

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Stavba výrobních strojů a zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Možnosti úprav 3D tiskárny typu „Felix“

Autor: **Pavel HAMRLE**
Vedoucí práce: **Doc. Ing. Josef FORMÁNEK, Ph.D.**

Akademický rok 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel HAMRLE**

Osobní číslo: **S14B0127P**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Stavba výrobních strojů a zařízení**

Název tématu: **Možnosti úprav 3D tiskárny typu "Felix"**

Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Základní požadavky:

Cílem je provést rozbor technického uspořádání modulárního pojezdového mechanismu pro 3D tiskárny s principem tisku FDM typu "Felix". Dále provést specifikaci požadavků s ohledem na správnou funkčnost, technickou a montážní jednoduchost. Výsledkem je zhodnocení možnosti konstrukčního návrhu stavebnicového systému pojezdového mechanismu tak, aby mohl být tento systém snadno použit přímo pro 3D tiskárny.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova bakalářské práce:

1. Vypracování rešerše včetně systematického popisu funkce.
2. Vypracování rozboru technických parametrů.
3. Vypracování variant koncepčních řešení.
4. Zhodnocení vybraného konstrukčního řešení.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah kvalifikační práce: **30-40 stran A4**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

MM Průmyslové spektrum: Konstrukce CNC obráběcích strojů. Praha, 2006

ŘAŠA, J., ŠVERCL, J. Strojnické tabulky. Scientia, Praha, 2004

HOSNEDL, S., KRÁTKÝ, J. Příručka strojního inženýra. Brno: Computer Press, 1999

Podkladový materiál, výkresy, prospekty, katalogy apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Josef Formánek, Ph.D.**

Katedra konstruování strojů

Konzultant bakalářské práce: **Doc. Ing. Josef Formánek, Ph.D.**

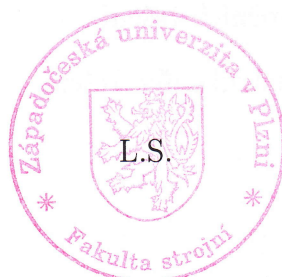
Katedra konstruování strojů

Datum zadání bakalářské práce: **19. září 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2017**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 19. září 2016

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

Autorská práva

Podle Zákona o právu autorském č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků bakalářské práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků, nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce, panu doc. Ing. Josefovi Formánkovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady a připomínky, kterými přispěl k vypracování této práce.

Pavel Hamrle

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Hamrle	Jméno Pavel	
STUDIJNÍ OBOR	„Stavba výrobních strojů a zařízení“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Formánek, Ph.D.	Jméno Josef	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKS		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Možnosti úprav 3D tiskárny typu „Felix“		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	59	TEXTOVÁ ČÁST	52	GRAFICKÁ ČÁST	7
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Bakalářská práce je zaměřena na rozbor technického uspořádání modulárního pojezdového mechanismu pro 3D tiskárny s principem tisku FDM typu "Felix". V práci je provedena specifikace požadavků s ohledem na správnou funkčnost, technickou a montážní jednoduchost. Výsledkem je zhodnocení možnosti konstrukčního návrhu stavebnicového systému pojezdového mechanismu tak, aby mohl být tento systém snadno použit přímo pro 3D tiskárny.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>3D tisk, aditivní technologie, FDM, konstrukce, FELIX 3.1, sw NX</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Hamrle	Name Pavel	
FIELD OF STUDY	„Design of Manufacturing Machines and Equipment“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Formánek, Ph.D.	Name Josef	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Equipment editing options 3D printers of type "Felix"		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2017
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	59	TEXT PART	52	GRAPHICAL PART	7
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>The bachelor thesis is focused on the analysis of the technical arrangement of the modular travel mechanism for 3D printers with FDM printing principle "Felix". The thesis is made with the use of requirements specification with regard to proper functionality, technical and assembly simplicity. The result is an appreciation of the design capability of the modular system of the drive mechanism so that it can be easily used directly for 3D printers.</p>
KEY WORDS	3D printing, additive technology, FDM, mechanical design, FELIX 3.1, sw NX

Obsah

Úvod	10
1 Uvedení do problematiky Technologie 3D tisku	11
1.1 Aditivní výroba	11
1.2 Aplikace	12
1.2.1 Přímý výrobní proces	12
1.2.2 Nepřímý výrobní proces	13
2 Rozdělení výrobních procesů 3D tisku	14
2.1 Polymerizace	14
2.2 Spékání a tavení	15
2.3 Vytlačování a tavení	16
2.4 Výroba vrstev laminátu	17
2.5 Materiály aditivní výroby	18
2.5.1 Plastické hmoty	18
2.5.2 Kovy	20
2.5.3 Keramika	20
2.5.4 Vybrané materiálové zajímavosti:	20
3 Kinematické struktury 3D technických systémů	21
4 Vlastní konstrukční návrh technického systému	23
4.1 Upřesnění úkolu	23
4.2 Průzkum stavu techniky	23
4.2.1 BigRap	24
4.2.2 Titan Robotics	25
4.2.3 FELIXprinters	26
4.3 Návrh koncepčních variant řešení technického systému	28
4.3.1 Varianta A	28
4.3.2 Varianta B	29
4.3.3 Varianta C	29
4.4 Hodnocení koncepčních variant	30
4.5 Konstrukční návrh	32
4.5.1 Tiskové orgány	32
4.5.2 Rámová konstrukce	33
4.5.3 Vedení pohybu	34
4.5.4 Pracovní stůl	35
4.5.5 Pohonné systémy	36
4.6 Modulární pojezdový mechanismus: Osa X	38
4.7 Modulární pojezdový mechanismus: Osa Y	41
4.8 Modulární pojezdový mechanismus: Osa Z	44
5 Technicko-ekonomické hodnocení návrhu	47
Závěr	48

Seznam obrázků	49
Seznam tabulek	49
Literatura	50
Seznam příloh	52
5.1 Tiské přílohy	52
5.2 Elektronické přílohy na CD	52

Úvod

V moderním průmyslovém světě je kladen stále větší důraz na zvýšení rychlosti a snížení nákladů výrobních procesů. Vzhledem k zavedenému směru se začaly na trhu ve stále větším množství uplatňovat aditivní technologie. Ze skupiny v současnosti největších technologických trendů významně vystupují právě aditivní výrobní procesy, neboli „3D tisk“.

Mezi hlavní pozitiva aditivní technologie patří především rychlost zavedení nových výrobků, splnění požadované výstupní kvality a především aplikace při výrobě tvarově velmi komplikovaných geometrií. Na základě těchto předpokladů si našla svá uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu.

Nejčastěji tuto technologii nalezneme ve strojírenském a elektrotechnickém průmyslu, kde se zabývá výrobou prototypů, složitých technických produktů, či nedostupných náhradních dílů. Nemalý prostor se technologii otvírá na poli zdravotnictví. Dnešní tiskárny jsou schopny tisknout modely kostí, kůže, buněk a funkčních orgánů. Skutečnost výroby komplikovaných výrobků v jediné funkční součásti je pro zdravotní průmysl zcela zásadní.

Kromě značných kladů jsou zde i výrazná omezení použitelnosti. Výrobky například nedosahují takových materiálových hodnot, jaké jsou při využití odlišných technologií snadno dosažitelné. Je zde také nutnost stavby a projektování podpůrných systémů výtisků, značné rozměrové omezení vzhledem k velikosti strojů a rychlost oproti konkurenci v sériové a hromadné výrobě.

V horizontu několika let je očekávaný nárůst aplikace 3D tisku v domácnostech. Stroje budou cenou přijatelnější pro domácí uživatele a tiskárna se stane členem domácnosti. Lidé budou bydlet v tištěných domech, používat tištěná vozidla, obklopovat se tištěnými gadgety a konzumovat tištěné potraviny. Budoucnost proto skýtá pro technologii 3D tisku ohromný potenciál.

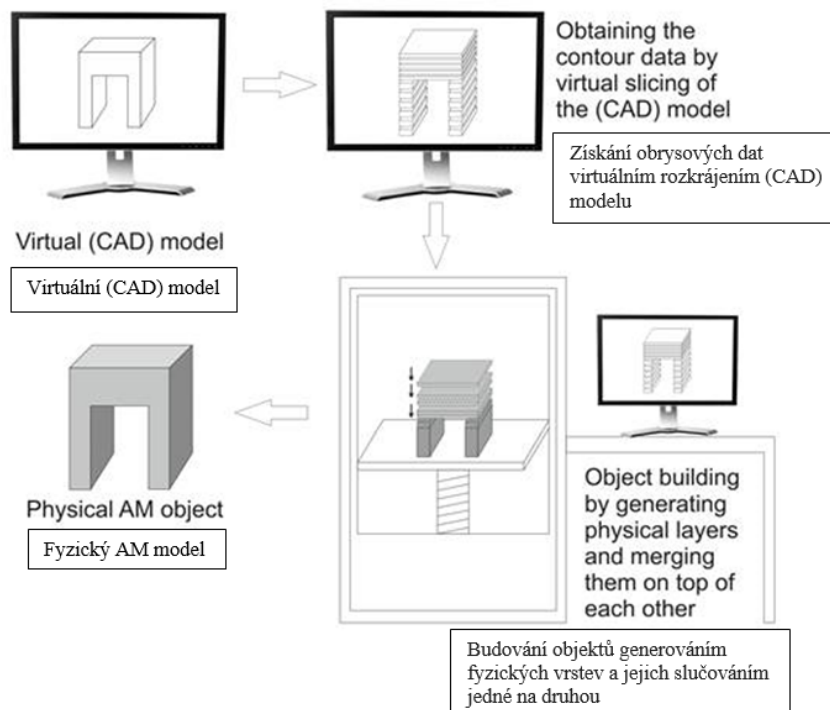
Základním požadavkem práce je provedení rozboru technického uspořádání modulárního pojezdového mechanismu pro 3D tiskárny s principem tisku FDM typu „Felix“. Dále provedení specifikace požadavků s ohledem na správnou funkčnost, technickou a montážní jednoduchost a cenovou přijatelnost. Výsledkem práce je zhodnocení možností konstrukčního návrhu stavebnicového systému pojezdového mechanismu tak, aby mohl být tento systém snadno použit přímo pro 3D tiskárny větších rozměrů.

1 Uvedení do problematiky Technologie 3D tisku

1.1 Aditivní výroba

Aditivní výroba (AM proces) je automatický výrobní proces založený na principu vrstvení materiálu, který vytváří 3D fyzický objekt přímo z 3D-CAD dat, bez využití nástrojů.

Data získaná z 3D-CAD modelů, skenování objektů nebo dalších zobrazovacích technologií (např. CT-Scanning;), jsou za pomoci speciálních softwarů rozložena do virtuálních vrstev, které mají definovaný tvar a tloušťku. Výsledný objekt poté vzniká pomocí speciálních strojů, fungujících na základě dvou výrobních kroků. Prvním krokem je přeměna virtuální vrstvy na fyzický objekt použitím různých fyzikálních jevů. Druhým krokem je spojení nově vznikající vrstvy s předchozí již vytvořenou. Tyto dva základní kroky jsou stejné pro všechny aditivní výrobní stroje: 3D tiskárny. Vzhledem k technologii procesu se materiál výrobku v některých případech prezentuje odlišnými vlastnostmi v různých směrech zatížení: tzv. anizotropie. Tato skutečnost chování materiálu závisí především na výrobních procesech a vlastnostech použitého materiálu. Cílem je správná konfigurace procesu, kdy se materiál stává zcela izotropním. [1]



Obrázek 1: Aditivní procesní řetěz [2]

Vzhledem k trendům ve vývoji a historii technologie je možné, že postupem času vznikne iniciativa změnit zavedené definice. V současnosti již existuje technologie nanášení kapek polymeru (BPM - ballistic Particle Manufacturing), kde se materiál přidává z více směrů v různém objemu. Jedná se tudíž o aditivní technologii, která není založená na vrstvách.

1.2 Aplikace

Vyjadřuje schopnost využití technologie a čerpání z jejích benefitů. Zatímco pojem technologie chápeme pouze jako popis výrobního procesu z pohledu vědeckého přístupu, aditivní technologie obsahuje dvě základní charakteristické procesní skupiny aplikací.

1.2.1 Přímý výrobní proces

Do této skupiny řadíme procesy, které splňují základní definice aditivní výroby a její charakteristické vrstevné struktury. Procesy jsou uvedené v anglickém názvosloví, které je v technických kruzích používáno i v České republice.

Rapid Prototyping

Shrnuje veškeré procesy, za pomoci kterých lze získat produkty, které neslouží jako konečné výrobky, ale pouze jako prototypy. S ohledem na funkci tištěného modelu dělíme skupinu na dvě podskupiny.

- **„Solid Imaging“ a „Concept Modeling“**
Jedná se o součásti vytvořené z kontrastních materiálů bez možnosti uplatnění činného zatížení na jejich povrch. Základní funkcí je získání technické představy a následného posouzení výsledného vzhledu a rozměrů objektu.
- **„Functional Prototyping“**
Jedná se o součásti, které mají stejné vlastnosti jako finální výrobek. Jsou schopné přenést zatížení a jiné působící elementy, se kterými výrobek přijde v době své životnosti do kontaktu. Slouží především k ověření a výslednému zhodnocení funkcí výrobku.

Rapid Manufacturing

Shrnuje veškeré procesy, za pomoci kterých lze získat konečný produkt. S ohledem na funkci tištěného modelu dělíme skupinu na dvě podskupiny:

- **„Direct Manufacturing“**
Konečné produkty vychází přímo z AM procesu. Součást splňuje veškeré charakteristiky a funkce, které jsou zadané konstrukčními parametry. V dnešní době již nejsou použitelné materiály pro technologii překážkou.
- **„Direct Tooling“**
Výrobky z AM procesu jsou využívány pro další technologické procesy vedoucí k výrobě konečného produktu (jádra forem, chladicí kanály, vtokové soustavy a další). Nástroje nemusí být vyrobené pouze AM technologií. Produkty mohou sloužit pouze jako součásti těchto nástrojů.

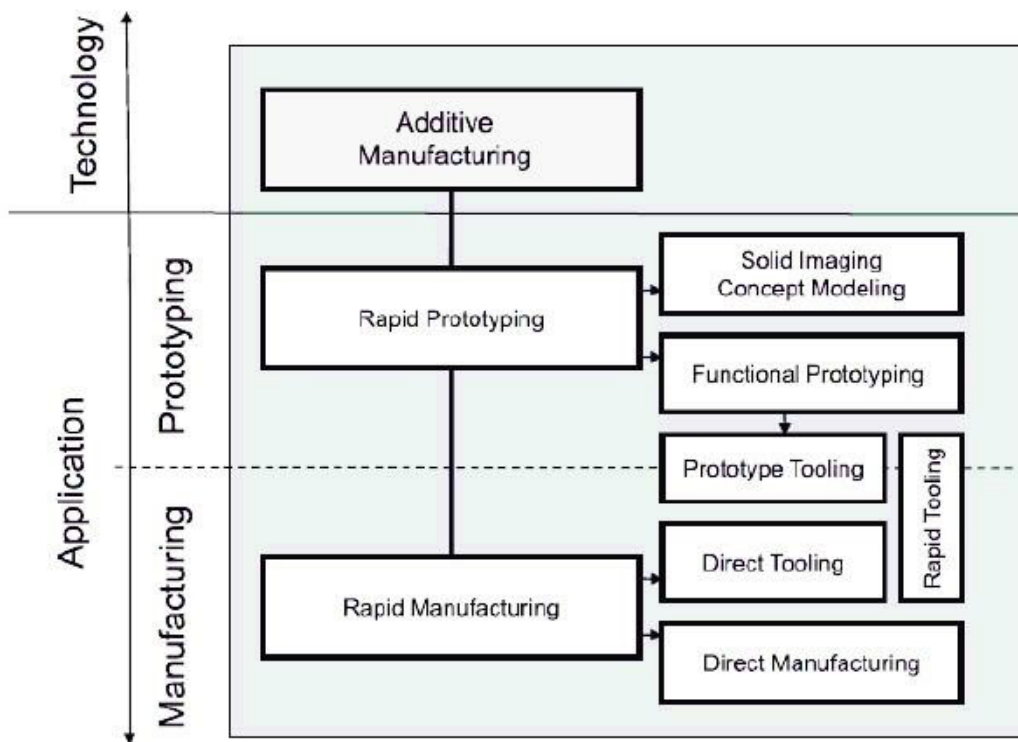
„Prototype tooling“ a „Rapid tooling“

Jedná se o aplikaci využívanou v malosériových výrobách, kde dochází k častým a rychlým změnám výrobků. Například formy pro odlévání součástí jsou vyráběné z levnějších dočasných materiálů pro snížení ceny výroby. Aplikace spadá do dvou kategorií. Jedná se o funkční prototyp, ale jelikož jde o výrobu nástrojů, je začleněna taktéž do kategorie „Direct Tooling“. Aplikace se tudíž nachází na rozhraní Prototypingu a Manufacturingu.

1.2.2 Nepřímý výrobní proces

Produkty nepřímých výrobních procesů jsou používány jako vzorové modely pro jiné reprodukční procesy (například lití). Procesy spadající do této skupiny tudíž nesplňují základní definici aditivní výroby, jelikož reprodukční procesy nejsou založené na vrstvení materiálu. Z těchto důvodů bylo zavedeno označení: Nepřímý výrobní proces.

Hlavním důvodem rozdělení a označování procesů je utřídění rozdílných technologií do přehledných skupin v závislosti na rychlosti a funkci. Hlavní roli v dnešní době hraje převážně marketing společností, které jsou hlavními lídry na trhu.



Obrázek 2: Úrovně aplikací aditivní technologie [3]

2 Rozdělení výrobních procesů 3D tisku

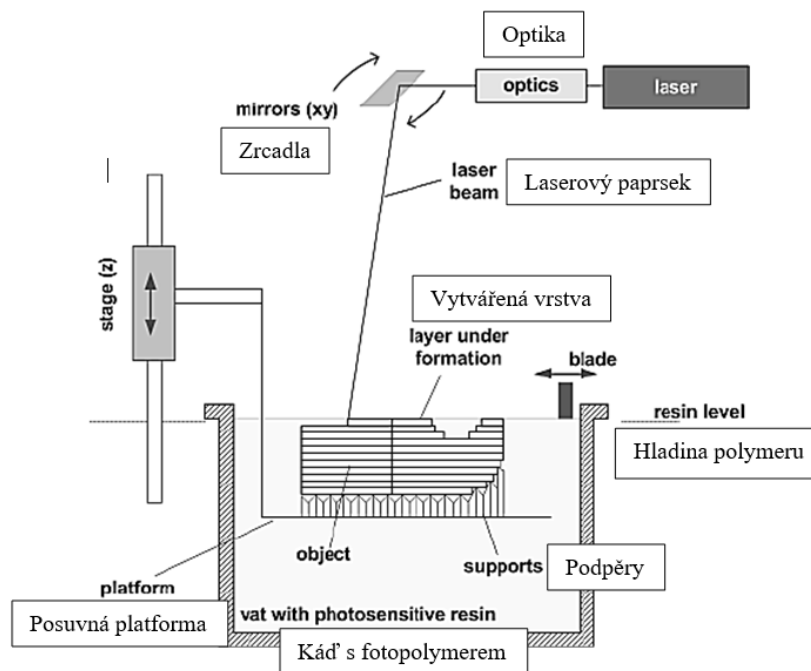
V současné době se na trhu pohybuje velké množství strojů, které pracují na základěch technologie aditivní výroby. Veškerá zařízení splňují dva základní kroky, které jsou zmíněné v kapitole (1.1). Hlavní odlišností jednotlivých zařízení je způsob výroby jednotlivých vrstev, jejich vzájemné spojení a schopnost použití odlišných materiálů. Vytváření jednotlivých vrstev vyžaduje energetický zdroj, který generuje potřebný fyzikální efekt a řídicí centrum, které kontroluje pohyb v souřadnicovém systému.

