



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

APLIKACE PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ VE 3D TISKU

APPLICATION OF INDUSTRIAL ROBOTS IN 3D PRINT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Krůpa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Bražina

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Jiří Krůpa**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jakub Bražina**
Akademický rok: 2019/20

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

Aplikace průmyslových robotů ve 3D tisku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je rešeršního typu a je zaměřena na využitelnost průmyslových robotů ve 3D tisku. Tato práce bude sloužit jako podklad pro tvorbu 3D tiskové aplikace za použití robotů nacházejících se v dílně Ústavu výrobních strojů, systému a robotiky. V průběhu tvorby této práce se student seznámí s technologiemi 3D tisku a jejich aplikovatelnosti za použití průmyslových robotů.

Cíle bakalářské práce:

Analýza využití průmyslových robotů ve 3D tisku.

Porovnání robotického 3D tisku a konvenčních 3D tiskáren. Analýza využitelnosti robotického 3D tisku v praxi.

Analýza periférií (softwarových i hardwarových) nutných k robotickému 3D tisku technologií FDM. Vyhodnocení dosažených výsledků.

Závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

CHUA, Ch. K. a K. F. LEONG. 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. New Jersey: World Scientific, [2017]. ISBN 978-981-3146-76-1.

KOLÍBAL, Z. a kol.: Roboty a robotizované výrobní technologie. VUTIUM Brno, 2016, ISBN 978--214-4828-5.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je řešeršního charakteru a zabývá se problematikou aplikace průmyslových robotů ve 3D tisku, především technologií FDM. V úvodní části práce jsou popsány základní druhy aditivních technologií využitelných pro robotický 3D tisk. V další kapitole jsou popsány některé nekonvenční způsoby 3D tisku s využitím více než tří stupňů volnosti. V práci je také uvedeno porovnání konvenčních 3D tiskáren s robotickými manipulátory a posouzení vhodnosti robotů pro 3D tisk. V závěru práce jsou uvedeny potřebné hardwarové i softwarové periferie pro modifikaci robotického pracoviště k tisku technologií FDM. Jako příklad softwarové periferie byl pro tuto práci zvolen program společnosti ABB Robotstudio a v příslušné kapitole je popsán postup tvorby řídicího kódu. Tato práce také obsahuje návrh vlastní tiskové hlavy pro tisk technologií FDM.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the application of industrial robots in 3D printing, especially FDM technology. The introductory part of the thesis describes the basic types of additive technologies usable for robotic 3D printing. The next chapter describes some unconventional methods of 3D printing, using more than three degrees of freedom. The work also presents a comparison of conventional 3D printers with robotic manipulators and an assessment of the suitability of robots for 3D printing. At the end of the work are the necessary hardware and software peripherals for the modification of the robotic workstation for printing FDM technology. The ABB Robotstudio program was chosen as the software peripheral for the work example, and the procedure for creating the control code is described in the relevant chapter. This work also contains the design of printinghead for FDM technology.

KLÍČOVÁ SLOVA

Robotický 3D tisk, aditivní výroba, technologie FDM, víceprostorový tisk, vícesměrné ukládání

KEYWORDS

robotic 3D printing, robotic additive manufacturing, FDM technology, Multi-dimensional Printing, multi-direction deposition

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRŮPA, Jiří. *Aplikace průmyslových robotů ve 3D tisku* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124684>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jakub Bražina.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jakubu Bražinovi za pohotovou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval rodině a přítelkyni za podporu během mého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jakuba Bražiny a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne

.....

Krůpa Jiří

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	MOTIVACE	13
3	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ V OBLASTI ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ	15
3.1	Tisk plastů a kompozitních materiálů metodou FDM	15
3.1.1	Princip metody FDM	15
3.1.2	Tisknutelné materiály:	16
3.1.3	Vhodnost materiálu pro robotický 3D tisk.....	18
3.1.4	Podpůrné struktury.....	18
3.1.5	Anizotropní vlastnosti výtisků.....	19
3.2	Tisk kovů.....	20
3.3	Tisk betonů a keramických materiálů	21
3.4	Tisk potravin a dalších materiálů.....	21
4	ANALÝZA VYUŽITÍ ROBOTICKÉHO 3D TISKU	23
4.1	Stress Line Additive Manufacturing (SLAM).....	23
4.2	Bezpodporový 3D tisk	25
4.2.1	Natáčení tiskové hlavy	26
4.2.2	Natáčení tiskové podložky	27
4.2.3	Pohyblivá podložka i tisková hlava	30
4.3	Tisk nerovinným vrstvením materiálu	30
4.4	FrameFab.....	33
4.5	Tisk inspirován pavoučími vlákny.....	34
4.6	Velkorozměrový 3D tisk	35
4.7	Spolupráce více robotů na jednom projektu.....	37
5	POSOUZENÍ VHODNOSTI ROBOTŮ PRO APLIKACI VE 3D TISKU	39
5.1	Přesnost FDM tiskáren.....	39
5.1.1	Tiskárny kartézského typu	40
5.1.2	Tiskárny typu delta	41
5.1.3	Přesnost výtisku technologií FDM	42
5.2	Přesnost Robotů.....	42
5.2.1	Pojmy popisující přesnost robotů	43
5.2.2	Příklady robotů a jimi dosahované přesnosti	44
5.3	Porovnání konvenčního a robotického 3D tisku	44
5.4	Vhodnost robotů pro FDM tisk	45
6	POTŘEBNÉ PERIFÉRIE K ROBOTICKÉMU FDM 3D TISKU	47
6.1	Tisková hlava.....	47
6.2	Tisková podložka.....	49
6.3	Ovládání tiskové hlavy.....	50
6.4	Ostatní	50
7	TVORBA ŘÍDÍCÍHO KÓDU	51
8	ZHODNOCENÍ A DISKUZE.....	53
9	ZÁVĚR	55
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	57

11	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	63
11.1	Seznam tabulek.....	63
11.2	Seznam obrázků.....	63

1 ÚVOD

V současné době jsou téměř všechny výrobky kolem nás vyráběny konvenčními metodami. Jednotlivé výrobní stroje jsou často jednoúčelové a zvládnou pouze omezené množství výrobních kroků. Při návrhu výrobku je proto potřeba dbát na vyrobitelnost a tvarovou jednoduchost, která zaručuje co možná nejmenší množství výrobních kroků a operací. Výroba komplikovaných dílů vyžaduje speciální stroje a zařízení, dlouhé výrobní časy a skladovací prostory pro díly čekající na další technologický krok. Často také nelze součást vyrobit v jednom závodě a je potřeba jej převézt na nové pracoviště, kvůli čemuž opět rostou výrobní náklady. Finančně náročná je především kusová a malosériová výroba, u které se náklady rozdělí jen mezi malé množství vyrobených kusů. Cenová náročnost kusové výroby je nejpatrnější u výrobků, které se vyrábí metodami odlévání nebo vstřikováním. Cena potřebné formy je často velmi vysoká a má významný podíl na ceně výsledného produktu. Konvenční výrobní technologie tak často nestačí narůstajícímu tlaku na ekologii, úsporu materiálu a nižší výrobní náklady.

Novou a rozvíjející se oblastí je výroba součástí aditivními technologiemi, jednou z nich je i 3D tisk. V minulosti byly ceny 3D tiskáren vysoké a tím se prodražovaly i samotné díly tisknuté touto technologií. Postupem času se však technologie 3D tisku stává dostupnější a především přesnější, než tomu bylo v minulosti. V současné době lze tisknout ze široké škály kovových/nekovových materiálů a tím vyhovět požadavkům většiny zákazníků. Výhodou aditivních technologií je především vyrobitelnost prakticky jakkoliv náročného tvaru s potřebou pouze minima dokončovacích operací. Designéři tak mohou navrhovat výrobky bez zbytečných omezení a bez ohledu na vyrobitelnost konvenčními metodami obrábění. Technologie 3D tisku je také ideální pro rychlé prototypování. V relativně krátkém čase tak mohou být zhmotněny představy zákazníka, a to v reálné velikosti, nebo případně v měřítku.

Konvenční 3D tiskové technologie však umožňují tisk pouze v rovinných horizontálních vrstvách a to kvůli své rámové konstrukci, která umožňuje tiskové hlavě pouze translační pohyby. Při tisku převislých objemů proto musí být využíváno technologických podpor. Využitím robotického manipulátoru jako nosiče tiskové hlavy by bylo možné odstranit některé omezující vlastnosti konvenčních 3D tiskáren, jako například striktně horizontální vrstvení materiálu, potlačení anizotropních vlastností vytištěných součástí, nebo by bylo možné zvětšit tiskovou plochu.

V této bakalářské práci je tedy podrobněji popsána problematika robotického 3D tisku, její možnosti, aplikace a potřebné hardwarové i softwarové požadavky.

2 MOTIVACE

Tato práce byla vytvořena, jako podklad pro vznikající 3D tiskové pracoviště s využitím robotického manipulátoru na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky VUT v Brně. Práce poukazuje na nové tiskové strategie, které lze realizovat s využitím robotického ramene jako nosiče tiskové hlavy, a shrnuje současný stav poznání v této rychle se rozvíjející oblasti. Informace a odkazy na zajímavé články, které jsou shrnuty v této bakalářské práci by měly poskytnout dostatek informací pro tvorbu vlastního robotizovaného 3D tiskového pracoviště.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ V OBLASTI ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ

Jako aditivní technologii lze označit takovou metodu výroby, při které je výrobek vytvářen přidáváním materiálu, nikoliv jeho odebráním, jako je tomu u běžného obrábění. Materiály jako termoplast, vosk, ocel či keramika jsou nanášeny v tenkých vrstvách, které jsou následně vytvrzovány způsobem, který odpovídá zvolené aditivní technologii. Při výrobě je vstupem CAD model, tento model je pomocí CAM systému rozřezán a upraven na jednotlivé tiskové vrstvy. Následně je vygenerován G-kód, pomocí kterého je stroj řízen [1].

Popis a rozdělení aditivních technologií podle použitého materiálu

V současné době, existuje celá řada aditivních technologií. Odlišují se od sebe způsobem nanášení jednotlivých vrstev, zdrojem energie, použitými materiály, způsobem dodávání materiálu do místa depozice atd. Podle těchto charakteristik existuje mnoho způsobů dělení aditivních technologií. Pro účely této práce jsem zvolil nejobecnější způsob.

Dělení aditivních technologií podle použitého materiálu:

1. tisk plastů a kompozitních materiálů
2. tisk kovů
3. tisk betonů a keramických materiálů
4. tisk potravin a dalších materiálů [2]

Jednotlivé metody si vyžadují především rozdílnou konstrukci tiskové hlavy a často i odlišný přístup při programování trajektorie tisku. V následujících podkapitolách jsou výše uvedené kategorie podrobněji popsány, případně jsou dále děleny podle použitých technologií.

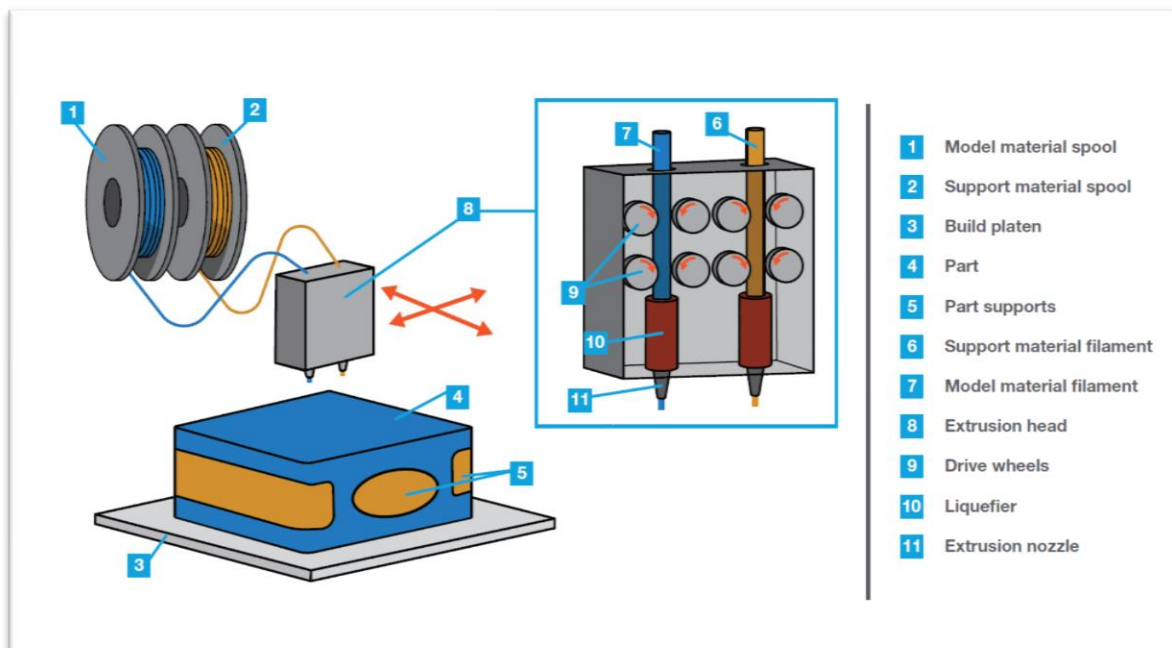
3.1 Tisk plastů a kompozitních materiálů metodou FDM

Tisk plastů a kompozitních materiálů může být realizován různými technologiemi, jako jsou například Selective Laser Sintering (SLS) nebo Laminated Object Manufacturing. Tyto a další technologie tisku jsou založeny na principu horizontálního přidávání materiálu, a proto stačí když tiskové zařízení disponuje pouze třemi stupni volnosti a umožňuje translační pohyb ve třech základních osách. Využití robotického ramene jako nosiče tiskové hlavy (případně vytvrzujícího laseru) by bylo zbytečné, protože by nebylo možné smysluplně využít 6 stupňů volnosti, které robotické rameno poskytuje. Výjimkou je však metoda FDM, kde využití robotického ramene dává technologii nové možnosti. Proto pro tisk plastů a kompozitních materiálů bude v práci dále uvažována pouze technologie FDM.

3.1.1 Princip metody FDM

FDM (Fused Deposition Modeling) funguje na principu extruze materiálu ve formě tenkých vláken. Poloroztavený materiál je tryskou vytlačován do místa depozice a ukládán na tiskovou plochu. Po dokončení vrstvy se tryska vzdálí od tiskové podložky o výšku jedné vrstvy a poté se začne tisknout nová vrstva. Výsledný model vzniká postupným skládáním těchto vrstev [3].

Tloušťka vrstvy se obvykle pohybuje mezi 0.05 až 0.5 mm dle nastavení uživatele. Čím nižší je výška vrstvy tím lepší je přesnost a kvalita povrchu tištěné součásti. Při tisku příliš tenkých vrstev však dochází k nežádoucímu natavení již vytištěné struktury, a proto je v současnosti minimální možná výška vrstvy 0.05 mm. Tiskovým materiálem jsou nejčastěji termoplasty ve formě drátu (filament) s přesně definovaným průměrem. Nejčastěji využívanými průměry filamentu jsou v praxi 1.75 a 2.85 mm. Při tisku převislých ploch jsou současně s modelem tisknuty i podpory. Pokud se jedná o rozpustitelné podpory z odlišného materiálu, než je zbytek součásti, je tisková hlava vybavena dvěma tryskami (viz. Obr. 3-1) [3] [4].



Obr. 3-1 Schéma tiskové technologie FDM [3]

3.1.2 Tisknutelné materiály:

Technologie FDM má širokou škálu tisknutelných materiálů. Jejich volbou můžeme ovlivnit nejen mechanické vlastnosti součásti, ale také vzhled a kvalitu tištěného povrchu. V následujícím výběru jsou uvedeny některé z běžně dostupných materiálů a jejich vlastnosti:

a) PLA

Tento polymerní materiál je pro 3D tisk nejvíce využívaný díky své snadné dostupnosti, snadnému tisku a dobré tvrdosti vytištěných modelů. Pro tisk nejsou vyžadovány vysoké teploty a větší výtisky lze tisknout na nevyhřívané podložce díky malé smrštitivosti [5].

Nevýhodami tohoto materiálu jsou nízká teplotní odolnost (přibližně kolem 60 °C) a nízká odolnost vůči UV záření, kvůli čemuž materiál špatně odolává slunečnímu paprskům. Materiál je možné, na rozdíl od reaktoplastů, opakovaně zahřívat přes hranici jeho teploty tání s velmi malou degradací materiálu [5].

Modifikace tohoto materiálu nazývaná PLA HD, nebo také PLA PRO, odstraňuje některé nevýhody běžného PLA, zejména jeho teplotní odolnost. Po vytvrzení v peci pak může model odolávat teplotám až 150 °C [5].

Materiál PLA je nejvhodnější pro tisk konceptů, prototypů, hraček apod [5].

b) ABS

Je materiál s výbornou tepelnou odolností (bez známek deformace až do 98 °C), který vykazuje také velmi vysokou pevnost. Díky tomu je velmi všestranný a je vhodný pro vnitřní i venkovní použití. Pro představu například kostky LEGO jsou vyrobeny z ABS [5].

Stejně jako PLA i ABS je termoplast a lze jej proto opakovaně roztavit a rekrystalizovat, aniž by došlo k znehodnocení materiálu. Filament ABS je rozpustný v acetonu, díky čemuž lze (po potření stykových ploch acetonem) snadno spojit více výtisků dohromady. Dále pomocí acetonu můžeme vyhradit povrch součástí získat tak dokonale hladký povrch (viz. Obr. 3-2) [5].

Nevýhodou je větší smršťivost a potřeba vyšších teplot při tisku [5].



Obr. 3-2 příklad vyhlazeného povrchu pomocí acetonu [5]

c) ASA

Tento materiál byl vyvinut, jako alternativa k ABS. ASA se vyznačuje vyšší odolností proti povětrnostním podmínkám a lepší odolností vůči UV záření. Pro venkovní aplikace je proto tento materiál vhodnější. Dále ASA netrpí tak velikou teplotní roztažností jako ABS a je také více teplotně stálý [5].

Nevýhodou je však vyšší pořizovací cena filamentu a také uvolňování zdraví škodlivých materiálů při extruzi. [5].

