



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

NÁVRH ROZŠÍŘENÍ STROJE O MOŽNOST ODDĚLOVÁNÍ 3D VÝTISKŮ

DESIGN OF EXTEND THE MACHINE WITH THE POSSIBILITY OF SEPARATING 3D PRINTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Josef Gonda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Pavlík, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Josef Gonda**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jan Pavlík, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

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:

Návrh rozšíření stroje o možnost oddělování 3D výtisků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte a konstrukčně zpracujte rozšíření vybrané pásové pily o možnost oddělování produktů 3D tisku. Při řešení je nutné co možná v největší míře zachovat původní technické vlastnosti stroje. Stanovení dalších charakteristik zadání bude součástí návrhu a rešerše.

Cíle bakalářské práce:

Rozbor současného stavu vědy a techniky u řešené problematiky.
Návrh variant řešení a zdůvodnění výběru konkrétního řešení.
Konstrukční návrh zvolené varianty – 3D model.
Nezbytné výpočty potřebné pro návrh a dimenzování.
Výkresová dokumentace vybraných uzlů.
Závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. Konstruování strojních součástí. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUT IUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Oddělení kovového 3D výtisku od tiskové desky je klíčovým krokem u většiny metod metalického 3D tisku. Cílem autora je navrhnout přípravek – upínací mechanismus, který rozšiřuje funkcionalitu stávajících pásových pil na kov o možnost komfortního oddělování výtisků. V úvodu práce autor pojednává o metodách kovového 3D tisku. Dále je práce soustředěna na rozbor trhu v dané problematice a stručný popis existujících řešení světových/konkurenčních výrobců pásových pil. Následně je odůvodněn výběr konkrétní pásové pily a jsou stanoveny základní vlastnosti mechanismu. Podstatnou částí je návrh variant řešení a výběr varianty na základě multikriteriální analýzy. Dále autor rozebírá konstrukční řešení vybrané varianty s popisem dílčích detailů, kde klade důraz na dodržení stanovených podmínek a optimalizaci produktu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kovový 3d tisk, oddělování, platforma, upínací mechanismus, pásová pila

ABSTRACT

Separating of the metal 3D print from the print plate is a key step in most metal 3D printing methods. The author's goal is to design a device - a clamping mechanism that expands the functionality of existing band saws for metal by the possibility of comfortable separation of prints. In the beginning of the work, the author discusses the methods of metal 3D. Furthermore, the author focuses on the analysis of the market in the given issue and a brief description of the existing solutions of world/competing band saw manufacturers. Subsequently, the choice of a specific band saw is justified and the basic properties of the mechanism are determined. An essential part is the design of solution variants and the selection of a variant based on multi-criteria analysis. Furthermore, the author analyzes the design solution of the selected variant with a description of partial details, where he emphasizes compliance with the specified conditions and product optimization.

KEYWORDS

Metal 3d printing, separation, platform, clamping mechanism, band saw

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

GONDA, Josef. *Návrh rozšíření stroje o možnost oddělování 3D výtisků*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/154184>.. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. 2024, 48 s., Vedoucí práce Ing. Jan Pavlík, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením pana Ing. Jana Pavlíka Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24.5.2024

.....

Gonda Josef

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Pavlíkovi za rady, přínosné konzultace a čas, který mi pro vypracování závěrečné práce věnoval. Veliký dík patří mé široké rodině a přátelům za podporu v průběhu bakalářského studia. Děkuji rodinné firmě Pegas-Gonda a lidem, kteří mi dali cennou školu v praxi.

OBSAH

1	ÚVOD	10
2	MOTIVACE	11
3	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	12
3.1	Aditivní výroba - rozdělení, rozvoj trhu, proces.....	12
3.2	Popis metod PBF	16
3.2.1	DMLS (Direct Metal Laser Sintering) a SLM (Selective Laser Melting).....	16
3.2.2	EBM (Electron Beam Melting).....	17
3.3	Popis metod DED	18
3.3.1	WLAM (Wire-Laser Additive Manufacturing)	18
3.3.2	LMD (Laser Metal Deposition)	18
3.3.3	EBAM (Electron Beam Additive Manufacturing).....	19
3.3.4	WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing).....	20
3.4	Popis ostatních metod	21
3.4.1	BJ (Binder Jetting).....	21
3.4.2	ME (Material Extrusion).....	22
3.4.3	MJ (Material Jetting)	23
3.5	Průzkum trhu kovových 3D tiskáren	24
3.6	Průzkum trhu pásových pil s ohledem na oddělování výtisku od platformy	26
4	ANALÝZA PROBLÉMU	29
4.1	Analýza	29
4.2	Stanovení základních vlastností produktu	29
4.3	Výběr pásové pily na kov	30
5	NÁVRH VARIANT	32
5.1	Varianta 1	32
5.2	Varianta 2	33
5.3	Varianta 3.....	33
5.5	Výběr varianty řešení.....	34
6	KONSTRUKCE VYBRANÉ VARIANTY	36
6.1	Popis hlavních komponent a konstrukčních řešení.....	36
6.2	Nezbytné výpočty	39
6.3	3D model	43
6.4	Aplikace na kloubové pásové pile 360x500 SHI	44
6.5	Aplikace na dvousloupové pásové pile 440 CALIBER SHI	45
7	ZHODNOCENÍ A DISKUZE	46
8	ZÁVĚR	47
9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	48
10	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK	51
10.1	Seznam zkratk	51
10.2	Seznam symbolů a značek.....	52
10.3	Seznam obrázků.....	53
10.4	Seznam tabulek.....	54
11	SEZNAM PŘÍLOH	55

1 ÚVOD

Zmínky o vynálezu 3D tisku sahají do první poloviny 80. let 20. století, kdy Japonec Hideo Kodama intenzivně pracuje na vývoji technologie využívající UV lamp a vytvrzování pryskyřice. Popisuje své invence jako „rapid prototyping device“ – zařízení pro rychlé prototypování. Byl také prvním, kdo se pokoušel patentovat princip spékání laserovým paprskem. Na základě jeho článků a neúspěšných pokusů o patentování se jeho nápadů ujali další. S prvním patentovaným přístrojem přišel v roce 1984 Charles Hull. Tento americký zakladatel společnosti 3D Systems v roce 1988 představuje první dostupnou tiskárnu SLA-1. Hull také s pomocí partnerské společnosti vyvíjí formát STL, který umožňuje rozdělit 3D model na vrstvy a tento formát je dodnes použitelný téměř u všech 3D tiskáren. V roce 1989 Dr. Carl Deckard a Dr. Joe Beaman z University of Texas v Austinu získali patent na metodu SLS (Selective Laser Sintering). V počátcích aditivní výroby se pracovalo se snadno roztavitelnými materiály – polymery, plasty, pryskyřicí atd. V roce 1995 je udělen patent na metodu SLM (Selective Laser Melting) Janu Deckardovi, který pracoval na vylepšení metody SLS. Díky vývoji metod SLS a SLM byl v odvětví 3D tisku vytvořen pevný základ pro využití kovových materiálů. [2], [3]

V průběhu 21. století se díky značné komercializaci vyvinuly i další metody. Jedná se například o 3D tisk spojený s práškovými kovovými materiály, nanášenými ve vrstvách na platformu. Ten získává univerzální označení PBF – (Powder Bed Fusion) a zahrnuje metody DMLS, SLM a EBM. Trendem posledních let je vývoj technologií pod společným označením DED – (Direct Energy Deposition). Jde o skupinu metod WLAM, LMD, WAAM a EBAM, které se vyznačují různým přístupem navařování kovového drátu nebo prášku přiváděného na pracovní povrch. [1]

Kovový 3D tisk, má v drtivé většině případů stejný společný bod při výrobě, obecně nazývaný post procesing (nutné operace a kroky po provedení tisku). Společným problémem řešeným v rámci post procesingu je mimo jiné oddělení 3D výtisku od platformy. Oddělení podpor probíhá nejčastěji na pásových pilách, v některých případech postačí pro odstranění podpor kleště nebo drátořezy. [1], [3]

Cílem této bakalářské práce je vytvořit přípravek pro odřezání 3D výtisku od platformy na pásové pile na kov. Upínací mechanismus by měl usnadnit manipulaci obsluze mezi 3D tiskárnou a pásovou pilou na kov. Přípravek by měl splnit jednoduchou manipulaci, přesné upnutí platformy a zajištění pozice pod pilovým pásem. V průběhu práce budou shrnuty a popsány různé technologie 3D tisku. V rámci průzkumu trhu s 3D tiskárnami bude práce obsahovat volbu ideální pásové pily na kov, na kterou se bude přípravek doporučovat.

2 MOTIVACE

Od šestnácti let jsem chodil na brigády do rodinné firmy Pegas-Gonda s.r.o., která se zabývá výrobou pásových pil na kov. S technologií kovového 3D tisku jsem se setkal na strojírenském veletrhu v Brně, před čtyřmi lety. Otázka, jak se odděluje výtisk od platformy tedy přišla přirozeně hned při prvním setkání s prodejci 3D tiskáren. Tehdy jsem dostal odpověď, že je to komplikované téma, ale nejčastěji se výtisky oddělují na pásových pilách. Nápad vznikl při konverzaci s prodejci na dalších veletrzích, kteří zmínili problémy při postprocesingu a ničení drahých výtisků při oddělování. Vycítil jsem mezeru na trhu a nepřipravenost výrobců pásových pil na tento typ řezání. Věřím, že výsledkem práce bude přípravek funkční a použitelný v praxi, který pomůže zpřesnit a urychlit výrobu ve firmách používajících kovové 3D tiskárny.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

3.1 Aditivní výroba - rozdělení, rozvoj trhu, proces

3D tisk, neboli aditivní výroba AM (Additive Manufacturing), je inovativní technologie umožňující vytváření komplexních objektů na základě digitálního modelu. Nabízí široké možnosti v průmyslové výrobě, letectví, architektuře, medicíně a dalších odvětvích díky schopnosti vytvářet komplexní geometrie, optimalizovat design a zkrátit vývojové a výrobní časy. Dle aktuální normy ISO/ASTM 52900:2021 je aditivní výroba definovaná jako proces spojování materiálů za účelem výroby dílů z dat 3D modelu, obvykle vrstva po vrstvě, na rozdíl od metod subtraktivní výroby a formativní výroby [9]. Výhoda 3D tisku spočívá v oblastech, kde konvenční výroba dosáhla svých omezení a v umožnění nových konstrukčních možností. Dnes je možné díky kvalitním extruderům, nebo laserům a pokročilým technologiím tisknout z polymerů, slitin, keramiky, hlíny a také kovu.

Rozdělení kovového 3d tisku MAM (Metal Additive Manufacturing) může být provedeno několika způsoby v závislosti na fyzikální podstatě procesu, typu materiálu, velikosti objektů nebo zdroji energie. Zmíněná norma ISO/ASTM 52900:2021 stanovila sedm skupin dle principu výroby (obr. 1 (a)) [9], [15]. Tyto metody jsou:

- **PBF** (Powder Bed Fusion – fúze práškového lože)

Do skupiny PBF patří SLS - Selective Laser Sintering spojovaný s polymery. DMLS - Direct Metal Laser Sintering principem totožný s SLS, ale označován zkratkou zdůrazňující využití s kovovými materiály. SLM - Selective Laser Melting metoda podobná DMLS s laserem schopným roztavit kovový prášek. EBM - Electron Beam Melting je metoda využívající elektronový paprsek.

