* [online]. 2014 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=-INJAr9Gsv8>
12. BARNATT, Christopher. *3D Printing: Second Edition*. 2. vyd. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014. ISBN 978-1-5028-7979-0.
13. BLOCKER, Rosa (ed.). Polar3D. *Pin it* [online]. 2015 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <https://www.pinterest.com/pin/329325791477634381/>
14. CARNES, Rebecca. Hybrid Manufacturing Technologies. *JobShop.cz* [online]. 2015 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://www.jobshop.com/techinfo/papers/CNCmachining3dprinting.shtml>
15. *Citace.com* [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://www.citace.com>

16. *Creatz 3D* [online]. 2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.creatz3d.com.sg/wp-content/uploads/2014/07/FDM-finishing-layer.png>
17. Finishing ABS 3D Printed Parts. *Parts2Print* [online]. 2013 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.parts2print.com.au/absfinishing>
18. FLAHERTY, Joseph. New 3-D Printers. *Wired* [online]. 2012 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://www.wired.com/2012/07/3-d-printers-that-dont-suck/>
19. FOX RUBIN, Ben a Scott STEIN. HP dives into 3D printing with Multi Jet Fusion. *CNet* [online]. 2014 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.cnet.com/news/hp-unveils-multi-jet-fusion-3d-printing/>
20. FTD IB Orange Pigm. *Fun To Do: Affordable 3D Resins* [online]. [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.funtodo.net/portfolio-ftd-ib-orange-pigm-b9-v1-7-see-extra-lines-on-flask.html>
21. Geeetech Me Creator Mini Desktop MK8 Extruder Assembled 3D Printer Prusa Mendel. *Amazon* [online]. 2015 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://www.amazon.com/Printer-Dimensions-Micron-1-75mm-Filament/dp/B00ONO16TI>
22. GROHMANN, Jan. 3D tisk: Třetí průmyslová revoluce: Revoluce no. 3. *EkonTech.cz: časopis pro studenty techniky a ekonomie* [online]. 2014 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.ekontech.cz/clanek/3d-tisk-treti-prumyslova-revoluce>
23. HIPOLITE, Whitney. *Voxeljet Introduces New Phenolic-Direct-Binding 3D Printing Method* [online]. 2014 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://3dprint.com/26922/voxeljet-pdb-3d-printing/>
24. HISTORIE 3D TISKU. *O3D* [online]. 2013 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.o3d.cz/3d-tisk/štítky/historie-3d-tisku/>
25. How 3D Printers Work. *Energy.gov* [online]. 2014 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://energy.gov/articles/how-3d-printers-work>
26. How To 3D Print. *3D printer plans* [online]. 2014 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://3dprinterplans.info/how-to-3d-print-beginners-guide-to-3d-printing/>
27. How to choose a FFF/FDM 3D printer: What type of printer geometry do i want. *Never stop learning: Blog dedicated to K2000, electronic and software programming stuff* [online]. 2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <https://nutz95.wordpress.com/2015/02/22/how-to-choose-a-ffffdm-3d-printer-what-type-of-printer-geometry-do-i-want/>
28. HRONČOK, Miroslav. 3D tiskárny RepRap: Open-source mašinky, které vám usnadní život. *LinuxExpres* [online]. 2012 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://www.linuxexpres.cz/hardware/3d-tisk>

29. *Hyperlink* [online]. 2000 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://robo.hyperlink.cz/rapid/index.html>
30. Informace o technologiích 3D tisku. *Easy CNC* [online]. 2013 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku/>
31. InssTek. *Youtube* [online]. 2014 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=Kz4-166XMUM#t=32>
32. *Introduction to Additive Technologies* [online]. 2012 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.additive3d.com/techn.htm>
33. *ISTECH s.r.o.* [online]. 2013 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.istech.cz/3d-tiskarna/vyuziti-a-aplikace/>
34. Izostatické lisování za tepla. *Bodycote* [online]. 2014 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://www.bodycote.cz/cs-CZ/services/hot-isostatic-pressing.aspx>
35. Jak vybrat 3D tiskárnu. *Josef Průša* [online]. [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://josefprusa.cz/vyber-3d-tiskarny/>
36. *Kylestetz: rapid prototyping study* [online]. 2009 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <https://kylestetzerp.wordpress.com/category/printing-technologies/>
37. Laminated Object Manufacturing – LOM. *Buy 3D Printer* [online]. 2015 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.buy3dprinter.org/3dprintingtechnologies/laminated-object-manufacturing-lom/>
38. LENS Technology. *Optomec: Production Grade 3D Printers.. with a Material Difference* [online]. 2014 [cit. 2015-05-21]. Dostupné také z: <http://www.optomec.com/3d-printed-metals/lens-technology/>
39. LOUCKÝ, Milan. Nové cenově dostupné 3D tiskárny na českém trhu. *Konstruktér: CAD, CAM, PLM, OBRÁBĚNÍ, 3D TISK, VÝROBA, AUTOMATIZACE* [online]. 2015 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.caxmix.cz/2015/02/01/nove-cenove-dostupne-3d-tiskarny-na-ceskem-trhu/>
40. Loughborough University. *About Additive Manufacturing: The 7 Categories of Additive Manufacturing* [online]. 2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>
41. Loughborough University. *About Additive Manufacturing: Materials* [online]. 2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/materials/>
42. Mark ONE je první tiskárna na světě, která tiskne z uhlíkových vláken. *Technet.cz* [online]. 2014 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/3d-tiskarna-mark-one-tiskne-z-uhlikovych-vlaken-flu-/hardware.aspx?c=A140128_235230