Stejně jako ABS je materiál ASA pro své dobré mechanické vlastnosti široce využíván v automobilním průmyslu [5].

d) ULTEM 9085

Tento materiál má jedny z nejlepších mechanických vlastností. Má dobrou chemickou odolnost a také dobře odolává hoření a přímému plameni. Materiál splňuje přísné hodnocení FST (flame, smoke, toxicity). Podobně jako ASA také dobře odolává UV záření a je proto vhodný pro venkovní využití. Oproti materiálu ABS má ULTEM 9085 až dvakrát větší pevnost v tahu a v ohybu [3].

Materiál je vhodný pro kosmický, letecký a automobilový průmyslu případně vojenské aplikace [3].

e) Kompozitní materiály

Kompozitní materiály jsou založené na hlavní plastové složce, ve které je sekundární složka ve formě prachu a drobných částecí. Vzniklé kompozitní materiály pak podle sekundární složky nazýváme například: woodfill, copperfill, bronzefill, karbonové nebo aramidové kompozitní materiály. Parametry tisku jako jsou teplota, rychlost depozice a úprava tiskového pracoviště se poté u jednotlivých materiálů mohou lišit v závislosti na použitém plastovém základu. V průběhu tisku je potřeba udržovat teplotu okolí nad hodnotou 120 °C, a proto musí být tisk prováděn ve vyhřívané komoře. V závislosti na použité sekundární složce materiál získává specifické vlastnosti, jako jsou korozivzdornost, žáruvzdornost, žárupevnost [5].

Potřebné tiskové teploty jednotlivých materiálů jsou uvedeny v tabulce 1).

Tab 1) Materiály a jejich teploty při tisku [5] [3]

MATERIÁL	TEPLOTA TRYSKY [°C]	TEPLOTA PODLOŽKY [°C]
PLA	215	50-60
ABS	255	100
ASA	270-280	100-110
ULTEM 9085	350-380	140-180
KOMPOZITY	190-210	50-70
PETG	250	80

3.1.3 Vhodnost materiálu pro robotický 3D tisk

Vhodnými materiály pro robotický FDM tisk mohou být všechny z výše uvedených materiálu, záleží však na způsobu využití tištěné součásti.

Materiál PLA se hodí především pro rychlé prototypování součástí díky snadné dostupnosti, jednoduchému tisku a možnosti materiál recyklovat a znovu použít.

Pro součásti, u kterých bychom vyžadovali lesklý a hladký povrchu, jako například modely pro odlitky, je vhodné využít materiál ABS a vyhladit povrch výpary acetonu.

Výtisky, které by po dokončení sloužily jako finální produkt a musely by odolávat přírodním vlivům a větším silovým působením, je vhodné vyrobit z materiálu ASA.

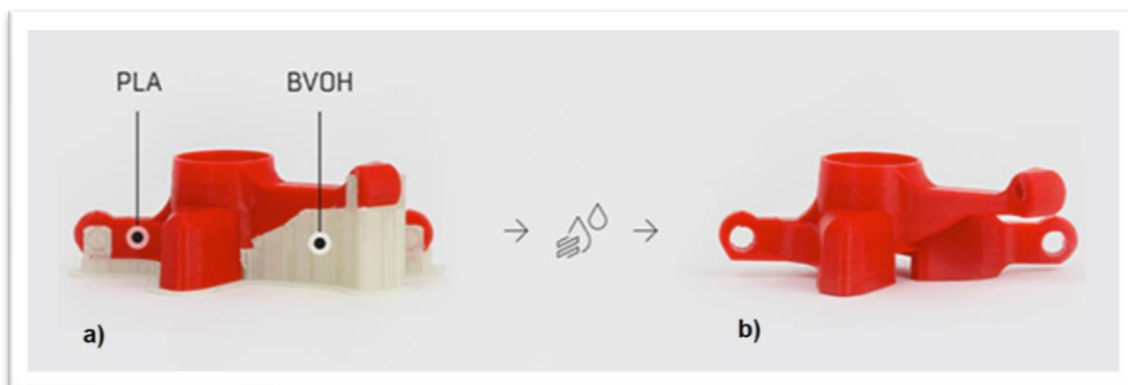
Pro docílení vysoké odolnosti tištěných součástí je vhodné využít materiály ULTEM, případně kompozitní materiály, které se svými mechanickými vlastnostmi blíží třískově obráběným kovovým součástem. Při tisku z materiálu ULTEM je však potřeba zajistit vyhřívanou komoru, což může být při robotickém 3D tisku komplikované.

3.1.4 Podpůrné struktury

Podpory se využívají při tisku, pokud je úhel převisu tištěného objemu menší než úhel kritický. Podpůrné struktury jsou vždy tisknuty zároveň s hlavní součástí a zajišťují polohu tištěné vrstvy

v daném místě. Technologie FDM totiž neumožňuje tisknout materiál volně do prostoru a je potřeba vždy zajistit dosedací plochu nově vznikající vrstvě (viz. Obr.3-3 a) [6].

Podpory jsou často zhotoveny ze stejného materiálu, jako je celá součást, v takovém případě je potřeba podpory odstranit mechanicky. Další možností jsou rozpustitelné podpory, které je možné rozložit ponořením do speciálních roztoků (viz. Obr. 3-3 b) Některé z nich však lze rozpustit i ve vodě z kohoutku [6].



Obr. 3-3 součást a) s podporami, b) očištěná a bez podpůrných struktur [6]

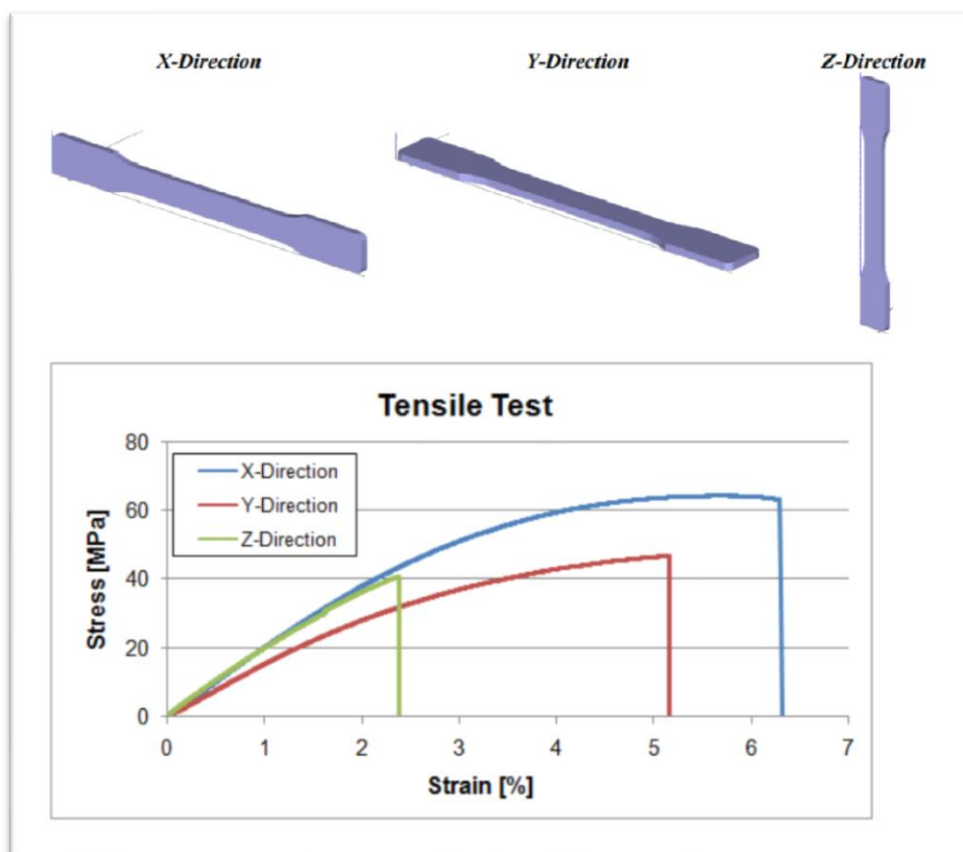
Materiálů pro rozpustné podpory je několik druhů a každý z nich se hodí k jinému primárnímu materiálu. Při tisku z ABS je vhodné pro podpory použít HIPS, který je rozpustný v Limonenu ($C_{10}H_{16}$), a pro PLA je vhodným společníkem BVOH. Pro rozpuštění podpor z materiálu BVOH stačí pouhá voda. Rozpustitelné podpory umožňují tisk prakticky libovolně složité geometrie a jsou vhodné také pro tisk jednodušších mechanismů. Nevýhodou je však nutnost mít tiskárnu, která má tiskovou hlavu uzpůsobenou pro tisk více materiálu najednou. Příklad takové tiskové hlavy je na obrázku 3-1 [6].

3.1.5 Anizotropní vlastnosti výtisků

„Anizotropie je vlastnost, kterou se označuje závislost určité veličiny na volbě směru.“ Anizotropní materiál je takový, který vykazuje rozdílné mechanické vlastnosti při působení stejně velké síly v různých směrech [7].

Anizotropní vlastnosti u modelů vytisknutých technologií FDM jsou způsobeny ukládáním materiálu ve vrstvách. Pevnost spojů mezi jednotlivými vrstvami (v ose Z) je vždy nižší než pevnost ve směru tiskové roviny (osy X, Y). Proto má model v jednotlivých osách rozdílnou mez pevnosti v tahu. Životnost silově namáhaných součástí tak lze významně ovlivnit orientací při tisku a jejich geometrií (viz. Obr. 3-4). Při návrhu součástí je také vhodné vyvarovat se malým otvorům a ostrým hranám, které by mohl působit jako koncentrátoři napětí [3].

Anizotropních vlastností využívá technologie robotického tisku SLAM, která bude podrobněji popsána v kapitole 4.1.



Obr. 3-4 graf závislosti meze pevnosti v tahu na orientaci tištěného modelu [8]

3.2 Tisk kovů

Technologie pro aditivní výrobu existují již téměř 40 let. Těmi prvními byly: stereolithography (SL), fused deposition modeling (FDM) a laminated object manufacturing (LOM). Nejčastěji však byly využívány pro rychlé prototypování, a ne pro výrobu finálního plně funkčního dílu. Postupně se technologie vyvíjely a rozšířil se sortiment tisknutelných materiálů, díky čemuž je nyní možné tisknout objekty, které svými vlastnostmi odpovídají požadovaným tvarovým, materiálovým a mechanickým specifikacím. Z Rapid Prototyping se tak stal Rapid Manufacturing. [9].

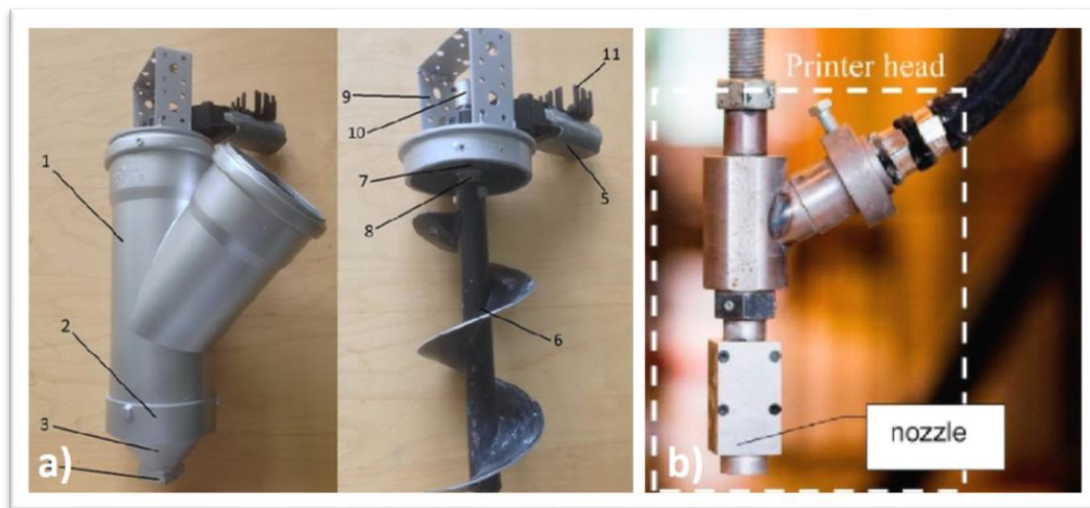
Podle způsobu depozice materiálu se aditivní technologie tisku kovů dělí na:

- Powder bed system
- Direct metal deposition (Powder feed system)
- Wire feed system [10]
- Cold spray

Výše zmíněné technologie je vhodné aplikovat pro robotický 3D tisk s výjimkou *Powder bed systemu*. Technologie je založena na principu práškového lože, které je obnovováno po laserovém vytvrzení tištěné vrstvy. Tisk probíhá v ochranné atmosféře na relativně malé ploše, a proto u této technologie není vhodné robotický 3D tisk aplikovat.

3.3 Tisk betonů a keramických materiálů

Dalšími materiály, které lze pro aditivní výrobu využít jsou různé druhy betonů a keramik. Polotekutý materiál prochází tryskou a při kontaktu se vzduchem dochází k tuhnutí. Tisková hlava může být buď aktivní (viz. Obr 3-5. a), nebo pasivní (viz. Obr. 3-5 b) [15].

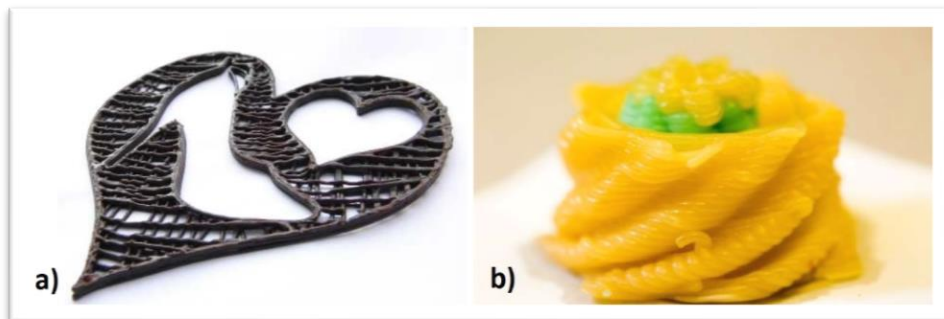


Obr. 3-5 a) Aktivní tisková hlava [16], b) pasivní tisková hlava [17]

Tisk s využitím robotického ramene má oproti běžnému rámovému řešení menší tiskovou plochu a omezenou nosnost, která se se vzdáleností od základny snižuje. Robot však umožňuje naklánění tiskové hlavy, což může být v některých případech výhodné [15]. Robotické rameno je tedy vhodné především při tisku menších a tvarově složitějších modelů, jako jsou vázy nebo zahradní nábytek. Při tisku není potřeba takové polohovací přesnosti tiskové hlavy, jako je tomu u jiných aditivních technologií. Proto lze pro tisk betonu využít i straší a méně přesné roboty.

3.4 Tisk potravin a dalších materiálů

Novou potencionální oblastí využití aditivních technologií je gastronomie. Numericky řízený extruder dokáže zdobit dorty, vytvářet čokoládové kresby nebo vrstvením materiálu vytvářet konzumovatelná umělecká díla. Zatím existuje přibližně šest druhů tisknutelných materiálů. Příklady pokrmů zhotovených pomocí 3D tisku jsou na obrázku 3-6 [19].



Obr. 3-6 Příklady pokrmů z 3D tiskárny: a) čokoládové srdce [20], b) pokrm z práškové pasty [21]

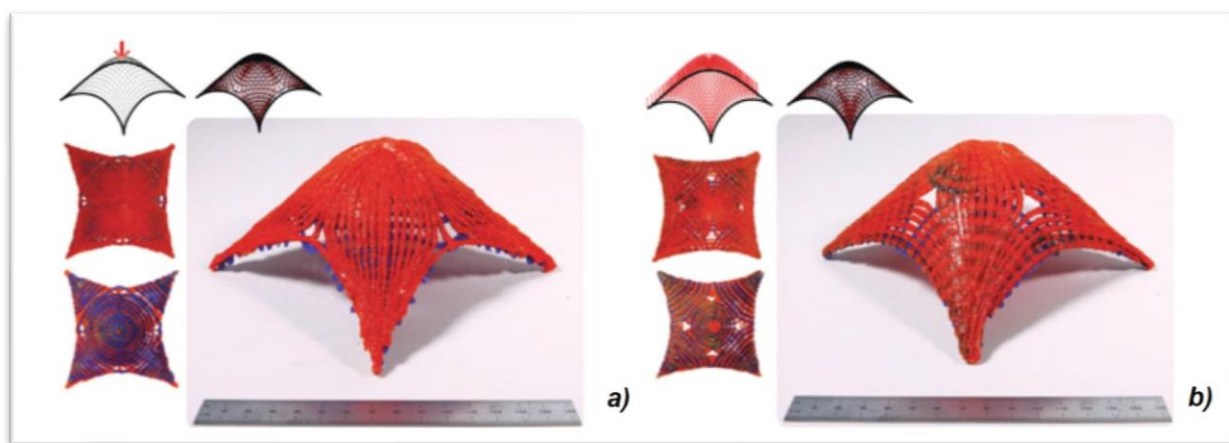
Dalšími možnými materiálu pro 3D tisk jsou takzvané biokompatibilní materiály nebo laboratorní buňky. Pomocí těchto materiálu jsou vědci a lékaři schopni vytisknout nejen zubní náhrady a umělé srdeční chlopně, ale také živé tkáně [22].

4 ANALÝZA VYUŽITÍ ROBOTICKÉHO 3D TISKU

Při konvenčním 3D tisku je tiskové hlavě umožněn pouze translační pohyb ve třech základních osách a celkový tiskový prostor je vlivem rámové konstrukce poměrně omezen. Užitím robotického ramene se šesti stupni volnosti mají inženýři a vývojáři nové možnosti při vývoji 3D tiskových metod. V této kapitole jsou uvedeny některé z nich.

4.1 Stress Line Additive Manufacturing (SLAM)

Tato metoda FDM tisku je zaměřena na tisk vysoce kvalitních a efektivně tištěných 2.5D struktur (povrchů). Vhodnou volbou orientace tištěných vláken je docíleno zvýšené pevnosti a tažnosti součástí. Vláknina jsou orientována ve směru působícího napětí v materiálu a součást poté lépe odolává vnějšímu silovému působení. Tahová kapacita vzorku zatíženého kolmo k orientaci vlákna může být až o 50 % slabší než u vzorku, který je zatížen ve směru orientace vláken [23].