2.1 Polymerizace

Proces výroby objektů spočívá ve vytvrzování polymerové tekutiny pomocí ultrafialového (UV) záření. V některých případech je nutné následné zpracování pro zajištění výsledné tuhosti objektu. Při tvorbě složitějších geometrií jsou konstruovány přídatné podpěry, které zabraňují případné deformaci materiálu během procesu výroby. Podpěry jsou vytvářeny pomocí speciálních softwarů a jsou z výsledného objektu nakonec odstraněny.

Stereolitografie (SLA - Stereolithography)

Objekty jsou vytvářeny pomocí UV laserového paprsku, který jednotlivé vrstvy vykresluje na hladinu polymerové tekutiny. Po dokončení vrstvy se tištěný objekt ponoří do polymeru a proces se opakuje. Velikost vrstev se pohybuje v rozmezí 0,05 až 0,25 [mm]. Posledním krokem je vytvrzení v UV peci a následné očištění povrchu. Kvalita a detaily výroby jsou na velmi vysoké úrovni v porovnání s ostatními procesy. Používanými materiály jsou fotonopolymery, které jsou vyplňovány nano-částicemi z karbonu nebo keramiky, pro zlepšení pevnostních vlastností.



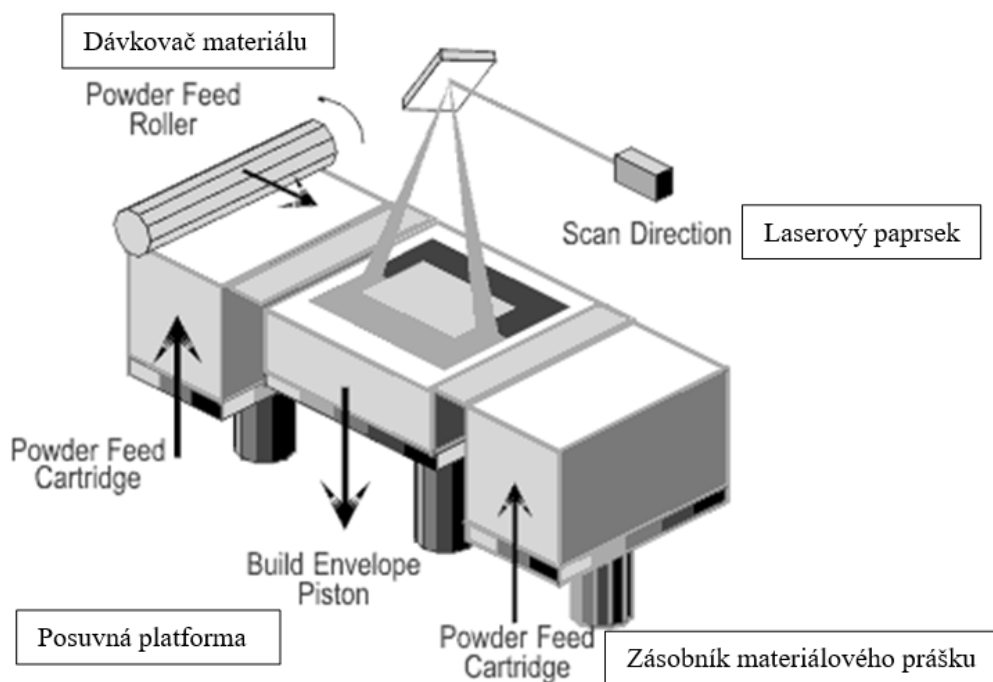
Obrázek 3: Stereolitografie [4]

2.2 Spékání a tavení

Proces spočívá v tavení termoplastického prášku a následném opětovném ztuhnutí. Jednotlivé stroje se liší v technologii, kterou je prášek taven (laser, elektronový paprsek a další). Jednotlivé vrstvy prášku jsou aplikovány na předchozí vytvrzené vrstvy. Při takovém postupu jsou podpěry nepotřebné, jelikož se výsledný objekt opírá o vrstvy neroztaveného prášku. Velkou výhodou je využití procesu nejen pro plasty, ale také kovové materiály a možnost plno-barevného tisku pomocí barevného pigmentu vstupního prášku. Po vytažení objektu ze stroje je možné přebytečný materiál recyklovat.

Selektivní laserové spékání (SLS - Selective laser sintering)

Pro použití metody SLS musí materiály splňovat několik zásadních kritérií. Z tohoto důvodu slouží technologie pouze pro několik materiálů: nerezová ocel, nástrojová ocel, titan, kobalt, chrom a hliník. Výhodou metody je vysoká pevnost výrobků. Princip spočívá v tavení tenkých vrstev kovového prášku velice výkonným laserem, který vytváří vysoké energetické nároky. Využití nalézá především u tvarových, těžko vyrobitelných a vysoce namáhaných součástí. Vysoké teploty nad křivkou tavení materiálu mohou způsobit vznik poruch a nežádoucího vnitřního napětí.



Obrázek 4: Selektivní laserové spékání [5]

Přímé kovové laserové spékání (DLMS - Direct metal laser sintering)

Jeden z nejefektivnějších aditivních procesů zaměřených na kovové materiály. Proces může být využit pro téměř jakoukoli slitinu kovu, což je nesmírnou výhodou. Tato metoda pracuje na principu spékání velmi tenké vrstvy kovového prášku požadovaného tvaru. Potřebnou teplotu vytváří paprsek laseru, který se pomalu pohybuje po tištěné ploše. Částice uvnitř kovu se díky rychlosti a použité teplotě spojí dohromady, aniž by došlo během procesu k úplnému roztavení kovu. Významnou výhodou technologie spo-

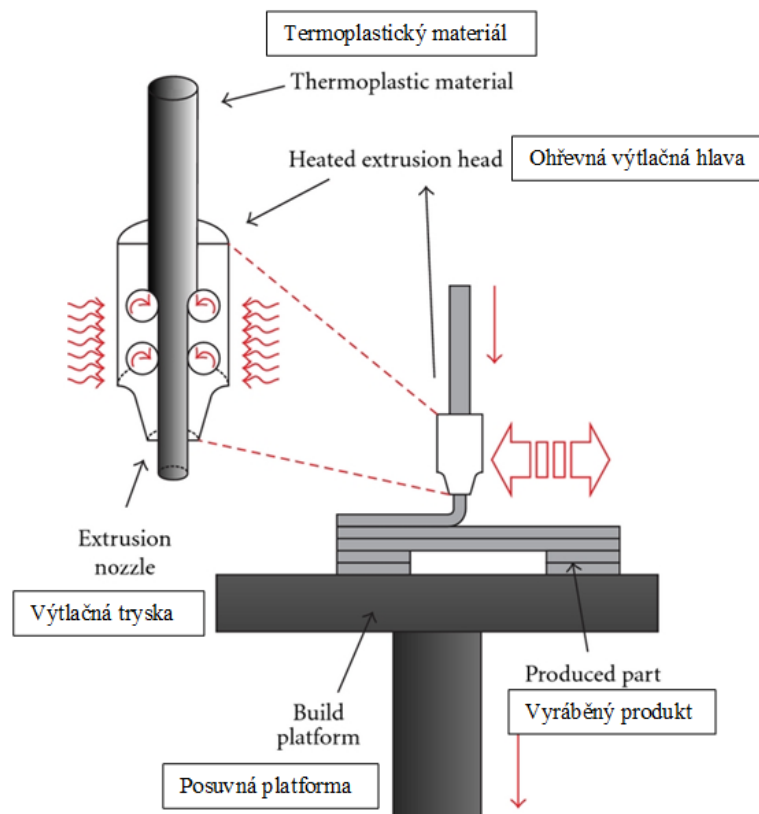
čívá tvorba objektů oproštěných od nežádoucího napětí a vnitřních poruch materiálu. Výrobek proto nemusí být dále tepelně zpracován. Nevýhodou technologie DLMS je cena a doba trvání celého procesu. Stroje jsou proto převážně využívány pro tvarové velmi složité kusové výroby v leteckém a vesmírném průmyslu.

2.3 Vytlačování a tavení

Proces je založený na tavení termoplastického materiálu a jeho vytlačování skrze trysky v pravidelných páslech na vyhřívanou podložku. Materiál se vyskytuje ve formě prášku, granulátu nebo tiskové struny (filamentu). Vzhledové vlastnosti závisí pouze na materiálu, tudíž mohou vznikat mnohobarevné objekty.

Modelování depozicí taveniny (FDM - Fused Deposition Modeling)

Materiál se do polotekutého skupenství přivádí pomocí elektrické cívky nebo laseru. Tato technologie nabízí střední kvalitu tisku, ale své nedostatky vyvažuje pořizovací cenou, neboť je jednou z nejlevnějších technologií 3D tisku na trhu. Výhodou se stává také množství použitelného materiálu. Pro FDM lze použít téměř jakýkoliv termoplastický polymer, který se dá vyrobít ve formě filamentu (Průměr struny se pohybuje v rozmezí 1.75-3 [mm]). Tato technologie byla průkopníkem při komercializaci trhu pro domácí uživatele.



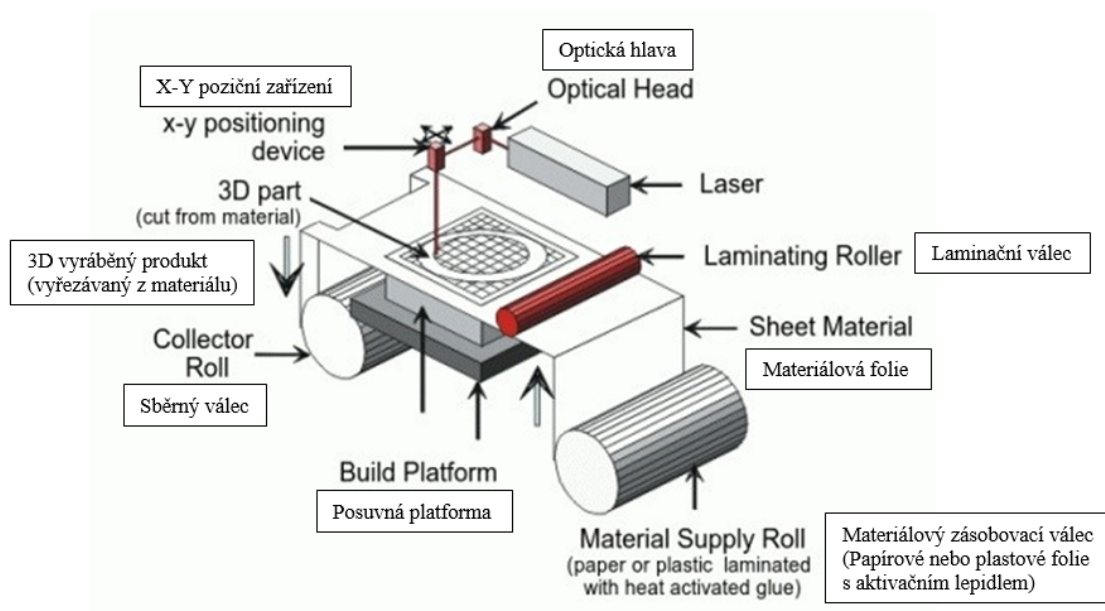
Obrázek 5: Modelování depozicí taveniny [6]

2.4 Výroba vrstev laminátu

Jednotlivé vrstvy objektu jsou vyřezávány pomocí nožů nebo laseru z předem připravených materiálových folií dané tloušťky. Folie jsou nejčastěji z plastů, papíru, kovu nebo keramiky. Jednotlivé vrstvy jsou spojené pomocí speciálních lepidel, svařováním nebo ultrazvukem. Nepotřebný přebytečný materiál slouží jako podpora výsledného objektu a některé materiály mohou být později recyklovány.

Výroba laminovaných objektů (LOM - Laminated Object Manufacturing)

Proces spočívá ve vyřezávání a následném lepení vrstev svinutého papíru nebo folie. Tloušťka vrstvy se pohybuje okolo 0,2 [mm]. Jako pojiv se využívá speciálních lepidel, které se aktivují vlivem zahřívání na určité teplotě. Výhodou tohoto tisku jsou relativně nízké náklady a především rychlost stroje. Jedná se o poměrně primitivní metodu, dnes již méně využívanou.



Obrázek 6: Výroba laminovaných objektů [7]

2.5 Materiály aditivní výroby

Na současném trhu se objevují materiály mnoha tříd: respektive plastické hmoty, kovy a keramika. Mimo těchto základních tříd se v aditivní výrobě používají nejrůznější exotické materiály. Trend vývoje materiálů jde kupředu velmi rychle, přestože zkoumání a výroba nového materiálu vyžaduje finančně velmi náročné procesy.

2.5.1 Plastické hmoty

Pro širokou veřejnost není tisk za pomoci plastických hmot převratnou novinkou. Právě výzkum fotopolymerů a myšlenka využití jejich vlastností dala podnět vzniku prvním aditivním procesům (kapitola 2.1). V dnešní době se na trhu nachází několik druhů plastických hmot, které vykazují specifické hodnoty, ať už mluvíme o mechanických, nebo chemických vlastnostech. Níže je uvedeno pouze několik základních, v praxi hojně využívaných plastů.

PLA - Kyselina polyléčná

Jedná se o ekologický „plast“ vyrobený z obnovitelných zdrojů. Hlavní surovinou pro jeho výrobu je rostlinná biomasa (kukuřičný škrob) a přírodní látky (celulóza). Je zdravotně nezávadný a je možné ho ekologicky likvidovat bez zátěže životního prostředí. Vyznačuje se poměrně vysokou pevností a možností různobarevného provedení. Při tisku velmi rychle chladne, neboť potřebuje na zpracování poměrně nízkou teplotu, proto nedochází ke kroucení modelů. Nevýhodou je jeho křehkost oproti ostatním materiálům. V oblasti 3D tisku je velmi rozšířen hlavně kvůli jeho velmi nízké teplotní roztažnosti. Ve většině případů není potřeba vyhřívaná podložka. [8]

ABS - Akrylonitril butadién styrén

Syntetický materiál řazený mezi ropné produkty. Vyznačuje se dobrými vlastnostmi v oblastech pevnosti, odolnosti vůči vodě či povětrnostním podmínkám. Jeho použití se orientuje hlavně na objekty, které jsou vystaveny vyšším zatížením. Nevýhodou jsou zápach, který se uvolňuje při tisku a znepríjemňuje celý proces výroby, a tepelná roztažnost, která způsobuje deformaci objektů a nutnost vyhřívání tiskové podložky. [8]

Tabulka 1: Srovnání materiálových vlastností plastických hmot ABS a PLA [8]

Materiálová charakteristika	Jednotka	ABS	PLA
Materiálový původ	-	Syntetický	Rostlinný
Teplota měknutí	°C	110-125	70-80
Teplota tání	°C	210-240	160-190
Teplota extrudace	°C	215-260	190-230
Teplota podložky	°C	80-120	50-70 (není potřebné)
Modul pružnosti	<i>MPa</i>	~ 2300	~ 3500
Mechanická odolnost proti zlomu	<i>MPa</i>	~ 70	~ 60
Povrchová tvrdost	-	Průměrná	Vysoká
Deformace	-	Vysoká	Nízká
Hořlavost	-	Hořlavé	Nehořlavé

PLA - WOOD

Materiál používaný při imitaci dřevěných výrobků. Skládá se ze 40 % z recyklované dřevěné drtě a základní matricí tvořenou PLA plastem. Díky dřevěné drti ve směsi je i vůně výtisku identická s vůní dřeva. Různorodost barevné kresby lze dosáhnout změnou teploty. Nevýhodou materiálu je časté ucpávání trysky dřevěnými částicemi. [9]

ASA - Akrylester styren akrylonitril

Polymer s vysokou pevností (dosahuje vyšších hodnot než ABS). Výhodou je výrazná odolnost proti povětrnostním vlivům při zachování fyzikálních vlastností. Díky mechanickým vlastnostem je ideální materiál pro náročné aplikace, kde je dlouhodobě kladen důraz na vzhled a dobrou rozměrovou stabilitu. [9]

PMMA - Polymethylmethakrylát

Zdravotně nezávadný syntetický polymer, který se vlastnostmi řadí mezi termoplasty. Je odolný vůči povětrnostním vlivům. Propouští UV záření, má dobré optické vlastnosti a snadno propouští světlo. Mezi přednosti PMMA patří: dobré mechanické a elektroizolační vlastnosti, odolnost vůči zředěným alkáliím a kyselinám. Jeho nedostatkem je nízká povrchová tvrdost (dochází k snadnému poškrábání povrchu). [9]

POM - Polyoxymethylen

Termoplast vyznačující se dobrou tuhostí, která přispívá k rozměrové stabilitě materiálu. Má velmi příznivé kluzné vlastnosti, chemickou a teplotní stabilitu. Využití nalezneme u součástí pracujících v náročném chemickém prostředí, kde je potřeba rozměrová stálost a nízké tření (palivové systémy). Materiál je recyklovatelný. [9]

Conductive filament

Jedná se o materiál, který dokáže za pomoci dodaných příměsí do směsi vést elektrický proud. Díky této vlastnosti materiál odkrývá nové prostory pro užití technologie 3D tisku. Materiál má schopnost vytvářet elektrické obvody, napájecí konektory, bateriové schránky a mnoho dalších elektrických součástí. Realizace výroby elektronických zařízení se zúží na jedinou součást a odstraní tak problémy s montáží. [9]

Flexible filament

Materiál významný především svojí elasticitou a lehkostí. Díky své pružnosti může být využitý pro aplikace, kde je zapotřebí tlumení vznikajících rázů (součástky jemných přístrojů, boty a další). Nevýhodou materiálu je výrazná degradace při rychlé změně teplot. [9]

Laybrick filament

Kompozitní materiál tvořený základním nosným polymerem a jemným výplňovým křídovým práškem. Ten vytváří po zatuhnutí jemnou strukturu na povrchu a objekt tak vypadá jako vytesaný z pískovcové horniny. [12]

2.5.2 Kovy

Z široké perspektivy lze tvrdit, že pro aditivní technologii se dá využít jakýkoliv kovový materiál, který lze svařit a připravit ve formě prášku. Velikost částic prášku se pohybuje v rozmezí 20-30 μm . Zprvu se používal především hliník a ocel. Postupně se díky inovacím portfolio rozšířilo o titan, nerezové oceli a vzácné kovy (zlato, stříbro). Použití nových materiálů s sebou přineslo i rozšíření aditivní technologie do vesmírného výzkumu, medicíny, šperkařství, jemných elektronických zařízení a robotiky. [10]

2.5.3 Keramika

Keramika se na trhu objevila během vývoje procesů spékání a tavení materiálů ve formě prášku. Keramický prášek se podobně jako kovový materiál spéká a postupně vrství. Materiál po vytištění nedosahuje zdaleka hodnot klasické výroby keramiky, a proto musí následovat další kroky zpracování, konkrétně vypalování a glazování. [11]

2.5.4 Vybrané materiálové zajímavosti:

B2

Označení tohoto materiálu vychází z jeho základního stavebního prvku, kterým je vitamin B2 (riboflavin). Struktura B2 poskytuje možnost tisku na molekulární úrovni. Riboflavin je jedním ze základních stavebních prvků organických tkání. Otevírají se tím nové možnosti uplatnění aditivní technologie v protetice, medicíně, ale hlavně v nanotechnologiích. [12]

Graphene

Vysoce sofistikovaný materiál vznikl v elektrotechnickém průmyslu pro velkovýrobu mikroelektronických součástek. Jedná se o speciální sloučeninu oxidu uhlíku. Graphene je pružná, plastická látka, která dokáže vést a kondenzovat elektrický proud. Použití této sloučeniny v aditivních procesech je možné na molekulární bázi i na bázi větších rozměrů. Tím je vhodná pro vytváření mikročipů, ale i vodivých součástek pro spotřební elektroniku. [13]