Prášek je nanesen na pracovní plochu a tepelným účinkem zdroje spojen s předchozí vrstvou. Tepelný zdroj je umístěn na pohyblivé hlavě. Po spojení vrstvy se pracovní platforma posune o výšku jedné vrstvy a proces se opakuje. Nespojený materiál slouží jako podpůrný a po dokončení tisku je vysán a znovu použit. Materiály používané při metodách PBF jsou různé polymery, keramiky, písky a především kovy. [2], [5]

- **DED** (Direct Energy Deposition – přímé nanášení energie)

Technologie pod označením DED jsou LMD - Laser Metal Deposition, WLAM - Wire Laser Additive Manufacturing, WAAM - Wire Arc Additive Manufacturing, EBAM – Electron Beam Additive Manufacturing. Pod pojmem DED je soubor procesů, které využívají soustředěnou tepelnou energii pro roztavení a spojení materiálu. Materiál je ve formě prášku nebo drátu přiváděn do místa působení tepelného zdroje a ochranné atmosféry. Zdrojem působícího tepla je laser, elektrický oblouk, plasma nebo elektronový paprsek. [2]

- **BJ** (Binder Jetting - tryskání materiálu a pojiva)

Metoda je založena na nanášení tekutého pojiva ve formě kapek na základní materiál v podobě prášku. Pojivo přiváděné tryskami působí jako adhezivum mezi jednotlivými vrstvami prášku. Po ztuhnutí pojiva je dokončena vrstva, stavební platforma je posunuta o výšku jedné vrstvy a celý proces se opakuje. Tímto principem se tisknou plasty, kov, písek, keramika i sklo. [11], [26]

- **ME** (Material Extrusion – vytlačování materiálu - Merkforged)

Je jedna z nejrozšířenějších technologií aditivní výroby ve spojení s plasty. Funguje na principu protlačování filamentu ve formě vláken. Materiál je veden tryskou, která jej nanáší na platformu. Při průchodu tryskou dochází k ohřátí a roztavení materiálu ještě před nanášením. Tryska je pohyblivá ve dvou až třech osách a nanáší materiál na konkrétní místa podle CAD předlohy. Nejčastěji se tisknou termoplasty jako nylon a ABS. Touto technologií disponují 3D

tiskárny Prusa Research, česká firma dodávající tiskárny do celého světa. Dlouho neexistovala technologie, která by byla schopna vytlačovat kovové materiály. Společnost Markforged vyvinula technologii MFFF. [25]

- **SL** (Sheet Lamination – lepení plechových plátů)

Spočívá ve vrstvení plechů (nebo papírů) na sebe. Při každém nanesení dojde ke slepení listu s předchozím a k vyřezání tvarových kontur. Pracovní platforma je posunuta o výšku vrstvy dolů a celý proces se opakuje, dokud není výrobek hotov. Materiály plátů jsou z papíru, plastu, nebo kovu.

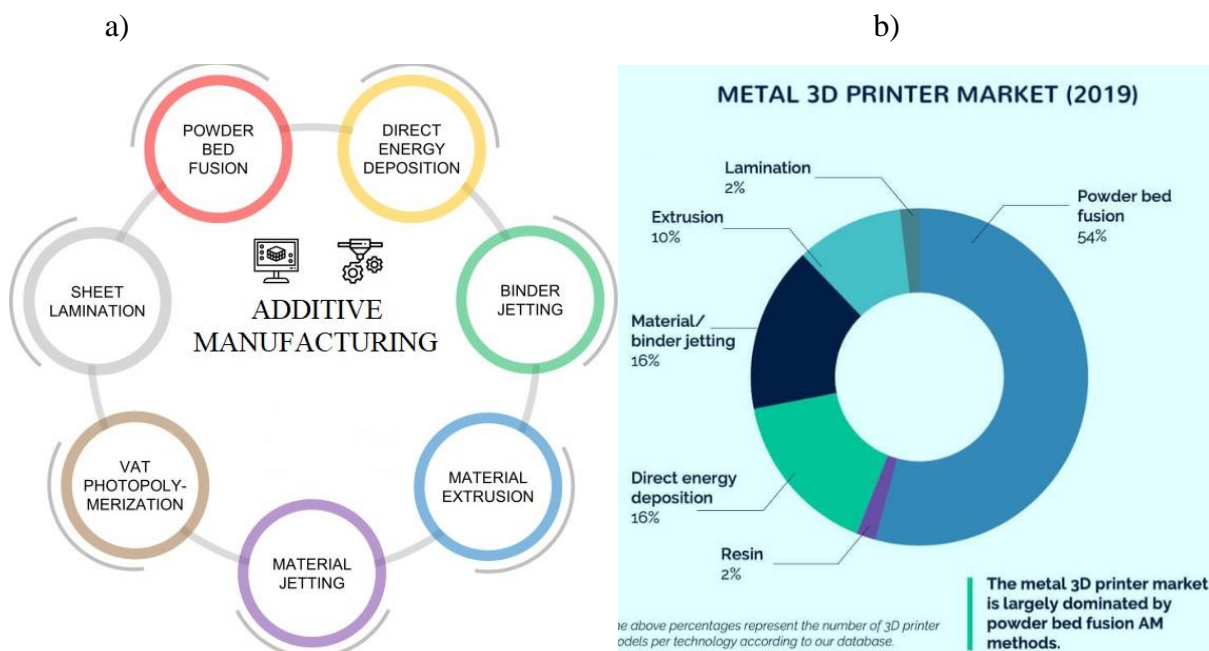
- **MJ** (Material Jetting – tryskání materiálů)

Využívá většího množství, v jedné řadě umístěných, tryskových hlav. Při posuvu soustavy hlav je pracovní plocha zaplněna tisknutým i podpurným materiálem, případně více různými materiály. Touto technologií jsou tisknuty fotopolymery, polymery. Firma XJET dokázala vyvinout technologii, která umožňuje tisk i z kovových nanočástic. [26]

- **VP** (Vat Photopolymerization nebo také Resin – Vytvrzování pryskyřice)

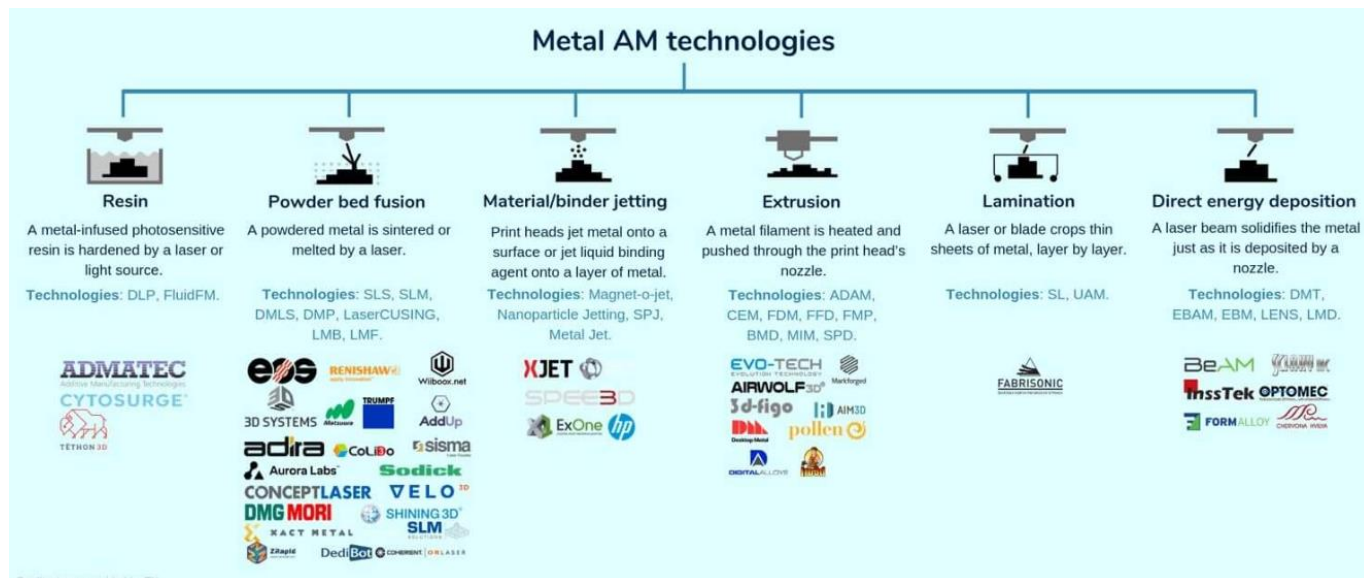
Patří sem metoda SLA, která je první vyvinutou metodou v rámci rapid prototypingu. S využitím ultrafialového laseru se v nádrži s tekutou fotosenzitivní pryskyřicí díky chemické reakci, zvané fotopolymerizace, mění na pevnou fázi. Dlouhou dobu byla SLA jedinou technologií. V roce 2021 však vyšla studie o open source vývoji nové technologie DLP – Digital Light Processing s potenciálem hlavně v uměleckých dílnách díky svým specifickým vlastnostem a umožnění tisku wolframu. [17]

Vzhledem k neustálému vývoji je velice obtížné zaznamenávat pokrok jednotlivých metod a technologií. Přibližný stav trhu (obr 1 (b)) zpracovaný certifikovaným zpravodajem Aniwaa z roku 2019 naznačuje trend a zastoupení jednotlivých metod na trhu. [12]



Obr. 1 (a) Rozdělení metod aditivní výroby dle normy ASTM [8], (b) Procentuální zastoupení metod (MJ a BJ zahrnuty společně) [12]

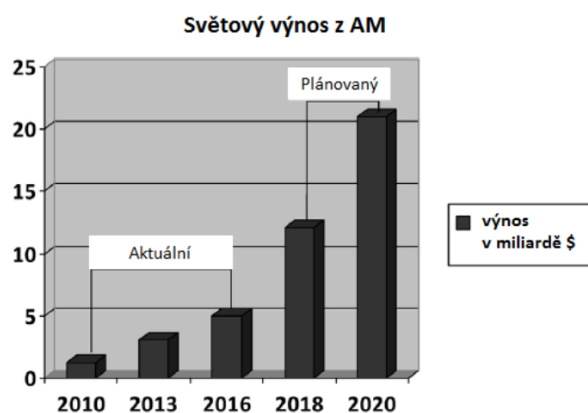
V tématu bakalářské práce budou detailněji popsány metody s nutností odřezání výtisku od platformy. Jedná se o technologie zahrnuté v PBF, DED, tvořící zhruba 70% MAM trhu viz (obr 1 (b)). Vzhledem k potenciálu metod MJ, BJ a ME shrnu tyto technologie také, díky rafinovanému řešení oddělování výtisku od platformy pouhým úderem nebo klepnutím. Přehled technologií MAM je na (obr. 2).



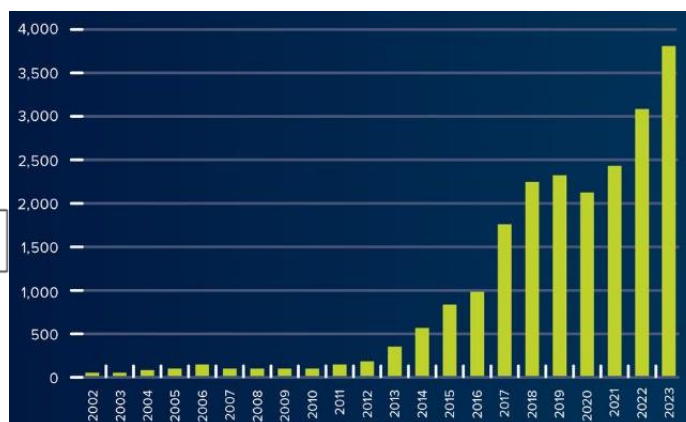
Obr. 2 Přehled technologií a výrobců v roce 2024 [12]

Rozvoj trhu s aditivní technologií znázorňují grafy zaznamenávající růst celosvětových tržeb. První graf (obr. 3 (a)) zahrnující všechny technologie aditivní výroby byl zveřejněn v roce 2017 Kalifornskou státní univerzitou, s odhadem do roku 2020. Správnost odhadu růstu plánovaného výnosu dokazuje druhý graf (obr. 3 (b)), zaměřený pouze na kovový 3D tisk vydaný v roce 2024. Graf zpracovala společnost Wohlers Associates, založená ASTM International. Wohlersova zpráva uvádí důležitý údaj o tom, že mezi rokem 2022 a 2023 zaznamenal segment s kovovým 3d tiskem vzrůst o 24,4% na necelé 4 miliardy USD. Obecný trh aditivní výroby zaznamenal nárůst o 11,1%, což k roku 2023 představuje 20,035 mld USD [13]. To dokazuje sílu tohoto specifického trhu a potenciál metod kovové aditivní výroby do následujících let.

a)