Obr. 4-1 Vytisknutá struktura s viditelnými napěťovými křivkami pro: a) bodové silové působení, b) plošné silové působení [23]

Tým z Massachusetts Institute of Technology, Cambridge v USA, který stojí za vývojem metody SLAM, využíval pro tvorbu 3D modelu software Rhinoceros a pro určení průběhu napětí ve struktuře použili softwarové doplňky Grasshopper, Karamba. Průběh napětí je potřeba určit pro konkrétní součást. Podle vstupních hodnot jsou poté vygenerovány napěťové křivky (viz. Obr. 4-1 a, b). Podle těchto křivek jsou následně vytvořeny dráhy pohybu, kterými se řídí robotické rameno s tiskovou hlavou [23].



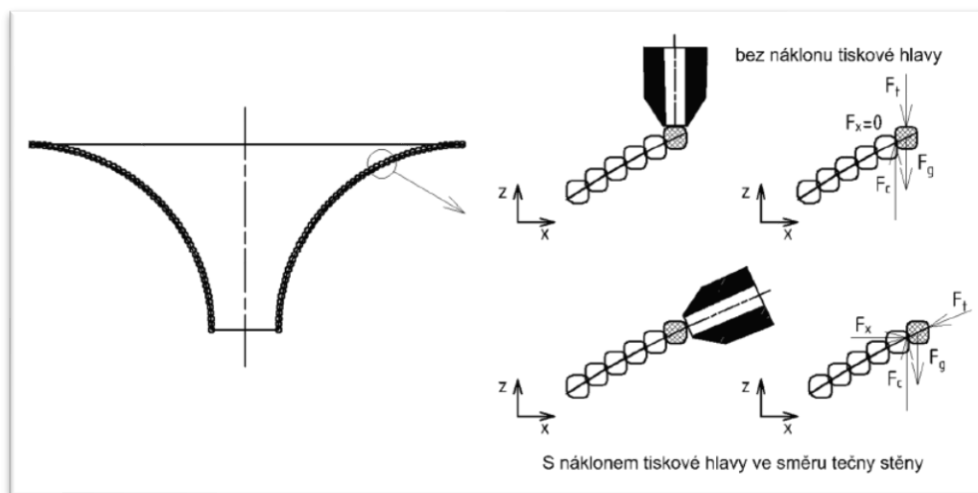
Obr. 4-2 Model pracoviště SLAM [23]

Při tisku je základem předem vyfrézovaná tisková plocha, například z dřevovláknitého materiálu (MDF), na který jsou nanášeny vrstvy tištěných vláken. Příklad frézované tiskové plochy je vidět na obrázku 2). Tisková plocha je pomocná a po dokončení tisku se odstraní, vytištěná konstrukce je poté samonosná. Jelikož se tisk řídí průběhem napěťových křivek, nelze vždy materiál nanášet v horizontálních vrstvách, a proto není možné využít konvenčních 3D tiskových metod. Je proto vhodné využít robotické rameno, které díky šesti stupňům volnosti může při tisku kopírovat i tvarově složité plochy a vést tištěný materiál po napěťových křivkách (viz. Obr. 4-2). Pro tisk je vhodné použít materiál PLA pro jeho adhezní schopnosti k MDF a pro jeho schopnost přilnout k nevyhřívaným povrchům [23].

Testováním bylo potvrzeno, že tato metoda překonává konvenční tiskové metody, které jsou založeny na tisku ve vrstvách v jedné ose, především zvýšenou pevností a lepšími mechanickými vlastnostmi [23].

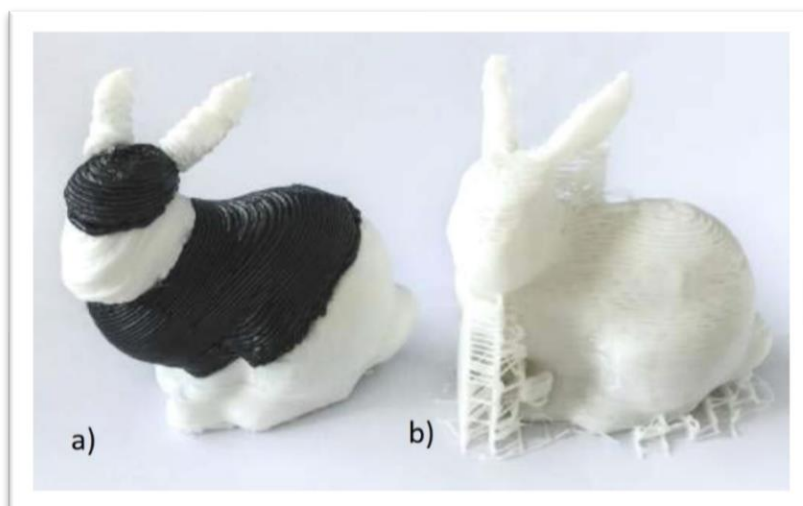
4.2 Bezpodporový 3D tisk

Během procesu tisku je poloroztavený materiál vytlačován z extruderu a ukládán do vrstvy ve směru působení gravitační síly. Pokud není tištěné vrstvě zajištěna dostatečná podpora vrstvou předchozí, může se nanášené vlákno před ztuhnutím pod vlastní vahou deformovat [24]. V kritických případech může dojít až k oddělení vlákna od struktury a vznikají tak vady povrchu součástí. Když je při tisku skloněných a převislých prvků úhel sklonu menší než úhel kritický, je třeba využít podpůrné struktury. Tyto struktury využívá většina konvenčních aditivních technologií, aby zajistily pevný podklad pro tisk nových vrstev. Na druhou stranu je lepší se podpůrným strukturám vyvarovat, protože jejich použitím se prodlužuje tiskový čas, dochází k plýtvání materiálem a po dokončení tisku je potřeba dalšími technologickými kroky tyto podpory odstranit [25].



Obr. 4-3 Rozbor silového působení na vlákno při tisku převisu [26]

Konvenční systémy se třemi stupni volnosti nejsou schopny poskytnout potřebnou obratnost, aby bylo možné se použití podpor vyhnout. Přidáním dalších stupňů volnosti je sestavě umožněno polohovat tiskovou hlavu vzhledem k tiskové podložce pod jinými než devadesátistupňovými úhly, díky čemuž může extruder lépe kopírovat již vytištěné plochy [24]. Takovéto metody se v anglické literatuře nazývají „multi-direction deposition“. Při tisku převislých ploch a objemů to znamená, že tiskovou hlavu lze nasměrovat tak, aby byla natočena ve směru vznikajícího převisu. Díky tomu se pozitivně změní silové působení mezi extruderem a vytištěným tělesem (viz. Obr. 4-3) [26].



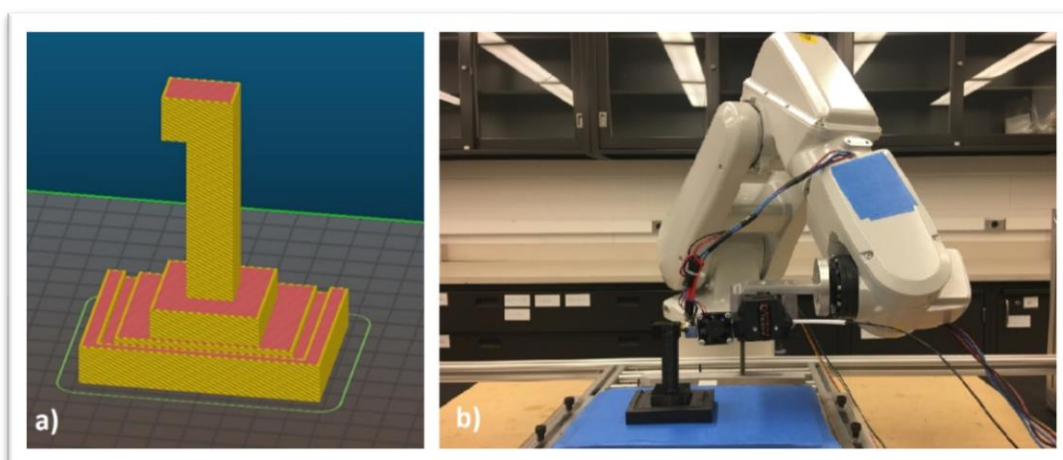
Obr. 4-4 Model králíka vytisknut a) bezpodporovou tiskovou metodou, b) konvenčním tiskem za pomoci technologických podpor [27]

Na modelu králíka jsou vidět oblasti, kde je úhel sklonu stěny menší než úhel kritický, a proto při tisku konvenční metodou bylo potřeba využít technologických podpor, které byly tisknuty současně s ostatními vrstvami (Obr. 4-4 b). Levý model (Obr. 4-4 a) byl vytisknut bezpodporovou metodou (konkrétně RoboFDM). Z reliéfu na povrchu modelu jsou patrné změny natočení tiskové roviny v průběhu tisku [27] [24].

Natáčení tiskové plochy vzhledem k extruderu může být zprostředkováno několika způsoby: natáčením tiskové hlavy, natáčením tiskové podložky, případně jejich kombinací. Rozdíly v těchto metodách budou rozebrány v následujících podkapitolách.

4.2.1 Natáčení tiskové hlavy

Jedná se o nejběžnější způsob, jak při bezpodporovém tisku zprostředkovat ideální úhel mezi tištěnou plochou a extruderem. Tisková plocha je nehybná a robotické rameno osazené tiskovou hlavou vykonává všechny potřebné pohyby. Na obrázku 4-5 je vidět příklad součásti s převislým objemem a její tisk pomocí robotického ramene [25].

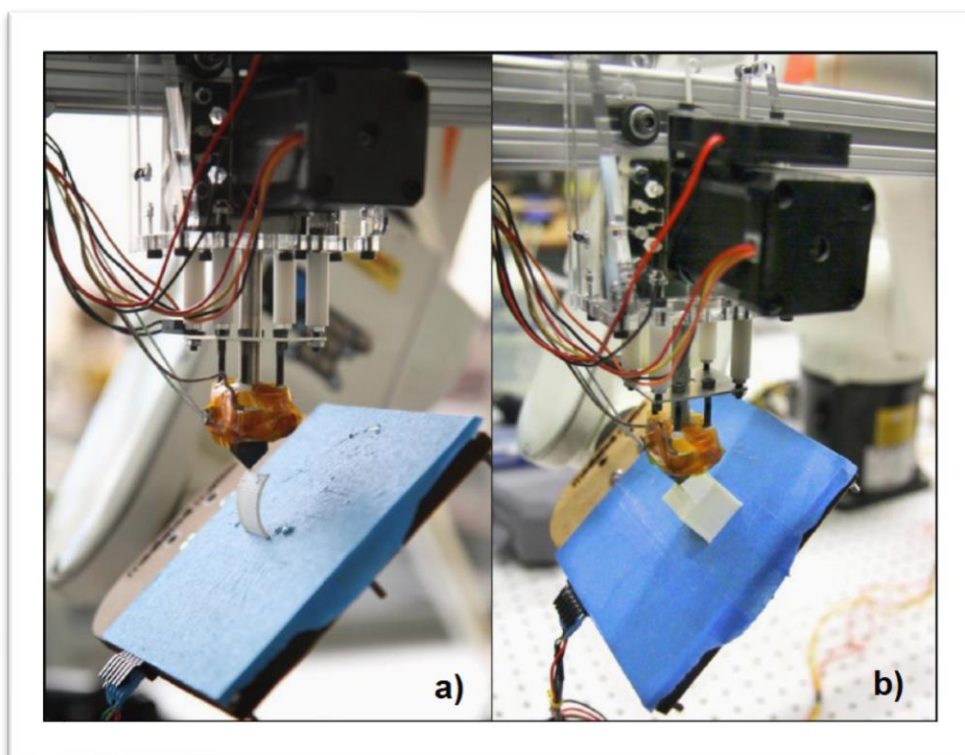


Obr. 4-5 a) tištěná součást s převísem, b) pracoviště při bezpodporovém tisku [25]

Tisková plocha nemusí být umístěna pouze ve vodorovné poloze. Jejím umístěním do jiných než vodorovných poloh, může být díky lepšímu silovému působení docíleno kvalitnějších výtisků [26]. Možnosti robotického ramene však nejsou neomezené a je potřeba zajistit, aby nedošlo ke kolizi části robotu s tištěnou součástí nebo s okolním prostorem. Proto je potřeba při tvorbě trajektorie zvolit vhodnou konfiguraci ramene na základě vyřešené inverzní úlohy. Je třeba také zohlednit velikost úhlu obálkového kužele kolem tiskové hlavy [25].

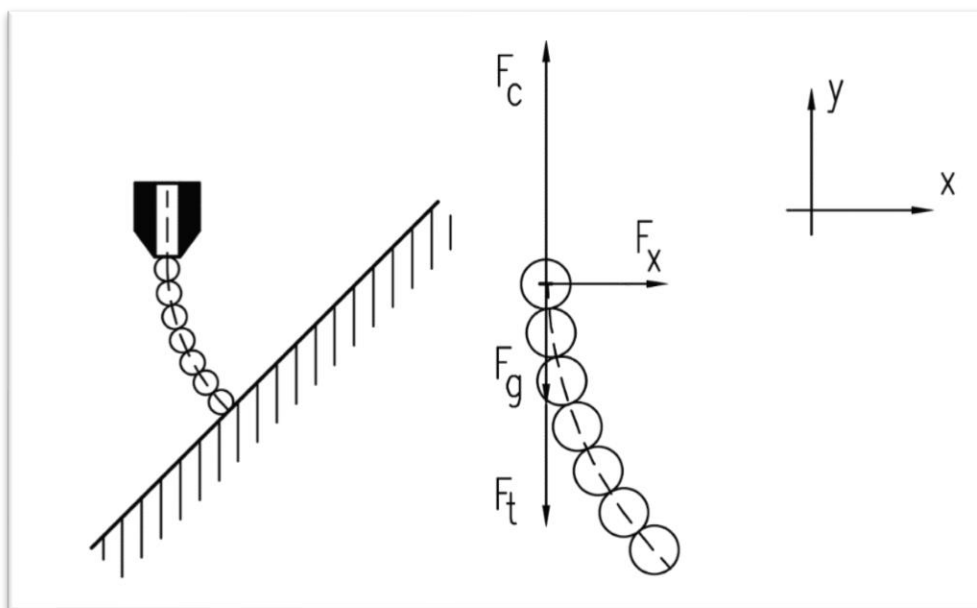
4.2.2 Natáčení tiskové podložky

Dalším přístupem při využití robotického ramene pro 3D tisk je „pohyblivá tisková podložka vzhledem k fixně uloženému extruderu“. Tisková plocha je usazena na konci robotického ramene. Rameno při tisku pak zajišťuje všechny potřebné pohyby. Oproti tomu tisková hlava je pevně uchycena k nehybné a dostatečně tuhé rámové konstrukci. Princip technologie je zachycen na ilustračních fotografiích (Obr. 4-6 a, b).



Obr. 4-6 Robotický tisk a) přehledu, b) horní stěny duté kostičky [28]

Při použití této metody dochází při tisku k rozdílnému rozložení působících sil než v předchozím případě. Natočení tiskové hlavy ve směru vznikajícího přehledu totiž není zajištěno pohybem tiskové hlavy, ale natočením podložky. Díky tomu jsou všechny síly mezi extruderem a vytisknutou součástí na jedné ose. Výslednice sil pak působí do vytištěného materiálu, díky čemuž je možné se vyhnout použití technologických podpor (viz. Obr. 4-7). Úhel natočení tiskové podložky je však omezen, aby nedošlo ke kolizi mezi extruderem a podložkou, případně mezi extruderem a vytištěnou součástí. Maximální hodnota natočení podložky je stanovena s ohledem na velikost obálkového kužele kolem tiskové hlavy [28].



Obr. 4-7 Silové působení při tisku převislého objemu (inspirováno obrázkem z [26])

Výpočet silového působení s předpokladem silové rovnováhy:

$$F_c = F_g + F_t$$

$$F_x = 0 \text{ N}$$

kde:

F_c – výsledná síla působící v kontaktu [N]

F_g – gravitační síla působící na tištěné vlákno [N]

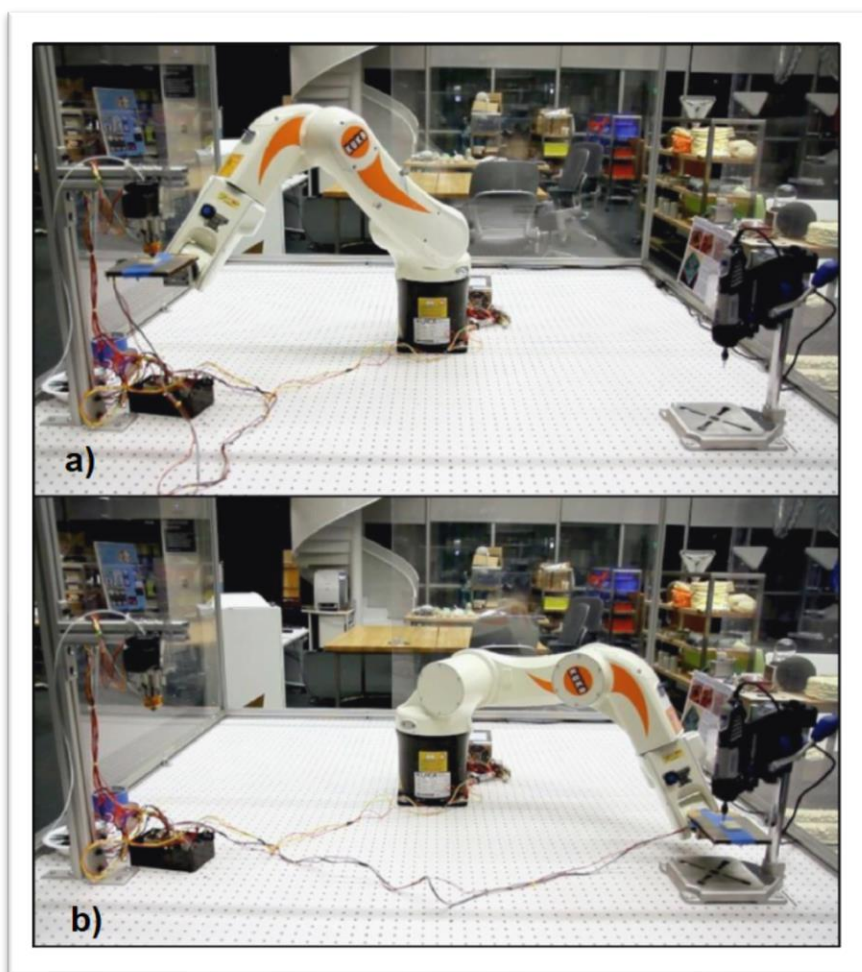
F_t – síla vyvolaná tlakem z tiskové hlavy [N]

F_x – výslednice sil ve směru osy x [N] [26]

Tato pracovní konfigurace s využitím robotického ramene umožňuje po dokončení tisku plynulé přemístění součásti k dalšímu pracovišti, kde lze pokračovat na dalších technologických krocích výroby (viz. Obr. 4-8 a, b). Součást má po celou dobu výrobního procesu jeden souřadný systém, který si nese s sebou mezi jednotlivými pracovišti. Odpadá proto potřeba opakované kalibrace a zaměřování součásti [28].