Sádra

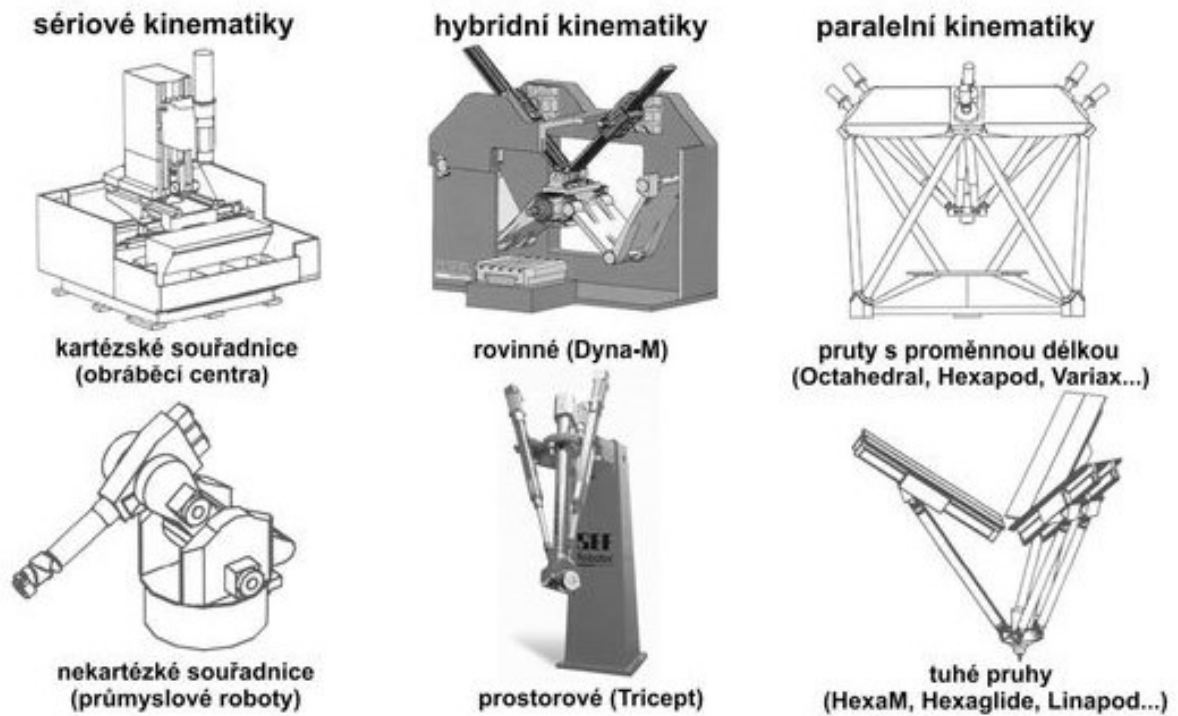
Princip se podobá klasickému 2D inkoustovému tisku. Na podložku se nanese sádrový prášek ve velmi tenké (0,01 – 0,2 [mm]) vrstvě, na kterou se nanese speciální inkoust, sloužící ke slepení prášku a vytvoření pevné hmoty. Opakováním těchto operací se vytvoří objekt s vysokým rozlišením a přesným detailem struktury a barevnosti. Tato technologie se nejlépe hodí pro vytváření architektonických modelů, modelů postav a jiných objektů, od kterých se vyžaduje, aby dodržovaly nejen hmotu, ale zároveň barvu. [13]

Čokoláda

Jeden z mála potravinových materiálů použitelný v technologii FDM. Snadno se působením tepla může přivést do pastovitého stavu. Chová se podobně jako plastické hmoty používané v procesu FDM. Díky pestrému využití materiálu lze namíchat hmoty zajímavých chutí a barev. Tento způsob vytváření cukrovinek je velmi populární mezi moderními cukráři. [14]

3 Kinematické struktury 3D technických systémů

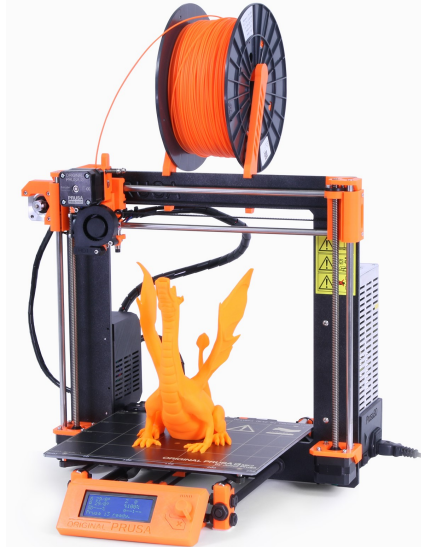
Správná volba kinematické struktury závisí především na velikosti a tvaru aplikačního prostoru. Tyto parametry jsou dané kombinací rotačních, obecných a posuvných kinematických dvojic (KD) v kartézských, cylindrických a sférických souřadnicích. V současnosti stále převažují 3D tiskárny se sériovou kinematikou. Na trhu ale můžeme nalézt systémy podporující smíšenou nebo paralelní kinematiku. [15]



Obrázek 7: Rozdělení kinematických struktur [15]

Sériová kinematika:

Technické systémy využívající sériovou kinematiku pracují s KD o jednom stupni volnosti. Jednotlivé kinematické členy mohou rotovat, nebo konat translační pohyb, nezávisle na sobě. Pohyb koncového členu je dán součtem všech předešlých pohybů do série řazených KD.



Obrázek 8: Kartézská 3D tiskárna ORIGINAL PRUSA I3 MK2 [16]

Paralelní (delta) kinematika:

Kinematika spočívá na využití délkově proměnných, kloubově uložených prutů o šesti stupních volnosti (pruty s konstantními délkovými hodnotami mají pouze tři stupně volnosti). Řazení pohonů probíhá paralelně a výsledný pohyb je dán spojením pohybů všech zúčastněných pohonů.



Obrázek 9: Delta 3D tiskárna Tripodmaker Classic [17]

4 Vlastní konstrukční návrh technického systému

Požadavkem zákazníka je konstrukční návrh funkčního prototypu „low-cost“ technického systému modulárních pojezdových mechanismů, které by pracovaly na bázi výrobních procesů FDM, spadajících do skupiny aditivních technologií. Zákazník požaduje dimenzování technického systému na netradiční rozměrové parametry, které mají v současnosti slabé zastoupení na trhu.

4.1 Upřesnění úkolu

Při řešení problematiky konstrukce byly zváženy možnosti tiskáren nacházejících se na trhu a čerpány informace z kompletní rešerše výchozího produktu tiskárny FELIX 3.1. Pomocí získaných informací bylo možné predikovat specifické požadavky problematiky 3D tisku.

4.2 Průzkum stavu techniky

Na současném trhu se nacházejí desítky společností zabývajících se problematikou aditivní výroby. Mezi jejich produkty se řadí technické systémy založené na základech různých procesů. Tato práce se zabývá stroji založenými na principech FDM procesů, a proto se při rešerši současného tržního obsazení zaměřuje výhradně na produkty na bázi FDM výrobního procesu.

Největší prostor na současném komerčním trhu zaujímají malé technické systémy, jejichž konstrukce vytváří pracovní prostor o přibližných rozměrech 200 x 200 x 200 [mm]. Většina je sestavena na principu sériové kinematiky, ale jsou zde i zástupci alternativních systémů typu delta (viz. kapitola 3). Důraz vývojářských společností malých tiskáren je kladen na vývoj tzv. „Do yourself“ produktů, které si do plně funkčního stavu sestaví zákazník. Stroje tohoto charakteru nabízí například společnosti Velleman, Prusa Research s.r.o, Tripodmaker a FELIXprinters.

V této práci je pozornost zaměřena především na stroje pracující v kartézských souřadnicích sériové kinematiky, vzhledem k náročnosti na řízení pohybů, a stroje větších rozměrů (BigRap, Titan Robotics), které velikostně korespondují s požadavky na námi vytvářený technický systém. Jako posuzovací a hodnotící technický systém slouží tiskárna FELIX 3.1 od společnosti FELIXprinters.

4.2.1 BigRap

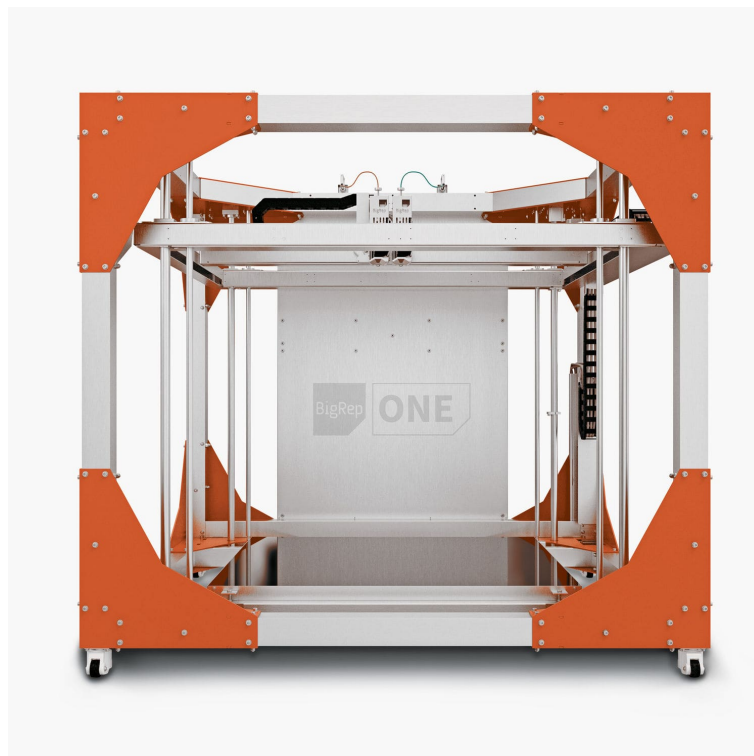
Společnost se věnuje od roku 2014 vývoji a výrobě strojů, pracujících na principech aditivních technologií. Mezi produkty patří profesionální stroje dvou skupin: BigRap STUDIO a BigRap ONE.

BigRap ONE v3

Technický systém vytvořený pro uspokojení zákazníků požadujících výrobu rozměrných objektů. Důraz při konstrukci je kladen na vysokou kvalitu, přesnost, rychlost a bezpečnost provozu.

Technické parametry:

Pracovní oblast nabízí prostor o velikosti 1005 x 1005 x 1005 [mm], přičemž celkový zástavbový prostor technického systému činí 1850 x 2250 x 1725 [mm]. Nosný rám konstrukce je sestavený z hliníkových profilů a dalších kovových komponent, které zajišťují dlouholetý provozní cyklus systému. Kubický rám spočívá na zátěžových kolečkách pro snadnou manipulaci v prostoru pracoviště. Ve spodní části se nachází vyhřívaný, velkoformátový, nepohyblivý pracovní stůl. Pohyb ve vertikálních souřadnicích zajišťuje rámová portálová konstrukce tvaru čtverce, umístěná na modulárním pohybovém mechanismu. Součástí této konstrukce je vestavěný příčník, na kterém se nacházejí dvě tiskové hlavy (extrudery). Krokové motory spolu s ozubenými řemeny a kuličkovými šrouby vytváří potřebné momenty pro konání pohybu. [18]



Obrázek 10: BigRap ONE v3 [18]

4.2.2 Titan Robotics

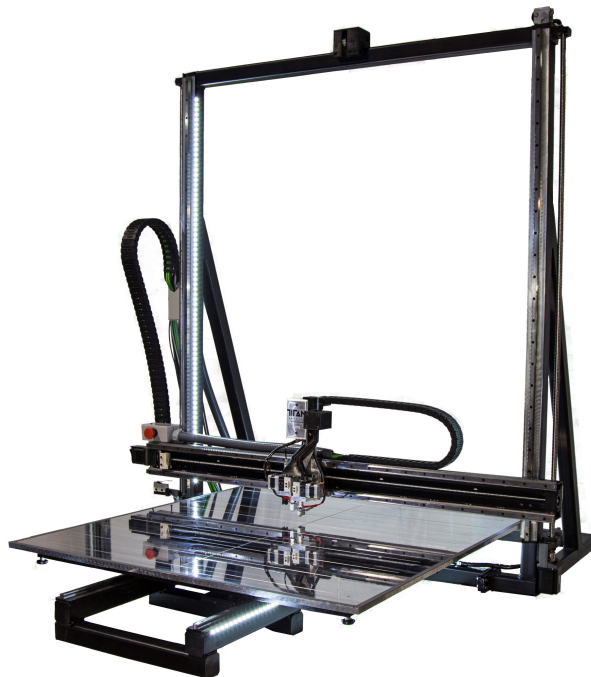
Společnost nacházející se v současné době na trhu velkých finančně dostupných 3D technických systémů. Politika společnosti je zaměřená na vysokou kvalitu tisku, vysokou životnost a použití vysoce kvalitních materiálů a komponent. V produktové nabídce společnosti se nacházejí tři odlišné stroje: The Cronus, The Hyperion a The Atlas (který nejvíce odpovídá směru konstrukce vytvářenému systému).

The Atlas

The Atlas je vlnkovou lodí společnosti na poli průmyslových kartézských aditivních výrobních strojů. Výrobní prostor stroje začíná na rozměrech 762 x 762 x 1143 [mm], ovšem na přání zákazníka je společnost ochotna rozměry upravit. Stroj je designován s důrazem na maximální rychlost, přesnost a spolehlivost.

Technické parametry:

Velikost pracovního prostoru na modelu Atlas 2.5 (největší sériový model) je 1066 x 1066 x 1220 [mm]. Rám je sestaven z ocelových komponent, na principu portálového stojanu. Skládá se ze stolového lože, po kterém se v jedné horizontální ose pohybuje pracovní stůl. Svislou osu zajišťuje ocelový portál. Portál je zajištěn proti přepadnutí ocelovou vzpěrnou konstrukcí. Na portál je uchycený příčný nosník, který zajistí pohyb ve druhé horizontální ose. Tiskové extrudery jsou uchyceny na příčník. [19]



Obrázek 11: The Atlas 2.5 [19]

4.2.3 FELIXprinters

Počátky společnosti sahají do roku 2010, kdy se zakladatel Guillaume Felixsdal rozhodl vytvořit díly pro svého humanoidního robota pomocí komerční 3D tiskárny. Nedokonalosti pořízeného přístroje jej donutily k zamyšlení a rozhodnutí vytvořit svůj vlastní stroj. Se svými dvěma společníky založil roku 2011 společnost FELIXprinters. Jejich první produkt sklídl obrovský ohlas a společnost se velmi rychle rozšířila do celého světa. Přestože se trh mění velmi rychlým tempem, základní myšlenka společnosti zůstává stejná.

Společnost klade důraz na jednoduchost systému a snadnou manipulaci. Současně společnost vydává pro zákazníky spoustu vylepšení, které si majitelé dokážou vytisknout a namontovat zcela sami. Tato invence shledává u zákazníků velký úspěch. [20]

Produktová řada:

Felix 3 series:

FELIX 3L - Think Bigger, Build Bigger
FELIX 3.1 - DIY Kit

Felix pro series:

FELIX Pro 1
FELIX Pro 2

Analýza produktu FELIX 3.1:

Proces tisku probíhá přes firemní software, který běží na základní desce atmega 2560. Umožňuje ovládání až pěti motorů, tří výkonných ohříváčů a ostatních elektronických prvků.

Tiskárna podporuje materiály: PLA, PET(G), Flexible filament, ABS, PVA (materiály vyžadující menší teploty než 275 °C dodávané ve formě filamentu). V nabídce výrobce se nachází dva typy extruderu. Pro jednobarevný tisk se využívá jedno-tryskové zařízení. Pro dvoubarevný tisk je zapotřebí dvou-trysková hlavice, přičemž jedna tryska je odjímatelná. Uvnitř je umístěné ohřívací zařízení, které poskytuje provozní dobu až 40 hodin. Maximální Rozměry tištěného výrobku jsou: 255 x 205 x 255 [mm].

Rámová konstrukce:

Hlavní kostru rámu tiskárny tvoří hliníkové konstrukční profily. Při uvážení rozměrů a velikosti tištěného výrobku jsou pevnostní charakteristiky profilů dostačující. Díky T-drážkám a jednoduché manipulaci vytvářejí možnosti samostatného sestavení zákazníkem a umožňují modularitu systému. Tiskárna se tak může prodávat jako sestavitelný kit. Konce profilů zaslepují plastové krytky, které zabraňují vniknutí cizích částic do vnitřních částí.

Spoje jsou obstarány za pomoci šroubových rozpěrek, které jsou zasazeny do T-drážek. Ty slouží též pro vedení kabeláže k tiskové hlavě a ovládacímu panelu (chytré řešení pro odstranění energetického řetězu). Hliník je vhodně zvoleným materiálem, jelikož svou pevností splňuje pevnostní podmínky a díky své hmotnosti zlepšuje ergonomii sestavy. Rám tvoří celkem 6 profilů. Podstava je konstruována do tvaru písmene T pro

zajištění odporu proti převrácení. Otevřený design napomáhá k manipulaci s výrobkem z jakékoliv strany. Pro snadnou manipulaci je váha redukována na 9 kilogramů a opatřena plastovým úchopem.

Vyhřívaný posuvný stůl tvoří foliový odporový ohříváč (o výkonu 144W) umístěný mezi dvěma hliníkovými deskami. Vyhřívání je nutné pro možnosti tisku rozmanitého spektra materiálů.

Pohony-vedení pohybu:

Tiskový extruder se pohybuje v horizontální souřadnicové ose. Vedení je realizováno pomocí lineárních ložisek pro průmyslové účely. Kvalita těchto vedení je velmi vysoká. Díky jejich vlastnostem dochází při pohybu částí tiskárny k minimálnímu tření a vysoké přesnosti i po několikahodinovém nepřetržitém tisku.

Vedení je umístěné v horním profilu tiskárny, stejně tak jako uložení řemenu. Ten umožňuje plynulý, rychlý a hladký pohyb extruderu, při vysoké přesnosti souřadnic.

V druhé horizontální souřadnicové ose se pohybuje vyhřívaný stůl. Obdobně jako v případě extruderu jsou vedení a pohon zajištěny lineárními ložisky a řemeny.

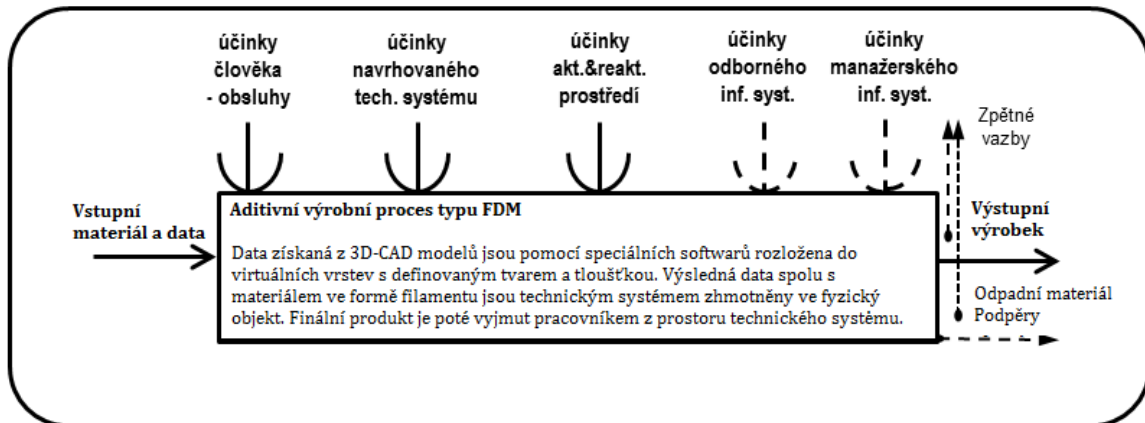
Díky rozdělení os na extruder a pohyblivý stůl je možné využít celý prostor tiskárny a dosáhnout tak větších rozměrů výtisků.