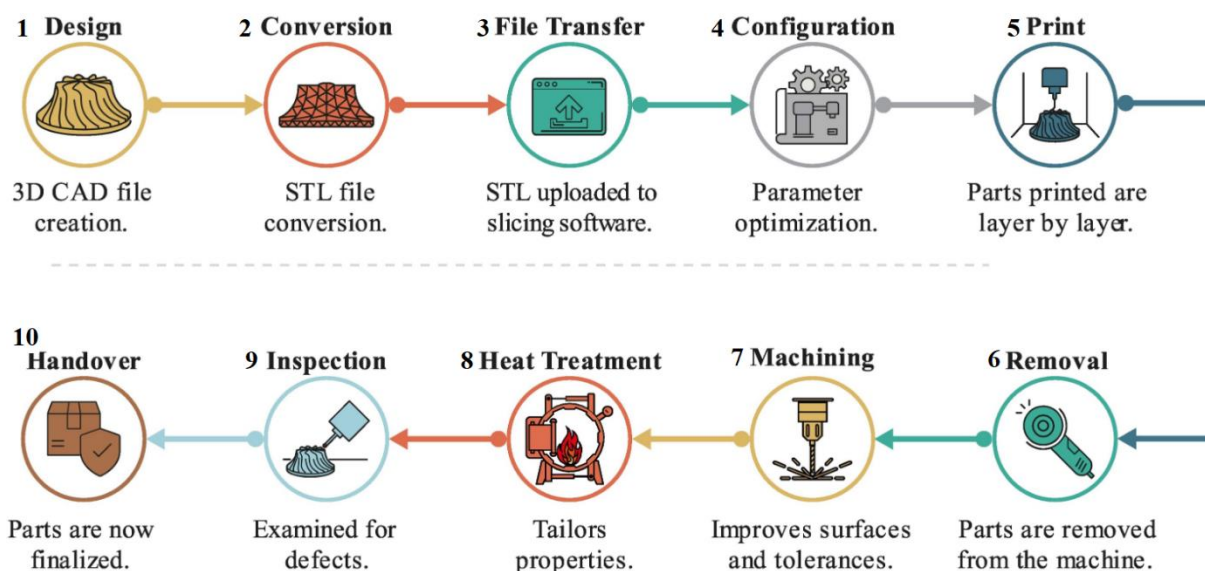
b)



Obr. 3 (a) Celosvětový výnos z aditivní výroby [14], (b) Celosvětový výnos z kovové aditivní výroby v letech 2002-2023 [12]

Proces 3D tisku je znázorněn na (obr. 4). Obecně se shrnuje v deseti krocích. Prvních pět kroků je základem každé metody. Spousta technologií následuje trend zjednodušení výrobního procesu a zrychlení výrobních časů pomocí vynechání některého z bodů post-processingu viz 6.-10. bod na obrázku. Proces MAM:

- 1) Návrh fyzického produktu je klíčový a konstruktér by měl počítat s návrhem geometrických prvků i vnitřních výplní a podpěrné konstrukce.
- 2) Konstruktér převede data modelu do formátu STL, který součást rozdělí do trojúhelníkové sítě.
- 3) Formát je nahrán do softwaru, který rozdělí součást na jednotlivé vrstvy.
- 4) Dojde k nahrání dat do 3D tiskárny, kontrole parametrů a nastavení tiskárny.
- 5) Samotný tisk probíhá dle metody vždy jinak, zásadně ale vrstva po vrstvě.
- 6) Post-processing začíná odstraněním výtisku z platformy.
- 7) Obrábění, broušení, leštění.
- 8) Tepelné zpracování – zušlechťování, kalení, žihání.
- 9) Kontrola kvality.
- 10) Převzetí koncovým zákazníkem.



Obr. 4 Znáznornění procesu výroby MAM [6]

3.2 Popis metod Powder Bed Fusion

3.2.1 DMLS (Direct Metal Laser Sintering), SLM (Selective Laser Melting) a DMP (Direct Metal Printing)

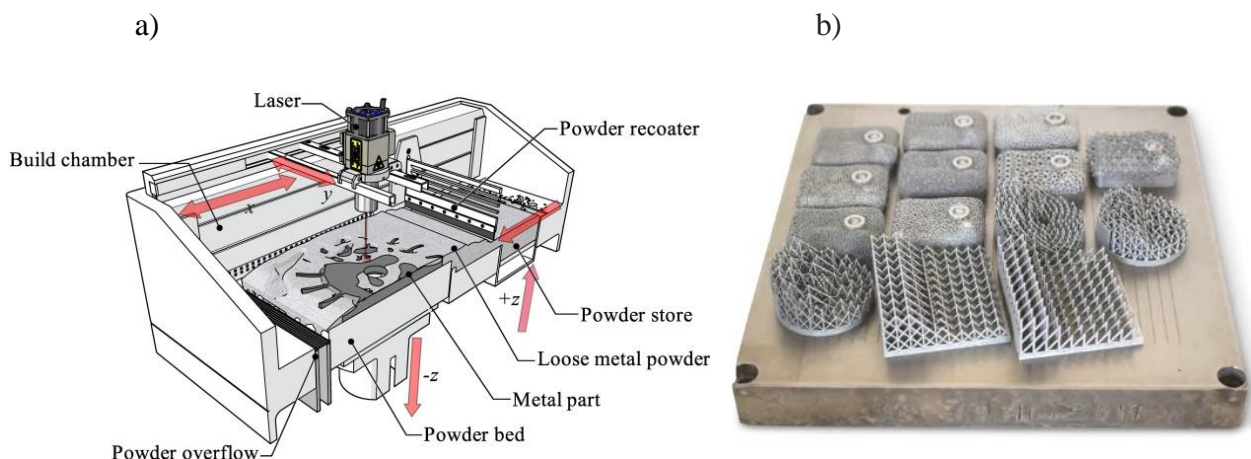
Technologie DMLS a SLM mají společného předchůdce. Tím je metoda SLS vyvinutá v roce 1989 Dr. Carlem Deckardem a Dr. Joe Beamanem. V devadesátých letech je udělen patent na metodu SLM (Selective Laser Melting - selektivní laserové tavení) Janu Deckardovi, který pracoval na vylepšení metody SLS. Ve stejném období byla patentována i technologie DMLS firmou EOS. Vzhledem k vypršení platnosti většiny patentů se chopilo příležitosti mnoho firem a společností a jejich technologie dnes tvoří drtivou většinu PBF i celé MAM. [2], [3]

Stroje obou technologií používají ke spojování kovových vrstev vysoce výkonné lasery. Ty roztaví (SLM), nebo sintrují (DMLS) práškový materiál. Vždy se tak děje v komoře s inertní atmosférou pro snížení oxidace roztaveného kovu. Tenká vrstva prášku je rozprostřena pomocí roznášecího ramene na platformu. Laser v každé vrstvě roztaví přesně definovaná místa podle tvaru průřezu dílu, který je definován 3D modelem. Platforma je na pístu a při dotisknutí jedné vrstvy klesne ve směru osy Z o úroveň další vrstvy. Rameno rozprostře další prášek a proces se opakuje, dokud není součást hotová. Během tisku slouží dosud neslinitý prášek jako podpora pro součást viz (obr. 5 (a)). Součásti se modelují s podporami, které fixují složitější díly, zároveň odvádí přebytečné teplo a zajišťují rovnoměrnější chladnutí. Po dokončení tisku obsluha stroje vysaje neslinitý prášek. V rámci zahájení post-procesingu se odřízne díl od platformy. Po odříznutí a odstranění podpor většina dílů vyžaduje dodatečné opracování a tepelné zpracování jako kalení nebo žíhání. [4], [10]

Přesnost těchto strojů je dána šířkou laserového paprsku a výškou vrstvy, která se dá nastavit. Drsnost povrchu a přesnost vůči modelu nejsou tak dobré jako u jiných technologií.

Obě technologie nachází využití v široké škále aplikací, například v lékařství, automobilovém a leteckém průmyslu. Rozměry tisknutých součástí se pohybují od malých (100x100x100mm) po velké (800x800x1000 mm).

Technologie **DMP**, pojmenována firmou 3D Systems je téměř totožná s SLM a DMLS, ale při tisku nanáší nové vrstvy prášku při každém pohybu tiskové hlavy. DMP vytváří díky patentované technologii zhutňování vrstev jedny z nejpřesnějších dílů s obdivuhodnými detaily a výbornými mechanickými vlastnostmi (obr. 5 (b)). [27]



Obr. 5 a) Princip technologie DMSL a SLM [6], b) detailní výtisky technologie DMP [27]

3.2.2 EBM (Electron Beam Melting)

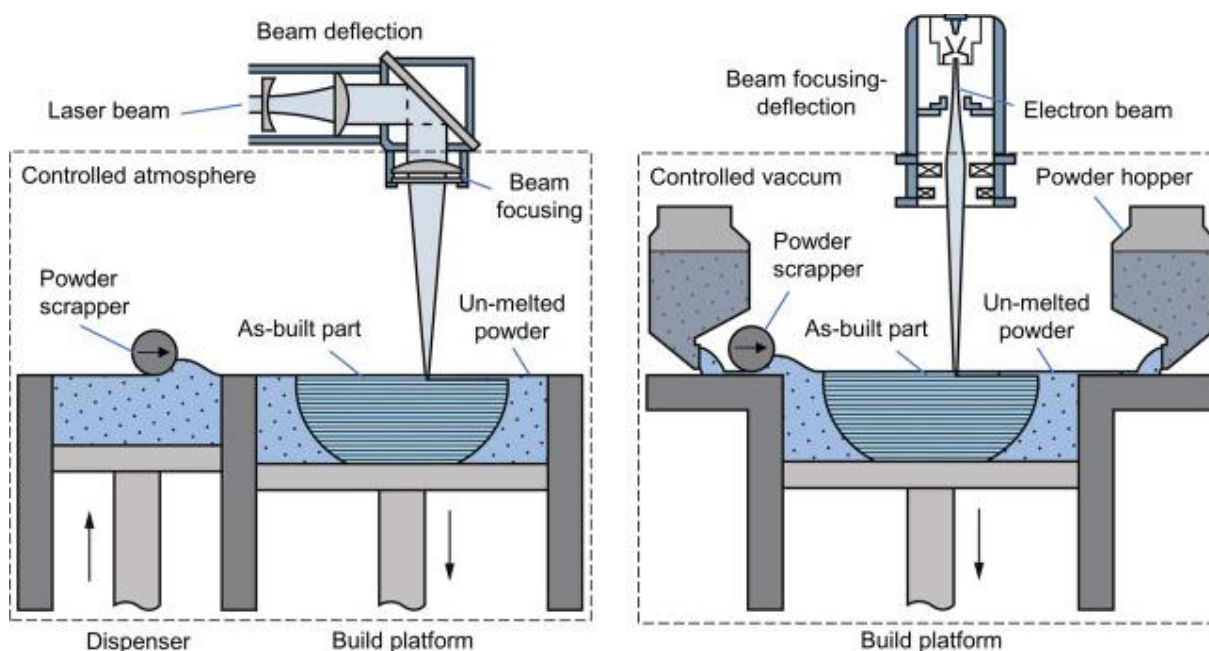
Technologie EBM byla vyvinuta švédskou firmou Arcam v roce 2002. Dnes vystupuje firma pod novým majitelem, společností GE Additive. V průběhu posledních deseti let se objevilo dalších 7 výrobců využívající metodu EBM.