Vytištěná součást pak může být s platformou přesunuta například na:

- kontrolní pracoviště (kontrola funkčních rozměrů a drsnosti povrchu)
- frézovací pracoviště
- lakovnu (nanášení barev a laků na povrch součásti)



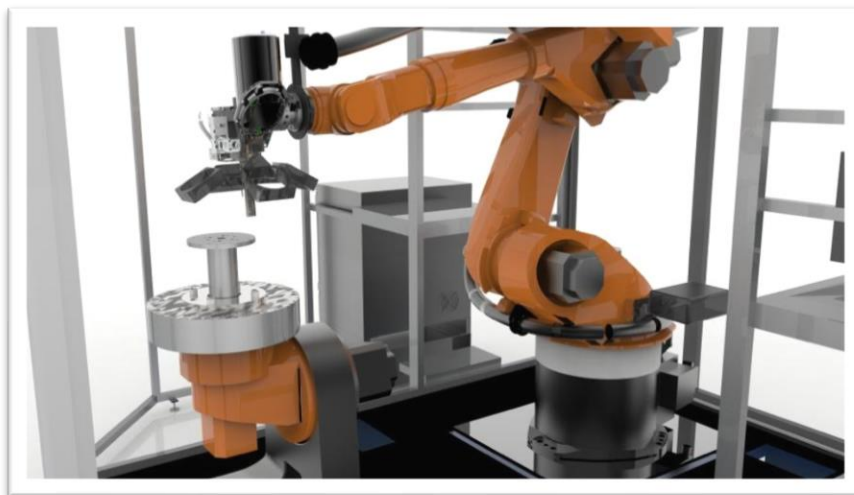
Obr. 4-8 Přemístění tiskové platformy mezi a) tiskovým a b) frézovacím pracovištěm [28]

Tato metoda je vhodná pro výtisky menších velikostí vzhledem k omezeným rozměrům tiskové plochy a kvůli rámové konstrukci, která drží tiskovou hlavu. Jako tiskovou podložku je vhodné využít takovou, která umožňuje výhřev tiskové plochy. Tím jsou zajištěny lepší adhezivní vlastnosti stykových ploch a výsledná soudržnost tištěné součásti k podložce je větší. Silové působení u případných dalších technologických kroků (jako například frézování, vrtání) by mělo být co nejmenší, aby nedošlo k odlepení součásti od podložky [28].

Metodu by bylo možné využít i pro opravy již existujících modelů. Robot by byl namísto tiskové plochy vybaven čelistmi, které by zajistily přesné ustavení modelu. Po dotisknutí chybějící části by se pak model (je-li to možné) mohl přesunout na další dokončovací pracoviště stejně jako v předchozím případě. Nevýhodou tohoto přístupu je potřeba specifických čelistí pro opravované modely.

4.2.3 Pohyblivá podložka i tisková hlava

Tato tisková strategie je kombinací dvou předchozích možností. Umožňuje řízený pohyb tiskové hlavy a zároveň také podložce. Většinou se jedná o spolupráci primárního robotického manipulátoru se šesti stupni volnosti s dalším robotem. Kooperující robot může být buď totožný s primárním, nebo se může jednat o jednodušší manipulátor s méně než šesti stupni volnosti, jako je vidět na obrázku 4-9. Primární robot je osazen tiskovou hlavou a sekundární robot je vybaven tiskovou plochou [29].

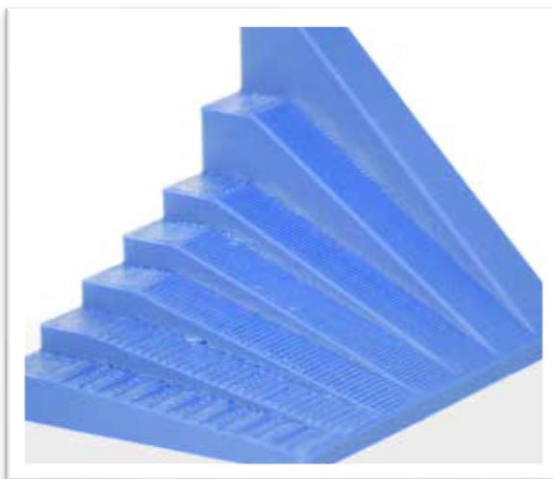


Obr. 4-9 Pracoviště zařízení Stratasys Robotic Composite 3D [30]

Přídavná robotická platforma může tištěné díly během tisku otáčet a prisouvat dle potřeby. Díky tomu tisková hlava dosáhne i do jinak nepřístupných míst. Pohyby sekundárního robotu lze přeorientovat tištěnou součást tak, že vliv gravitační síly není tak významný a lze tak bez použití technologických podpor tisknout převyslé objemy [29] [26]. Tato konfigurace je vhodná především pro komplexní rotační součásti, jako jsou například lopatkové rotory.

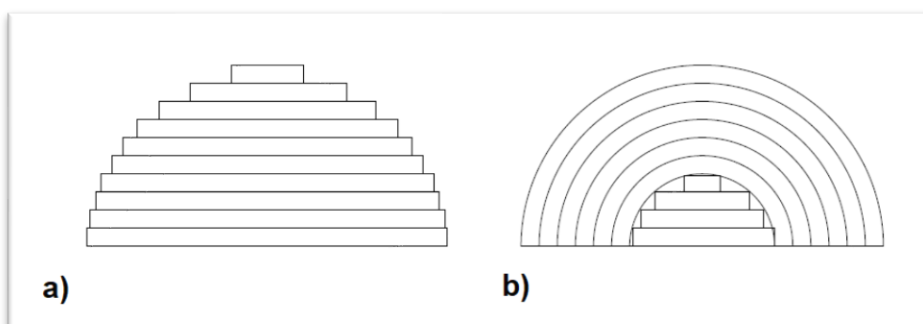
4.3 Tisk nerovinným vrstvením materiálu

Většina 3D tiskových technologií pracuje na způsobu rovinného vrstvení materiálu (viz. Obr. 4-11 a). Tento způsob je velmi praktický a jednoduchý především pro tvorbu řídicího G-kódu. Výsledný model je charakteristický svými anizotropními vlastnostmi a horší kvalitou povrchu při malých úhlech stoupání. Zhoršená kvalita povrchu je způsobena vznikem schodovité struktury na povrchu součásti. Schodovitý efekt v závislosti na úhlu stoupání je dobře patrný na modelové součásti (viz. Obr. 4-10). Nastavením menší výšky tištěné vrstvy lze schodovitý efekt částečně odstranit, výrazně se tím však zvýší celkový tiskový čas [31].



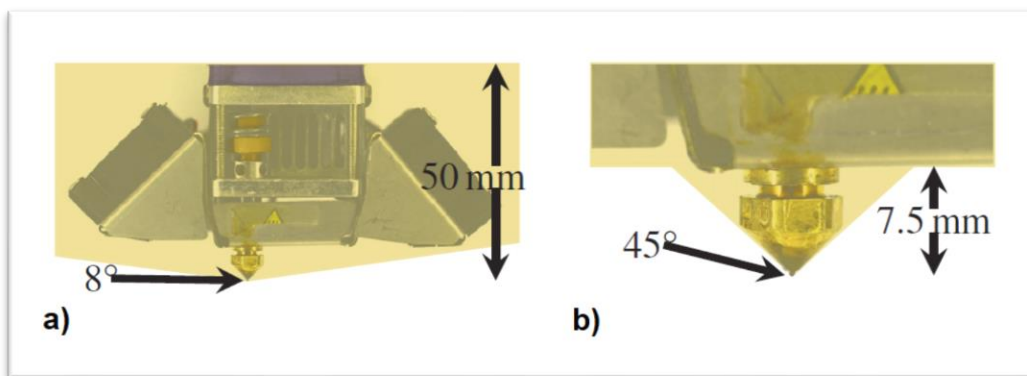
Obr. 4-10 efekt schodovitého stupňování povrchu na modelové součásti [3]

Pro potlačení anizotropních vlastností a docílení lepší kvality povrchu je vhodné využít takzvané nerovinné vrstvení materiálu. Při použití této metody je nejdříve klasickým rovinným vrstvením vytištěno nosné jádro modelu, které je poté pokryto jednou anebo více vrstvami materiálu (viz. Obr. 4-11 b) [32].



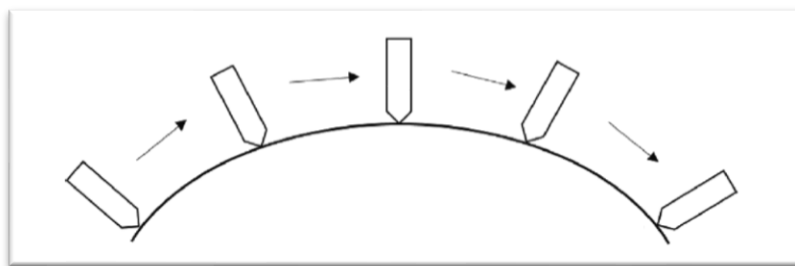
Obr. 4-11 a) Rovinné vrstvení materiálu, b) kombinace rovinného a nerovinného vrstvení materiálu [32]

Technologii nerovinného vrstvení je možné využívat na konvenčních 3D tiskárnách. Konstrukce tiskárny a tiskové hlavy však tuto technologii značně omezuje. Při tisku povrchů s větším úhlem stoupání totiž dojde ke kolizi mezi modelem a tiskovou hlavou. Maximální úhel stoupání tištěného povrchu je stanoven podle tzv. obálkové plochy a většinou se u konvenčních tiskáren pohybuje v jednotkách stupňů (viz. Obr. 4-12 a). Při tisku menších převýšení (např. 7.5 mm) se v závislosti na vrcholovém úhlu trysky obálková plocha mění a je umožněn tisk ploch až pod úhlem 45° (viz. Obr. 4-12 b) [31].



Obr. 4-12 znázornění obálkových ploch na tiskové hlavě tiskárny Ultimaker 2 [31]

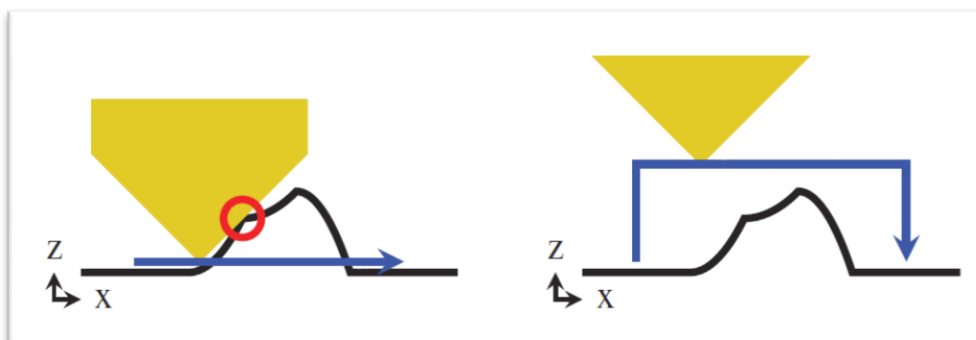
Aby mezi modelem a tiskovou hlavou nedošlo ke kolizi, je vhodné jako nosič tiskové hlavy využít robotické rameno. Robot díky šesti stupňům volnosti umožní nástroji se v průběhu tisku naklánět a zajistit tak mezeru mezi povrchem součásti a obálkovou plochou tiskové hlavy. Ideální je, aby byl extruder natočen kolmo k tištěnému povrchu (viz. Obr. 4-13) [33].



Obr. 4-13 změna natočení TCP podél zakřiveného tištěného povrchu [33]

Díky nerovinnému nanášení materiálu nedochází pouze ke zkvalitnění povrchu, ale je také potlačován anizotropní efekt tištěné součásti, ta poté vykazuje konzistentnější mechanické vlastnosti při různých směrech zatěžující síly [3].

Nevýhodou této technologie je náročnější tvorba řídicího G-kódu. Při tisku hrozí kolize nejen s tištěnou plochou, ale i s tou, která již byla vytištěna dříve. Rameno proto nemůže do referenčního bodu najíždět přímo, ale je potřeba zajistit zdvih v ose Z o příslušnou výšku (viz. Obr. 4-14). Program při generování trajektorií musí mít představu o velikosti a pohyblivosti jednotlivých komponentů soustavy [31].

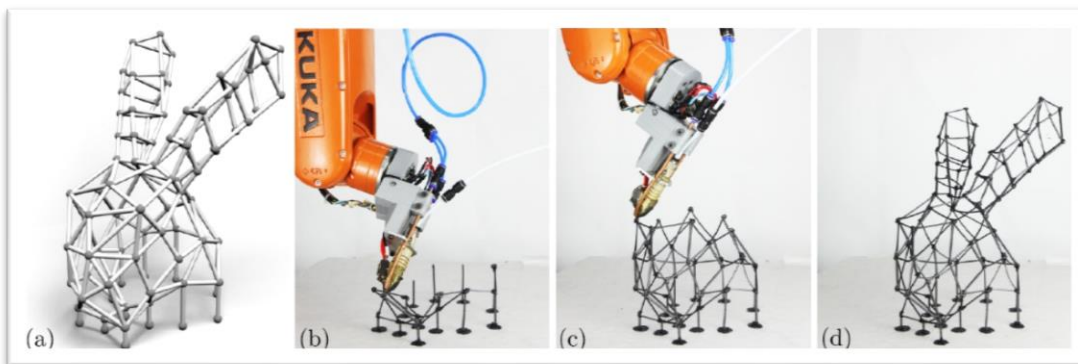


Obr. 4-14 příklad úhybného manévru tiskové hlavy při přejezdu nad součástí [31]

4.4 FrameFab

Tým z *University of Science and Technology of China* vyvinul výpočetní algoritmus pro tisk lehkých prutových konstrukcí, který nazval FrameFab. Podle vloženého modelu je vygenerována prutová síť. V dalším kroku je zvoleno správné pořadí, ve kterém budou jednotlivé pruty vznikat tak, aby konstrukce byla v průběhu tisku dostatečně tuhá a aby nedošlo ke kolizi tiskové hlavy s vytištěnými pruty [34].

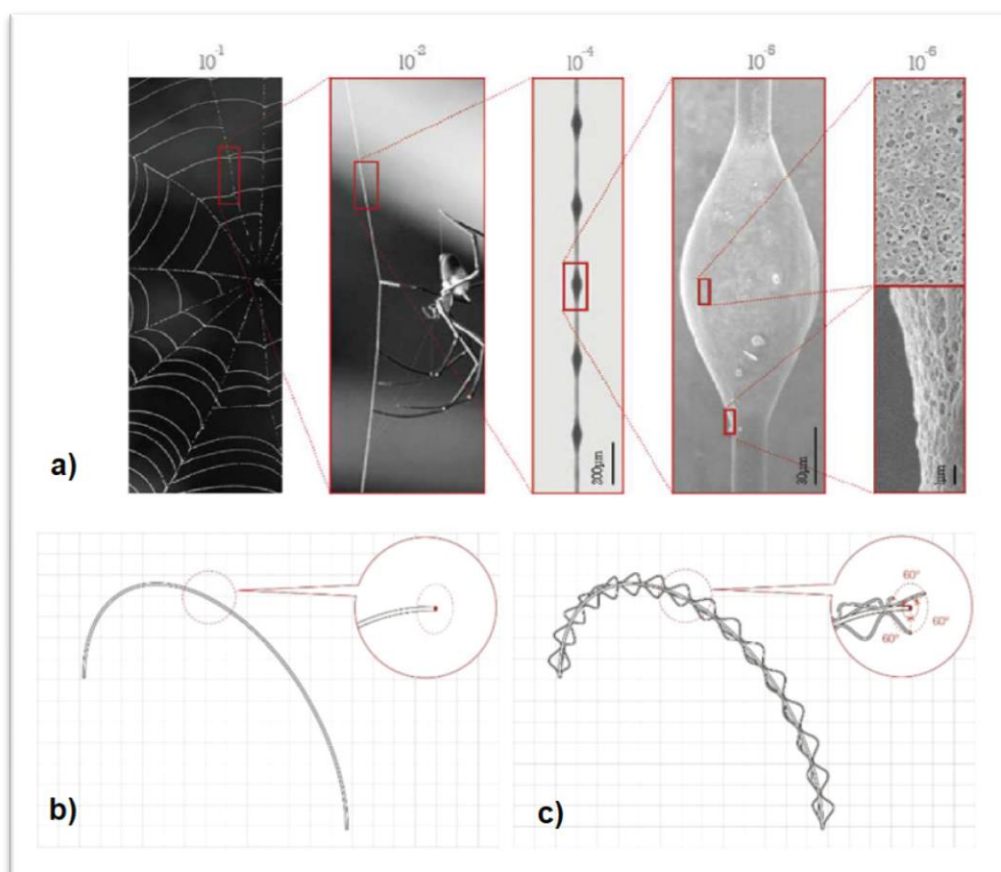
Jednotlivé pruty vznikají pomalým vytlačováním filamentu z trysky a okamžitým chlazením pomocí stlačeného vzduchu. Výsledný model je poté tvořen soustavou prutů, které jsou spolu spojeny ve styčnících (viz. Obr. 4-15 a-d). Při tisku je potřeba zajistit, aby tisková hlava byla natočena ve směru vznikajícího prutu, proto je tisk prováděn pomocí robotického ramene se šesti stupni volnosti, které umožňuje dostatečnou obratnost. Vývojáři doufají, že algoritmus, který vyvinuli bude po zpřístupnění využíván pro tisk lehkých rámových konstrukcí a pro rychlé prototypování [34] [26].