Vertikální souřadnicová osa je vymezena velikostí rámu. Pohyblivý stůl je umístěný na plastovém držáku, který je uchycen na stavícím trapézovém šroubu. Stavící šroub zajistí plynulý a velmi přesný krokový posuv, který je rovný výšce vytištěné vrstvy. Velikost vrstvy se u zařízení FELIX 3.1 pohybuje v rozmezí 50 až 350 μm . [21]



Obrázek 12: FELIX 3.1 [21]

4.3 Návrh koncepčních variant řešení technického systému



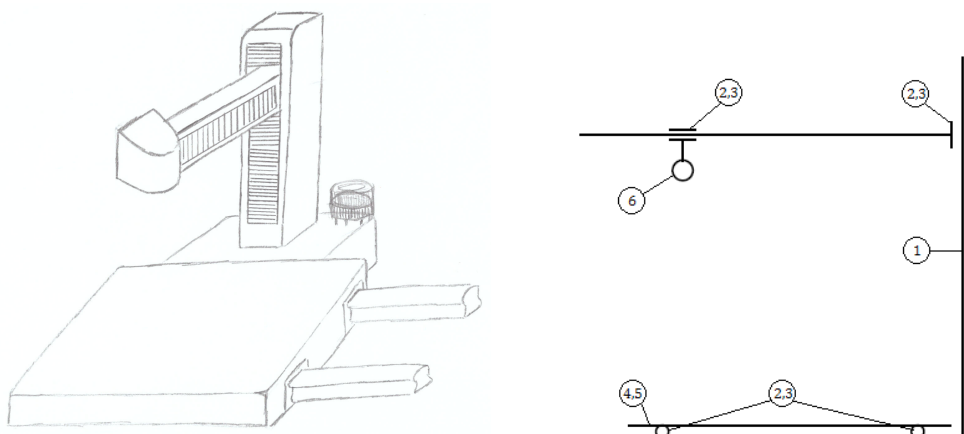
Obrázek 13: Technologie provozního transformačního procesu [22]

3D tiskárna, s ohledem na dotýčný provozní transformační proces, musí splňovat několik základních neoddiskutovatelných funkcí:

- (1) Zajištění nosných funkcí
- (2) Zajištění pohybu komponent
- (3) Zajištění vedení pohybu
- (4) Zajištění nesení produktu
- (5) Zajištění tepelného působení na produkt
- (6) Zajištění rovnoměrné aplikace materiálu

4.3.1 Varianta A

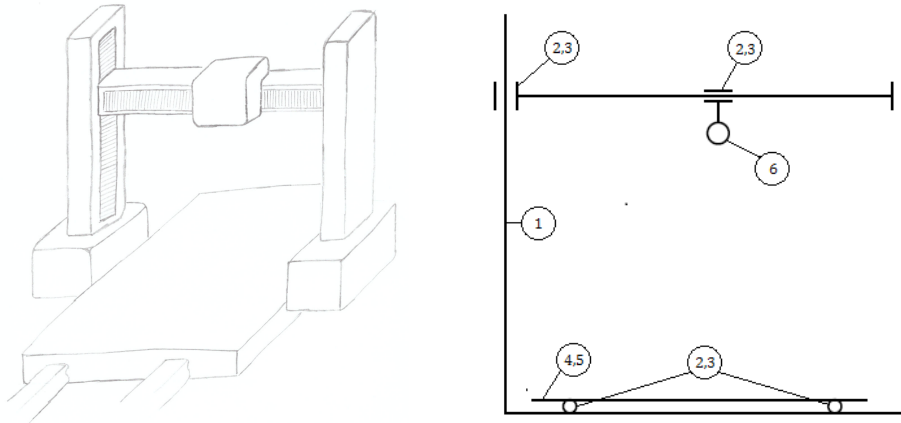
- (1) Princip stojanového ramene
- (2) Funkce na principu motorů a posuvných mechanismů
- (3) Funkce na principu vedení součástí
- (4) Funkce na principu pohyblivé podpěrné desky
- (5) Funkce na principu ohřevu pracovní desky
- (6) Funkce na principu tavení materiálu



Obrázek 14: Varianta A

4.3.2 Varianta B

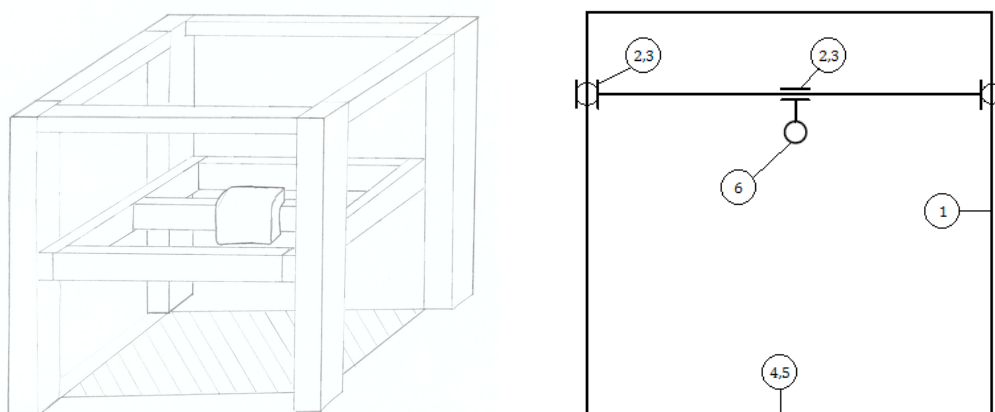
- (1) Princip portálového stojanu (2) Funkce na principu motorů a posuvných mechanismů
(3) Funkce na principu vedení součástí (4) Funkce na principu pohyblivé podpěrné desky
(5) Funkce na principu ohřevu pracovní desky (6) Funkce na principu tavení materiálu



Obrázek 15: Varianta B

4.3.3 Varianta C

- (1) Princip kubické mříže (2) Funkce na principu motorů a posuvných mechanismů (3)
Funkce na principu vedení součástí (4) Funkce na principu statické podpěrné desky (5)
Funkce na principu ohřevu statické pracovní desky (6) Funkce na principu tavení materiálu



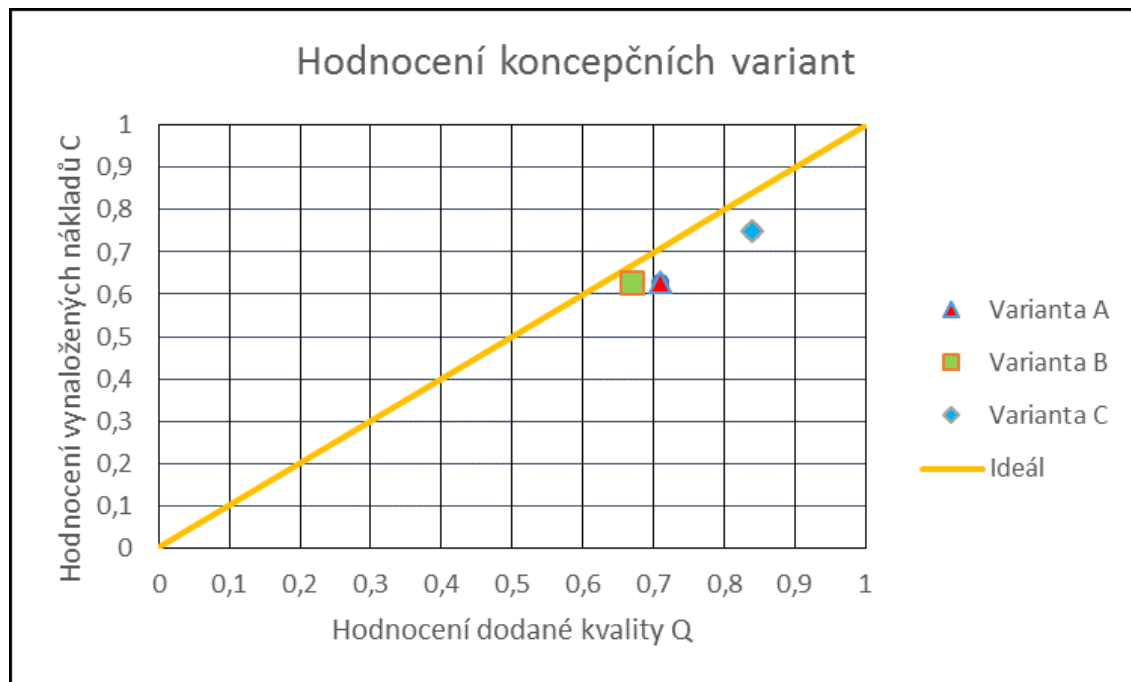
Obrázek 16: Varianta C

4.4 Hodnocení koncepčních variant

Rozhodnutí o konečném layoutu konstrukční varianty se provádí na základě vyhodnocení vlastností a parametrů koncepčních variant. Hodnocení je subjektivní a záleží na posouzení a dobré znalosti problematiky konstruktéra.

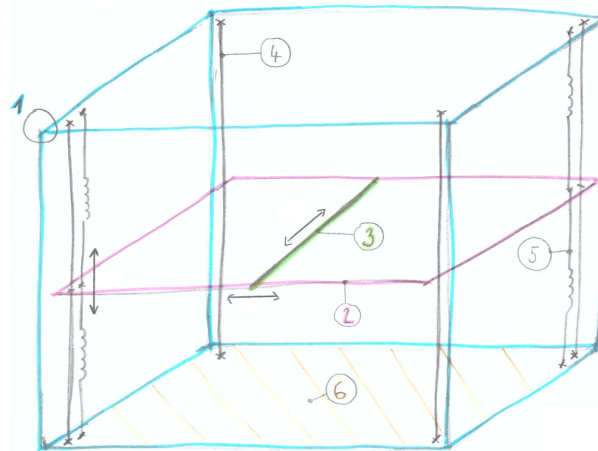
Tabulka 2: Hodnocení koncepčních variant [22]

	Hodnotící parametry	Varianta A	Varianta B	Varianta C	Ideální hodnota
Q	Tuhost	2	3	4	4
	Manipulace s produktem	4	3	2	4
	Zástavbový prostor	3	2	4	4
	Setrvačné hmoty	2	2	4	4
	Přesnost	2	3	4	4
	Estetika	4	3	2	4
	Celkový součet	17	16	20	24
	Normované hodnocení	0,71	0,67	0,84	1
C	Náklady na výrobu	2	3	4	4
	Náklady na nákup	3	2	2	4
	Celkový součet	5	5	6	8
	Normované hodnocení	0,63	0,63	0,75	1



Obrázek 17: Hodnocení koncepčních variant [22]

Z diagramu vyplývá, že (sub)optimálním návrhem je varianta C. Rozdíl mezi variantami je výraznější u dodané kvality, kterou má varianta C nejvyšší. Vynaložené náklady jsou taktéž nejvyšší u varianty C, zatímco varianty A a B jsou velmi podobné. [22]



Obrázek 18: Layout technické orgánové struktury konstrukčního návrhu

(1) Rám tiskárny z montovaných hliníkových profilů (2) Modulární pojezdový mechanismus osy X (3) Modulární pojezdový mechanismus osy Y (4,5) Modulární pojezdový mechanismus osy Z (6) Temperovaný pracovní stůl



Obrázek 19: Model výsledného konstrukčního návrhu

4.5 Konstrukční návrh

4.5.1 Tiskové orgány

Aditivní procesy jsou časově velmi náročné, z tohoto důvodu je zapotřebí zajistit stabilní a spolehlivé tiskové orgány stroje. Jedná se o operační software a hardware ve formě extruderu. Při řešení problematiky předpokládáme využití tiskových komponent výchozího produktu tiskárny FELIX 3.1. Touto predikcí odpadá nutnost konstrukce elektronických a mechanických komponent extruderu.

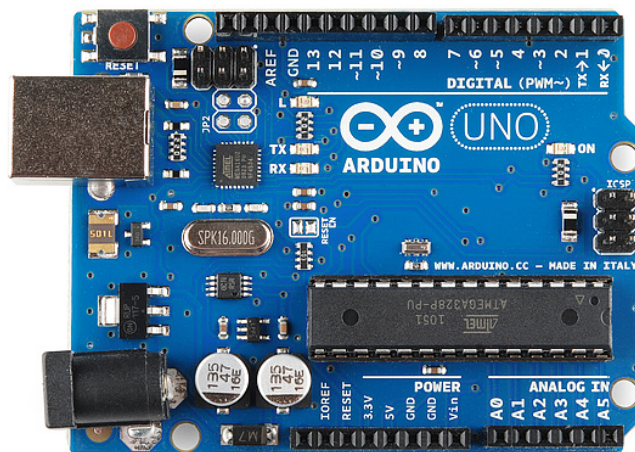
Operační software: Arduino

Jedná se o elektronickou platformu, která vytváří ovládací software elektronických komponent. Platforma vznikla jako „Open Source“, neboli volně přístupná technologie, určená pro rychlé vytváření prototypů. Oproti ostatním nástrojům softwarového řízení Arduino nabízí několik zásadních výhod. Platforma je určena zejména pro začátečníky a je cenově dostupná. Software funguje na operačních systémech Windows, Macintosh OSX a Linux.

Platforma je založená na počítačové desce a vývojovém prostředí. Základní deska je velmi jednoduchá a snadno vyrobitelná svépomocí. Tvoří ji mikrokontroler, krystal, napájecí zdroj 5[V] a převodník pro komunikaci s počítačem. Arduino software (IDE) je volně přístupný. Pomocí údajů sebraných z čidel a senzorů přivedených do základního programu, který je vytvořen pomocí programovacího jazyka Arduino, platforma ovládá určité výstupy (sepne obvod, rozsvítí diodu, spustí motor a jiné) [23]

Volba konstrukčního řešení problému tiskových orgánů:

Vzhledem k cenové dostupnosti a technologické nezávislosti je software Arduino ideální pro účely naší konstrukce. Využitý je především pro programovou podporu taktálních (diskrétních) senzorů dojezdů modulárních mechanismů a temperaci pracovní desky a extruderu.



Obrázek 20: Počítačová deska Arduino [24]

4.5.2 Rámová konstrukce

Rámem stroje rozumíme pevné nebo pohyblivé těleso, které přenáší účinky všech statických a dynamických sil. Slouží jako nosná plocha pro další komponenty sestavy, jako jsou pohonné systémy, pracovní deska a ostatní tiskové zařízení. Velikostní parametry a konstrukce rámu pak určují zástavbový prostor tiskárny a její výslednou pracovní plochu. [25]

požadované vlastnosti:

- Statická tuhost
- Dynamická stabilita
- Teplotní stabilita
- Ergonomie
- Ekonomičnost výroby
- Estetický vzhled

Rámová konstrukce technického systému může být navržena jako montovaná profilová sestava, svařovaná konstrukce nebo monoblok konstrukčního materiálu.

- Svařovaná konstrukce je charakteristická vysokou tuhostí. Svařované spoje jsou pevné a nedochází během pracovních procesů stroje k jejich odlehnutí nebo povolání. Výraznou nevýhodou je ztráta schopností modularity systému.
- Základem montovaného konstrukčního systému je konstrukční profil s T-drážkami po obvodu a možností kombinace pomocí spojovacích prvků. Sestava nenabízí tak vysoké hodnoty tuhosti jako svařovaná konstrukce, ale má významnou schopnost modularity. Jednotlivé profilové segmenty lze bezpečně přidávat pomocí tvarových spojek k tělesu rámu. Systém tak nabízí adaptabilitu v rámci mnoha řešení a nových nároků technických systémů.

Volba konstrukčního řešení problému rámové konstrukce:

Vzhledem k požadavkům je zvolena montovaná konstrukce složená z montovaných eloxovaných hliníkových profilů, které splňují pevnostní parametry a požadavek modularity. Z cenového hlediska je tato konstrukce značně výhodná díky minimální potřebě kvalifikovanosti montážních pracovníků (není potřeba technologií svařování). Hlavním dodavatelem hliníkových profilů je společnost: Alutec *KK*, s.r.o. [26]



Obrázek 21: Hliníkový konstrukční systém Alutec *KK* [26]

4.5.3 Vedení pohybu

Jedná se o spojovací elementy pracující pouze v rovině. Při uvážení kartézské kinematické struktury technického systému je rovinná charakteristika dostačující. Vedení zabezpečuje polohu nebo pohyb mezi pevnou a pohyblivou částí stroje a zároveň přenáší dynamické a statické síly. Splnění tohoto úkolu definuje požadavky na přesnost, odolnost proti vibracím, opotřebením systému a vyrobiteľnost. [25]

Varianty řešení vedení pomocí tření

- **Kluzné lineární vedení s hydrodynamickou charakteristikou**

Komponenta je složena z kolejničky a vozíku, která se po sobě navzájem pohybují. Mezi nimi je nanášena vrstva maziva, které při určitých rychlostech nadlehčuje pohybující se těleso. Vlivem konstrukce a technologie mazání se mění součinitel velikosti tření, za klidu a za pohybu.

Výhody

- Dynamicky stabilní
- Cena
- Dobré tlumení

Nevýhody

- Trhavé pohyby
- Vznik tepla

- **Hydrostatické vedení**

Komponenta je složena z kolejničky a vozíku, která se po sobě navzájem pohybují. Provozní médium je neustále přiváděno pod tlakem do hydrostatických kapes. Tlak je řízený přístroji podle zatížení vedení.

Výhody

- Dobré tlumení
- Náročná operace

Nevýhody

- Cena
- Náročný provoz
- Složitá výroba

- **Valivé vedení**

Komponenta je složena z kolejničky a vozíku, která se po sobě navzájem pohybují. Pohyb se uskutečňuje pomocí valivých těles umístěných ve vozíku. Valivá tělesa se používají ve formě kuliček, válečků nebo jehliček.

Výhody

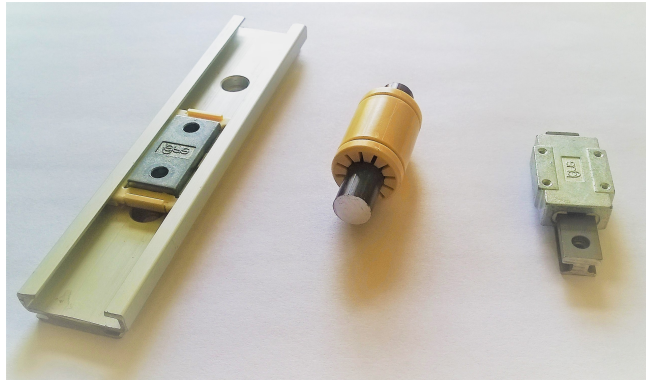
- Tuhost
- Přesnost
- Minimální tření

Nevýhody

- Minimální tlumení
- Náročná na nečistoty
- Náročná výroba

Volba konstrukčního řešení problému vedení pohonu:

Výběr správného vedení je subjektivní proces, který probíhá na základě zjištěných informací z katalogů výrobců. Upřednostnění výrobců závisí na konstruktérově znalosti problematiky. Vybraným (sub)optimálním návrhem je varianta vedení od společnosti „Iigus®“, která se rovněž silně angažuje v additivním průmyslu. Jedná se o technologie samomazných, bezúdržbových plastických hmot uložených v kovových maticích, které využívají veškerých výhod kluzných vedení. Vybraná vedení jsou rovněž kontrolována pomocí firemního analytického serveru. [27]



Obrázek 22: Lineární kluzná vedení společnosti Iigus®

4.5.4 Pracovní stůl

Technický systém zajišťující nosnou funkci vyráběného produktu je zapotřebí nadimenzovat pro minimální deformace. Druhou, velmi důležitou funkcí, je regulace tepelného toku mezi produktem a 3D tiskárnou. Pro tisk z velké škály materiálů se deska stolu samostatně ohřívá, aby nedošlo k sesunutí nebo přilepení materiálu k podkladu. Splnění těchto funkcí zajistí výrobu produktů přesných rozměrů a tolerancí, čímž se efektivně zvýší výrobní portfolio tiskárny.



Obrázek 23: Příklad vyhřívané podložky MK2a [28]

Volba konstrukčního řešení problému pracovního stolu:

Stůl je připojen tvarovými úchyty k tělesu rámu. Temperace stolu je zajištěna vrchní deskou s odporovým drátem, který je ohříván průchodem proudu. Velikost proudu je řízena operačním softwarem na základě tištěného materiálu. Temperační deska není dimenzována na robustní rozměry vzhledem k náročnosti výroby. Aby deformace pod tíhou tištěného produktu byly co nejmenší, je zkonstruován podpěrný rám z hliníkové slitiny.

4.5.5 Pohonné systémy

Pohonné systémy jsou složeny z hnacího členu, převodového mechanismu, který mění kroutící moment z hnacího členu, a posuvného mechanismu, který přenáší výsledný kroutící moment na posuvný pohyb v kartézských souřadnicích. Technické systémy pohybu komponent musí splňovat několik základních požadavků. Zapotřebí jsou především minimální velikost kroku pohybu, rychlost a regulace chodu systému. V neposlední řadě je zde cenové hledisko, které je nezbytné definovat pro udržení kroku s konkurencí.