43. MARSH, Randall. Micro laser sintering technology to 3D print tiny metal parts. *Gizmag* [online]. 2013 [cit. 2015-05-21]. Dostupné také z: <http://www.gizmag.com/micro-laser-sintering-3d-prints-tiny-metal-parts/30115/>
44. MASTERS, Duncan (ed.). *Pin it: Möbius Gear* [online]. 2014 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <https://cz.pinterest.com/pin/230668812139394305/>
45. Nekonvenční metody obrábění 10. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, 2008(12) [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil.html>
46. Nekonvenční metody obrábění 9. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: Vogel Publishing, 2008 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil.html>
47. *Olivero designs* [online]. 2015 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcR_pj6AvgZTo4MP5ERIE-HNEv3PEw76DzU3KKH-tgAvyKrB54s6
48. ORION™ Delta Desktop 3D Printer. *SeeMeCNC: 3D Printers and More* [online]. [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://seemecnc.com/products/orion-delta-3d-printer>
49. PC (polycarbonate). In: *Evektor* [online]. 2011 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://evektor.cz/Data/Sites/1/Files/pdf/MS-PC-FORTUS.pdf>
50. Polar 3D Launches Unique Polar Coordinate-Based FFF 3D Printer at CES 2015. *3D print.com: 3D Printer and 3D Printing News* [online]. 2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://3dprint.com/35656/polar-3d-printer-ces-2015/>
51. Polylactic Acid (PLA, Polylactide). *MakeItFrom.com* [online]. 2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.makeitfrom.com/material-properties/Polylactic-Acid-PLA-Polylactide/>
52. Principle of Operation. *Core (x,y)* [online]. 2012 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://www.corexy.com/theory.html>
53. PRŮŠA, Josef a Michal PRŮŠA. *Základy 3D tisku* [online]. 2014, 12 s. Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/e-book-stahnuti/>
54. Rapid prototyping pro každého. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2010, 2010(7) [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/rapid-prototyping-pro-kazdeho.html>
55. Rapid Prototyping: Laminated Object Modelling and Computer Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials. *AZO materials* [online]. 2002 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1650#_Manufacture_of_Ceramic

56. ROOBEEK, Rosanne. 3D printing and the future of disaster relief: SCIENCE & TECHNOLOGY. *Aljazeera* [online]. 2014 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.aljazeera.com/indepth/features/2014/10/3d-printing-future-disaster-relief-20141016825642208.html>
57. Shells and Parameters. *Teambudmen* [online]. 2012 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://blog.teambudmen.com/2013/09/understanding-shells-layer-height-and.html>
58. *Stratasys* [online]. 2015 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com>
59. STUCKER, Brent. *ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES: TECHNOLOGY INTRODUCTION AND BUSINESS IMPLICATIONS* [online]. 9 s. [cit. 2015-05-21]. Dostupné také z: <http://www.naefrontiers.org/File.aspx?id=31004>
60. The Titan 1: High performance DLP SLA 3D Printer. *Kudo3D* [online]. 2015 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.kudo3d.com/products/>
61. *Ti6Al4V Titanium Alloy*. Dostupné také z: <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-Ti6Al4V-Titanium-Alloy.pdf>
62. Tisk prostorových modelů. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2004, roč. 2004, č. 3 [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/tisk-prostorovych-modelu.html>
63. TwoUp 3D Printer Kit 7" x 7" x 5" Build Dimensions 50 Micron 1.75mm PLA Filament. *Amazon* [online]. 2015 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://www.amazon.com/Printer-Dimensions-Micron-1-75mm-Filament/dp/B00ONO16TI>
64. Unikátní 3D tiskárna Solido SD300 PRO. *Solido* [online]. 2010 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.solido3d.cz/content/o-tiskarne-technicke-udaje>
65. VOŘÍŠEK, Lukáš. Pevnější než hliník: První 3D tiskárna využívající uhlíkových vláken je tu!. *CDR* [online]. 2014, č. 1 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://cdr.cz/clanek/3d-tisk-karbonovych-vlaken-mark-one>
66. VOXELJET 3D PRINTERS: FAST, PRECISE AND ECONOMICAL. *Voxeljet* [online]. 2013 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.voxeljet.de/en/systems/>
67. VX4000: THE LARGE-FORMAT 3D PRINTING SYSTEM. *Voxeljet* [online]. 2013 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.voxeljet.de/en/systems/vx4000/>
68. What is Binder Jetting?: Unique binder-based 3D printing technology was developed at MIT. *ExOne: Digital part materialization* [online]. [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.exone.com/Resources/Technology-Overview/What-is-Binder-Jetting>
69. Extruders. *RepRap* [online]. 2015 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Extruder>