Obr. 4-15 Technologie FrameFab: a) počítačový model prutové konstrukce, b-d) postup tisku [34]

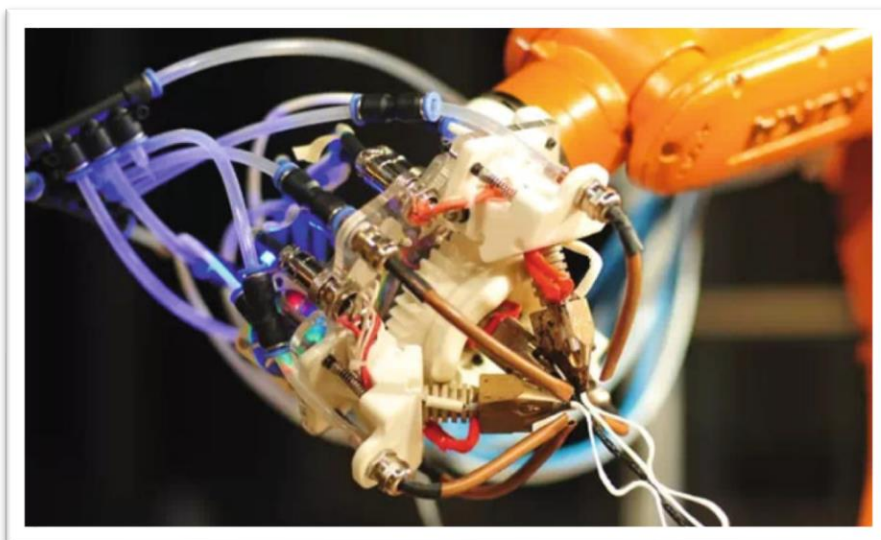
4.5 Tisk inspirován pavoučími vlákny

Jedná se o experimentální tiskovou technologii, která díky speciální tiskové hlavě umožňuje produkci samonosných prutových konstrukcí. Struktura tištěného vlákna je inspirována sekční stavbou pavoučího hedvábí (viz. Obr. 4-16 a). Středový prut, který je tisknut hlavní tryskou, je po stranách zesilován smyčkami pomocného materiálu, které jsou tisknuty zároveň se středovým prutem (viz. Obr. 4-16 b, c). Tím dochází ke zvýšení modulu průřezu v ohybu a výsledný prut lépe odolává gravitačnímu působení. Tato technologie byla navržena a testována pro FDM tisk [26].



Obr. 4-16 a) detail pavoučího vlákna, b) náčrtek středového prutu, c) náčrtek středového prutu s podpůrnými vlákny [35] [26]

Tištěnou strukturu lze rozdělit na primární a sekundární úseky. Primární úsek je oblast, kde jsou pomocné křivky v kontaktu s hlavním prutem a tvoří spoj. Sekundární úsek je místo, kde nedochází ke kontaktu podpůrných vláken se středovým prutem, takže zde vlákna tvoří smyčky. Výsledný prut je tvořen plynulým opakováním primárního a sekundárního úseku. Množství podpůrných vláken, které obklopují středové vlákno je klíčové. Při nadměrném množství podpůrná vlákna již tvoří jen mrtvou váhu, která zhoršuje vlastnosti konstrukce. [35].



Obr. 4-17 tisková hlava při tisku vlákna [35]

Tisková hlava se skládá ze středové trysky, která produkuje hlavní nosný prut. Vznik smyčkových podpůrných struktur je zajištěn kývavým pohybem sekundárních trysek, které jsou rozestavěny kolem středové trysky. Každá sekundární tryska má vlastní servo-motor, systém pro zahřívání materiálu v trysce a vlastní přívod stlačeného vzduchu pro chlazení vlákna po opuštění trysky (viz. Obr. 4-17). Ovládání tiskové hlavy zajišťuje mikrokontroler Arduino MEGA [26].

Tato technologie je především experimentální. Podařilo se ji však docílit dobrých výsledků a v budoucnu by tato technologie mohla být využita pro tisk různých typů podpor a nosných konstrukcí.

4.6 Velkorozměrový 3D tisk

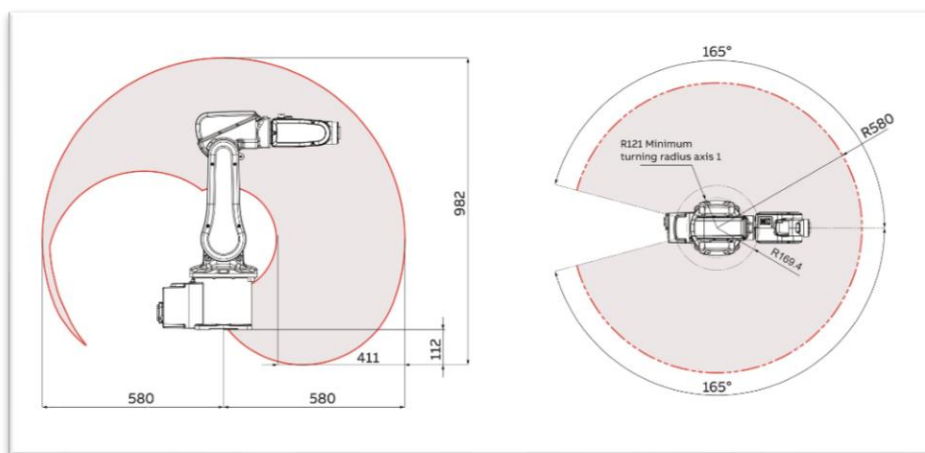
Konvenční, běžně dostupné 3D tiskárny často není možné využít pro tisk velkorozměrových součástí, jelikož je jejich tisková plocha většinou menších rozměrů. Aby bylo možné tisknout součásti velkých měřítek tradičními tiskovými metodami, je potřeba, aby se tištěná součást vešla do pracovního prostoru stroje. Pro udržení přesnosti tiskové hlavy i při přejezdu větších vzdáleností, je potřeba pevná rámová konstrukce, robustní pohony a přesný kalibrační systém. To vše dělá tiskárnu větší a nákladnější. Zařízení svou konstrukcí poté připomíná numericky řízenou CNC frézku. Na obrázku 4-18 je ukázka velkorozměrové komerční tiskárny portálového typu ExOne Exerial. Tiskový prostor stroje je 2200x1200x600 mm. Celkový rozměr stroje je poté 8380x4030x4950 mm a hmotnost 12 000 kg [24]. Takováto tiskárna může stát i více než 500 000 USD.



Obr. 4-18 Zařízení ExOne Exerial určené pro velkorozměrový 3D tisk [36]

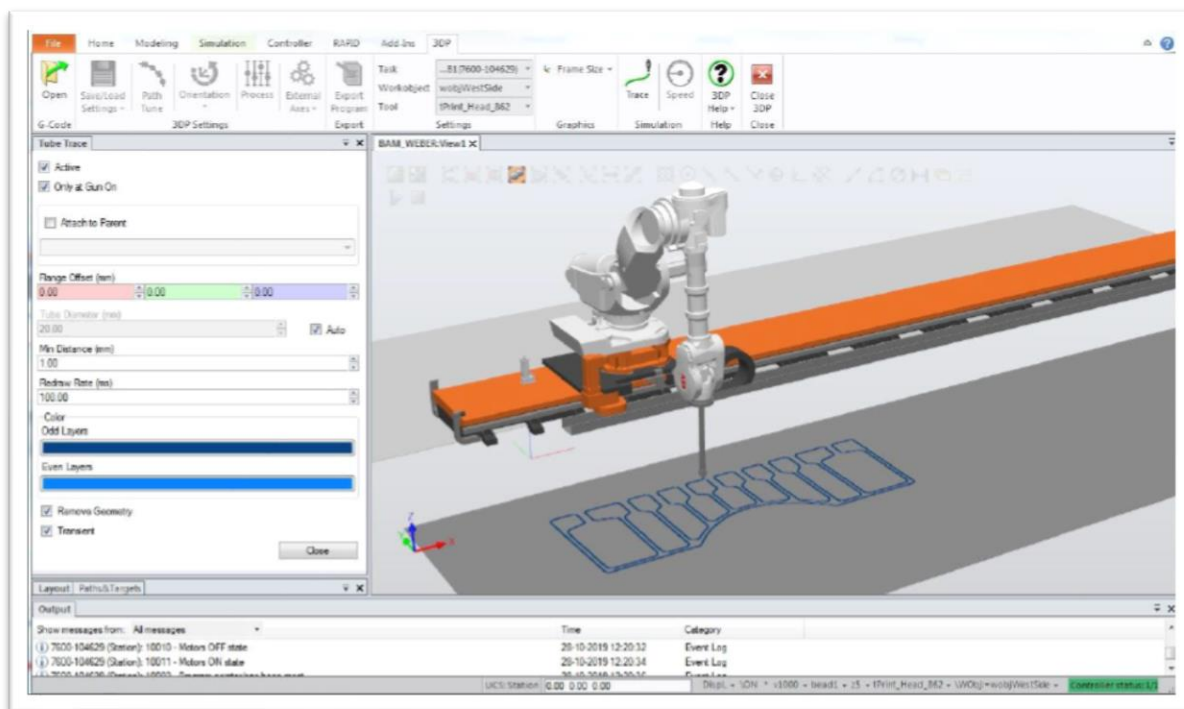
Použitím robotů můžeme překonat omezení, která mají tiskárny portálového typu. Především je možné zvětšit objem stavebního prostoru, snížit pořizovací náklady a využitím bezpodporového tisku je možné zkrátit tiskový čas a uspořit materiál.

Robotické rameno osazené tiskovou hlavou může s nástrojem manipulovat ve svém pracovním prostoru. Jako příklad je uvedeno schéma pracovního prostoru průmyslového robotu ABB IRB 120 se šesti stupni volnosti (viz. Obr. 4-19). Pracovní prostor umožňuje robotu tisknout nejen před sebou, ale také po stranách.



Obr. 4-19 Pracovní prostor průmyslového robotu ABB IRB 120 [37]

Pokud by byl robot připevněn k mobilní základně, jakou může být například translační pojezdová dráha, jeho pracovní prostor by se zásadně zvětšil, což by umožnilo tisk ještě objemnějších součástí (viz. Obr. 4-20). Nedávný vývoj mobilních platform navíc dokázal zlepšit polohovací přesnost, což napomůže využití mobilních manipulátorů pro aditivní technologie v budoucnosti.

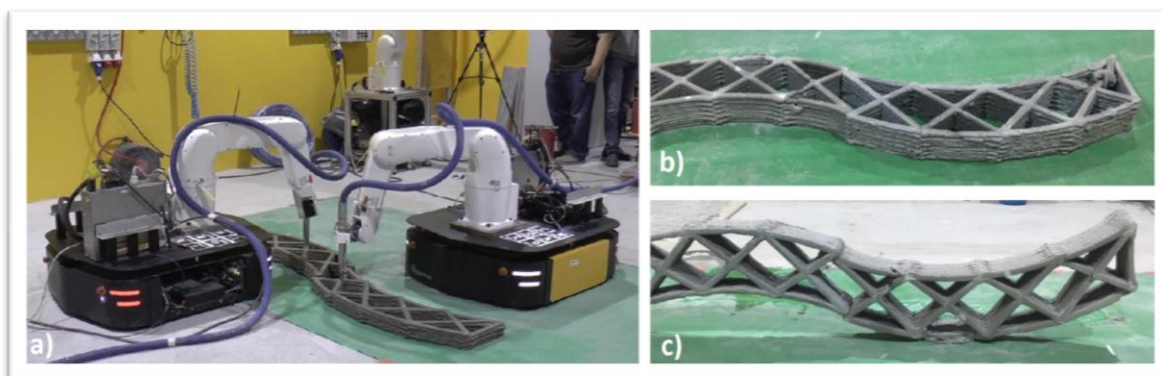


Obr. 4-20 Simulace velkorozměrového robotického tisku s využitím pojezdové dráhy v programu RobotStudio [2]

4.7 Spolupráce více robotů na jednom projektu

Další možností, jak provádět tisk velkorozměrových modelů, je spolupráce více robotů na jednom projektu (viz. Obr. 4-21 a). Přidáním dalšího robotu k tisku jedné součásti se zvětší tisková plocha, zkrátí se tiskový čas modelu a díky tomu se zvýší celková efektivita práce [38].

Koordinovaný tisk více robotů je však z několika důvodů velmi náročný. Pohyby robotů musí být pečlivě naprogramované tak, aby tisk probíhal bez problémů a zároveň aby nedošlo ke vzájemné kolizi tiskových hlav. Roboty musí být přesně seřizeny tak, aby bylo zajištěno, že jednotlivé části modelu budou perfektně zarovnané a nedošlo k jejich odsazení (viz. Obr. 4-2 b, c). I díky menší celkové přesnosti robotů je tato technologie zatím vhodná převážně pro tisk betonů a keramických materiálů [38].



Obr. 4-21 a) souběžný tisk jednoho betonového modelu pomocí dvou mobilních robotů, b, c) tištěný model po deseti dnech schnutí [38]

5 POSOUZENÍ VHODNOSTI ROBOTŮ PRO APLIKACI VE 3D TISKU

Pro posuzování průmyslových robotů, manipulátorů i robotů jako takových je užíváno mnoho aspektů a kritérií, které roboty charakterizují [39]. Jsou jimi například:

- Morfologie robotu
- Počet stupňů volnosti
- Velikost obsluhovaného prostoru
- Maximální hmotnost břemene
- Vlastní velikost a hmotnost
- Způsob řízení a komunikace s robotem
- Rychlost pohybu
- Směr upevnění robotu atd. [39]

Tyto charakteristiky určují, ke které činnosti je robot vhodný, ať už je to svařování, lakování, anebo užití v aditivních technologiích [39].

Když posuzujeme vhodnost robotů pro aplikaci ve 3D tisku, vidíme, že průmyslové roboty v mnoha rozhodujících faktorech dosahují lepších hodnot než konvenční 3D tiskárny. Především při porovnání počtu stupňů volnosti, kdy průmyslový robot disponuje 6 stupni a konvenční tiskárna 3 stupni volnosti, nebo porovnáním velikosti obsluhovaného prostoru. Zásadním parametrem, který rozhoduje o vhodnosti robotů pro 3D tisk je přesnost, tu však nelze tak jednoduše porovnat, jako je tomu v případě počtu stupňů volnosti. Přesnost je totiž popsána více parametry a je potřeba rozhodnout, které z nich jsou pro 3D tisk určující. Nyní tedy budou konstrukce 3D tiskáren a robotických manipulátorů podrobněji rozebrány a porovnány z hlediska dosahovaných přesností.

5.1 Přesnost FDM tiskáren

Při nákupu tiskárny je přesnost zásadním parametrem určujícím kvalitu tiskárny. Pojmem přesnost většina výrobců udává preciznost, s jakou lze na jejich tiskárně model vyhotovit, a výsledná hodnota odchylky od počítačového modelu je udávána v procentech. Někteří výrobci a lidé v komunitě 3D tisku však častěji pojmem přesnost označují různé hodnoty jako například výška vrstvy, rozlišení či polohovací přesnost.

Rozlišení (resolution):

Rozlišení je definováno jako nejmenší změna, kterou dokáže zachytit pohybový senzor. Takovým pohybovým senzorem je většinou enkodér, který může být případně součástí servo-pohonu. Jedná se tedy o nejmenší možný krok, který může stroj kontrolovaně provést [40]. Prospekty tiskáren často udávají fantastické hodnoty rozlišovací schopnosti. Při tisku na bázi extruze materiálu (jako je i FDM) nehraje tato hodnota však tak významnou roli, jako v případě tisku na principu laserového vytvrzování pryskyřice. Při tisku technologií FDM totiž ukládané vlákno plynule přechází mezi jednotlivými pixely a není tak patrná schodovitá trajektorie trysky. Jako referenční hodnotu rozlišení pro následné porovnání s roboty můžeme považovat hodnotu 0.05 mm tiskárny Prusa i3 MK3. Hodnota rozlišení však není určujícím parametrem pro velikost polohovací přesnosti.

Polohovací přesnost (accuracy):

Je maximální velikost chyby, které se dopustí mechanismus při polohování referenčního bodu do jakéhokoliv bodu definovaného v kartézském souřadném systému [40]. Hodnota polohovací přesnosti je závislá na mnoha aspektech, především na zvoleném typu konstrukce, pohybovém ustrojí, přesnosti pohonů, či kvalitě ložisek. Polohovací přesnost však není závislá na rozlišení tiskárny. Rozlišení udává pouze minimální velikost kroku, ne však s jakou přesností je referenční bod přesunut.

5.1.1 Tiskárny kartézského typu

Tyto tiskárny jsou nejběžnější a vycházejí z původního návrhu RepRap. Tiskové hlavě a podložce jsou umožněny pouze translační pohyby ve třech základních osách XYZ. Pohyby mohou být zprostředkovány buď řemenovým systémem GT2 nebo pomocí předeprnutého šroubového vedení (viz. Obr. 5-1) [41].



Obr. 5-1 Příklad kartézské tiskárny Prusa i3 MK3 [42]

Systém GT2

Pohyb tiskové hlavy nebo podložky zajišťuje napnutý ozubený řemen, který je poháněn krokovým motorem (viz. Obr. 5-2). Systém je náchylný na vznik polohovací nepřesnosti, především kvůli mírnému pružení řemene při rychlé změně směru, při nedostatečném napnutí řemene nebo vlivem stárnutí materiálu.

Max rozlišení 0.01 mm



Obr. 5-2 Řemenový systém GT2 zajišťující pohyb tiskové hlavy [43]

Předepnutý kuličkový šroub

Pohybový mechanismus s využitím kuličkového šroubu je podstatně tužší a umožňuje lepší polohovací přesnost než řemenový systém GT2. Šroub musí být zvolen se správným stoupáním, aby byla zajištěna dobrá posuvová rychlost a rozlišovací přesnost. Velikost rozlišení se pak určuje vztahem (1) [41].

$$res = \frac{p_h}{n} = \frac{16}{3200} = 0.005 \text{ mm} \quad (1)$$

Kde p_h je stoupání závitu a n je počet nastavitelných kroků motoru.