Stroje EBM se od SLM/DMLS strojů liší tím, že používají k výrobě dílů elektronový paprsek místo laseru. Paprsek je tvořený v elektronové pistoli, která emituje elektrony z wolframového vlákna. Kovový prášek (titan, měď, slitiny niklu, tantalu, nerezové a nástrojové oceli) je pomocí elektronového paprsku roztaven na teplotu až 2 000 °C a spojen. Rozdíly metod SLM a EBM jsou patrné na (obr. 6). Metody se liší v typu ochranné atmosféry v pracovní komoře. EBM využívá vakuum na rozdíl od použití inertních plynů u SLM a DMLS. Proces tisku je velice podobný jako u DMLS a SLM. [18]

Velkým přínosem je možnost umístit tisknuté součásti na sebe. Mezi platformu a tisknutou součást se natiskne speciální vrstva. Ta se v otryskávací stanici společně s volným práškem odstraní a tím se hotové díly uvolní. Není tedy nutné odřezávat výtisk. [28]

Výhodou je možnost znovupoužití neroztaveného prášku – až 98% a vysoká rychlost tisku. Mezi nevýhody patří například menší přesnost kvůli zrnitějšímu prášku, s tím spojené horší čištění a delší doba chladnutí. [21]

Technologie EBM se uplatňuje v leteckém průmyslu díky odolnosti dílů vůči vysokým teplotám a výborným mechanickým vlastnostem (např. při použití specifických slitin na bázi niklu). Významné užití je i v lékařství, kde se tisknou kyčelní náhrady a jiné implantáty z titanu. Technologie získává uplatnění i v ostatních průmyslových odvětvích. Její rozšíření směrem k poloprofesionálnímu a hobby tisku je vzhledem k vysokým nákladům nepravděpodobné. [19], [20], [28]



Obr. 6 Porovnání technologie SLM (vlevo) a EBM (vpravo) [8]

3.3 Popis metod DED

3.3.1 WLAM (Wire-laser additive manufacturing)

Technologie využívá laserový paprsek k tavení kovového drátu a tvorbě svarové lázně. Kombinování laseru a přídavného drátu je velice přesné a díky tomu patří metoda k nejvíce používaným metodám kovového 3D tisku.

Metoda je založená na emisi fotonů. Energie potřebná pro dosažení kritického množství fotonů je získávána elektrickým výbojem. Laserové dělo tvoří válcová trubice složená ze zrcadla s 100 % odrazivosti a na druhé straně je polopropustné zrcadlo s 80-90 % odrazivosti. Emitované fotony, soustředěné v úzkém paprsku o frekvenci až 500 Hz, dopadají na krystalickou mřížku svařovaného materiálu. Zvyšují její frekvenci vibrací a tím dochází k ohřevu a tavení drátu. Ochranná atmosféra je tvořena inertním plynem (Ar, He).

Výhodou metody je malá tepelně ovlivněná oblast a díky tomu i nízká deformace výrobku po zchladnutí. Zajímavou vlastností je možnost plynulé změny rozměrů svarové housenky díky korekci intenzity laserového paprsku. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena.

Silným zástupcem této technologie je firma Meltio, která je v Česku zastoupena společností 3D Wiser. Společnost Meltio vznikla v roce 2019 jako společný podnik firem Additec a Sicnova. Ty se věnovaly vývoji technologie a prodávají ji pod označením W-LMD (Wire-Laser Metal Deposition). Dnes Meltio vyvíjí hlavy s více lasery. To umožňuje tisk ze dvou až tří drátů a vznik slitin, které vykazují výborné mechanické vlastnosti [21].

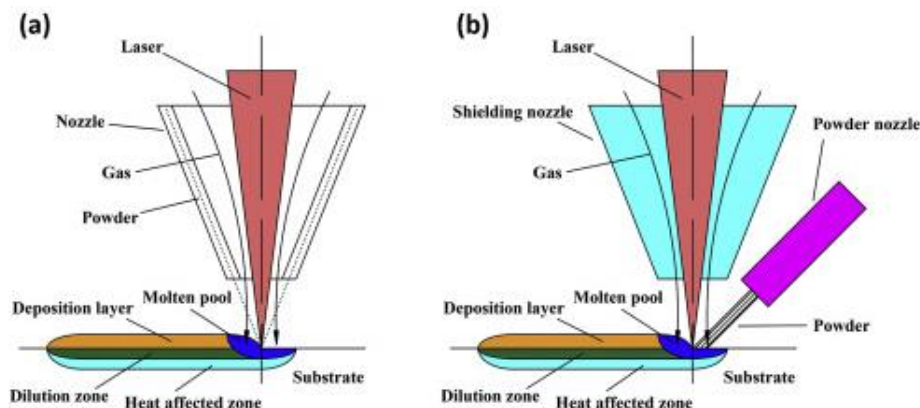
3.3.2 LMD (Laser Metal Deposition)

LMD je společné označení pro známé technologie LENS (laser engineering net shaping), DMD (direct metal deposition), LRF (laser rapid forming) a DLF (direct laser fabrication). Mnoho názvů pro totéž je zapříčiněno vývojem metod na různých univerzitách a společnostech.

Proces je podobný technologii WLAM viz WLMD firmy Meltio. Při procesu LMD je navržená součást rozdělena do vrstev. Zaměřený laser spéká přiváděný prášek tryskou podle navržené trajektorie. Kovový prášek je přiváděn dvěma způsoby (obr. 7) buď koaxiálním (a) nebo bočním (b). Koaxiální přívod je přesnější. Boční podávání prášku se běžně používá k výrobě povlaků trubkových dílů. [7], [12]

Ve srovnání s technologií SLS/SLM je LMD vhodné i pro opravy již vyrobených dílů [7]. Technologie je uplatněna také v lékařství při tisku implantátů vykazujících vlastnosti kostí.

Zajímavostí je, že firma Formalloj umožňuje tisk drátu i prášku zároveň. [12]



Obr. 7 Podávání prášku při metodách LMD a) koaxiální, b) boční přívod [7]

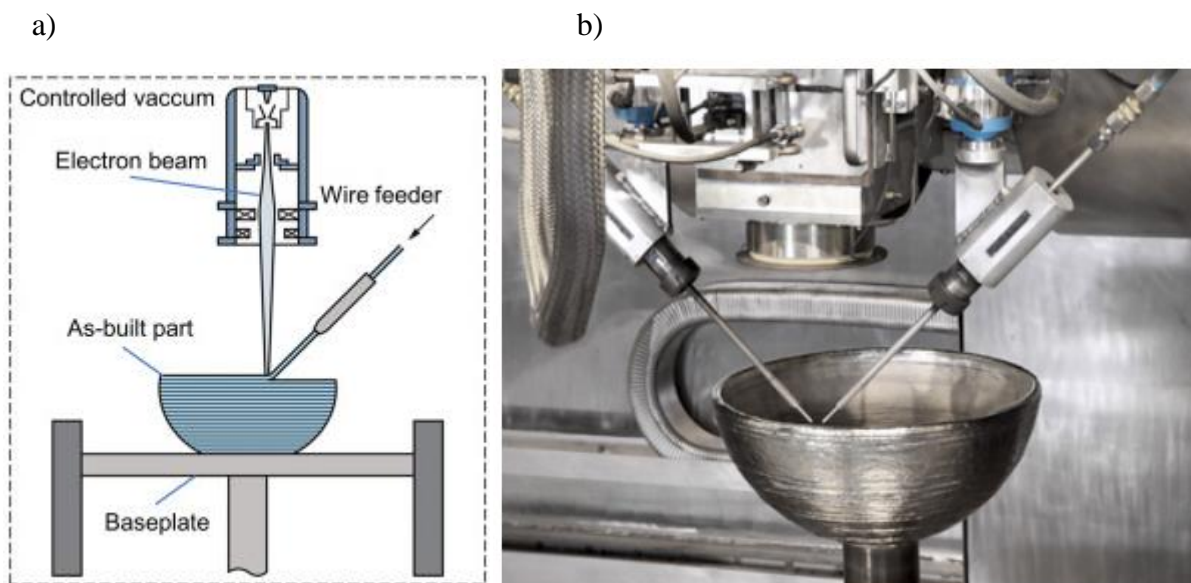
3.3.3 EBAM (Electron beam additive manufacturing)

Tato technologie je založena na tavení drátu elektronovým paprskem.

Zdrojem svazku elektronů je tzv. elektronové dělo s emisní diodou a elektromagnetickými urychlovači a usměrňovači, které ovlivňují směr a intenzitu toku. Proces probíhá ve válcové nádobě s vakuem, aby nedocházelo k vychylování paprsku částicemi vzduchu a vzniku oblouku mezi elektrodami (W, Ta, Mo, Nb). Díky velmi malé hmotnosti elektronu je možné ho urychlit pomocí elektrického pole na vysokou rychlost (25-75 % rychlosti světla). Kinetická energie emitovaných elektronů a následný náraz na povrch materiálu vyvolají jeho požadované zahřátí. Díky tomu je možné tavit drát a vytvářet součást definovanou 3D modelem (obr. 8 (a)).

Výhodou EBAM je vysoká rychlost tisku. Není nutné tepelné zpracování jako u technologií PBF. Drát je výrazně levnější než prášková surovina a snadněji se skladuje. Další výhodou je rozsáhlé použití materiálů (titan a slitiny titanu, inconel, tantal, wolfram, niob, nerezové oceli, hliník, 4340 ocel, zircalloy, 70-30 měď nikl). [23]

Firma Sciaky je významným dodavatelem technologie EBAM pro průmyslové využití od roku 2009. (Obr. 8 (b)) ukazuje řešení firmy Sciaky se dvěma dráty. Historie této společnosti je delší, svařování elektronovým paprskem se věnuje od roku 1950. Nabízí systémy členěné dle velikosti tiskových komor. Velké komory: od 579 do 1981 mm délky, střední komory: od 1295 do 686 mm délky, malé komory: do 600 mm délky. Díky velkým rozměrům součástí nachází využití při výrobě v leteckém a lodním průmyslu. [23]



Obr. 8 a) Technologie EBAM [8], (b) řešení firmy Sciaky s dvojitým podáváním drátu [23]

3.3.4 WAAM (Wire arc additive manufacturing)

Metoda využívá elektrického oblouku jako tepelného zdroje. Poprvé ji jako možnou technologii pro 3D tisk popsali v roce 1990 na univerzitě Cranfield, ve Velké Británii. Pozitivním faktorem, který má hlavní zásluhu na dostupnosti je, že metoda užívá klasické součásti svařecích strojů. Soustavy WAAM tvoří:

- Pohybový člen – CNC portál, nebo víceosé robotické rameno. Je to zásadní prvek pro programovatelnost, robotizaci a automatizaci procesu tisku. Robotická ramena mají větší rozsah pohybu, zatímco CNC portál dosahuje vyšší přesnosti. Pohybový člen nese svařovací hlavu s hořákem a ústí podavače.
- Ochranný plyn – zamezuje oxidaci, snižuje pórovitost, kontroluje propalování materiálu a ovlivňuje svarové procesy. Ochranný plyn je uložen v tlakových nádobách. Redukční ventil ovlivňuje průtok a tlak plynu, který je hořákem přiváděn do zóny svaru.
- Svařovací hořák – je připojený ke zdroji, který dává napětí potřebné ke vzniku oblouku. Hořák je složen z hlavy s plynovou tryskou a elektrodou, podle které se často rozlišují metody svařování.
- Zdroj oblouku – slouží jako emitör tepelné energie. Je řízený digitální elektronickou jednotkou, která kontroluje procesy všech součástí svařovací soustavy.
- Podavač drátu – je uložený ve skříní spolu se zdrojem oblouku, tvoří ho cívka s drátem a soustava kladek. Soustava obsahuje kladku hnanou elektromotorem.
- Řídící jednotka – koriguje elektrické napětí a proud, rychlost podávání drátu, průtok plynu, celkový průběh a trajektorii tisku. Řídící jednotky 3D tiskáren WAAM se neliší od běžného vybavení CNC strojů nebo robotických center.

WAAM zahrnuje mnoho technologií určených různými možnostmi svařování. Mezi ně patří:

- PAW (Plasma Arc Welding) – tisk plazmovým paprskem.
- TIG (Tungsten Inert Gas) – tisk s wolframovou elektrodou.
- MIG (Metal Inert Gas) – tisk s ochranou atmosférou inertního plynu.
- MAG (Metal Activ Gas) – tisk s ochranou atmosférou aktivního plynu.
- CMT (Cold Metal Transfer) – svařování s tvorbou výboje při kontaktu drátu a platformy.