Hnací člen - motor

- **Krokový motor:**
Jedná se o synchronní motor s buzením permanentními magnety. Ovládací proudové impulsy se přivádí postupně na jednotlivé fáze, rotor se otáčí přetržitě tak, jak je postupně přitahován na jednotlivé póly statoru. Krokové motory lze díky svým vlastnostem použít pro velmi přesné polohování, natočení, moment či rychlost výstupní hřídele. Tyto motory jsou vhodné pro aplikace v situacích potřeby velkého rozběhového momentu.
- **Servo motor:**
Funkční schéma je velmi podobné krokovým motorům. Použití nalézají především pro polohovací aplikace. U servomotorů se dá velmi přesně řídit poloha natočení výstupní hřídele, moment či rychlost. Motory také disponují velmi plochou křivkou výkonu v závislosti na výchozích otáčkách. Oproti krokovým motorům jsou, při zachování stejného výkonu, ve vyšší cenové hladině. [29]

Funkční požadavky hnacího členu:

- Zabezpečení potřebného výkonu
- Zajištění dostatečné přesnosti
- Umožnění rychlé, plynulé změny a reverzace otáček
- Statická a dynamická tuhost
- Teplotní stabilita
- Vysoká účinnost, spolehlivost a minimální hlučnost

Převodový mechanismus - mění rozsah výstupních parametrů (otáček, momentů).

- **Mechanický způsob:**
Převod se uskutečňuje pomocí řemenic, ozubených kol, řetězů a harmonických převodovek. V 3D strojním průmyslu je tento typ převodu velmi málo využívaný.
- **Elektrický způsob:**
Převodové poměry jsou měněny stupňovitým nebo plynulým způsobem. Stupňovitá změna spočívá v přepínání počtu pólů střídavého elektromotoru. Plynulou změnu zajišťují regulační krokové motory s elektrickými měniči. Tento způsob změny otáček je často využíván u 3D tiskáren, jelikož jsou regulační krokové motory snadno dostupné.

Posuvný mechanismus - mění pohyb rotační v lineární a obráceně

Mezi hlavní požadavky kladené na mechanismy patří zajištění plynulého pohybu posouvané části v celém rozsahu rychlostí. Zároveň je zapotřebí zajistit přesnou polohu posouvané části stroje, spolehlivost, životnost, dynamiku a přesnost.

Principy:

- Pohybový šroub
- Pastorek a hřeben
- Ozubnice a ozubený řemen
- Šnek a hřeben
- Klikový mechanismus

Volba konstrukčního řešení problému pohonného systému:

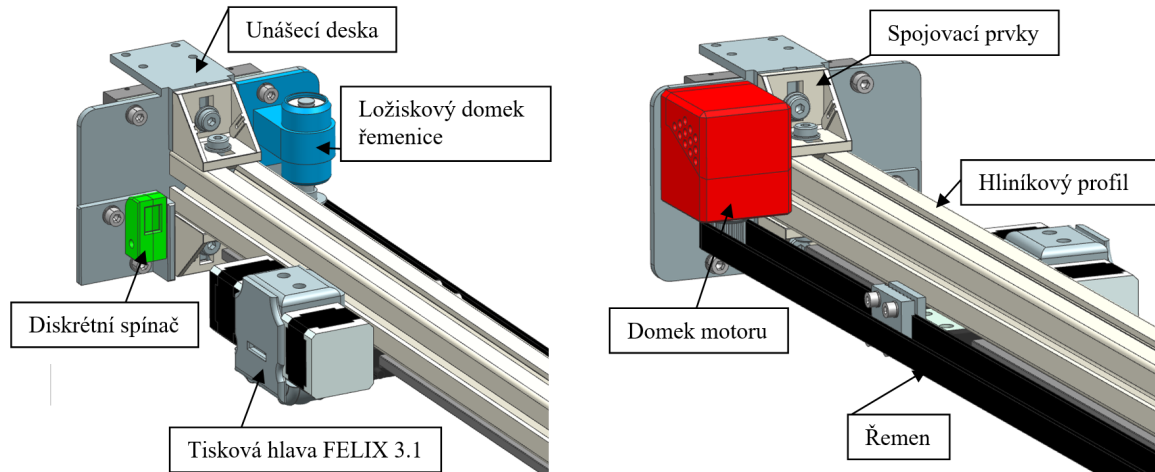
Pohonné orgány tiskárny při konstrukci jsou zajištěny pomocí krokových motorů, které slouží jako hnací členy, a zároveň převodové mechanismy díky elektrické samoregulaci. Oproti servomotorům nenabízejí zpětnou vazbu do systému, ale tento nedostatek vyvažují nižší cenou.

Změnu pohybů vyvolaných krokovými motory zajišťují pohybové orgány tiskárny. Ty jsou tvořeny řemeny a pohybovými šrouby. Řemeny jsou velmi rychlé, spolehlivé a relativně přesné v závislosti na hybné hmotnosti. Těchto výhod je využito při pohybu extruderu v horizontálních souřadnicích, kde působí menší zátěžné síly. Jako dodavatel krokových motorů, řemenů a potřebných komponent posuvného mechanismu je vybrán internetový server CNCshop. [30]

Pro osy zatížené většími silami je lepší variantou pohybový šroub, který přenesení dané zatížení a docílí velké přesnosti i při minimálních posuvech. Použití nalézájí převážně ve vertikální ose, kde jsou malé rychlosti a posuvy v řádech μm . Vybraným (sub)optimálním dodavatelem pohybového trapézového šroubu a veškerého pomocného materiálu (matice, upnutí) je společnost „Igus®“. [27]

4.6 Modulární pojezdový mechanismus: Osa X

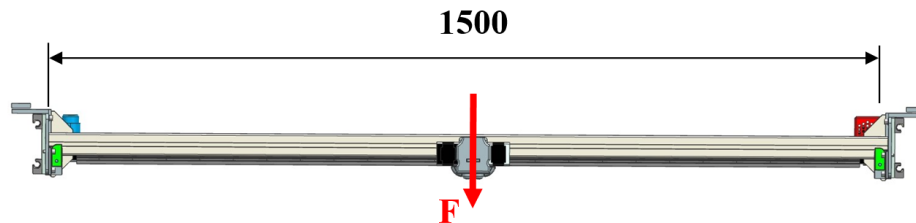
Lineární pojezdový mechanismus, pracující v ose X, zajišťuje lineární pohyb extruderu pomocí pohonných systémů (kapitola 4.5.5). Nosná funkce je zajištěna nosným hliníkovým profilem (kapitola 4.5.2).



Obrázek 24: Modulární pojezdový mechanismus osa X

Výpočet deformace profilu

Problematika je řešena jako oboustranně vetknutý nosník. Při výpočtu deformací jsou informace čerpány z analytického serveru společnosti „Item“. [31]



Obrázek 25: Zatížení hliníkového profilu osa X

m - hmotnost pohonného systému a extruderu: $m = 10[kg]$

m_p - hmotnost nosníku: $m = 3[kg]$

l - délka nosníku: $l = 1,5[m]$

E - Youngův modul pružnosti hliníkové slitiny: $E = 70000[MPa]$

J - kvadratický moment setrvačnosti průřezu: $J = 13.96[cm^4]$

g - tíhové zrychlení: $g = 9.81[\frac{m}{s^2}]$

Vzorec výpočtu deformace s uvažováním hmotnosti nosného profilu.

$$f(x) = \frac{l^3}{E \cdot J} \left[\frac{F}{192} + \frac{F_p}{384} \right] \quad (1)$$

$$f(x) = \frac{l^3}{E \cdot J} \left[\frac{F}{192} + \frac{F_p}{384} \right] = \frac{l^3}{E \cdot J} \left[\frac{m \cdot g}{192} + \frac{m_p \cdot g}{384} \right] = \frac{1500^3}{70000 \cdot 13.96 \cdot 10^4} \left[\frac{10 \cdot 9.81}{192} + \frac{3 \cdot 9.81}{384} \right] = 0,203mm$$

Výpočet vodícího systému

Maximální požadovaná rychlost: $V_{\max} = 3 \left[\frac{m}{s} \right]$

Požadovaný čas zrychlení na maximální rychlost: $t = 1 [s]$

Výsledné zrychlení v ose X:

$$a = \frac{V_{\max}}{t} = \frac{3}{1} = 3 \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad (2)$$

Výpočet statických a dynamických sil:

- Tíhová síla:

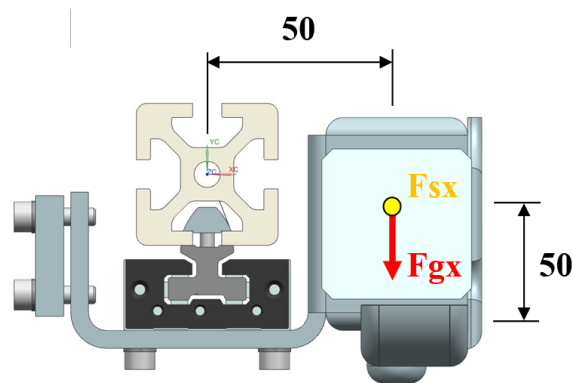
$$F_{gX} = m \cdot g [N] \quad (3)$$

- Setrvačná síla:

$$F_{sX} = m \cdot a [N] \quad (4)$$

Výpočet klopných momentů:

$$M_k = r \cdot F \quad (5)$$



Obrázek 26: Zatížení vodícího systému osa X

m - hmotnost závěsných komponent (extruder, doplňkové komponenty - cca 10% navýšení): $m = 5 [kg]$

a - zrychlení vedení v ose X: $a = 3 \left[\frac{m}{s^2} \right]$

g - tíhové zrychlení: $g = 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$

r - rameno působení sil: $r = 50 [mm]$ (dimenzováno na vyšší hodnoty)

Výpočet sil:

$$F_{gX} = m \cdot g = 5 \cdot 9.81 = 49.05 [N]$$

$$F_{sX} = m \cdot a = 5 \cdot 3 = 15 [N]$$

Výpočet klopných momentů:

$$M_{kX} = r \cdot F_{sX} = 0.05 \cdot 15 = 0.75 [Nm]$$

$$M_{kZ} = r \cdot F_{gX} = 0.05 \cdot 49.05 = 2.45 [Nm]$$

Na základě výpočtu klopných momentů je zvoleno vedení „Drylin TW-01-15“ (kapitola 4.5.3), které je dimenzováno na zatížení převyšující vypočtené. Vedení splňuje požadavky přesnosti, rychlosti, velikosti a cenové dostupnosti. Výhodou je dále nastavitelná vůle. Vybrané vedení je kontrolováno pomocí analytického serveru společnosti Igus®. [32]

Výpočet pohonného systému

Pro osu X je zvolen pohonný systém zajištěný sestavou řemen-řemenice-krokový motor. Důvodem je cena, rychlost a přesnost, které vzhledem k zadaným parametrům řešení pomocí těchto komponent splňuje.

Potřebný moment krokového motoru: $M_k \geq M_{kp}[Nm]$

Výpočet potřebného momentu je závislý na průměru zvolené řemenice, řemenu a setrvačné síle, která vzniká při rozjezdu a zastavení pohybu komponent.

$$M_{kp} = r_o \cdot F_{sX}[Nm] \quad (6)$$

r_o - poloměr řemenice řemenu: $r_o = 20[mm]$

M_{kp} - potřebný kroutící moment motoru

$$M_{kp} = r_o \cdot F_{sX} = 0,02 \cdot 15 = 0,3[Nm]$$

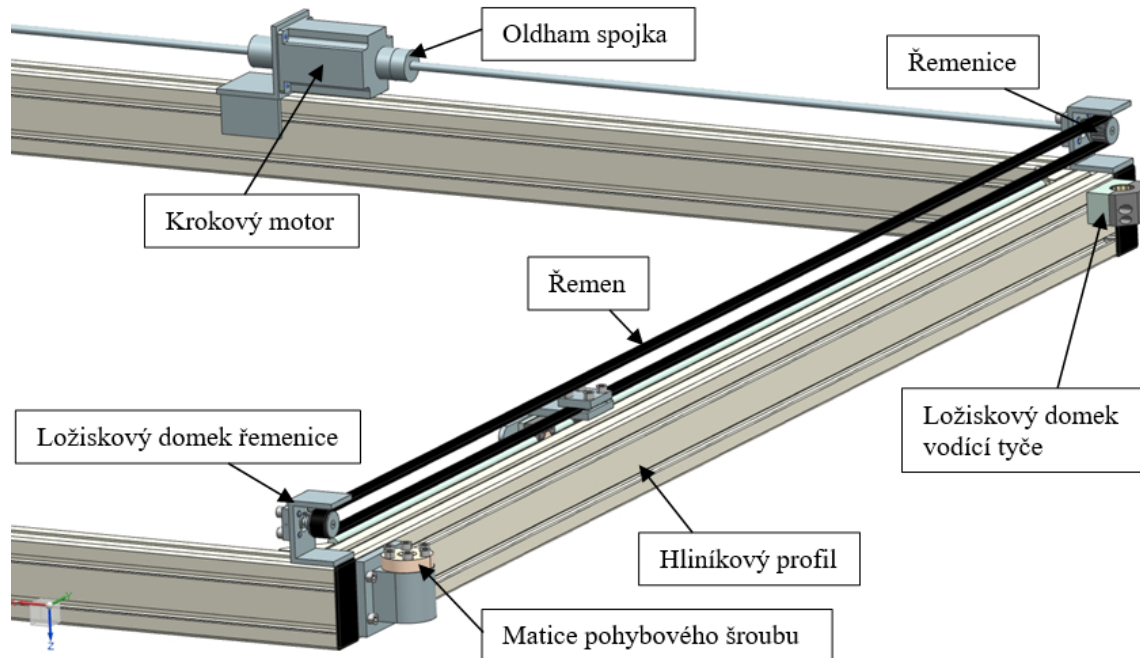
Vzhledem k vypočteným hodnotám je vybrán krokový motor 42HS03 - krokový 2-fázový motor $0,47NmII$, který nabízí dostatečný kroutící moment. Elektrické impulzy, řídicí pohyby výstupní hřídele motoru, zajišťuje driver krokového motoru DM422C - digitální driver pro 2-fázové krokové motory, 36V, 2.2A. [30]



Obrázek 27: Sestava modulárního pojezdového mechanismu osa X

4.7 Modulární pojezdový mechanismus: Osa Y

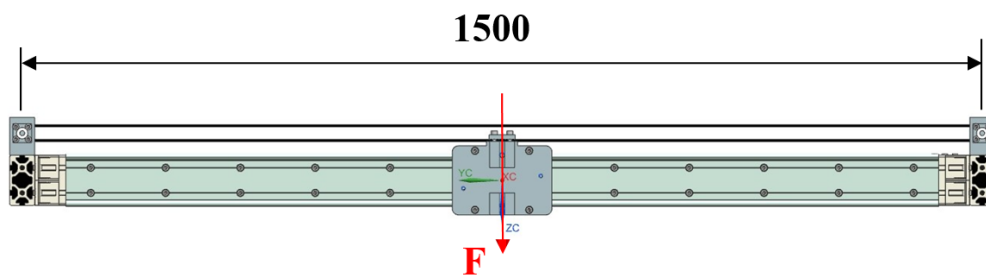
Lineární pojezdový mechanismus, pracující v ose Y, zajišťuje lineární pohyb technického systému osy X pomocí pohonných systémů (kapitola 4.5.5) a nosného hliníkového rámu (kapitola 4.5.2).



Obrázek 28: Modulární pojezdový mechanismus osa Y

Výpočet deformace profilu

Problematika výpočtu je řešena jako oboustranně vetknutý nosník. Při výpočtu deformací jsou informace čerpány z analytického serveru společnosti „Item“. [31]



Obrázek 29: Zatížení hliníkového profilu osa Y

m - hmotnost pohonného systému a extruderu: $m = 15[kg]$

m_p - hmotnost nosníku: $m = 5[kg]$

l - délka nosníku: $l = 1,5[m]$

E - Youngův modul pružnosti: $E = 70000[MPa]$

J - kvadratický moment setrvačnosti průřezu: $J = 101.19[cm^4]$

g - tíhové zrychlení: $g = 9.81[\frac{m}{s^2}]$

Vzorec výpočtu deformace s uvážením hmotnosti nosného profilu.

$$f(x) = \frac{l^3}{E \cdot J} \left[\frac{F}{192} + \frac{F_p}{384} \right]$$

$$f(x) = \frac{l^3}{E \cdot J} \left[\frac{F}{192} + \frac{F_p}{384} \right] = \frac{l^3}{E \cdot J} \left[\frac{m \cdot g}{192} + \frac{m_p \cdot g}{384} \right] = \frac{1500^3}{70000 \cdot 101.19 \cdot 10^4} \left[\frac{15 \cdot 9.81}{192} + \frac{5 \cdot 9.81}{384} \right] = 0,043 \text{ mm}$$

Výpočet vodícího systému

Maximální rychlost: $V_{\max} = 3 \left[\frac{m}{s} \right]$

Čas zrychlení na maximální rychlost: $t = 1 [s]$

Výsledné zrychlení: $a = \frac{V_{\max}}{t} = \frac{3}{1} = 3 \left[\frac{m}{s^2} \right]$

Volba vedení pohonného systému

Výpočet statických a dynamických sil:

- Tíhová síla:

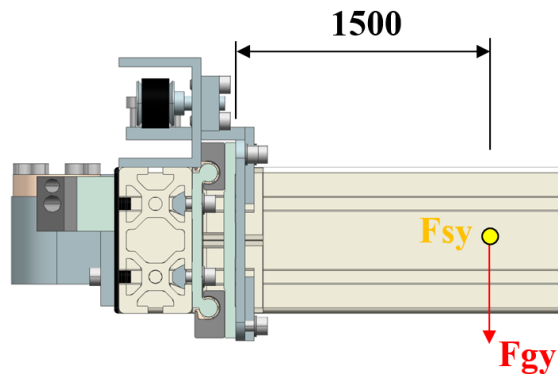
$$F_{gY} = m \cdot g [N]$$

- Setrvačná síla:

$$F_{sY} = m \cdot a [N]$$

Výpočet klopných momentů:

$$M_k = r \cdot F$$



Obrázek 30: Zatížení vodícího systému osa Y

m - hmotnost závěsných komponent (modulární jednotka v ose X; lineární vedení 2x):

$$m = 10 [kg]$$

a - zrychlení vedení v ose Y: $a = 3 \left[\frac{m}{s^2} \right]$

g - tíhové zrychlení: $g = 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$

r - rameno působení sil: $r = 1.5 [m]$

Výpočet sil:

$$F_{gY} = m \cdot g = 10 \cdot 9.81 = 98.1 [N]$$

$$F_{sY} = m \cdot a = 10 \cdot 3 = 30 [N]$$

Výpočet klopných momentů:

$$M_{kY} = r \cdot F_{sY} = 1.5 \cdot 30 = 45 [Nm]$$

$$M_{kZ} = r \cdot F_{gY} = 1.5 \cdot 98.1 = 147.15 [Nm]$$

Na základě výpočtu klopných momentů je zvoleno vedení WW-10-80-10 (kapitola 4.5.3). Vedení splňuje požadavky přesnosti, rychlosti, velikosti a cenové dostupnosti. Vybrané vedení je kontrolováno rovněž pomocí analytického serveru společnosti Iigus®. [32]

Volba hnacího členu

Pro osu Y je zvolen pohonný systém podobný, jako v případě osy X, zajištěný sestavou řemen-řemenice-krokový motor.

Potřebný moment krokového motoru: $Mk \geq Mkp [Nm]$

Výpočet potřebného momentu je závislý na průměru zvolené řemenice, řemenu a setrvačné síle, která vzniká při rozjezdu a zastavení pohybu komponent.