Nevýhodou kartézských tiskáren je, že pohyblivé prvky jsou většinou relativně těžké a při pohybu vznikají velké setrvačné síly, především když je pohyb osy Y zprostředkován pohybem tiskové plochy. Vlivem setrvačných sil tak při rychlých změnách směru může dojít až k utržení výtisku od podložky [41].

Podle tuhosti konstrukce a přesnosti seřízení dosahují tiskárny kartézského typu většinou polohovací přesnosti v desítkách mikronů (zhruba od ± 0.01 až do ± 0.09 mm).

5.1.2 Tiskárny typu delta

Tento typ tiskárny je charakteristický kruhovou tiskovou plochou, nad níž je umístěn delta robot se třemi paralelními rameny. Konce ramen jsou uchyceny ve třech vertikálních věžích, které jsou pevně spojeny se základnou (viz. Obr. 5-3). Translačními posuvy ramen po nosných věžích dochází k pohybu tiskové hlavy. Všechny součásti, které zajišťují pohyb, jsou

umístěny v základně tiskárny. Díky tomu je tisková hlava mnohem lehčí a dokáže rychle reagovat na změnu směru bez ztráty polohovací přesnosti. Tiskárny typu delta tak dosahují polohovací přesnosti až 0.0125 mm [41].



Obr. 5-3 příklad FDM tiskárny typu delta [44]

5.1.3 Přesnost výtisku technologií FDM

Polohovací přesnost a rozlišení nejsou jediné parametry ovlivňující přesnost finálního modelu. Rozměrová přesnost závisí také na rychlosti tiskové hlavy, kvalitě filamentu, rychlosti dodávaného materiálu, průměru trysky, tloušťce vrstev, kvalitě první vrstvy atd. Přesnost finálního výtisku je tedy většinou $\pm 0.15 \%$ (se spodním limitem $\pm 0.2 \text{ mm}$).

5.2 Přesnost Robotů

Přesnost polohování je v případě pracovních robotů a manipulátorů závislá nejen na obecných faktorech, jakými jsou výrobní nepřesnosti a technologické vůle apod., ale také na uspořádání kinematického řetězce. Ten je tvořen kinematickými dvojicemi, které umožňují ramenu vykonávat translační nebo rotační pohyb. Kinematická dvojice obsahuje řadu mechanických částí, které jsou vyrobeny s určitou nepřesností, anebo je jim potřeba pro správné fungování zajistit nutnou minimální vůli. Vlivem těchto vůlí je pohybující se člen kinematické dvojice zatížen chybou a pohyb tak vykonává s určitou nepřesností. Jednotlivé vůle se vlivem sériového uspořádání kinematických dvojic sčítají a vniká tak celková nepřesnost stroje. Skutečný zdvih je poté menší než ten požadovaný, protože se určitá část pohybu spotřebuje na vymezení vůlí v mechanismu [39]. Další chyby mohou být způsobeny v průběhu výpočtu trajektorie, jelikož je výpočet prováděn numericky a vzniká tak zaokrouhlovací chyba.

5.2.1 Pojmy popisující přesnost robotů

Přesnost pozice (AP)

pose accuracy

Je střední vzdálenost TCP (Tool Centre Point) od naprogramované pozice po provedení programu (viz. Obr. 5-4 a) [45].

Opakovatelnost pozice (RP)

pose repeatability

Tolerance polohy bodu B při opakovaném nájezdu TCP (viz. Obr. 5-4 a) [45].

Přesnost trajektorie (AT)

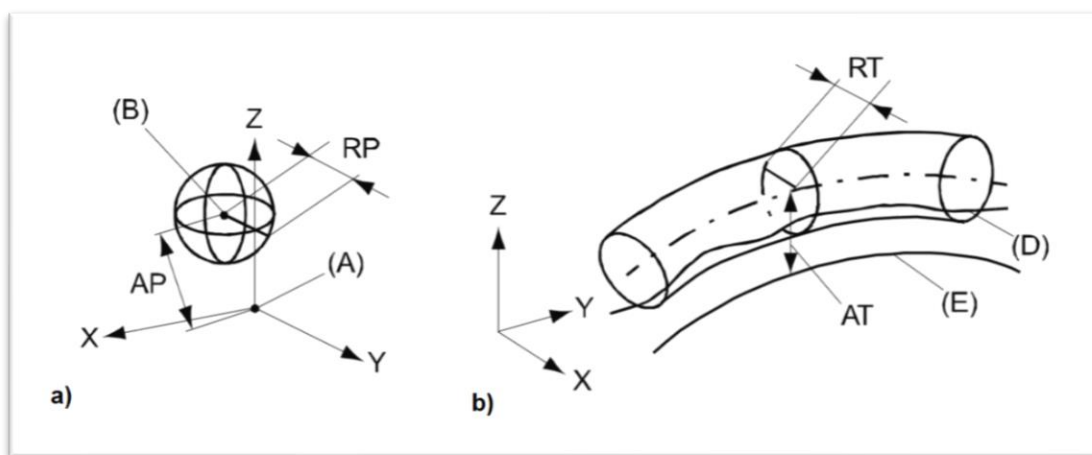
path accuracy

Je maximální velikost chyby mezi naprogramovanou křivkou a průměrem reálné trajektorie (viz. Obr. 5-4 b) [45].

Opakovatelnost trajektorie (RT)

path repeatability

Tolerance trajektorie TCP po opakovaném provedení programu (viz. Obr. 5-4 b) [45].



Obr. 5-4 Schématické znázornění přesnosti a opakovatelnosti a) pozice, b) trajektorie

Ve většině případů poté platí vztah:

Rozlišení < opakovatelnost < přesnost

5.2.2 Příklady robotů a jimi dosahované přesnosti

Jednou z mála firem, která v dokumentacích robotů udává všechny z výše zmíněných parametrů přesnosti je firma ABB. Proto jsem si tuto firmu zvolil pro sběr dat a vyhotovení tabulky porovnávající přesnosti některých modelů (viz tab.2). Hodnoty přesností byly naměřeny při maximálním možném zatížení, při rychlosti 1.6 m/s. Měření proběhlo podle normy **ISO 9283** [45].

Tab 2) Průměr dosahovaných přesností robotů firmy ABB [46] [47] [45] [48] [49]

Typ robotu firmy ABB	IRB 120	IRB 2600	IRB 4400/60	IRB 460	IRB 6620
Maximální zátěž [kg]	4	12	60	110	150
Dosah [m]	0.58	1.65	1.96	2.24	2.20
Opakovatelnost pozice (RP) [mm]	0.01	0.04	0.05	0.2	0.03
Přesnost pozice (AP) [mm]	0.02	0.03	0.03	0.2	0.12
Opakovatelnost trajektorie (RT) [mm]	0.07	0.13	0.05	0.11	0.62
Přesnost trajektorie (AT) [mm]	0.21	0.55	0.36	3.89	3.03

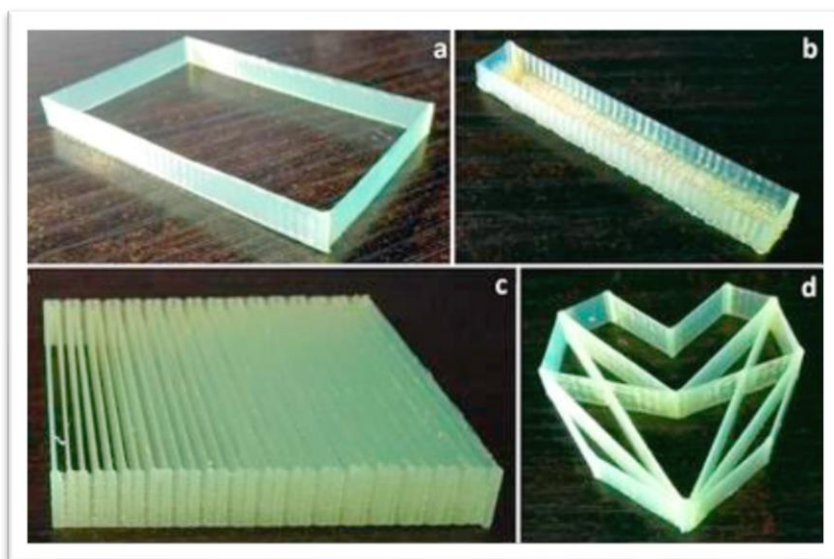
Pro většinu robotických aplikací je rozhodující veličinou „opakovatelnost pozice“, především proto, že roboty často vykonávají opakující se naprogramované cykly. I proto je často hodnota *opakovatelnosti pozice* udávána v dokumentacích robotů jako jediná.

Při robotizovaných aditivních technologiích (zejména při FDM tisku) však do přesnosti trajektorie efektoru mohou být promítnuty všechny čtyři druhy nepřesností. Většina trajektorií tiskové hlavy při 3D tisku jsou pro robot nové a on je vykonává s *přesností trajektorie*.

5.3 Porovnání konvenčního a robotického 3D tisku

Tým z Řecké univerzity v Aténách vyhotovil pomocí robotického FDM tisku několik tvarově rozdílných modelů (viz. Obr. 5-5 a-d). Využil k tomu robot Stäubli RX90L s opakovatelností ± 0.025 , vybavený tiskovou hlavou o hmotnosti 3.5 kg [50]. Výrobce tento model robotu označuje jako velice přesný, přesnou hodnotu polohovací přesnosti však neuvádí (na základě tabulky výše lze však předpokládat, že se *přesnost trajektorie* bude pohybovat mezi 0.2 až 0.4 mm).

Stejně jako při konvenčním FDM tisku byly vrstvy nanášený pouze v horizontálním směru a při tisku bylo využito trysky o průměru 0.4 mm, která je při konvenčním tisku nejčastěji používána. Díky tomu můžeme jimi naměřené odchylky od CAD modelu porovnat s běžně dosahovanou přesností výtisků, kterých je dosahováno konvenčním FDM tiskem [50].



Obr. 5-5 a-d) testovací výrobky robotického FDM tisku [50]

Průměrná procentuální chyba délky, šířky a výšky u čtyř testovacích modelů byla **0,76 %**, **2,04 %** a **3,9 %**. Velikost chyby se tak pohybovala od desetin milimetru až k maximální hodnotě 3.36 mm, která byla naměřena na výšce otevřeného čtverce (obr. 5-5 a) [50]. Jelikož se přesnost vytištěného modelu pohybuje až v jednotkách milimetrů, usuzují, že hodnota *opakovatelnosti pozice* není pro robotický tisk rozhodující a při výběru vhodného robotu je potřeba hledět na všechny přesnostní parametry, především pak na hodnotu *přesnost trajektorie*.

V porovnání s konvenčním FDM tiskem, který dokáže model vyhotovit s přesností $\pm 0.15 \%$ (se **spodním limitem $\pm 0.2 \text{ mm}$**) je zřejmé, že robotický tisk nedosahuje takové tiskové přesnosti.

5.4 Vhodnost robotů pro FDM tisk

V současné době existuje několik národních a mezinárodních standardů pro hodnocení přesnosti a dalších charakteristik robotů. Jsou jimi například ISO 9283, ISO 9946, ANSI/RIA. Tyto dokumenty poskytují podrobné návody, jak konzistentně vyhodnocovat zásadní parametry robotů. Většina firem však ve svých materiálech uvádí pouze hodnotu *opakovatelnosti*, a to většinou bez odkazu na jakoukoli normu [40]. Nemáme tak vhodný aparát pro porovnání robotů a lze jen velmi těžce posoudit vhodnosti jednotlivých modelů pro 3D tisk.

Na základě tabulky 2) je však patrné, že některé modely robotů dosahují výrazně nižší *přesnosti trajektorie*. Jsou to především roboty určené pro přemisťování těžkých objektů, jako například IRB 6620. Roboty tohoto typu lze tedy pro aplikaci v robotickém FDM tisku považovat za nevhodné.

Všeobecně však platí, že roboty jsou již v dnešní době pro FDM tisk vhodnou volbou, ne však pro tisk malých a detailních modelů, ale pro tisk velkorozměrných struktur, kde již nepřesnost v desetinách milimetru není tak významná. Při robotickém FDM tisku je vhodné využít trysku o větším průměru (až například 2 mm) a provádět tisk s větší výškou vrstvy. Díky tomu se zkrátí tiskový čas a výroba velkorozměrných výtisků se výrazně zkrátí. To je vhodné především pro rychlé prototypování výrobků neboli rapid prototyping.

6 POTŘEBNÉ PERIFÉRIE K ROBOTICKÉMU FDM 3D TISKU

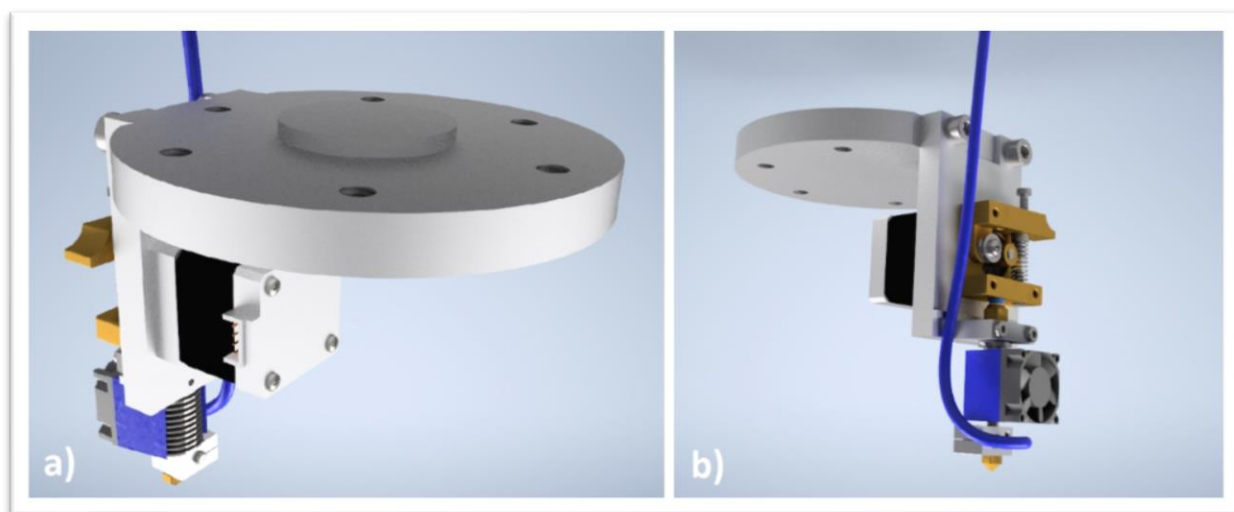
Aby mohlo být robotické rameno využito pro FDM tisk, je potřeba jej doplnit o potřebný hardware a software.

6.1 Tisková hlava

Pro robotický FDM tisk je možné využít tiskovou hlavu z běžných 3D tiskáren, je však potřeba ji upravit tak, aby ji bylo možné nainstalovat na koncový efektor robotického manipulátoru. Pro účely této práce jsem se rozhodl navrhnout vlastní tiskovou hlavu pro robotický manipulátor na Ústavu výrobních strojů, systému a robotiky FSI VUT v Brně (viz. Obr. 6-4 a, b). Návrh tiskové hlavy byl inspirován již existujícími řešeními. Při návrhu jsem vycházel z: [49], [25], [33],

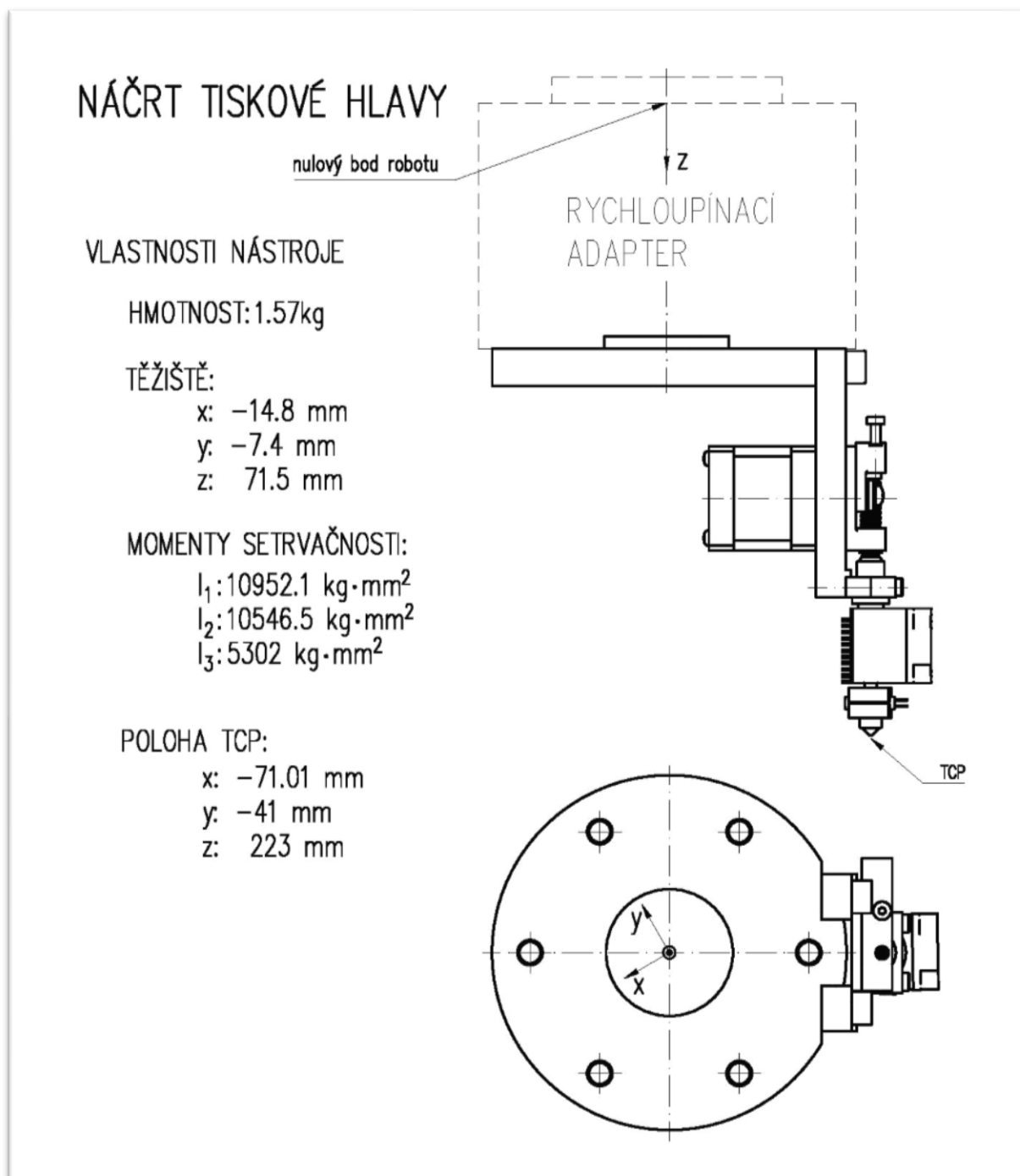
Filament přicházející k nástroji z horní části je nejdříve veden do pohonného ústrojí (na obrázku 6-1 b) vyobrazeno zlatou barvou). Posouvání filamentu zajišťuje ozubený kroužek, který je připevněn k hřídeli servomotoru. Přítlak filamentu k ozubenému kroužku je zajištěn pomocí otočného kolečka a pákového mechanismu s tlačnou pružinou. Servomotor je umístěn v zadní části konstrukce pro lepší přístupnost k filamentu a pro dosažení lepší vyváženosti konstrukce. Filament dále prochází pasivním chladičem do heatblocku, kde je zahříván na požadovanou teplotu. V heatbloku je zašroubována standartní tryska s průměrem vnitřního otvoru 0,4 mm. Chladič, který je umístěn mezi pohonným mechanismem a heatblockem, slouží jako tepelný štít, který zabraňuje šíření tepla. Pasivní chladič je doplněn o elektrický větráček a plastový nástavec, který vede proud vzduchu na žebra chladiče. Při návrhu hlavy jsem vycházel z komponent, které jsem měl k dispozici z ÚVSSR.