Metody umožňují díky většímu rozsahu robotického ramene tisknout rozměrnější díly. Svary jsou větších rozměrů, proto je nutné součásti po dotisknutí obrábět. Kvůli tomu se v posledních letech vyvíjí tzv hybridní stoje. Ty eliminují povrchové nedokonalosti už v průběhu tisku, kdy postupně obrábí povrch tisknuté součásti. [23]

3.4 Popis ostatních metod

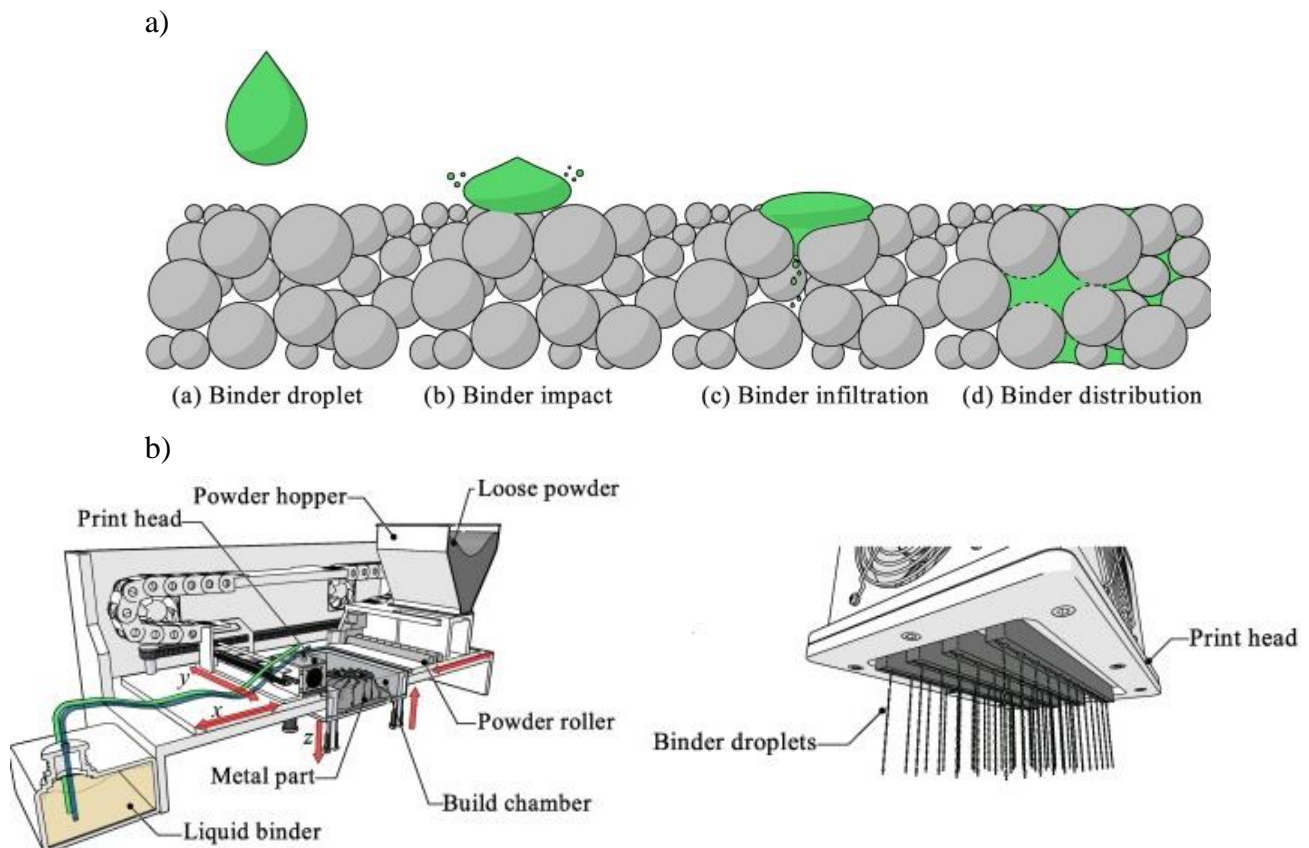
3.4.1 BJ (Binder jetting)

Binder Jetting je rozsáhlá, vysoce přesná metoda kovového 3D tisku. Má stejnou vlastnost jako ostatní technologie PBF, kde nepoužitý prášek slouží jako částečná nosná struktura. Rozdílem oproti PBF je práce při pokojové teplotě, která umožňuje větší volnost ve výběru materiálu, jako jsou kovy, keramika nebo polymery. Sestava tiskárny BJ je na (obr. 9 (b)). [6]

BJ probíhá podobně jako procesy PBF, ale místo laseru jsou na vrstvy prášku tryskány kapičky pojiva (obr. 9 (a)). Pojivo se rozmístí mezi částice a ztuhne. Tisk probíhá za pokojových teplot. Výhodou absence fúze v průběhu tisku je, že se během procesu nemění základní kovová struktura. To zabráňuje mnoha nežádoucím vedlejším účinkům, jako jsou zbytková napětí, tepelně ovlivněné zóny a oxidace (díky tomu není třeba ochranné atmosféry). Po dotisknutí součásti následuje slinování, které zlepšuje hustotu a pevnost součásti. V tomto kroku se vypaluje pojivo a zhušťuje součást. Nevýhodou je, že během slinování dochází ke snížení pórovitosti a rozměrovému smrštění, které ovlivní rozměrovou přesnost. Nepoužitý prášek je plně recyklovatelný. [24]

Proces je rychlejší než u PBF. V počátku tisku je nanášena speciální vrstva, díky které lze součást bez námahy odebrat. Není tedy nutné výtisk mechanicky oddělovat pásovou pilou.

Kovové díly vyrobené prostřednictvím BJ lze použít jako funkční prototypy nebo pro malosériovou výrobu. Některé stroje BJ, které používají jako prášek oxid křemičitý nebo slévárenský písek, mohou vyrábět formy a jádra pro odlévání do písku. BJ má také značné uplatnění v automobilovém průmyslu a průmyslu těžké techniky. [24], [6]



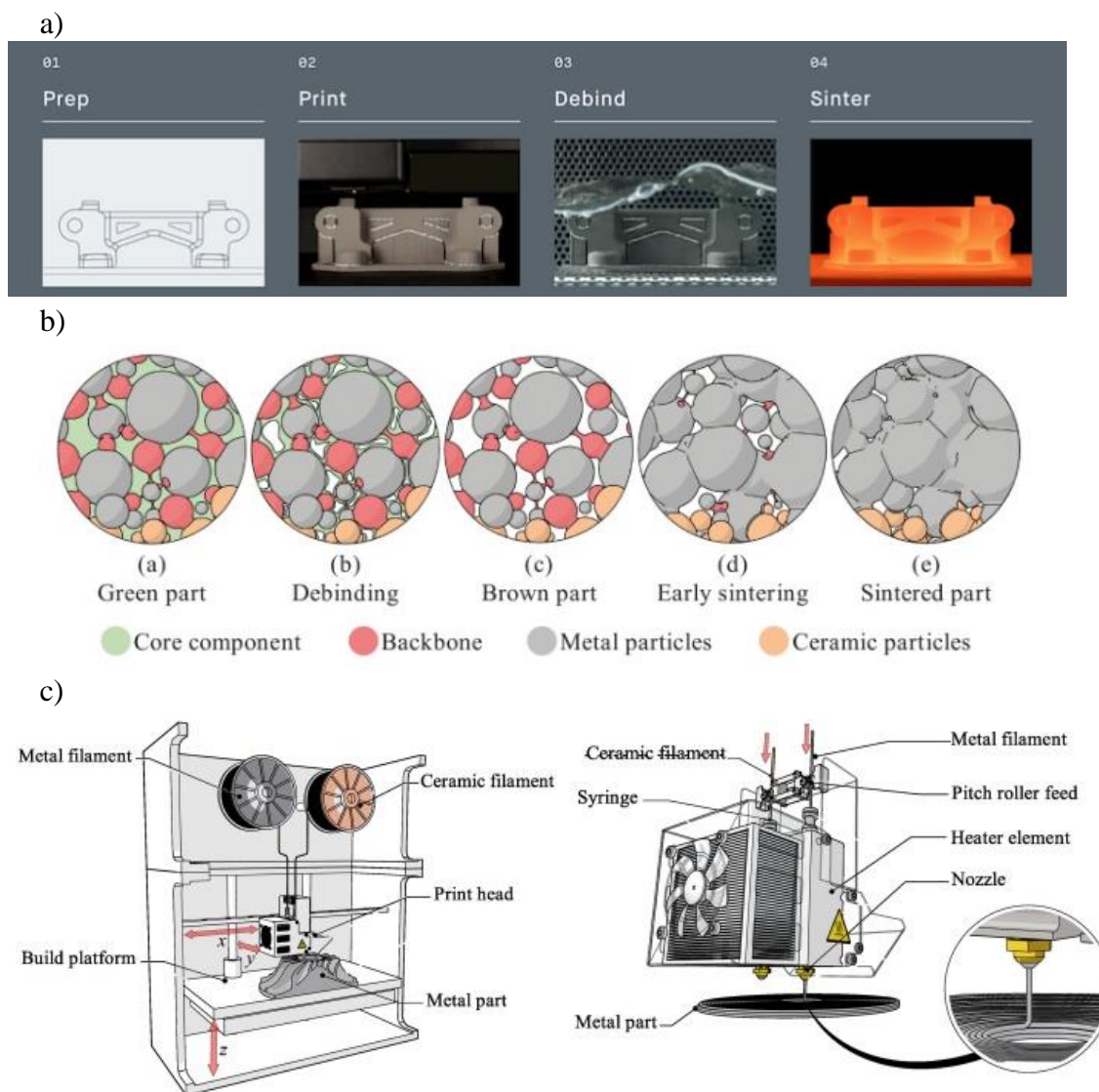
Obr. 9 a) Průběh vsřebání pojiva, b) sestava BJ tiskárny (vlevo) a tisková hlava s kapkami pojiva (vpravo) [6]

3.4.2 ME (Material extrusion)

Metoda je založena na vytlačování směsi jemného kovového prášku vázaného v polymerní matrici s keramickými elementy. Proces probíhá ve čtyřech krocích – návrh, tisk, naložení v lázni a sintrování výtisku (obr. 9(a)). Po smísení v tiskové hlavě se surovina zahřívá nad bod tání polymerní matrice ve vyhřívané hlavici. Díky tomu je směs nanášena na platformu a vzniká tzv. zelené těleso. To se vloží do lázně a chemickou reakcí se z pórů odstraňuje pojivo značené na (obr. 9 (b)) zelenou barvou. V průběhu slinování dochází k rozkladu zbytků matrice a dojde k vysintrování částic kovu. Na obrázku (obr. 9 (c)) můžeme vidět schéma tiskárny a tiskové hlavy. [6], [25]

Hlavním průkopníkem této metody je firma Markforged, která vyrábí tiskárny Metal X a metodu nazývají MFFF (Metal Fused Filament Fabrication). Výhodou jsou výborné mechanické vlastnosti, nejsou nutné další povrchové úpravy, vysoká rychlost tisku a především zde není nutné odřezávat výtisk – úspora času v rámci postprocesingu. Nevýhodou je nepatrné zmenšení rozměrů po dokončení tisku. [25]

Metoda je zatím v počátcích svého vývoje, ale rozhodně má obrovský potenciál ve spoustě strojírenských odvětví.



Obr. 10 a) Průběh tisku [25], b) průběh vstřebání materiálu v průběhu procesu [6]
c) sestava ME tiskárny [6]

3.4.2 MJ (Material jetting)

Technologie MJ se vyvíjela několik let a zahrnuje více než 80 patentů. Nejznámější firmou je XJET, která má technologii postavenou na nanášení až 100milionů kapek za sekundu. Kapky jsou tvořeny speciálním inkoustem a nanočásticemi kovového materiálu. Nanášené vrstvy jsou velice tenké, méně než 10 mikrometrů. Tisk je extrémně rychlý a neprobíhá ve speciální atmosféře, rozpustná vrstva umožní snadné odstranění výtisku z platformy. Na závěr probíhá sintrování, při kterém nedochází ke změně velikosti. Další výhodou je to, že kapičky dopadají jen na místa stanovené programem. [26]

Technologie nachází uplatnění ve výrobě polovodičů, biotechnologii, zdravotnictví, leteckém průmyslu, automobilovém průmyslu, telekomunikaci a další. Vysoká produktivita a opakovatelnost umožňují řešení od prototypování až po plnohodnotnou výrobu. [26]

Stejně jako u předchozích metod BJ a ME můžeme odhadovat strmý růst a dorovnání metod DED a PBF.