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tab. 1 Příklady materiálových vlastností ABS, PC a PLA [8], [32], [51].....	30
Tab. 2 Příklady materiálů pro SLA stroje ve srovnání s běžným ABS+ [3].....	35
Tab. 3 Příklady materiálových vlastností používaných pro MJ [3], [58]	38
Tab. 4 Příklady vlastností polymerních materiálů využívaných PBF [3]	44

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1 Ukázka vytištěných objektů 3D tiskovou technologií [47]	13
Obr. 2 Několik variant orientace součásti a z toho vyplývajícího objem podpor [5].....	15
Obr. 3 Před a po obroušení stěn [16]	15
Obr. 4 Další z možností využití 3D tisku - barevné zobrazení výsledků simulace napětí [5]..	17
Obr. 5 Ukázka vytištěného mechanismu [44]	18
Obr. 6 Schéma tiskové hlavy [69]	19
Obr. 7 a obr. 8 Schéma kartézského, delta a polárního systému [27] [50].....	19
Obr. 9 Ukázka stroje s konstrukčním řešením standart [63]	20
Obr. 10 Ukázka stroje s konstrukčním řešením cubed shape printer [21].....	20
Obr. 11 Stroj VX4000 [67].....	21
Obr. 12 Schéma nejpoužívanějšího spřažení motorů u metody CoreXY [14]	21
Obr. 13 Konstrukční řešení delta [48]	21
Obr. 14 Použití polárního systému [13].....	21
Obr. 15 Schéma fotopolymerizace seshora [32].....	22
Obr. 16 Osvětlování seshora [2]	22
Obr. 17 Osvětlování zespod [11].....	22
Obr. 18 Schéma spékání práškového lože [32]	23
Obr. 19 Schéma metody laminování [32].....	24
Obr. 20 Ukázka hybridního stroje [14].....	24
Obr. 21 Schéma technologie vytlačování materiálu [10]	27
Obr. 22 Rozdíl mezi povrchy stejných objektů vytisknutých metodou FDM a SLA [18].....	28
Obr. 23 Ukázka povrchů - výška vrstev: 0,127 mm (vlevo), 0,33 mm (vpravo) [17].....	28
Obr. 24 Výplně součásti 0-100 % [57]	29
Obr. 25 Ukázka převislých a osamocených částí [12].....	29
Obr. 26 Různé směry nanášení vrstev. Vlevo podélný a vpravo příčný. [7].....	30
Obr. 27 Pohled na povrch vytisklé betonové zdi [56]	31
Obr. 28 Schéma technologie stereolitografie [10].....	33
Obr. 29 Výtisk metodou SLA – ukázka podpor [20]	34
Obr. 30 Výtisk technologií 2PP. Délka objektu je 0,1 mm. [12]	35
Obr. 31 Schéma technologie nastřikování materiálu [10]	37
Obr. 32 Vícebarevná součást vytisknutá v jednom tiskovém procesu [19].....	38
Obr. 33 Schéma metody binder jetting [10]	40
Obr. 34 Stroj VX4000 [67].....	41
Obr. 35 a obr. 36 Ukázka vytištěné pískové formy metodou binder jetting [23].....	42
Obr. 37 Schéma selektivního spékání materiálu v práškovém loži [10]	43
Obr. 38 Ukázka velikosti součásti vytvořené MLS [43]	45
Obr. 39 Schéma technologie laser engineered net shaping (LENS) [32]	47
Obr. 40 DED technologie jako příslušenství CNC stroje [31]	48
Obr. 41 Součást vyrobená na hybridním stroji [14]	48
Obr. 42 Povrchová úprava [31]	48
Obr. 43 Schéma technologie laminování.....	50
Obr. 44 Dekorativní váza vytisknutá z papíru technologií LOM [37]	51