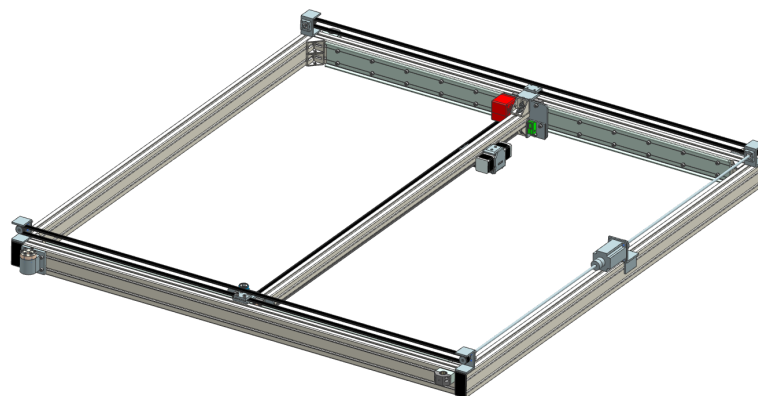
$$Mkp = r_o \cdot F_{sY} [Nm]$$

r_o - poloměr řemenice řemenu: $r_o = 40 [mm]$

Mkp - potřebný kroutící moment motoru

$$Mkp = r_o \cdot F_{sY} = 0,04 \cdot 30 = 1,2 [Nm]$$

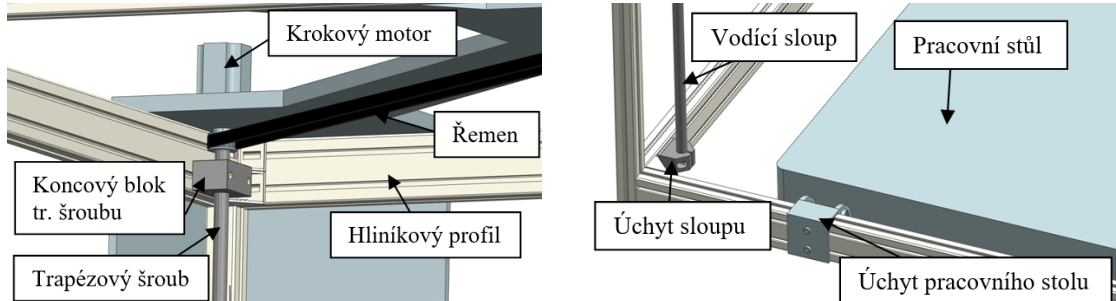
Vzhledem k vypočteným hodnotám je vybrán krokový motor 60STH88 - krokový 2-fázový motor $3Nm$, který nabízí dostatečný kroutící moment. Elektrické impulzy, řídicí pohyby výstupní hřídele motoru, zajišťuje driver krokového motoru M542 - driver pro 2-fázové krokové motory, $50V, 4.2A$. [30]



Obrázek 31: Sestava modulárního pojezdového mechanismu osa X a Y

4.8 Modulární pojezdový mechanismus: Osa Z

Lineární technický systém, pracující v ose Z, zajišťuje lineární pohyb modulárních pojezdových mechanismů osa Y a X, pomocí pohonných systémů (kapitola 4.5.5) a nosné hliníkové kubické mříže (kapitola 4.5.2).



Obrázek 32: Modulární pojezdový mechanismus osa Z

Pohonný systém

Pro souřadnici Z technického systému je využito pohybových šroubů. Pohybové šrouby je možné vystavit působení velkých zátěžných sil. Zároveň je pohyb rozčleněn na rozměrově malé kroky symbolizující jednotlivé vrstvy tisku. Z důvodů financí a samosvornosti je použit trapézový pohybový šroub.

Dimenzování trapézového šroubu:

Vychází z tlakové pevnostní rovnice:

$$\sigma_d = \frac{Q}{S_3} \leq \sigma_{Dt} [MPa] \quad (7)$$

$$\sigma_{Dt} = \frac{Q}{S_3} = \frac{m \cdot g}{\frac{\pi d_3^2}{4}} \rightarrow d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot m \cdot g}{\pi \cdot \sigma_{Dt}}}$$

m - hmotnost zátěže šroubu: $m = 50[kg]$

g - tíhové zrychlení: $g = 9.81[\frac{m}{s^2}]$

S_3 - plocha dřívku šroubu

σ_{Dt} - volené dovolené namáhání u lichoběžníkového závitu: $\sigma_{Dt} = 88[MPa]$

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot m \cdot g}{\pi \cdot \sigma_{Dt}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 50 \cdot 9.81}{\pi \cdot 88 \cdot 10^6}} = 2.65mm \quad (8)$$

Výslednému rozměru je zvolen příslušný pohybový šroub s normovanými rozměry (Při uvážení krutového namáhání je volen průměr šroubu navýšený nejméně o 50 %). Na základě výpočtů a uvážení vzpěrného namáhání je použit pohybový šroub: PTGSG-18x4-01-R-1500-Z118-ES (kapitola 4.5.5)

Výpočet obvodové síly pro zvedání zátěže trapézového šroubu:

$$F_o = Q \cdot tg(\gamma + \varphi') \quad (9)$$

F_o - obvodová síla pro zvedání

φ' - třecí úhel pro lichoběžníkový závit (tření v klínové drážce)

γ - úhel stoupání šroubovice

f - součinitel tření v závitech: $f = 0.12$

P - rozteč lichoběžníkového závitu: $P = 4$

$$tg\gamma = \frac{P}{\pi \cdot d_2} = \frac{4}{\pi \cdot 16} = 0.08 \Rightarrow \gamma = 4.55^\circ \quad (10)$$

$$tg\varphi' = \frac{f}{\cos \beta} = \frac{0.12}{\cos 15^\circ} \Rightarrow \varphi' = 7.08^\circ \quad (11)$$

$$F_o = Q \cdot tg(\gamma + \varphi') = m \cdot q \cdot tg(\gamma + \varphi') = 50 \cdot 9.81 \cdot tg(4.046^\circ + 5.91^\circ) = 86.1N$$

Kroutící moment na šroubu:

$$M_{kp} = F_o \cdot \frac{d_2}{2} = 86.1 \cdot \frac{9}{2} = 387.45Nmm \quad (12)$$

Redukované napětí ve šroubu:

Tlakové:

$$\sigma_d = \frac{Q}{S_3} = \frac{m \cdot q}{\frac{\pi \cdot d_3^2}{4}} = \frac{50 \cdot 9.81}{\frac{\pi \cdot 7.5^2}{4}} = 11.1MPa \quad (13)$$

V krutu:

$$\tau_k = \frac{M_{kp}}{W_k} = \frac{M_k}{0,2 \cdot d_3^3} = \frac{387.45}{0,2 \cdot 7.5^3} = 4.59MPa \quad (14)$$

Redukované:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_d^2 + 3\tau_k^2} = \sqrt{11.1^2 + 3 \cdot 4.59^2} = 13.65MPa \quad (15)$$

Dovolené napětí (pro míjivé zatížení): $\sigma_D = 0,2 \cdot R_m = 0,2 \cdot 440 = 88MPa$

Po srovnání dovoleného a redukovaného namáhání dostáváme vztah: $\sigma_D > \sigma_{red}$

Navržený šroub PTGSG-18x4-01-R-1500-Z118-ES, namáhaný míjivým zatížením, vyhovuje.

Kontrola šroubu na vzpěr:

l - délka trapézového šroubu: $l = 1.5[m]$

Redukovaná délka je vzhledem k uložení - $l_0 = l/\sqrt{2} = 1.5/\sqrt{2} = 1.061[m]$

Výpočet kritické síly podle Eulera:

$$F_{kr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l_0^2} = \frac{\pi^3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot d_3^4}{64 \cdot l_0^2} = \frac{\pi^3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 13.5^4}{64 \cdot 1061^2} = 2854.6N \quad (16)$$

Bezpečnost k: $k = \frac{Fr}{Q} = \frac{F_{kr}}{m \cdot q} = \frac{2854.6}{50 \cdot 9.81} = 5.82$

Výpočet délky matice:

Z pevnostní rovnice otláčení:

$$p_D \geq \frac{Q}{\pi \cdot d_2 \cdot H_1 \cdot z} = \frac{Q}{\pi \cdot d_2 \cdot H_1 \cdot \frac{c}{p}} = \frac{Q \cdot P}{\pi \cdot d_2 \cdot H_1 \cdot c} \Rightarrow c \geq \frac{Q \cdot P}{\pi \cdot d_2 \cdot H_1 \cdot p_D} \quad (17)$$

$$\frac{Q \cdot P}{\pi \cdot d_2 \cdot H_1 \cdot p_D} = \frac{m \cdot q \cdot P}{\pi \cdot d_2 \cdot H_1 \cdot p_D} = \frac{50 \cdot 9.81 \cdot 2}{\pi \cdot 9.1 \cdot 10} = 3.47 \Rightarrow c = 3.47 \text{ mm}$$

p_D - dovolené napětí na otláčení: $p_D = 10 \text{ MPa}$ (doporučeno 5 – 15 MPa)

z - počet závitů v matici

c - délka matice

H_1 - nosná hloubka závitu: $H_1 = 2$

d_2 - střední průměr závitu: $d_2 = 16 [\text{mm}]$

Navržená matice JFRM-2835TR18x4, délky 35mm, bezpečně vyhovuje.

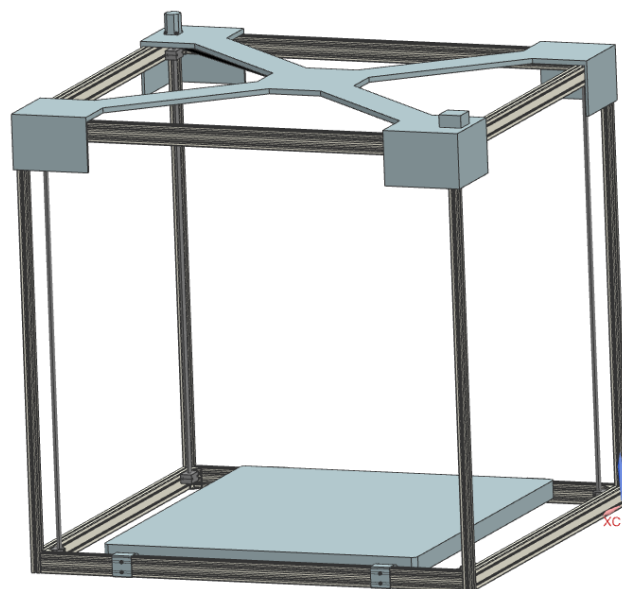
Volba hnacího členu

Potřebný moment krokového motoru:

$$M_k \geq M_{kp} [\text{Nm}]$$

$$M_{kp} = F_o \cdot \frac{d_2}{2} = 86.1 \cdot \frac{9}{2} = 0.388 \text{ Nm}$$

Vzhledem k vypočteným hodnotám je vybrán krokový motor 57HS22 - krokový 2-fázový motor 2,2Nm, který nabízí dostatečný kroutící moment. Elektrické impulzy, řídicí pohyby výstupní hřídele motoru, zajišťuje driver krokového motoru M752 - driver pro 2-fázové krokové motory, 75V, 5.2A. [30]



Obrázek 33: Sestava modulárního pojezdového mechanismu osa Z

5 Technicko-ekonomické hodnocení návrhu

V úvodu konstrukční části práce byly stanoveny cíle konstrukčního řešení technického systému. Návrh tiskárny byl směřován k atypickému, na trhu méně zastoupenému, rozměrovému layoutu. Posledním úkolem je konečné vyhodnocení výsledného návrhu. Hodnocení je subjektivní a probíhá na základě několika definovaných hledisek, které 3D tiskárna musí splňovat, jestliže má být konkurenceschopná.

Hledisko technické způsobilosti nepohyblivých částí.

Rámová konstrukce pracuje na principu kubické mříže z hliníkových montovaných profilů. Řešení je ideální pro případy rozměrově variabilního a montážně jednoduchého systému. Pracovní prostor nabízí rozměry 1200 x 1200 x 1400, které jsou ve výsledku konkurenceschopné. Řešení pracovní plochy hliníkovým nosným stolem s temperovanou deskou je vhodné zejména pro náročné tiskové operace.

Hledisko technické způsobilosti pohyblivých částí.

V uspořádání tiskárny je využita sériová kinematika. Toto řešení je výhodné vzhledem k náročnosti řízení pohybu. Návrh využívá k pohonu komponent ozubených řemenů a pohybových šroubů podobně, jako je tomu u konkurenčních tiskáren. Snaha se odlišit od současné konkurence není v tomto ohledu příliš výhodná, neboť pohybové šrouby použité pro všechny pohony by byly příliš drahé. Řešení pohybu v horizontálních souřadnicích pomocí ozubených řemenů a ve vertikální souřadnici pomocí pohybového trapézového šroubu je vhodné a cenově nenáročné. Rozložení pohybových šroubů úhlopříčně je nejvýhodnější variantou. Je zde možnost vzniku potíží s vzpříčením pojezdového mechanismu v ose Y, ale oproti použití šroubu v každém rohu je toto řešení méně náročné na řízení pohybu a cenově přijatelnější. Využití krokových motorů řízených operačním softwarem Arduino je inspirováno produkty na trhu, které toto řešení úspěšně prověřují v praxi.

Hospodářské hledisko.

Jedná se o zcela nový funkční prototyp 3D tiskárny, vzhledem k tomuto faktu je výrazně ovlivněna celková kalkulace nákladů. Valná většina komponent je nakupována, a tudíž je zde výrazná závislost ceny tiskárny na nakupovaném objemu a množstevních slevových akcích. Cenová kalkulace je stanovena na maloobchodní cenové hladině a je vyčíslena na přibližně 70-80 000 Kč. Nejvyšší podíl na celkových nákladech pak zaujmají krokové motory a jejich příslušenství.

Výsledek

Návrh splnil cílové požadavky, a je proto schopný uhájit svou pozici prototypové zkušební verze, která se postupem času a vývoje dostane na pomyslnou úroveň velkých technických společností.

Závěr

Bakalářská práce je věnována tématu problematiky aditivní technologie a konstrukčního návrhu 3D technického systému, pracujícího na bázi výrobního procesu FDM.

V úvodní části práce jsou stručně vysvětleny základní pojmy týkající se aditivní technologie a její následné aplikace. Vzhledem ke konkretizaci zadání v oblasti výrobních procesů je vypracováno stručné rozdělení výrobních procesů používaných v současnosti, na které navazuje řešerše používaných materiálů. Hlavní důraz je kladen na plastické hmoty PLA a ABS, které jsou definovány ve výrobním portfoliu vlastní konstrukce.

V další části práce jsou zpracovány kinematické struktury 3D technických systémů v závislosti na základních souřadnicích a náročnosti použití. Díky ujasnění základních definic je možné lépe porozumět odborné literatuře a technické specifikaci produktů společností nacházejících se na současném trhu.

Vlastní konstrukční návrh je věnován především ujasnění zadaných úkolů a požadavků zákazníků na výsledný technický systém. V rámci udržení kroku s konkurencí je vypracován základní průzkum stavu technických systémů na trhu, které korespondují se zadanými požadavky. Po rozpracování koncepčních variant a následném hodnocení je konstrukční návrh rozpracován do jednotlivých orgánů. Výsledná konstrukční řešení orgánů jsou následně zdůvodněna a přiřazena dodavatelské společnosti. Finální technický layout tiskárny je rozdělený do tří modulárních pojezdových mechanismů. Jednotlivé komponenty layoutů jsou vypočteny a vybrány z katalogů dodavatelských společností.

V poslední části práce je technicko-ekonomicky zhodnocen výsledný konstrukční návrh. Vzhledem k zaměření práce na prototypové zařízení s důrazem na minimum nákladů je tiskárna dimenzována na přijatelné přesnosti. Pokud by se jednalo o návrh přímo určený prodeji koncovým spotřebitelům, bylo by vhodné, aby byl návrh přehodnocen v oblasti tuhosti použitých materiálů (dražší materiály lepších mechanických vlastností) a v oblasti pohonných systémů (menší přesnost elastických ozubených řemenů). V neposlední řadě je důležitá designová úprava stroje (tvar, barva). Všechny tyto kroky jsou v případě zavedení produktu na již velmi konkurenční trh nezbytné, ale taktéž velmi finančně náročné.

Seznam obrázků

1	Aditivní procesní řetěz [2]	11
2	Úrovně aplikací aditivní technologie [3]	13
3	Stereolitografie [4]	14
4	Selektivní laserové spékání [5]	15
5	Modelování depozicí taveniny [6]	16
6	Výroba laminovaných objektů [7]	17
7	Rozdělení kinematických struktur [15]	21
8	Kartézská 3D tiskárna ORIGINAL PRUSA I3 MK2 [16]	22
9	Delta 3D tiskárna Tripodmaker Classic [17]	22
10	BigRap ONE v3 [18]	24
11	The Atlas 2.5 [19]	25
12	FELIX 3.1 [21]	27
13	Technologie provozního transformačního procesu [22]	28
14	Varianta A	28
15	Varianta B	29
16	Varianta C	29
17	Hodnocení koncepčních variant [22]	30
18	Layout technické orgánové struktury konstrukčního návrhu	31
19	Model výsledného konstrukčního návrhu	31
20	Počítačová deska Arduino [24]	32
21	Hliníkový konstrukční systém Alutec <i>KK</i> [26]	33
22	Lineární kluzná vedení společnosti Igus®	35
23	Příklad vyhřívané podložky MK2a [28]	35
24	Modulární pojezdový mechanismus osa X	38
25	Zatížení hliníkového profilu osa X	38
26	Zatížení vodícího systému osa X	39
27	Sestava modulárního pojezdového mechanismu osa X	40
28	Modulární pojezdový mechanismus osa Y	41
29	Zatížení hliníkového profilu osa Y	41
30	Zatížení vodícího systému osa Y	42
31	Sestava modulárního pojezdového mechanismu osa X a Y	43
32	Modulární pojezdový mechanismus osa Z	44
33	Sestava modulárního pojezdového mechanismu osa Z	46

Seznam tabulek

1	Srovnání materiálových vlastností plastických hmot ABS a PLA [8] . .	18
2	Hodnocení koncepčních variant [22]	30

Literatura

- [1] GEBHARDT, Andreas. *Understanding Additive Manufacturing* Munich: Carl Hanser Verlag, 2011. ISBN 978-3-446-42552-1
- [2] Poliklinika Klapan Medical Group. Additive Manufacturing of Medical Models - Applications in Rhinology. *Basic principle of additive manufacturing process* [Online]. [cit. 2017. Květen 25.] <http://poliklinika-klapan.com/index.php?menuID=204>
- [3] ResearchGate. Levels of application additive manufacturing technology. *ResearchGate* [Online]. [cit. 2017. Květen 23.]
https://www.researchgate.net/figure/284719670_fig1_Figure-1-Levels-of-application-additive-manufacturing-technology-1
- [4] ResearchGate. Sketch of the stereolithography process. *ResearchGate* [Online]. [cit. 2017. Květen 23.] https://www.researchgate.net/figure/26375752_fig1_Figure-1-Sketch-of-the-stereolithography-process
- [5] 3DPRINTING.COM. 3D Printing Techniques for Dental Products. *3DPRINTING.COM* [Online]. [cit. 2017. Květen 23.] <https://3dprinting.com/dental/3d-printing-dental-products/>
- [6] SCANANDMAKE.COM. Additive manufacturing. *Fused deposition modeling process* [Online]. [cit. 2017. Květen 23.] <https://scanandmake.com/additive-manufacturing>
- [7] SCANANDMAKE.COM. Additive manufacturing. *Laminated Object Manufacturing* [Online]. [cit. 2017. Květen 23.] <https://scanandmake.com/additive-manufacturing>
- [8] Verbatim. 3D tiskové materiály. 3D vlákna-časté dotazy. *Verbatim* [Online]. [cit. 2017. Březen 10.] <http://www.verbatim-europe.cz/cz/3D/abs-vs-pla/>
- [9] 3dstruny.cz. 3D tiskový materiál. *3dstruny.cz* [Online]. [cit. 2017. Březen 11.] <http://www.3dstruny.cz/>
- [10] o3D. Materiály pro 3D tisk I. *o3D* [Online]. [cit. 2017. Březen 13.] <http://www.o3d.cz/3d-tisk/2013/11/materialy-pro-3d-tisk-i/>
- [11] 3DPrinting Industry. The Free Beginner's Guide. 3D Printing Materials. *3DPrinting Industry* [Online]. [cit. 2017. Březen 12.] <http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/materials/>
- [12] o3D. Materiály pro 3D tisk III. *o3D* [Online]. [cit. 2017. Březen 13.] <http://www.o3d.cz/3d-tisk/2013/11/materialy-pro-3d-tisk-iii/>
- [13] o3D. Materiály pro 3D tisk IV. *o3D* [Online]. [cit. 2017. Březen 14.] <http://www.o3d.cz/3d-tisk/2013/12/materialy-pro-3d-tisk-iv/>
- [14] o3D. Budoucnost materiálů pro 3D tisk. *o3D* [Online]. [cit. 2017. Březen 14.] <http://www.o3d.cz/3d-tisk/2013/12/budoucnost-materialu-pro-3d-tisk/>