3.5 Průzkum trhu s kovovým 3D tiskem

Pro správné určení velikosti přípravku a zpracování konstrukčního řešení práce předkládám tabulku výrobců a metod kovového 3D tisku. V tabulce shrnuji informace o velikosti tiskového prostoru a nutnosti odřezávat výtisk na pásové pile. Z portfolia výrobců byl uveden nejmenší, střední a největší výrobek co se týče velikosti tiskového prostoru.

Tab. 1 – Přehled 3D tiskáren PBF, BJ, MJ a ME. [12]

Me- to- da	Výrobce	Model	Technologie	Velikost tiskového prostoru [mm]	Nutnost od- říznot vý- tisk od plat- formy
PBF	3D Systems	DMP Flex 100	DMP	100x100x90	ANO
		DMP Flex 200		140x140x115	
		DMP Factory 350 Dual		275x275x420	
		DMP Factory 500		500x500x500	
	EOS	EOS M 100	DMLS	100x100x95	
		EOS M 290		250x250x325	
		EOS M 400-4		400x400x400	
	Nikon SLM Solutions	SLM 125	SLM	125x125x125	
		SLM 280 PS		280x280x365	
		SLM 500		500x280x365	
		NXG XII 600		600x600x600	
	DMG Mori	Lasertec 12 SLM		125x125x200	
		Lasertec 30 Dual SLM		300x300x350	
	HBD	HBD 300		325x325x400	
	Renishaw	RenAM 500S		250x250x350	
	Xact Metal	XM200C	DMSL	127x127x127	
		XM300G		300x300x350	
	Intech	iFusion 325		325x325x420	
GE Additive	Arcam EBM Q10plus	EBM	200x200x180		
	Arcam EBM Spectra H		d250x430		
	Arcam EBM Spectra L		d350x430		
BJ	M2 Series 7	BJ	250x250x352		
	Series 5		500x500x502		
MJ	Carmel 700M	NPJ (Nano Particle Jetting)	500x140x200		
	Carmel 1400M		500x140x200		
ME	Markforged	Metal X (Gen 2)	MFFF	330x220x180	

Tab. 2 – Přehled 3D tiskáren DED. [12]

Me- to- da	Výrobce	Model	Technolo- gie	Velikost tiskového prostoru [mm]	Nutnost od- říznout výtisk od platformy
DED	Formalloy	L-Series	LMD	1000x1000x1000	ANO
	Trumpf	TruLaser Cell 7040		800x600x400	
		TruLaser Cell 7040		4000x2000x1000	
	Okuma	MU-8000V LASER EX		925x870x600	
	Nikon	Lasermaister LM100A		297x210x200	
		Lasermaister LM101A		d150x150	
	Meltio	M450	W-LMD	145x168x390	
		M600		300x400x600	
	MetalWorm	MHTTM1000	WAAM	d700x700	
		MW2000s		2000x2000x2000	
	WAAM3D	RoboWAAM		2000x2000x2000	
	RAMLAB	MAXQ ROBOT		–	
	Enigma	ArcMan S1		400x400x500	
		ArcMan 600		600x600x1000	
	Aditec	Performance AMRC-S	WLAM	1800x1800x1800	
Sciaky	EBAM 68 Series	EBAM	711x635x1600		
	EBAM 110 Series		1219x889x1600		
	EBAM 150 Series		2794x1575x1575		

V tabulkách jsou shrnuta podstatná data pro rozhodování a určení základních požadavků a parametrů samotné konstrukce přípravku.

U metod PBF se maximální rozměry tiskového prostoru (tisknuté součásti) blíží k 500 mm. Téměř každý výrobce PBF nabízí nejméně dvě tiskárny do 300 mm. Nejméně výrobků, co se týče rozměru platform, je v rozmezí od 350 do 490 mm.

Metody ME, MJ a BJ jsou zahrnuty v tabulce pro informaci a přehled rozsahu tisku. Odřezávání není nutné.

Tabulka č.2 s metodami DED ukazuje velké množství výrobců a obecný trend rozměrnějších výtisků díky užití robotických ramen a větších tlouštěk vrstev. Rozměry tisknutých ploch začínají od 600 mm a končí i nad 2000 mm. Díky výrobcům Meltio a Nikon, kteří patří k úspěšným výrobcům na trhu, můžeme počítat s přípravkem do 325 mm, který bude pracovat i na odřezávání výtisků vytvořených metodou DED.

Vzhledem k nadpolovičnímu zastoupení metod PBF na trhu viz (obr. 1 (b)) se bude zpracování přípravku pro upínání, manipulaci a odříznutí zaměřovat na metody PBF a DED pro tisk součástí o maximálních rozměrech 325x325x350 mm.

3.6 Průzkum trhu pásových pil s ohledem na oddělování výtisku od platformy

- Řešení firmy **Pilous**

Firma Pilous je český výrobce, který má ve svém portfoliu stroje na řezání kovu i dřeva. V rámci pásových pil na kov nabízí řadu pásových pil přímo pro odřezávání 3D tisku. Jedná se o stroje Xpert 3.0 3D, Xpert 3.3 3D a Xpert 5.2 3D (obr. 11 (a, b)).

Maximální rozměr platformy, kterou upne stroj Xpert 3.0 3D, je 300x300mm. Stroj nabízí dvě varianty upínání. První je pomocí šroubů a využití otvorů v platformě. Druhé je pomocí rychloupínání – dotažení pomocí jednoho šroubu. Upínání probíhá ve vodorovné pozici, k zvednutí platformy slouží uchopovací tyče. Nastavení pod pilový pás umožňuje klička a závitová tyč, přičemž matice je součástí upínací desky. [29]

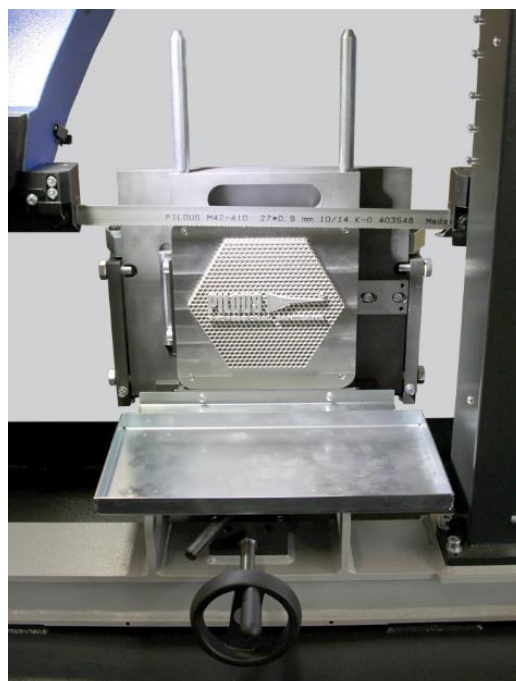
Stroje kladou důraz na minimální rozměry pro snadnější umístění do výrobní haly.

Jako příslušenství je možné přimontovat k pile box pro odsávání prášku (obr. 11 (c)).

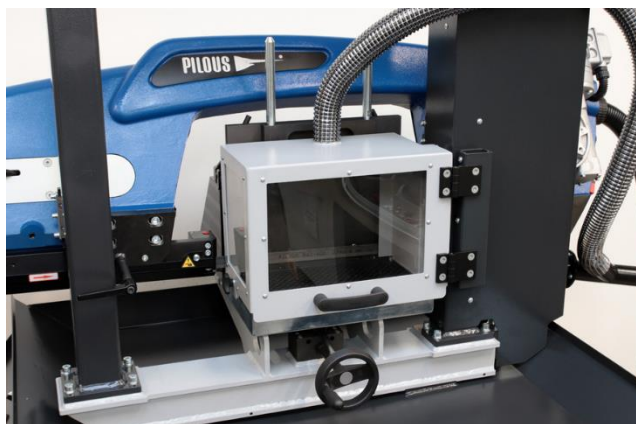
a)



b)



c)



Obr. 11 a) Xpert 3.0 3D, b) Náhled řešení, c) odsávací box [29]

- Řešení firmy Meba

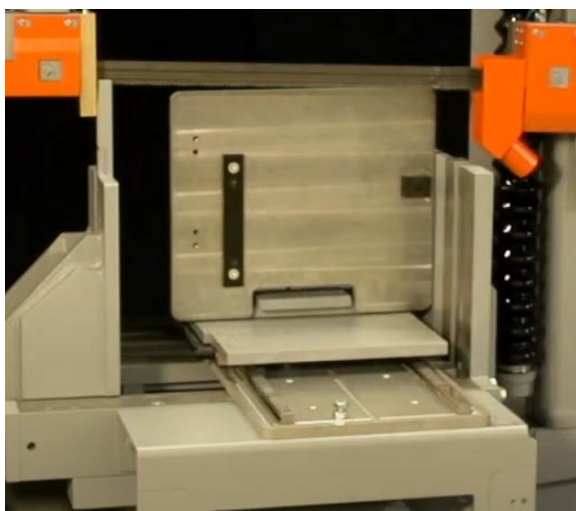
Meba sawing solutions vyvinula řešení pro odřezávání 3D tisku na konstrukci existujícího produktu MEBAeco. Na základě úprav vznikl produkt MEBAeco3D (obr. 12 (a)). Balíček řešení obsahuje přípravek na základní desce, která se montuje na pásovou pilu. Na základní desce jsou lineární vedení, díky kterým lze nastavit upnutou platformu s výtiskem pod pilový pás. Zajímavostí je upínání platformy ve svislé pozici bez možnosti sklopení. [30]

Stejně jako u řešení stroje Pilous je možné dokoupit box a vysavač na odsávání nebezpečného jemného prášku.

a)



b)



c)



Obr. 12 a) MEBAeco3D, b) Náhled řešení, c) odsávací box [30]

- Řešení firmy **Behringer**

Behringer nabízí širokou škálu produktů od stolních, vertikálních a kotoučových pil po klasické dvousloupové a kloubové. V nabídce má také dvě pásové pily na odřezávání 3D tisku. Horizontální HBE320-523 3D a vertikální LPS-T 3D (obr. 12 (a, b)).

Horizontální pila je dvousloupová a umožňuje oddělování platform o rozměrech 520x300mm. Oproti řešení firm Pilous a Meba využívají stroje při odřezávání řeznou emulzi a nebezpečný prášek vážou do této kapaliny. Speciální filtr (obr. 12 (c)) dokáže mikročástice zachytit a nezanese se čerpadlo emulze. [31]

Behringer nabízí individuální řešení držáku platformy podle požadavků zákazníka.

Zajímavým řešením je vertikální pila, která dokáže pracovat s platformami o rozměrech 1200x1200mm (obr. 12 (b)).

a)



b)



c)



Obr. 13 a) Behringer HBE320-523 3D, b) LPS-T 3D, c) řešení filtrace řezné emulze [31]

4 ANALÝZA PROBLÉMU

4.1 Analýza

Na trhu s kovovým 3D tiskem je mnoho technologií, které tisknou kovový materiál přímo na platformu. Výrobci stále přibývá a kovový 3D tisk nachází stále více uplatnění v různých odvětvích. 3D tisk je zdlouhavý proces, který probíhá v řádu hodin. Metody PBF a DED čelí nutnosti post-procesingu, který je nejčastěji započatý oddělením výtisku od tiskové plochy – platformy. To se děje nejčastěji na pásových pilách na kov, jejichž proces odříznutí se pohybuje v řádu desítek minut. Přesnost pásových pil na kov je ideální vlastností pro tuto aplikaci. Koncoví zákazníci, kteří pořídí 3D tiskárnu na kov za účelem prototypování, popř pro kusovou výrobu, obvykle disponují pásovou pilou a často si s upnutím a odříznutím výtisku operativně poradí. Při snaze ustavit výtisk přímo mezi svěráky dochází k velkému riziku úrazu, proto výrobci pásových pil začínají nabízet první řešení snadné a bezpečné manipulace s platformou a výtiskem.