Jednotlivé komponenty jsou namontovány na hliníkové konstrukci skládající se z obdélníkové plotny a kruhové příruby, která slouží ke spojení tiskové hlavy s rychloupínacím mechanismem. Tímto mechanismem je vybaven robot na ÚVSSR. Oba hliníkové díly jsou navrženy s ohledem na snadnou vyrobiteľnosť a jsou spojeny pomocí dvou šroubů M8x25. Úhel obáľkového kužeľe na navrhenej tiskovej hlave je 140°. Hlavu je tak možné pri tisku naklonit maximálne o 20°.



Obr. 6-1 a, b) model tiskové hlavy pro tisk technologií FDM

Náčrt tiskové hlavy s potřebnými parametry je na obrázku 6-2.



Obr. 6-2 náčrt tiskové hlavy a soupis parametrů nástroje

6.2 Tisková podložka

Tiskovou plochu je třeba volit s ohledem na tištěný materiál, velikost tištěného objektu, případně na maximální robotem dosažitelné vzdálenosti. Většina dostupných filamentů vyžaduje pro lepší přilnavost vyhřívání podložky (viz. tab. 1), proto je vhodné pod dále zmíněné druhy tiskových povrchů zajistit vyhřívací lože [5] [51].

Hliník

Tisková podložka z hliníku je jednou z nejjednodušších a nejdostupnějších možností. Její použití má však plno nevýhod. Hliník je měkký kov, a proto při čištění takovéto tiskové podložky může snadno dojít k úběru materiálu a k jejímu znehodnocení. Podložka navíc trpí na teplo. Hliník není vhodný pro tisk z ABS a dalších smrštitelných materiálu [51].

Sklo

Tisková podložka ze skla se vyznačuje odolností a rovinností povrchu, který lze velmi snadno očistit. Sklo je snadno dostupné i ve větších rozměrech a je tak vhodné pro větší tiskovou plochu robotického tisku. Sklo má lepší teplotní odolnost (ne však proti teplotnímu šoku). Před tiskem je vhodné na odmaštěné sklo aplikovat lak (na vlasy), který zlepší přilnavost tištěného materiálu. Vhodné materiály: PLA, ABS, CPE PC, Nylon a další [51].

Plast

Materiál podložky zhotovené z odolného plastu je díky lisování a přidané pryskyřici pevný, odolný vůči teplotám nad 80 °C a pružný. Plastová podložka tedy umožňuje sejmutí tištěného modelu pomocí prohnutí. Na plastovou podložku lze tisknout materiál PLA bez použití jakýchkoliv pojiv. Při tisku ABS a ostatních materiálu je potřeba si trochu dopomoci pojivy [51].

Ocelová podložka

Tato podložka si bere to nejlepší z výše uvedených tiskových podložek. Ocel je pevná, odolná, pružná a vykazuje dobrou teplotní vodivost. Přichycení podložky na místo může být navíc zajištěno pomocí několika silnějších magnetů. Pro lepší přilnavost se povrch opatřuje speciálními foliemi a dalšími úpravami povrchu, jako je práškový PEI povrch, který využívají i tiskárny Prusa. Na PEI lze i bez použití dalších pojiv tisknout ze všech standardně používaných druhů filamentu (PLA, PETG, ABS, FLEX, CPE apod.) [5] [51].

Upevnění již vytištěných dílů

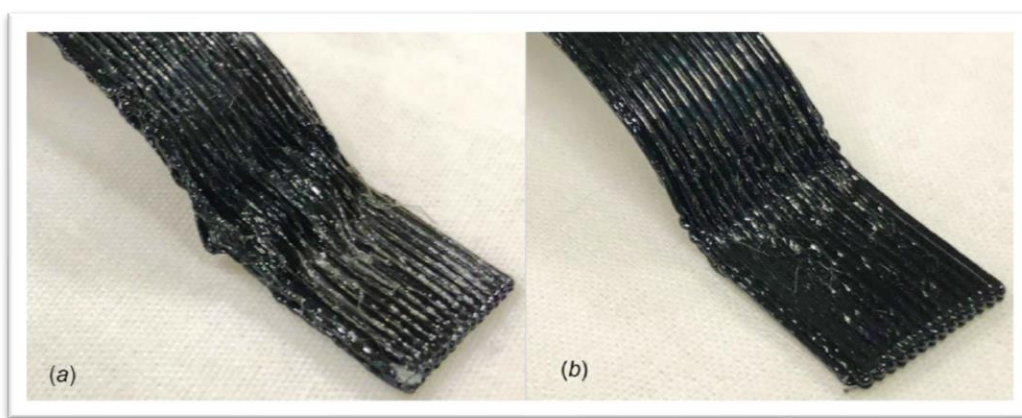
Aditivní technologie, mezi které se řadí i FDM technologie, se vyznačují možností oprav a úprav již existujících dílů. Pro uchycení těchto dílů neslouží klasické rovné podložky, ale různé druhy svěráku, přípravků a upínek.

Pořizovací cena kompletní tiskové plochy se bude lišit v závislosti na zvoleném materiálu a způsobu vyhřívání. Náklady by se však měly pohybovat v řádu jednotek až desítek tisíc.

6.3 Ovládání tiskové hlavy

Další věcí, kterou je potřeba při robotickém FDM tisku zajistit, je způsob řízení tiskové hlavy. Pro ovládání parametrů krokového motoru a teploty heat blocku je většinou používáno externí zařízení na bázi desky Arduino doplněné o další nadstavby [26].

Týmy zabývající se problematikou robotického FDM tisku pro ovládání tiskové hlavy volí rozdílné přístupy. Nejjednodušší možností je separované ovládání tiskové hlavy a kontroleru robotu. Tento způsob však neumožňuje plynulé ovládání dodávky materiálu a teploty heat blocku. Pro dosažení co možná nejlepší kvality výtisku je potřeba v průběhu tiskového procesu měnit rychlost dodávaného filamentu. Především při tisku nerovinným vrstvením materiálu, kdy dochází k rotaci nástroje kolem TCP, způsobuje nekorigování rychlosti extruze výrazné zhoršení kvality výtisku (viz. Obr. 6-3 a, b) [33]. Separované ovládání tiskové hlavy navíc neumožňuje kontrolované zastavení dodávky materiálu, a tak není možné přerušovaným tiskem vytvářet například boční otvory ve vertikálních stěnách.



Obr. 6-3 Příklad FDM výtisku a) bez kontroly rychlosti distribuce, b) s kontrolou rychlosti distribuce materiálu [33]

Další možností je centrální řízení jak robotu, tak Arduino kontroleru tiskové hlavy. Společným řídicím bodem může být například počítač, který má v reálném čase přístup k řízení kontroleru robotů i kontroleru tiskové hlavy. Tisk tak může být centrálně spuštěn, zastaven a dle řídicího programu mohou být změněny provozní parametry tiskové hlavy [50].

6.4 Ostatní

Pro dosažení přesnějších a kvalitnějších modelů je ideální doplnit tiskové pracoviště o kamery a další druhy senzorů. Využití senzorů je dvojí. Zaprvé pro korigování přesné trajektorie robotu a zadruhé ke korekci parametrů tisku analýzou vytištěné vrstvy. Vlivem nepřesného dávkování materiálu do místa depozice totiž může dojít k oddálení tiskové hlavy od povrchu a tím ke vzniku chyby. Software po analýze dat ze senzorů provede drobné korekce v řídicím programu a upraví tiskové parametry. Za pomoci senzorů lze také zvýšit polohovací přesnost robotů [9].

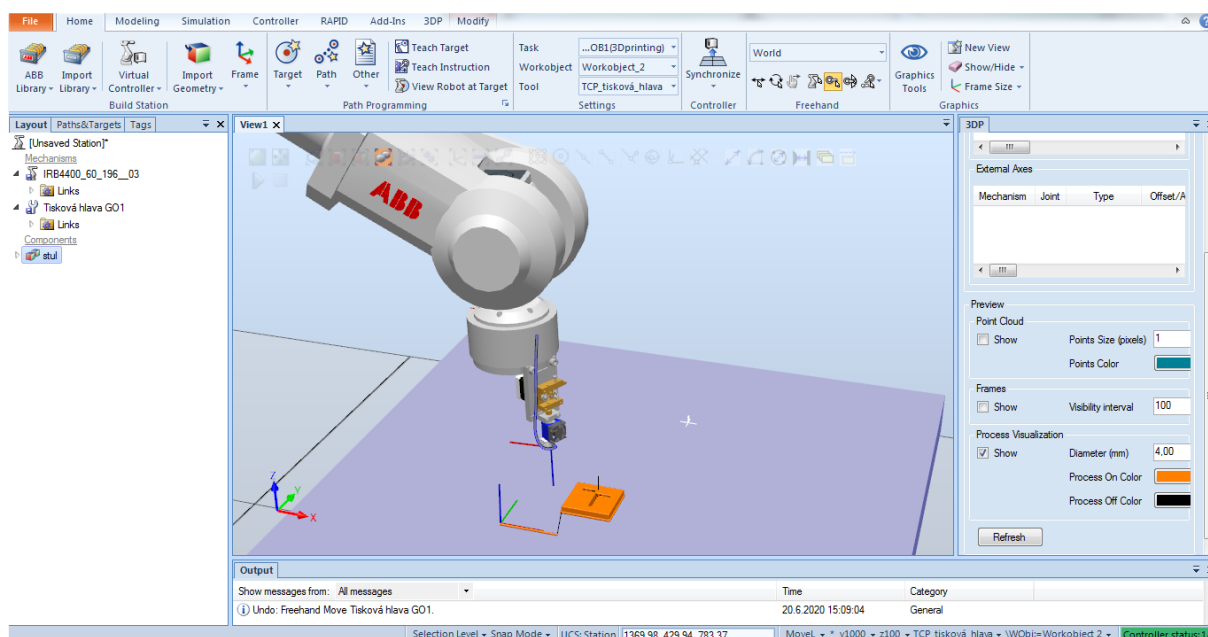
Podle specifických požadavků zákazníka je možné tiskové pracoviště dále modifikovat. Lze využít například translační pojezdovou dráhu pro několikanásobné zvětšení tiskového prostoru – viz. kapitola 4.6, nebo tvarovou tiskovou plochu pro bezpodporový tisk specifických modelů.

7 TVORBA ŘÍDÍČÍHO KÓDU

Pro tvorbu řídicího kódu donedávna neexistoval specializovaný program, a proto bylo potřeba pro vytvoření tiskové trajektorie využít kombinaci více softwarů. Týmy zabývající se robotickým 3D tiskem využívaly například programy Rhinoceros, Grasshopper s pluginem KUKA | prc, popřípadě MatLab.

V lednu 2020 však společnost ABB vydala nový *3D printing PowerPac* svého softwaru RobotStudio. Ten po nainstalování umožňuje na základě importovaného G-kódu vytvořit řídicí program v jazyce RAPID pro roboty ABB. Importovaný G-kód je možné vytvořit v jakémkoliv volně dostupném Sliceru, jakým je například PrusaSlicer (viz. Obr. 7-1).

Podle konkrétně nakonfigurovaného pracoviště, které obsahuje robot a tiskovou hlavu, je vygenerován nový kontroler. Tento kontroler poté slouží k tvorbě vlastního RAPID programu. V samotném rozhraní PowerPacu je navíc možné měnit různé parametry tisku, jako jsou rychlost, náklon tiskové hlavy, nebo počet bodů do kterých jsou rozděleny jednotlivé křivky G-kódu. Na rozdíl od předchozích programů jako Rhinoceros, Grasshopper a MatLab, dokáže RobotStudio vytvořit také 3D simulaci s konkrétním modelem robotu a tiskové hlavy. To je vhodné především k ověření, zda nedojde v průběhu tisku ke kolizi robotu s modelem, případně ke kolizi robotu s okolím.



Obr. 7-1 Simulace robotického 3D tisku v programu RobotStudio s využitím vlastní tiskové hlavy z kapitoly 6.1

8 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Robotický 3D tisk je nová a rychle se rozvíjející oblast aditivních technologií. Použití robotického manipulátoru jako nosiče tiskové hlavy rozšiřuje dosavadní spektrum 3D tiskových možností. V některých oblastech je již robotický 3D tisk plně využíván. Při tisku detailnějších modelů, například technologií FDM, se však robotický 3D tisk stále potýká s mnoha problémy. Problematickými oblastmi robotického 3D tisku jsou bezesporu přesnost a tvorba řídicího kódu.

Výhodou aplikace robotů ve 3D tisku je především univerzálnost manipulátoru jako takového. Pokud má firma k dispozici dostatečně přesný manipulátor, může z něj relativně snadno vytvořit tiskové pracoviště a firma tak může ušetřit velké množství financí, které by investovala do pořízení velkorozměrové tiskárny. Pokud není průmyslový robot používán pro 3D tisk, může provádět další činnosti, jako například frézování, přesun součástí, nanášení barev apod.

V kapitole o potřebných perifériích k robotickému 3D tisku byl představen vlastní návrh jednoduché tiskové hlavy. V původním plánu bylo tuto tiskovou hlavu vyhotovit a provést i první testovací tisk za pomoci robotu ABB IRB 4400/60, který je na ÚVSSR. To bohužel vzhledem ke karanténě a omezenému provozu školy nebylo možné. Na začátku roku 2020 však společnost ABB vydala svůj *3D printing Powerpac*, a proto bylo možné s pomocí vedoucího práce vytvořit alespoň 3D tiskovou simulaci. Vzhledem k tomu, že Powerpac vyšel na začátku roku, je tato práce jednou z prvních, která se o tomto novém balíčku do Robot studia zmiňuje.

V rámci dalšího rozvíjení této problematiky na ÚVSSR by bylo vhodné navrhnoutou tiskovou hlavu vyrobit. Na základě reálných testovacích výtisků by pak mohly být provedeny úpravy stávajícího návrhu. Pravděpodobně bude potřeba přidat držák filamentu, chlazení vytištěné vrstvy, popřípadě zvětšit průměr trysky. V budoucnu by také bylo potřeba změřit přesnostní charakteristiky robotu IRB 4400/60 na ÚVSSR, což by mohlo být náplní navazující diplomové práce.

9 ZÁVĚR

Hlavním cílem této bakalářské práce byla analýza využití průmyslových robotů ve 3D tisku a vytvořit podklady pro tvorbu 3D tiskového robotického pracoviště v dílně na Ústavu výrobních strojů systémů a robotiky FSI VUT v Brně. Pracoviště by mělo být nejdříve zaměřeno na tisk plastů, a proto je bakalářská práce převážně zaměřena na tisk technologií FDM. V první kapitole je čtenář obecně seznámen s pojmem aditivní technologie a se současným stavem poznání v této oblasti.

V kapitole pojednávající o analýze využití robotického 3D tisku jsou uvedeny některé zajímavé možnosti robotického tisku. S využitím robotického manipulátoru není tisk omezen na striktně horizontální vrstvení materiálu a lze tak tisknout po zakřivených tiskových plochách, ve směru napěťových křivek, vytvářet přvislé objemy bez použití podpor, nebo lze vytvářet rychlé modely technologií FrameFab. Ne všechny uvedené technologie jsou však pro praxi rozumně využitelné. Především „pavoučí tisk“ slouží spíše pro demonstraci možností robotického tisku a pro umělecké účely.

V kapitole 5 byla posouzena samotná vhodnost robotů pro aplikaci ve 3D tisku. Ta byla posuzována na základě srovnání parametrů robotů a konvenčních 3D tiskáren. Ukázalo se, že zásadním a velmi špatně srovnatelným parametrem je přesnost. Manipulátory kvůli své konstrukci dosahují horší polohovací přesnosti než běžné 3D tiskárny. Hodnota polohovací přesnosti je navíc v praxi obtížně měřitelná. Dalším problémem je nejednota v terminologii ohledně přesnosti mezi roboty a konvenčními 3D tiskárnami. V současné době tedy neexistuje dostatek společných přesnostních parametrů, podle kterých by bylo možné vyhodnotit robotický manipulátor jako vhodný pro 3D tisk. Jednou z možností by bylo, aby dosahovaná přesnost všech robotických zařízení byla měřena podle společné normy, jakou je například ISO 9283. Dále by bylo vhodné 3D tiskové pracoviště doplnit o senzory, díky kterým by bylo možné v průběhu tisku zlepšovat polohovací přesnost.

Kapitola 6 pojednává o potřebných periferiích k robotickému 3D tisku technologií FDM. V této kapitole je také popsán návrh vlastní tiskové hlavy. Pořizovací náklady jednotlivých hardwarových doplňků se pohybují v řádu jednotek tisíc a modifikace robotického pracoviště pro 3D tisk tedy určitě nebude finančně náročná.