- [15] DOCPLAYER. Ing. MRÁZ, Petr Ph.D. *Průmyslové roboty v praxi* [Online]. [cit. 2017. Květen 23.] <http://docplayer.cz/6707543-Prumyslove-roboty-v-praxi.html>
- [16] PRUSA RESEARCH. 3D TISKÁRNA ORIGINAL PRUSA I3 MK2S. *PRUSA RESEARCH* [Online]. [cit. 2017. Květen 23.] <http://www.prusa3d.cz/>
- [17] TRIPODMAKER. Tripodmaker Classic. *TRIPODMAKER* [Online]. [cit. 2017. Květen 23.] <http://www.tripodmaker.com/tripodmaker-classic/>
- [18] BigRap. BigRap ONE. *BigRap* [Online]. [cit. 2017. Květen 20.] <https://bigrep.com/bigrep-one/>
- [19] Titan Robotics. The Atlas. *Titan Robotics* [Online]. [cit. 2017. Květen 20.] <http://www.titan3drobotics.com/atlas/>
- [20] FELIX printers. About FELIXprinters. *History*. [Online]. [cit. 2017. Květen 20.] http://www.felixprinters.com/about_us/
- [21] FELIX printers. FELIX 3.1. *FELIX printers* [Online]. [cit. 2017. Květen 20.] <http://www.felixprinters.com/landing/index/view/id/402/>
- [22] home.zcu.cz/ hosnedl. HOSNEDL, S. *Přednášky z předmětu DFX* [Online]. [cit. 2017. Květen 18.] [http://home.zcu.cz/~hosnedl/g_DFX_\(cast_SH\)/A_DFX_PREDNASKY/](http://home.zcu.cz/~hosnedl/g_DFX_(cast_SH)/A_DFX_PREDNASKY/)
- [23] Arduino.CZ. CO JE TO ARDUINO?. *Arduino.CZ* [Online]. [cit. 2017. Květen 15.] <https://arduino.cz/co-je-to-arduino/>
- [24] Sparkfun, start something. What is an Arduino? *Sparkfun* [Online]. [cit. 2017. Únor 1.] <https://learn.sparkfun.com/tutorials/what-is-an-arduino>
- [25] Doc. Ing. LAŠOVÁ Václava Ph.D. KKS/ZSVS. *Základy stavby obráběcích strojů* [Online]. [cit. 2017. Únor 2.] https://otik.uk.zcu.cz/xmlui/bitstream/handle/11025/16835/Zaklady_stavby.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [26] AlutecKK. Hliníkový konstrukční systém Alutec *KK*. *AlutecKK* [Online]. [cit. 2017. Únor 1.] <http://www.aluteckk.cz/>
- [27] Igus®. dry-tech®. *Igus®* [Online]. [cit. 2017. Květen 10.] http://www.igus.eu/wpck/9128/drytech_home
- [28] Vše pro 3D tisk. Vyhřívaná podložka MK2a. *Vše pro 3D tisk* [Online]. [cit. 2017. Květen 17.] <https://www.vsepro3dtisk.cz/p/vyhrivana-podlozka-mk2a-300x200mm-pro-3d-tisk?gclid=CK-Fiv0z99MCFZFUGAodbiMAqg>
- [29] Raveo. ELEKTROMOTORY. *Raveo* [Online]. [cit. 2017. Květen 17.] <http://www.raveo.cz/motory>
- [30] CNCshop.cz. CNC a automatizace. *CNCshop.cz* [Online]. [cit. 2017. Květen 15.] <http://www.cncshop.cz/>

- [31] Item. Machining tool. *Item* [Online]. [cit. 2017. Květen 17.] <http://item.engineering/DEen/machiningtool/#details>
- [32] Igus®. Návrh systému a výpočet životnosti lineárních vedení drylin®. *Igus®* [Online]. [cit. 2017. Květen 17.] <http://www.igus.sk/Apps/drylinexpert/default.aspx>

Seznam příloh

5.1 Tištěné přílohy

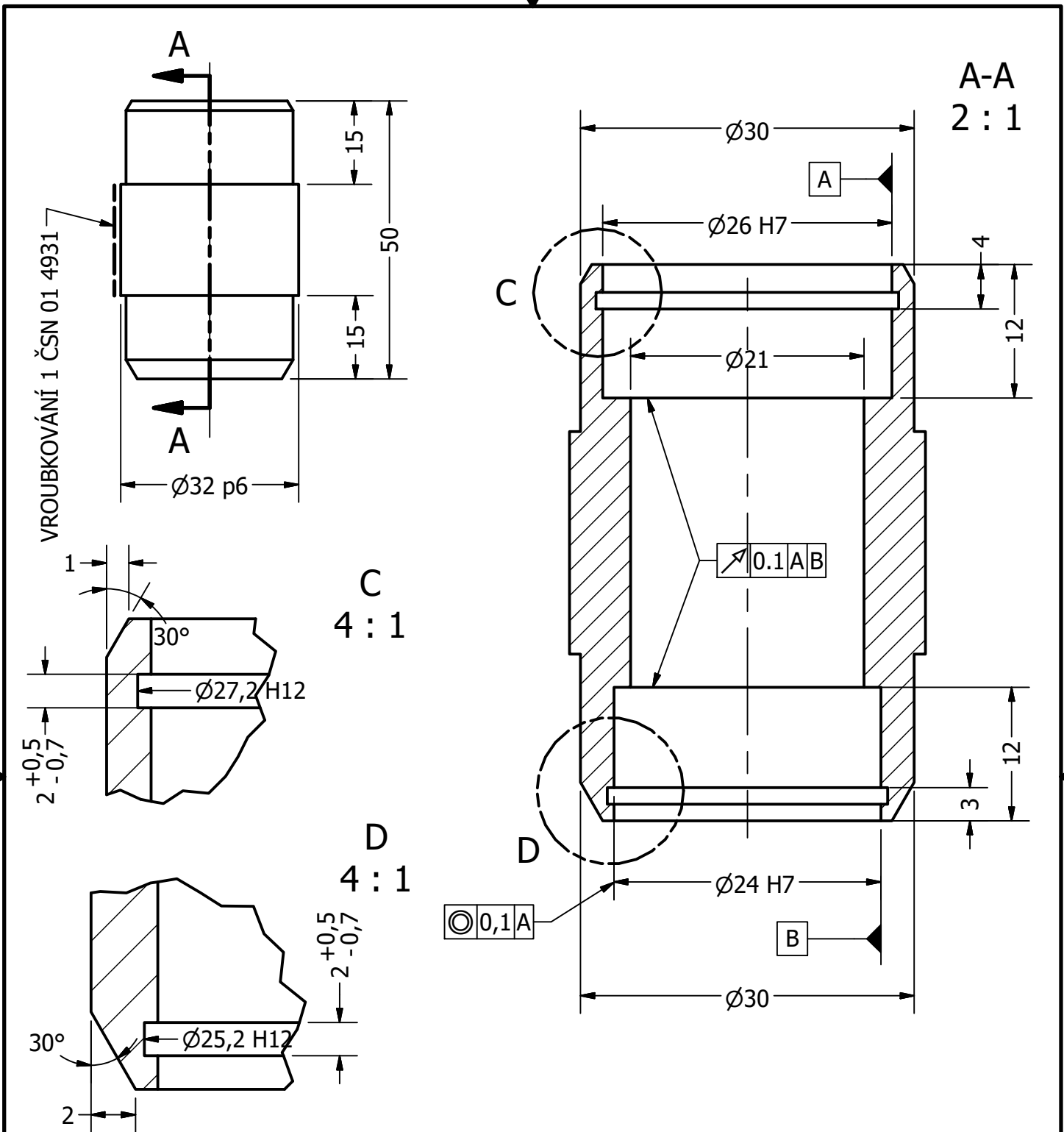
Výrobní výkres: PH-BP-V-01

Výkres sestavy: PH-BP-S-00, PH-BP-S-01, PH-BP-S-02

5.2 Elektronické přílohy na CD

Výrobní výkres: PH-BP-V-01

Výkres sestavy: PH-BP-S-00, PH-BP-S-01, PH-BP-S-02



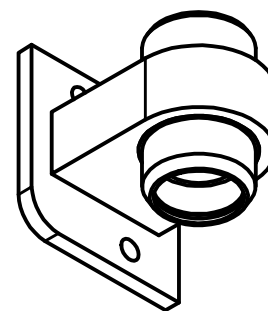
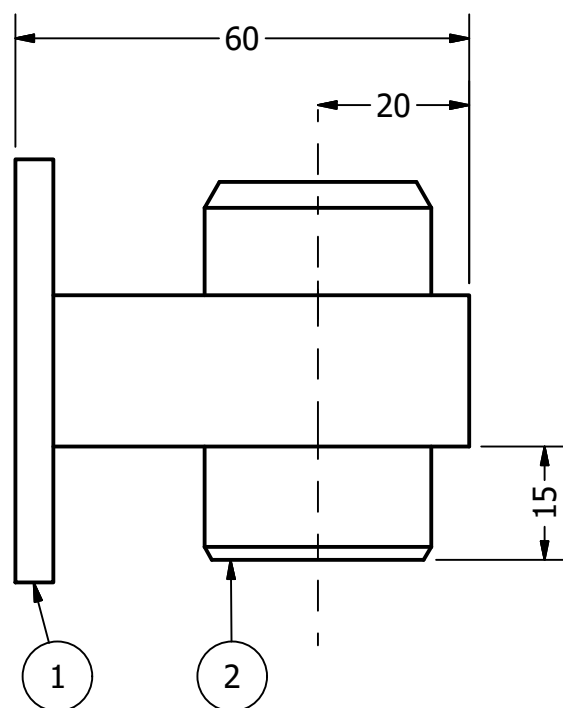
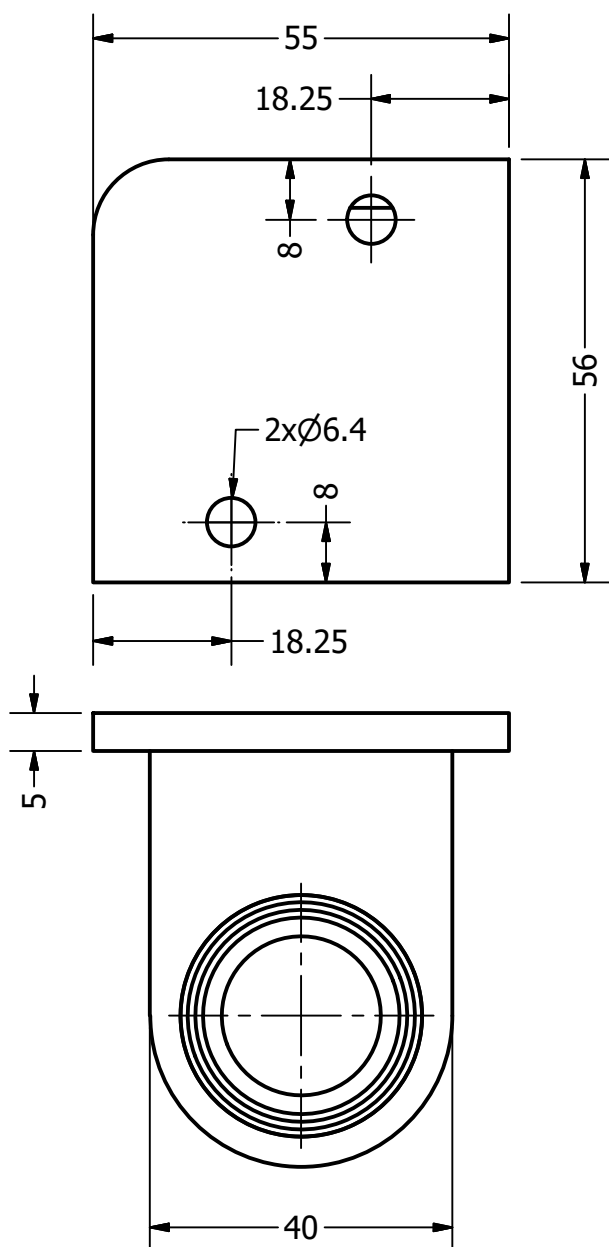
Textura povrchu 	Hrany ISO 13715 	Měřítko 1:1	Přesnost ISO 2768 - mK
		Hmotnost (kg) 0,08	Tolerování ISO 8015
			Promítání

Materiál - Polotovár AlCu4Mg1 ČSN 424203	Formát A4
---	--------------

 FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI KKS KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ	Kreslil Pavel Hamrle	Název Ložiskový domek Soustružená část
	Datum 22. 5. 2017	
	Schválil	
	Datum	
Druh dokumentu VÝROBNÍ VÝKRES		

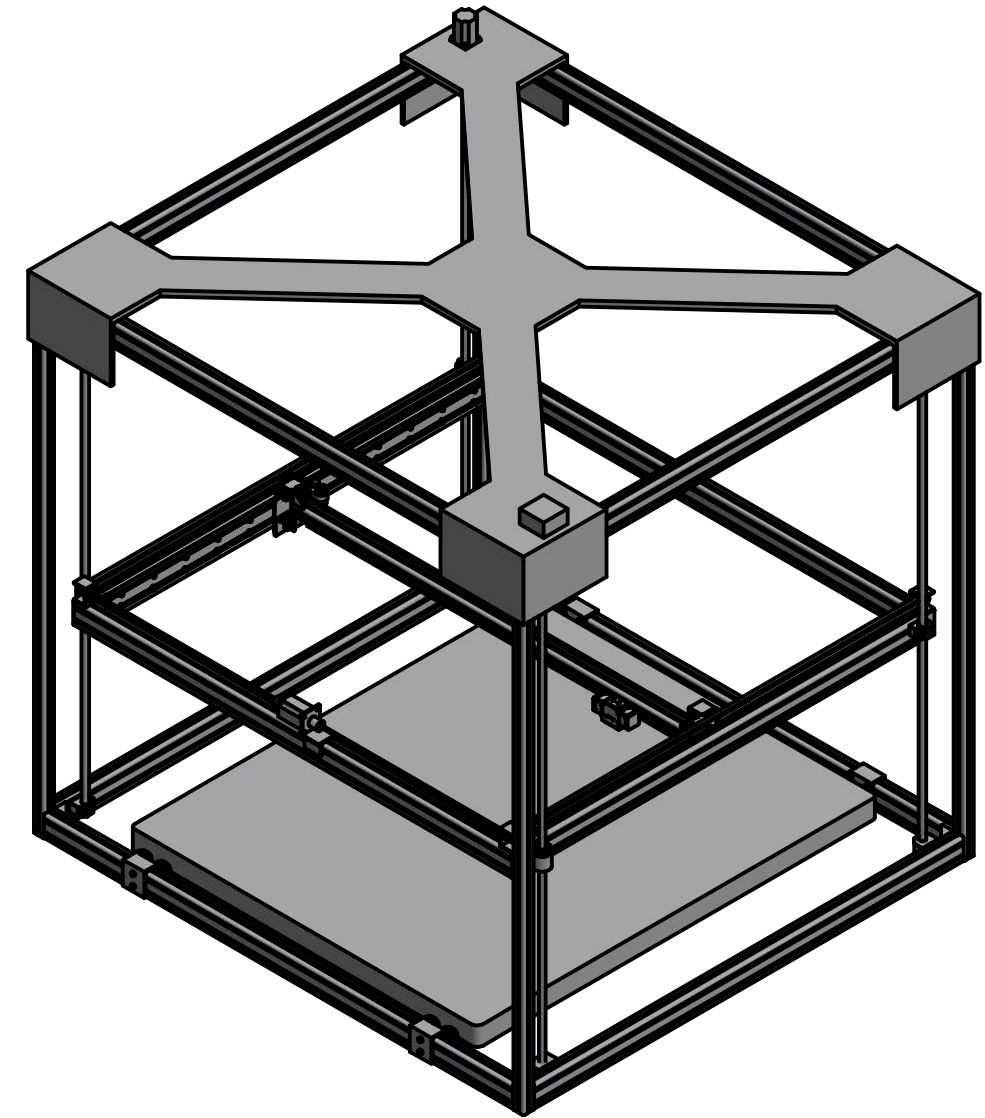
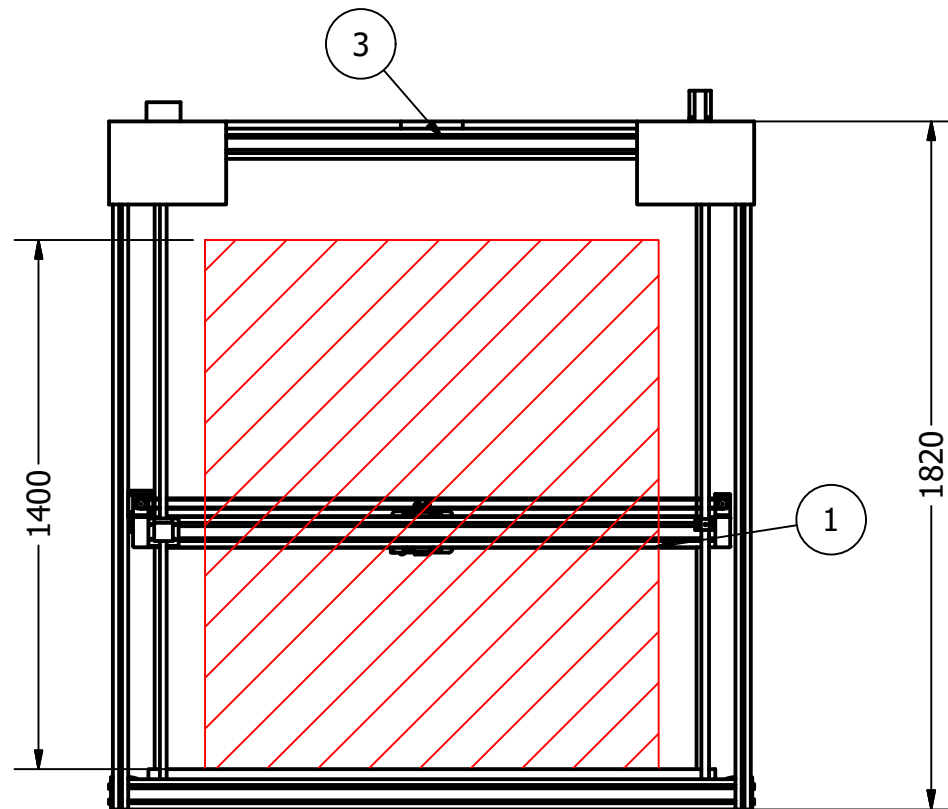
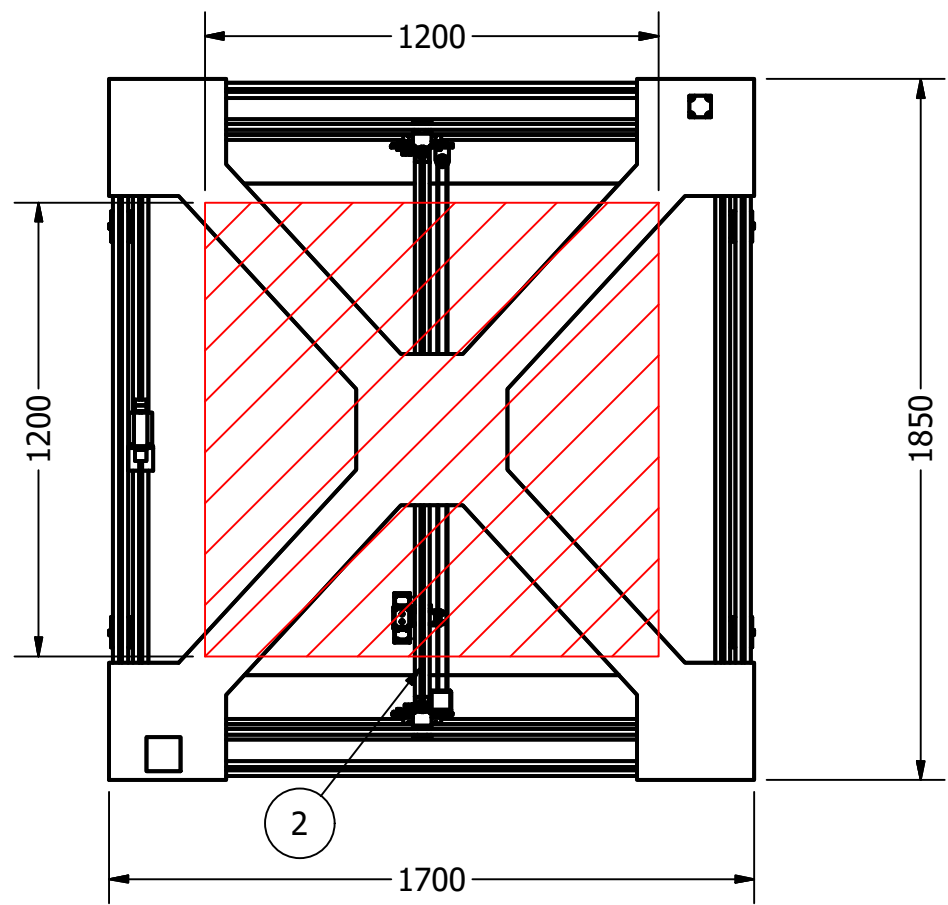
PH-BP-V-01 List 1 Listů 1





Předepsáno lisování za studena.
Pro zajištění stability lisovaného spoje s přesahem (H7/p6) je navrženo vroubkování soustružené části na vnějším průměru \varnothing 32.