Výrobci tiskáren tuto důležitou část postprocesingu výrazně nezmiňují, přitom oblast mezi deskou a 3D výtiskem, kde se tiskne přídavek na odřezání velice důležitá. Odvádí se tudy teplo z výtisku a občas se stává, že se vlivem různě tepelně ovlivněné plochy platforma prohne. Běžně dochází k průhybu v řádu 1-3 mm. Problém pokryje přídavek na obrábění. Tento problém může předejít konstruktér se zkušenostmi, který navrhne podpory výtisku pro rovnoměrné chladnutí. S průhybem si však dokážou pásové pily poradit, jejich přesnost je v řádu desetin mm u dvousloupových pil, u kloubových pil při menších rychlostech řezného posuvu také.

4.2 Stanovení základních vlastností produktu

Při stanovování základních vlastností produktu byly zohledněny faktory vycházející z průzkumu trhu a požadavků v zadání práce.

Požadavky na vlastnosti přípravku:

- Vytvořit příslušenství k pásové pile.
- Zákazník si může dokoupit příslušenství bez nutnosti úpravy pily.
- Univerzálnost použití – přípravek bude možné použít i na jiný stroj.
- Důraz na bezpečnost a snadnou manipulaci s přípravkem.
- Přípravek by měl sloužit jako prototyp s výhledem na zdokonalení, s tím je spojený požadavek co nejširšího použití pro nejrůznější metody PBF a DED k získání nových zkušeností.
- Přizpůsobit velikost přípravku pro nejvíce zastoupené velikosti tiskového prostoru – dle kapitoly 3.5 byl zvolen maximální rozměr pro upnutí platformy 325 mm.
- Konstrukční řešení neovlivní základní charakteristiky stroje.

4.3 Výběr pásové pily na kov

Pásovou pilu jsem volil na základě průzkumu trhu z portfolia firmy Pegas-Gonda.

Firma Pegas-Gonda byla založena v roce 1990. Od počátku se zaměřovala na výrobu pásových pil pro dělení hutních polotovarů. V dnešní nabídce jsou:

- Kloubové pásové pily – gravitační, poloautomatické a automatické.

Kloubové pásové pily se využívají pro dělení profilů a trubek o průměru 150-300 mm. Nabízí řezání pod úhlem (nejen 90° stupňů ve směru podávání materiálu) obvykle do 60° buď na jednu, nebo na obě strany.

Gravitační pásové pily mají ručně ovládaný rychloupínací svěrák. Řez prostřednictvím hmotnosti ramene je regulován hydraulickým tlumičem a škrťicím ventilem. Průběh řezu není ovlivněn lidským faktorem a vede k vyšší životnosti pásu.

Poloautomatické kloubové pily jsou vybavené řídicím systémem a kompletním hydraulickým ovládním. Rameno do řezu tlačí hydraulický válec s regulací tlaku i průtoku.

CNC řídicí systém automatické pily kontroluje pohyby ramene, svěráků i podavače materiálu. Všechny pohyby probíhají pomocí hydraulického agregátu. Délka i počet kusů je zadáván na ovládacím panelu. Pila umožňuje volbu mezi automatickým a poloautomatickým režimem. [16]

- Dvousloupové pásové pily – pro dělení profilů pod úhlem

Pily jsou určeny pro dělení materiálu v kolmých i úhlových řezech. Úhlové řezy jsou plynule nastavitelné od -60° do 60°.

Dvousloupové pásové pily jsou zastoupeny řadou Horizont. Pily Horizont jsou konstruovány pro dělení materiálu o průměru 440 mm až 540 mm. Tyto pily jsou nabízeny ve variantách SHI, X, A-CNC a X-CNC. Tato označení rozlišují, jestli jde o pilu poloautomatickou, nebo automatickou a liší se řídicím systémem Siemens (X, X-CNC) nebo Mitsubishi (SHI, A-CNC). Pily pro řezání pod úhlem doplňují stroje Katana SERVO a X-CNC-LR pro dělení materiálu do 340 mm.

Tyto stroje nalézají uplatnění v sériové výrobě v průmyslových provozech.

- Dvousloupové pásové pily – vysokoproduktivní

Pily jsou určeny pouze pro kolmé řezy. Jedná se o robustní stroje pro dělení plných materiálů. Stroje jsou zaměřené na vysoký výkon. Tomu pomáhají výkonné pohony s frekvenčním měničem, nebo servopohony. Pohyby jsou ovládané hydraulickým agregátem často je používán i kuličkový šroub se servopohonem.

Tuto skupinu zastupují řady Herkules, Caliber a Thor. Pily Herkules se vyrábí ve čtyřech velikostech pro dělení materiálu od 300x300 mm po 1200x1400 mm.

Pily Caliber jsou vyvíjené společně s Horizonty a jejich dělení je totožné. Jedná se o vysoce výkonné a přesné pásové pily. [16]

Vlajkovou lodí jsou THOR 4 a THOR 5 pro dělení materiálů do 450 mm respektive 550 mm. Pily jsou určeny pro dělení velmi tvrdých a houževnatých materiálů včetně nerezových a nástrojových ocelí, zejména plných průřezů. Díky nejmodernějším technologiím a robustní konstrukci jsou schopné dokonale eliminovat vibrace a hluk při řezání.

Pro splnění podmínek zadání a základních vlastností produktu byly vybrány dvě pásové pily ideální k aplikaci přípravku. Poloautomatická kloubová pásová pila 360x500 SHI-LR a poloautomatická dvousloupová pila 440 Caliber SHI.

Pila 360x500 SHI-LR (obr. 14 (a)) je určena pro dělení materiálu v kolmých i úhlových řezech, úhlové řezy plynule nastavitelné od 0 do +60 stupňů vpravo a od 0 do -60 stupňů vlevo. Změna úhlu nastane pomocí rychloupínací páky. Pila je určena k řezání ocelového materiálu. Další materiály, které je na pile možno řezat, jsou lehké kovy. Při řezání tvrdších materiálů je výhodnější použít pilu dvousloupovou. Rameno je uloženo v předepnutých kluzných pouzdech s teflonovou třecí plochou, výrobce klade důraz na vyváženost ramene tak, aby nositelka gravitační síly ramene procházela osou otáčení. Pohyb ramene je tak plně řízen silou hydraulického válce s funkcí RTR, stejně jako u pily Caliber. Pila je konstrukčně řešena tak, aby odpovídala extrémnímu namáhání ve výrobních podmínkách. [16]

440 Caliber (obr. 14 (b)) je vysoce produktivní poloautomatická dvousloupová pásová pila. Pila je určena pro dělení materiálu v kolmých řezech. Nalézá uplatnění v sériové výrobě v průmyslových provozech a vzhledem ke své robustní konstrukci umožňuje dělení široké škály jakostí materiálů včetně nerezových a nástrojových ocelí. Aplikace s přípravkem umožňuje dělení náročnějších, jakostnějších materiálů. Stroj zajišťuje přesnost řezu v tolerančním poli v řádu desetin mm. Regulace rezného posuvu je realizována škrťicím ventilem hydrauliky s funkcí RTR – Regulace Tlaku Řezu. Pila je konstrukčně řešena tak, aby plně podporovala efektivní využití karbidových pilových pásů. Pásová pila má robustní konstrukci umožňující extrémní namáhání ve výrobních podmínkách. Všechny komponenty stroje jsou konstruovány a optimalizovány s cílem minimalizace vibrací a umožnění maximálního rezného výkonu stroje. [16]

a)



b)

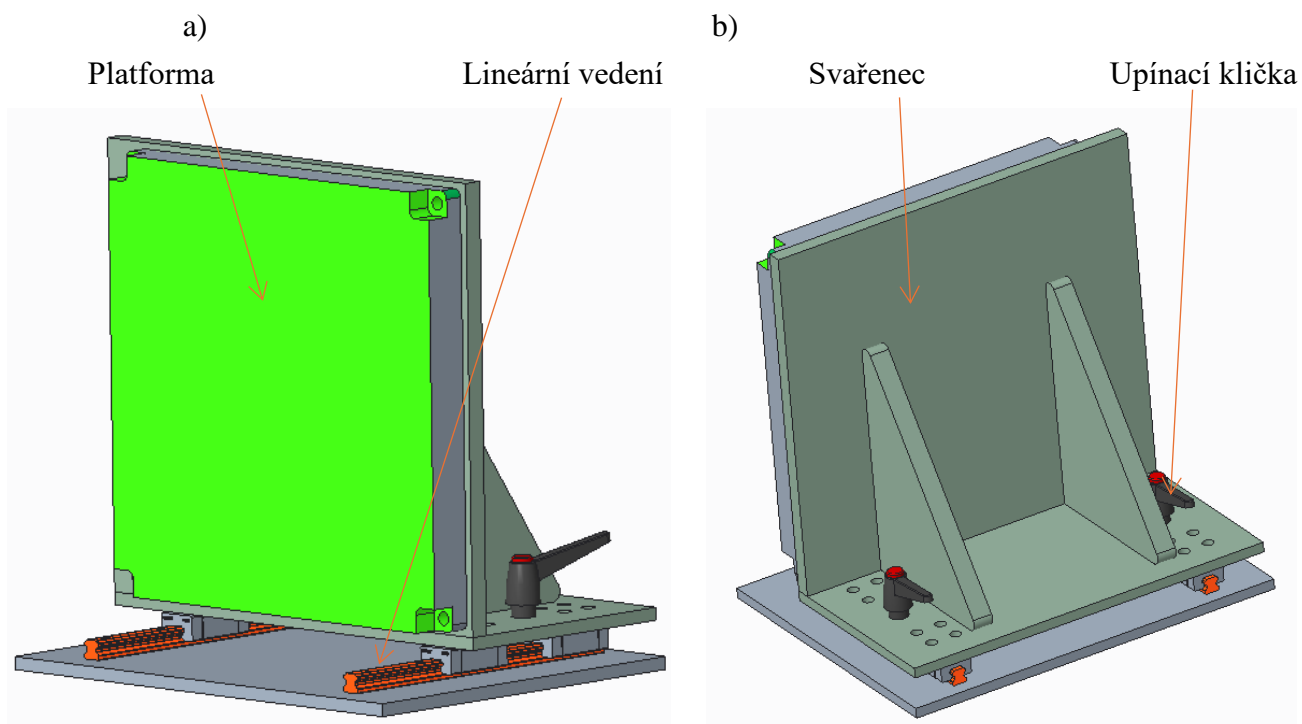


Obr. 14 a) 360x500 SHI-LR, b) 440 Caliber SHI [16]

5 NÁVRH VARIANT

5.1 Varianta 1

První variantu tvoří svařenec umístěný na lineárním vedení, které zajišťuje posuv pod pilový pás a nastavení pozice skrze různé tloušťky platformem (obr. 15 (a)). Lineární vedení se aretuje pomocí kličky a měděného kolíku (obr. 15 (b)), který by při stlačení zajistil statickou pozici. Platforma s výtiskem se montuje na svislou stěnu svařence pomocí stejných děr jako v 3D tiskárně. Přesná pozice pod pilovým pásem je naznačena díky laserline – běžném příslušenství pásových pil na kov.

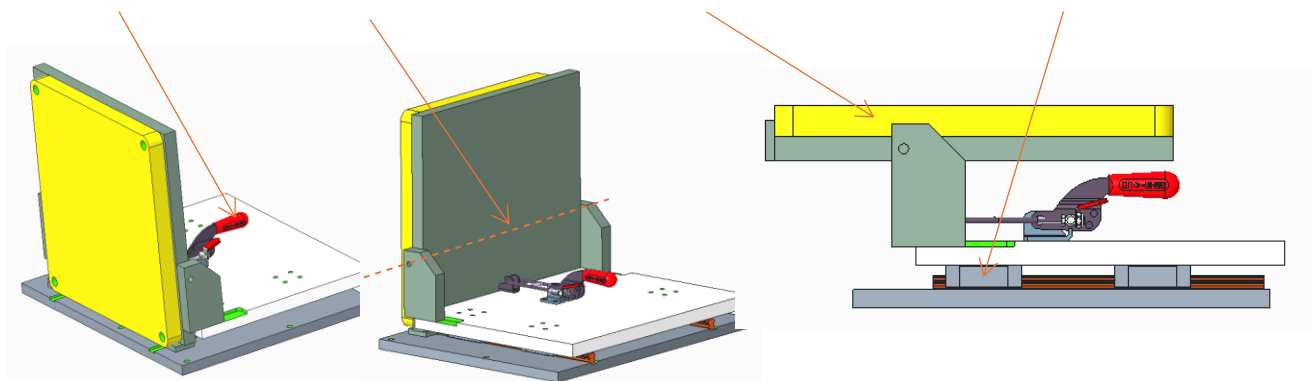


Obr. 15 a) Varianta 1 z přední strany, b) pohled ze zadní strany

5.2 Varianta 2

Druhá varianta umožňuje upínání platformy ve vodorovné pozici, následné sklopení do pozice svislé. Obsluha zajistí pozici upínací pákou používanou ve svařovnách (obr. 16 (a)). Na zajistitelných lineárních vedeních (stejný princip jako u varianty 1) dojde k nastavení platformy s výtiskem pod pilový pás. K upnutí platformy k desce slouží excentrické upínky užívané při fixaci obrobku.