Pro tvorbu řídicího kódu byl v práci představen nový PowerPac programu RobotStudio. S jeho využitím lze na základě vloženého G-kódu snadno vygenerovat řídicí RAPID program, pro řízení robotického manipulátoru. Program RobotStudio je však určen výhradně pro roboty společnosti ABB.

Posledním cílem bakalářské práce byla analýza robotického 3D tisku v praxi. V současné době jsou aditivní technologie s využitím robotických manipulátorů ve vývoji. I přesto se lze v praxi již setkat s využitím robotů jako nosičů tiskové hlavy, a to především při tisku kovu, popřípadě betonu. Pro případ technologie FDM platí, že je vhodná spíše pro rozměrnější modely, kde není kladen takový důraz na výslednou přesnost. Robotický FDM tisk, by tak bylo možné uplatnit například při rychlém prototypování. Cena výsledného modelu vyjde podstatně levněji než vyhotovení speciální formy.

Robotický 3D tisk tak může být často tou správnou ekologickou a ekonomickou variantou tvorby modelů a v některých případech i výsledných produktů.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- 1] |WANG, Wego. *Reverse Engineering* [online]. 1st Edition. Boca Raton: CRC Press, 2010 [cit. 2020-02-17]. DOI: 10.1201/EBK1439806302. ISBN 9780429135767. Dostupné z: <https://doi-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.1201/EBK1439806302>
- 2] |*RobotStudio 3D Printing PowerPac: Additive Manufacturing of large scale objects* [online]. In: . s. 2-24 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107680A2114&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- 3] |*Design Considerations for FDM Additive Manufacturing Tooling*. 2018. Dostupné z: http://www.stratasys.com/-/media/files/design-guides/dg_fdm_designconsiderationsfdmtooling_0618a.pdf
- 4] |ZEIN, Iwan, Dietmar HUTMACHER, Kim TAN a Swee TEOH. Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications. *Biomaterials* [online]. 2002, **23**(4), 1169-1185 [cit. 2020-04-15]. DOI: 10.1016/S0142-9612(01)00232-0. ISSN 01429612. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142961201002320>
- 5] |Průvodce materiály. *Prusa Research* [online]. Praha [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>
- 6] |3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna?. In: *SVĚT HARDWARE* [online]. Česká republika: redakce SHW, 2019 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457>
- 7] |Anizotropie. *Wikipedia* [online]. Wikipedie: Otevřená encyklopedie, 2019 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Anizotropie>
- 8] |KEANE, Phillip. What is Design for Additive Manufacturing?. *Engineers rule* [online]. Engineers rule, 2016 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.engineersrule.com/design-additive-manufacturing/>
- 9] |VAYRE, Benjamin, Frédéric VIGNAT a François VILLENEUVE. Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects. *Mechanics & Industry* [online]. 2012, **13**(2), 89-96 [cit. 2020-03-04]. DOI: 10.1051/meca/2012003. ISSN 2257-7777. Dostupné z: <http://www.mechanics-industry.org/10.1051/meca/2012003>
- 10] |FRAZIER, William. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2014, **23**(6), 1917-1928 [cit. 2020-03-04]. DOI: 10.1007/s11665-014-0958-z. ISSN 1059-9495. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11665-014-0958-z>
- 11] |SLAVÍČEK, Jakub. *Konstrukce tiskové hlavy pro 3D tisk velkorozměrových dílů z betonové směsi* [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z:

<http://hdl.handle.net/11012/82485>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování. Vedoucí práce David Paloušek.

- 12] |MICHAEL, MOLITCH-HOU. 3D PRINTED GUITARMAKER LEADS STUDENTS IN BUILDING MOBILE CONCRETE 3D PRINTER. *3D printing industry* [online]. 2015 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printed-guitarmaker-leads-students-in-building-mobile-concrete-3d-printer-54546/>
- 13] |*Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing* [online]. , 213 [cit. 2020-05-11]. DOI: 10.1080/17452759.2016.1209867. ISSN 1745-2759. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>
- 14] |BREJLOVÁ, Iva. Udělejte si místo v kuchyni. Přicházejí 3D tiskárny na jídlo. *SVĚT CHYTŘE* [online]. 2019 [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://www.svetchytře.cz/a/pVRvw/udelejte-si-misto-v-kuchyni-prichazeji-3d-tiskarny-na-jidlo>
- 15] |LIPTON, Jeffrey, Meredith CUTLER, Franz NIGL, Dan COHEN a Hod LIPSON. Additive manufacturing for the food industry. *Trends in Food Science & Technology* [online]. 2015, **43**(1), 114-123 [cit. 2020-05-11]. DOI: 10.1016/j.tifs.2015.02.004. ISSN 09242244. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092422441500045X>
- 16] |„Stáhni si a vytiskni večeri.“ Vědci představili 3D tiskárnu na jídlo Více na: <https://www.mobilmania.cz/bleskovky/stahni-si-a-vytiskni-veceri-vedci-predstavili-3d-tiskarnu-na-jidlo/sc-4-a-1335924/default.aspx>. In: *Mobil Mania* [online]. 2016 [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://www.mobilmania.cz/bleskovky/stahni-si-a-vytiskni-veceri-vedci-predstavili-3d-tiskarnu-na-jidlo/sc-4-a-1335924/default.aspx>
- 17] |HAMÁČEK, Daniel. *Prognóza vývoje 3D tisku* [online]. Praha, 2019 [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/82631/MU-DP-2019-Hanacek-Daniel-Daniel%20Hanacek%20-%20Diplomova%20prace.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- 18] |TAM, Kam-Ming, James COLEMAN, Nicholas FINE a Caitlin MUELLER. Robotics-Enabled Stress Line Additive Manufacturing. REINHARDT, Dagmar, Rob SAUNDERS a Jane BURRY, ed., Dagmar REINHARDT, Rob SAUNDERS, Jane BURRY. *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2016, s. 350-361 [cit. 2020-02-22]. DOI: 10.1007/978-3-319-26378-6_28. ISBN 978-3-319-26376-2. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-26378-6_28
- 19] |BHATT, Prahar, Rishi MALHAN, Aniruddha SHEMBEKAR, Yeo YOON a Satyandra GUPTA. Expanding capabilities of additive manufacturing through use of robotics technologies: A survey. *Additive Manufacturing* [online]. 2020, **31** [cit. 2020-02-25]. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100933. ISSN 22148604. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860419312266>

- 20] |LI, Lin, Azadeh HAGHIGHI a Yiran YANG. A novel 6-axis hybrid additive-subtractive manufacturing process: Design and case studies. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2018, **33**, 150-160 [cit. 2020-02-25]. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.05.008. ISSN 15266125. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1526612518304602>
- 21] |KREJČÍŘÍK, Petr. *Bezpodporový 3D tisk na 6-ti osém robotickém rameni* [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-02-25]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/83093>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování. Vedoucí práce David Škaroupka.
- 22] |WU, Chenming, Chengkai DAI, Guoxin FANG, Yong-Jin LIU a Charlie WANG. RoboFDM: A robotic system for support-free fabrication using FDM. In: *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* [online]. Singapore: IEEE, 2017, s. 1175-1180 [cit. 2020-02-25]. DOI: 10.1109/ICRA.2017.7989140. ISBN 978-1-5090-4633-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7989140/>
- 23] |KEATING, Steven a Neri OXMAN. Compound fabrication: A multi-functional robotic platform for digital design and fabrication. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [online]. 2013, **29**(6), 439-448 [cit. 2020-03-19]. DOI: 10.1016/j.rcim.2013.05.001. ISSN 07365845. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0736584513000409>
- 24] |DING, Yaoyu, Rajeev DWIVEDI a Radovan KOVACEVIC. Process planning for 8-axis robotized laser-based direct metal deposition system: A case on building revolved part. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [online]. 2017, **44**, 67-76 [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.1016/j.rcim.2016.08.008. ISSN 07365845. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0736584515300326>
- 25] |FDM: One of the Keys for Stratasys Success in 3D Printing. *Ennomotive* [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.ennomotive.com/fdm-stratasys-3d-printing-plastics/>
- 26] |AHLERS, Daniel, Florens WASSERFALL, Norman HENDRICH a Jianwei ZHANG. 3D Printing of Nonplanar Layers for Smooth Surface Generation. In: *2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)* [online]. IEEE, 2019, s. 1737-1743 [cit. 2020-04-14]. DOI: 10.1109/COASE.2019.8843116. ISBN 978-1-7281-0356-3. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8843116/>
- 27] |*A Robot FDM Platform for Multi-Plane and 3D Lattice Structure Printing* [online]. Melbourne, Florida, 2018 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11141/2558>. Disertační práce. College of Engineering at Florida Institute of Technology.
- 28] |SHEMBEKAR, Aniruddha, Yeo YOON, Alec KANYUCK a Satyandra GUPTA. Generating Robot Trajectories for Conformal Three-Dimensional Printing Using Nonplanar Layers. *Journal of Computing and Information Science in Engineering* [online]. 2019, **19**(3) [cit. 2020-04-14]. DOI: 10.1115/1.4043013. ISSN 1530-9827. Dostupné z:

<https://asmedigitalcollection.asme.org/computingengineering/article/doi/10.1115/1.4043013/726284/Generating-Robot-Trajectories-for-Conformal>

- 29] |HUANG, Yijiang, Juyong ZHANG, Xin HU, Guoxian SONG, Zhongyuan LIU, Lei YU a Ligang LIU. FrameFab. *ACM Transactions on Graphics* [online]. 2016, **35**(6), 1-11 [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.1145/2980179.2982401. ISSN 0730-0301. Dostupné z: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2980179.2982401>
- 30] |YUAN, Philip, Hao MENG, Lei YU a Liming ZHANG. Robotic Multi-dimensional Printing Based on Structural Performance. REINHARDT, Dagmar, Rob SAUNDERS a Jane BURRY, ed., Dagmar REINHARDT, Rob SAUNDERS, Jane BURRY. *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2016, s. 92-105 [cit. 2020-03-20]. DOI: 10.1007/978-3-319-26378-6_7. ISBN 978-3-319-26376-2. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-26378-6_7
- 31] |He ExOne Exerial™ 3D printing system designed for industrial series production will debut at GIFA 2015. In: *MetalworkingNEWS: ExOne debuts Exerial™ 3D printing system designed for industrial series production* [online]. [cit. 2020-02-26]. Dostupné z: <http://metalworkingnews.info/wp-content/uploads/2015/05/Prod-Rev-ExOne-1.jpg>
- 32] |Working range. In: *ABB: Technical data for the IRB 120 industrial robot* [online]. [cit. 2020-02-26]. Dostupné z: <https://webimages.imagebank.abb.com/public/v2/b7207bb0-410e-4ea7-bee3-3cbbe94b0a74/i1080px.jpg>
- 33] |ZHANG, Xu, Mingyang LI, Jian LIM, Yiwei WENG, Yi TAY, Hung PHAM a Quang-Cuong PHAM. Large-scale 3D printing by a team of mobile robots. *Automation in Construction* [online]. 2018, **95**, 98-106 [cit. 2020-05-16]. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.08.004. ISSN 09265805. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580518304011>
- 34] |KOLÍBAL, Zdeněk. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. První vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
- 35] |GREENWAY, Bryan. Robot accuracy. *Industrial Robot: An International Journal* [online]. 2000, **27**(4), 257-265 [cit. 2020-04-03]. DOI: 10.1108/01439910010372136. ISSN 0143-991X. Dostupné z: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/01439910010372136/full/html>
- 36] |3D printing technology – Delta versus Cartesian. *Tractus 3D* [online]. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://tractus3d.com/knowledge/3d-printing-technology-delta-versus-cartesian/>
- 37] |Prusa Research. In: *Prusa Research* [online]. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/wp-content/uploads/2019/09/MK-1-e1568036631208.png>

- 38] |2B. MK3S/MK2.5S - demontáž extruderu. In: *Prusa Research* [online]. 2019 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://manual.prusa3d.com/Guide/2B.+MK3S-MK2.5S+-+demont%C3%A1%C5%BE+extruderu/1168>
- 39] |TRILAB DeltiQ Na první pohled jiný 3D tisk. In: *TRILAB* [online]. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://trilab3d.com/deltiq/>
- 40] |*Product specification IRB 4400*. b.r. Dostupné také z: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC042478-001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- 41] |*Product specification IRB 120*. b.r. Dostupné také z: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC035960-001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- 42] |*Product specification IRB 2600*. b.r. Dostupné také z: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC035959-001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- 43] |*Product specification IRB 460*. b.r. Dostupné také z: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC039611-001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- 44] |*Product specification IRB 6620*. b.r. Dostupné také z: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC025861-001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- 45] |DINE, Andi a George-Christopher VOSNIAKOS. On the development of a robot-operated 3D-printer. *Procedia Manufacturing* [online]. 2018, 17, 6-13 [cit. 2020-04-09]. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.10.004. ISSN 23519789. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S235197891831120X>
- 46] |KOVÁČIK, Miroslav. Tisková podložka. *3Dfactory.cz* [online]. 2018 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://3dfactory.cz/2018/11/06/tiskova-podlozka/>
- 47] |MUELLER, Stefanie, Sangha IM, Serafima GUREVICH, Alexander TEIBRICH, Lisa PFISTERER, François GUIMBRETIERE a Patrick BAUDISCH. WirePrint. In: *Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '14* [online]. New York, New York, USA: ACM Press, 2014, s. 273-280 [cit. 2020-02-26]. DOI: 10.1145/2642918.2647359. ISBN 9781450330695. Dostupné z: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2642918.2647359>
- 48] |SABELA, Jakub. *Struktura a mechanické vlastnosti nástřiku Ti-6Al-4V připraveného metodou Cold Spray*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2019.. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Vedoucí práce Lukáš Řehořek.
- 49] |BARINKA, Michal a Lukáš ŘEHOŘEK. *Současné principy nanášení vrstev metodou Cold Spray, charakteristika nástřiku Cu* [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/112945>. Diplomová

práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Vedoucí práce Lukáš Řehořek.

- 50] |SINGH, Harminder, T. SIDHU, S. KALSI a J. KARTHIKEYAN. Development of cold spray from innovation to emerging future coating technology. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* [online]. 2013, **35**(3), 231-245 [cit. 2020-03-13]. DOI: 10.1007/s40430-013-0030-1. ISSN 1678-5878. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s40430-013-0030-1>

11 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

11.1 Seznam tabulek

Tab 1) Materiály a jejich teploty při tisku [5] [3]	18
Tab 2) Průměr dosahovaných přesností robotů firmy ABB [46] [47] [45] [48] [49]	44

11.2 Seznam obrázků

Obr. 3-1 Schéma tiskové technologie FDM [3]	16
Obr. 3-2 příklad vyhlazeného povrchu pomocí acetonu [5]	17
Obr. 3-3 součást a) s podporami, b) očištěná a bez podpůrných struktur [6]	19
Obr. 3-4 graf znázorňující závislost meze pevnosti v tahu na orientaci tištěného modelu [8].	20
Obr. 3-5 a) Aktivní tisková hlava [16], b) pasivní tisková hlava [17]	21
Obr. 3-6 Příklady pokrmů z 3D tiskárny: a) čokoládové srdce [20], b) pokrm z práškové pasty [21]	21
Obr. 4-1 Vytisknutá struktura s viditelnými napěťovými křivkami pro: a) bodové silové působení, b) plošné silové působení [23]	23
Obr. 4-2 Model pracoviště SLAM [23]	24
Obr. 4-3 Rozbor silového působení na vlákno při tisku převisu [26]	25
Obr. 4-4 Model králíka vytisknut a) bezpodporovou tiskovou metodou, b) konvenčním tiskem za pomoci technologických podpor [27]	26
Obr. 4-5 a) tištěná součást s převisem, b) pracoviště při bezpodporovém tisku [25]	26
Obr. 4-6 Robotický tisk a) převisu, b) horní stěny duté kostičky [28]	27
Obr. 4-7 Silové působení při tisku převislého objemu (inspirováno obrázkem z [26])	28
Obr. 4-8 Přemístění tiskové platformy mezi a) tiskovým a b) frézovacím pracovištěm [28] ..	29
Obr. 4-9 Pracoviště zařízení Stratasys Robotic Composite 3D [30]	30
Obr. 4-10 efekt schodovitého stupňování povrchu na modelové součásti [3]	31
Obr. 4-11 a) Rovinné vrstvení materiálu, b) kombinace rovinného a nerovinného vrstvení materiálu [32]	31
Obr. 4-13 změna natočení TCP podél zakřiveného tištěného povrchu [33]	32
Obr. 4-14 příklad úhybného manévru tiskové hlavy při přejezdu nad součástí [31]	32
Obr. 4-15 Technologie FrameFab: a) počítačový model prutové konstrukce, b-d) postup tisku [34]	33
Obr. 4-16 a) detail pavoučího vlákna, b) nákres středového prutu, c) nákres středového prutu s podpůrnými vlákny [35] [26]	34
Obr. 4-17 tisková hlava při tisku vlákna [35]	35
Obr. 4-18 Zařízení ExOne Exerial určené pro velkorozměrový 3D tisk [36]	36
Obr. 4-19 Pracovní prostor průmyslového robotu ABB IRB 120 [37]	36
Obr. 4-20 Simulace velkorozměrového robotického tisku s využitím pojezdové dráhy v programu RobotStudio [2]	37
Obr. 4-21 a) souběžný tisk jednoho betonového modelu pomocí dvou mobilních robotů, b, c) tištěný model po deseti dnech schnutí [38]	37
Obr. 5-1 Příklad kartézské tiskárny Prusa i3 MK3 [42]	40

Obr. 5-2 Řemenový systém GT2 zajišťující pohyb tiskové hlavy [43].....	41
Obr. 5-3 příklad FDM tiskárny typu delta [44].....	42
Obr. 5-4 Schématické znázornění přesnosti a opakovatelnosti a) pozice, b) trajektorie.....	43
Obr. 6-1 a, b) model tiskové hlavy pro tisk technologií FDM.....	47
Obr. 6-2 náčrt tiskové hlavy a soupis parametrů nástroje.....	48
Obr. 6-3 Příklad FDM výtisku a) bez kontroly rychlosti distribuce, b) s kontrolou rychlosti distribuce materiálu [33]	50
Obr. 7-1 Simulace robotického 3D tisku v programu RobotStudio, s využitím vlastní tiskové hlavy z kapitoly 6.1	51