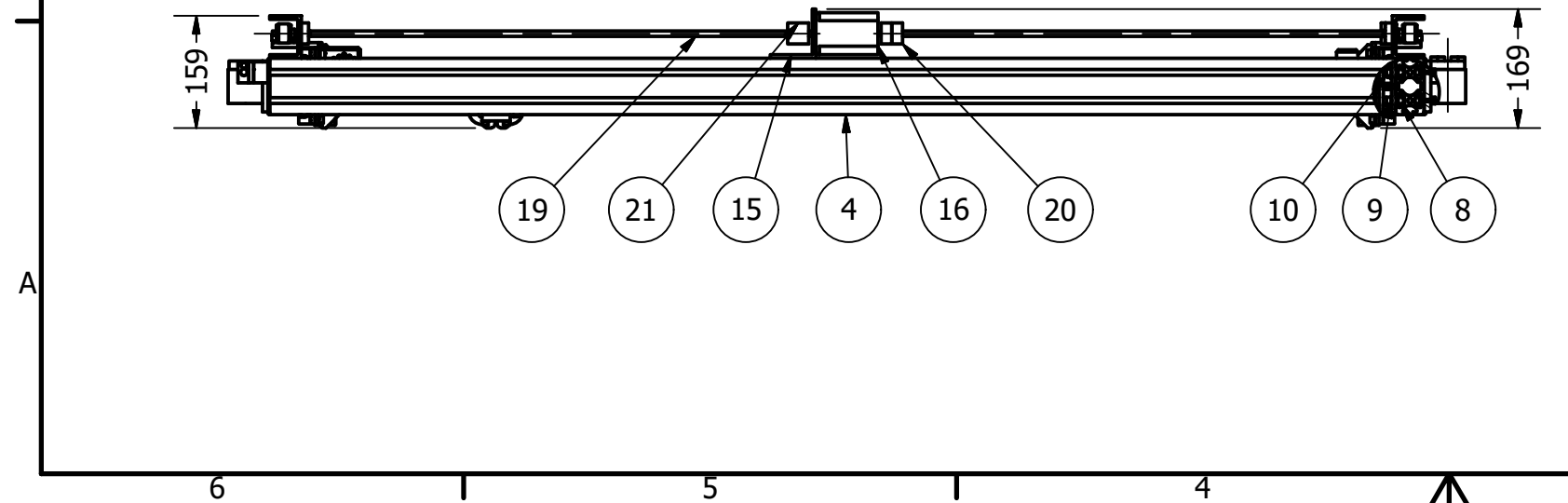
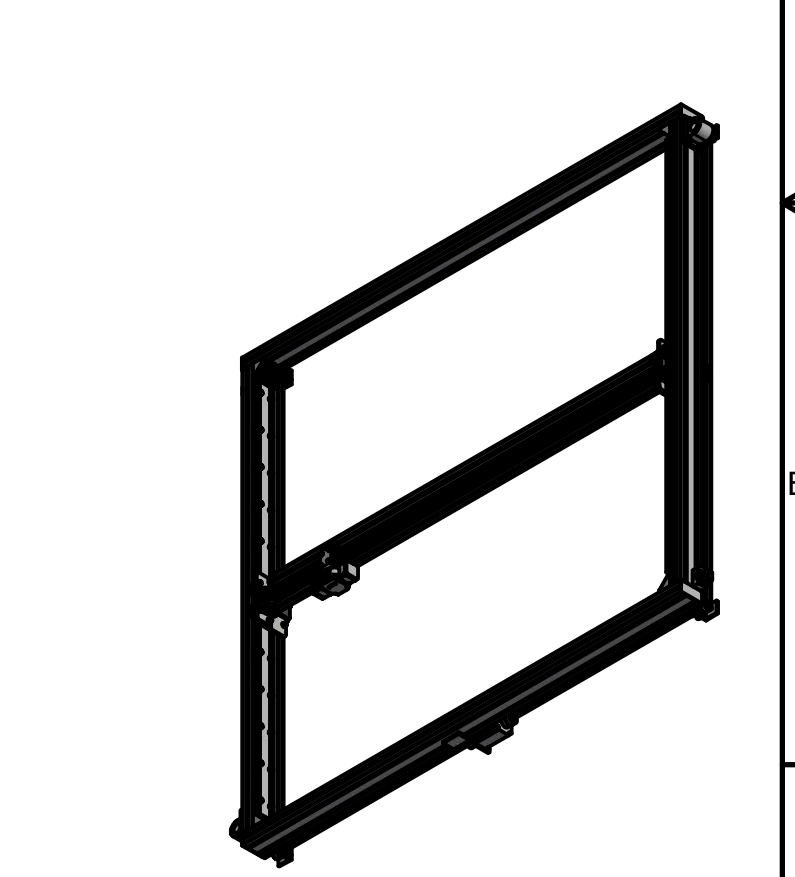
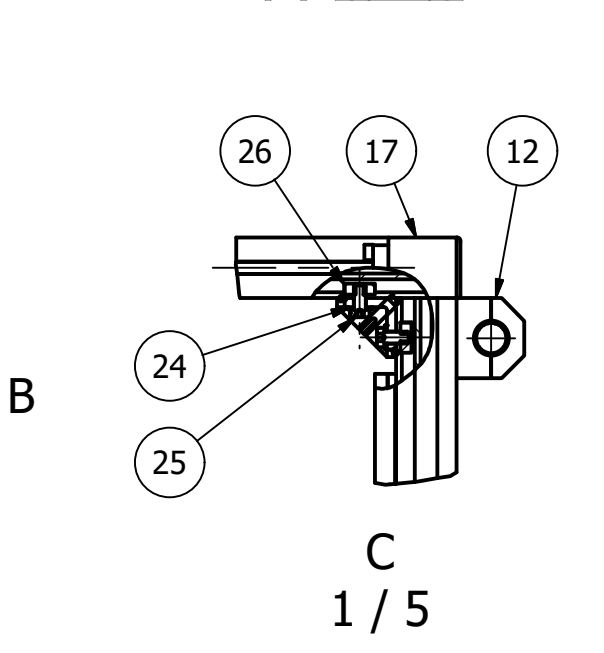
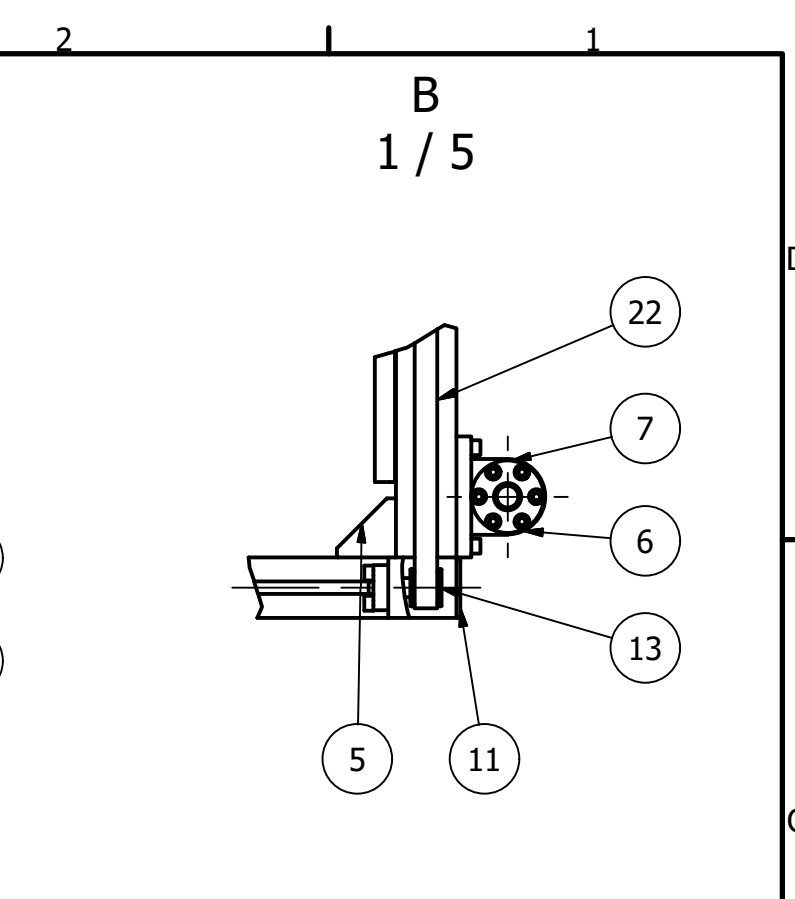
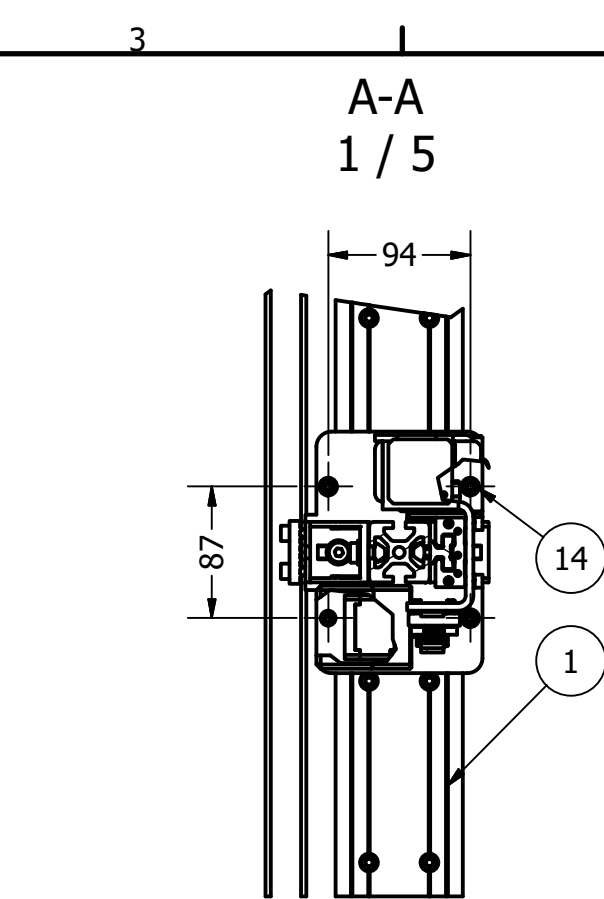
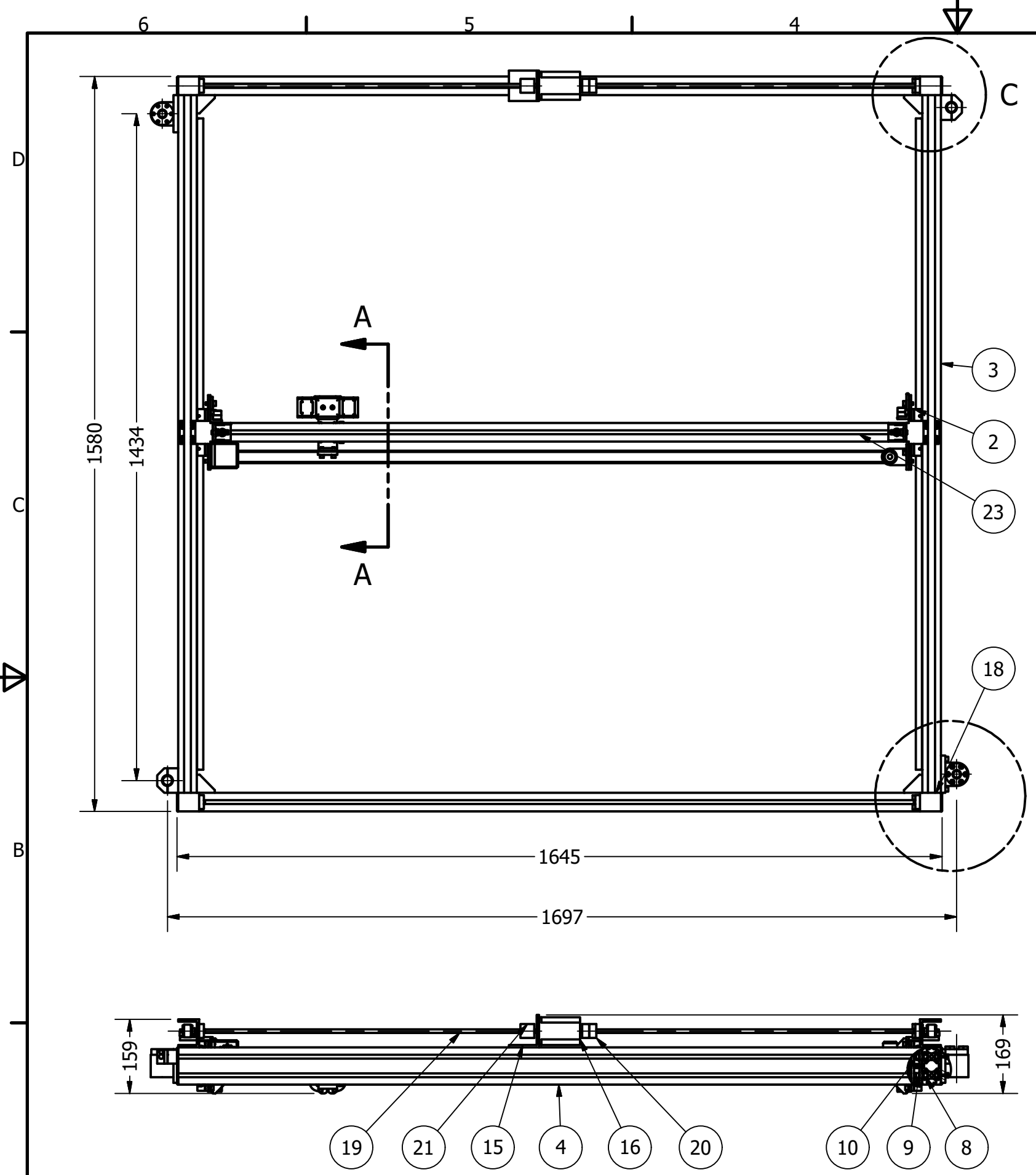
Kusovník				
Pozice	Množství	Název - Rozměr	Výkres - Norma	Materiál
1	1	Ložiskový domek Tištěná část	PH-BP-V-02	ABS
2	1	Ložiskový domek Soustružená část	PH-BP-V-01	ČSN 424203
Měřítko	1:1	Hmotnost (kg)	0,13	Promítání
				Formát
				A4
 FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI	Kreslil	Pavel Hamrle		Název
	Datum	26. 5. 2017		
KKS KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ	Schválil			Číslo dokumentu
	Datum			
	Druh dokumentu	VÝKRES SESTAVY		



— Pracovní prostor stroje.

Kusovník			
Pozice	Množství	Název - Rozměr	Výkres - Norma
1	1	Modulární pojezdový mechanismus: Osa Y	PH-BP-S-001
2	1	Modulární pojezdový mechanismus: Osa X	PH-BP-S-002
3	1	Modulární pojezdový mechanismus: Osa Z	PH-BP-S-003

Měřítko	1:20	Hmotnost (kg)	120	Promítání		Formát	A3
FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI	Kreslil	Pavel Hamrle		Název			
	Datum	27. 5. 2017		Dispoziční schéma			
KKS KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ	Schválil			Číslo dokumentu			
	Datum			PH-BP-S-00			
Druh dokumentu				VÝKRES SESTAVY			



Měřítko	1:10	Hmotnost (kg)	50	Promítání		Formát	A3
FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI	Kreslil	Pavel Hamrle		Název			
	Datum	25. 5. 2017		Sestava pojezdového mechanismu XY			
KKS KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ	Schválil			Číslo dokumentu			
	Datum			PH-BP-S-01			
Druh dokumentu				VÝKRES SESTAVY			
List 1 Listů 2							

Kusovník

Položka	Množství	Název - Rozměr	Výkres - Norma
1	2	Dvouřadá kulatá kolejnice	Igus-WS-10-80
2	2	Montovaný vozík, kulatý	Igus-WW-10-80-10
3	2	Hliníkový profil - 1500	AlutecKK-104080
4	2	Hliníkový profil - 1640	AlutecKK-104080
5	8	Fixační úhelník	AlutecKK-304040
6	2	Domek matice pohybového šroubu	PH-BP-V-011
7	2	Přírubová trapézová matice	Igus-JFRM-2835TR18x4
8	62	Matice s pružinou M6	ALutecKK-210462
9	82	Podložka 6	ČSN EN ISO 02 1740.1
10	82	Šroub M6 x 16	ČSN EN ISO 4762 - 12.9
11	4	Záslepka profilu	AlutecKK-224080
12	2	Dělený ložiskový domeček	PH-BP-S-013
13	4	Ozubená řemenice	CNCShop-HTD-5m-15-14z
14	8	Šroub M6 x 20	ČSN EN ISO 4762 - 12.9
15	1	Úchyt krokového motoru	PH-BP-V-012
16	1	Krokový motor	CNCShop-60STH88
17	2	Ložiskový domek řemenice - hnací	PH-BP-S-014
18	2	Ložiskový domek řemenice - hnané	PH-BP-S-015
19	2	Hnací hřídel KR 8h11x740	ČSN 42 6510.12 12 061
20	1	Oldhamova spojka 8-6	PH-BP-S-011
21	1	Oldhamova spojka 8-8	PH-BP-S-012
22	2	Ozubený řemen 15x3150	ATP10-3150- 15
23	1	Modulární pojezdový mechanismus: Osa X	PH-BP-S-002
24	16	Podložka 8	ČSN EN ISO 7089
25	16	Šroub M8 x 16	ČSN EN ISO 4762 - 12.9
26	16	Matice s pružinou M8	AlutecKK-210482

Měřítko 1:10	Hmotnost (kg) 50	Promítání 	Formát A4
 FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI	Kreslil Pavel Hamrle	Název Kusovník	
	Datum 25. 5. 2017		
KKS KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ	Schválil	Číslo dokumentu PH-BP-S-01	
	Datum		
Druh dokumentu VÝKRES SESTAVY			