Upínací páka Osa otáčení Platforma ve vodorovné pozici Vozík lineárního vedení



Obr. 16 Varianta č. 2

5.3 Varianta 3

Tato varianta je založena na sofistikovanějším řešení. Konstrukce využívá dvou hydraulických válců a hydraulického upínání platformy pomocí zero pointů. Jeden hydraulický válec zajišťuje posuv pod pilový pás – princip podobný jako u podavače běžného hutního materiálu. Druhý hydraulický válec pohybuje se sklápěcím mechanismem pro zafixování platformy ve svislé pozici. Poté obsluha odejde od přípravku a na ovládacím panelu pomocí tlačítek sklopí platformu a posune s podavačem pod pilový pás. Následuje proces odsátí prášku z prostoru řezu.

5.4 Výběr variant

Pro výběr varianty, která by splňovala požadavky v kapitole 4.2 byla použita multikriteriální analýza. Pro klíčová kritéria byly vytvořeny dvě matice parametrů. Ke každému parametru se přiřadila čísla 1 nebo 0. Číslo jedna znamená, že se dva parametry ovlivňují a nula, že se dané parametry neovlivňují. Součet ovlivňujících parametrů kritéria udává jeho váhu. V druhé matici výběru variant se každému kritériu k variantě přiřadily body od 1 do 5 (5 – nejlepší, 1 - nejhorší). Největšího součtu bodů pronásobených váhou kritéria získala varianta 2, které se bude věnovat konstrukční řešení.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9		Součet	Váha kritéria
K1	0	1	1	1	1	0	1	1	1		7	0,14
K2	1	0	1	1	0	0	1	1	1		6	0,12
K3	1	1	0	1	0	0	0	1	1		5	0,1
K4	1	1	1	0	1	0	1	1	1		7	0,14
K5	1	0	0	1	0	1	1	1	1		6	0,12
K6	0	0	0	0	1	0	0	1	0		2	0,04
K7	1	1	0	1	1	0	0	0	0		4	0,08
K8	1	1	1	1	1	1	0	0	1		7	0,14
K9	1	1	1	1	1	0	0	1	0		6	0,12
Suma										50	1	

Popis kritéria:	Váha	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
K1 - Náklady na výrobu	0,14	4	4	2
K2 - Snadná manipulace	0,12	2	4	5
K3 - Bezpečnost	0,1	1	3	5
K4 - Funkčnost, přesnost	0,14	2	3	5
K5 - Nutnost zásahu do konstrukce pásové pily	0,12	4	4	3
K6 - Škálovatelnost	0,04	3	4	3
K7 - Univerzálnost použití	0,08	4	4	2
K8 - Závislost na externím dodavateli komponent	0,14	4	3	2
K9 - Cenová dostupnost	0,12	5	4	3
Součet	1	3,26	3,62	3,36
Pořadí výběru variant		3	1	2

6 KONSTRUKCE VYBRANÉ VARIANTY

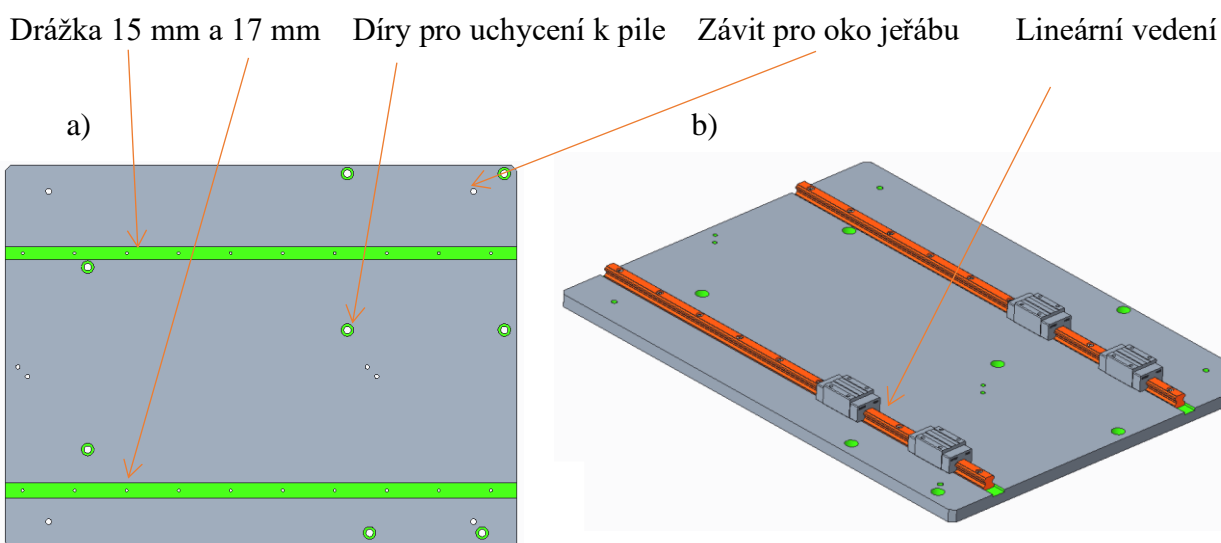
6.1 Popis hlavních komponent a konstrukčního řešení

Popis hlavních komponent je uveden ve smyslu postupu montáže manipulačního přípravku. Montáž sestavy probíhá mimo pilu, po složení je jeřábem dopravena do pracovní pozice.

1) Základní deska a lineární vedení

Tvoří základ celé sestavy. Je vypálena z plechu tloušťky 15 mm, je široká 440 mm a dlouhá 590 mm. V desce jsou obrobena dvě přesné drážky o hloubce 3 mm pro lineární vedení značky HIWIN (obr. 12 (b)). Drážky musí být rovnoběžné a každá jinak široká. To je z důvodu přesného seřízení lineárních vedení. Jedna drážka má šířku 15 mm s tolerancí 0, +0,2. Do této drážky se namontuje první lineární vedení a nasadí vozík lineárního vedení. Následuje montáž a seřízení druhého lineáru pomocí přesného mechanismu a budíku. Mechanismus je umístěný na vozíku a budík měří v setinách milimetru rovnoběžnost lineárních vedení v celé jeho délce.

V desce jsou obrobena také díry se zahlobenou hlavou pro šrouby M8, kterými je celá sestava připevněna k pile (obr. 12 (a)). Nechybí také čtyři závitové otvory M8 pro oka namontovaná v případě nutnosti transportovat přípravek do pily a z pily. Nechybí závity pro dorazové kostky.



Obr. 17 (a) Základní deska, (b) první bod montáže - deska s lineáry

2) Sestava s hlavní nosnou deskou upínacího mechanismu

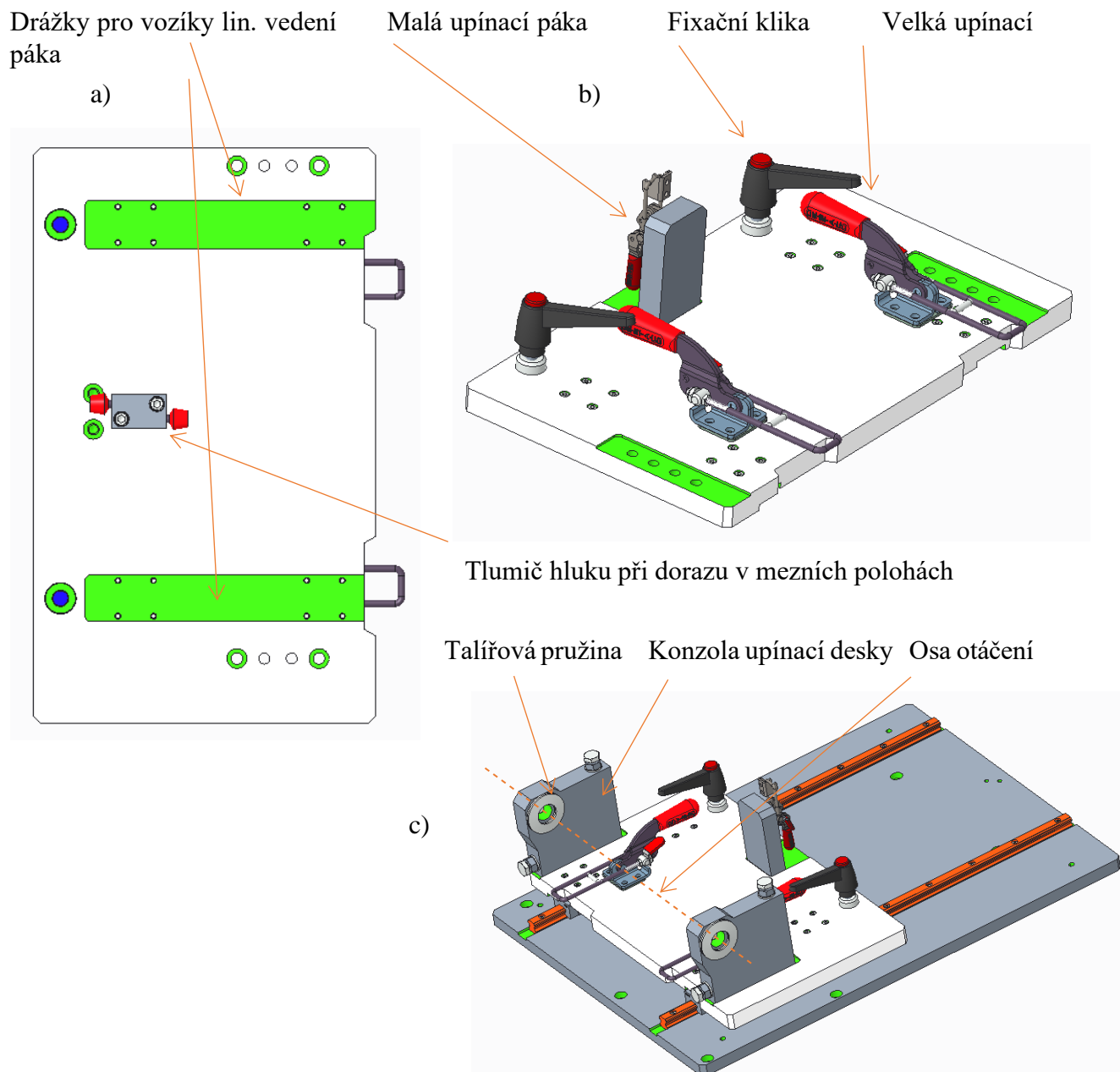
Nosná deska je z plechu o 20 mm vzhledem k výraznějšímu silovému zatížení. Ze spodního pohledu (obr. 12 (a)) jsou vidět opět dvě drážky pro vozíky lineárního vedení. V ose obou lineárů je obrobena otvor pro měděný a ocelový váleček. Z horní strany je závit pro kliku, která přenese tlak na válečky a dojde k zafixování desky.

Z horní strany desky jsou obrobena plochy pro dvě konzoly, které jsou zespodu také obrobena. Jsou montovány každá dvěma šrouby M8 a pozice je zajištěna přesnými kolíky s uložením H7/k7. To zajistí důležitou sousost děr na obou konzolách. Na konzolách jsou šrouby se šestihrannou hlavou a jisticí maticí pro nastavení dorazu

kolmé pozice hlavní upínací desky (obr. 12 (b)). Mezi konzolami a čepem upínací desky jsou dvě talířové pružiny pro eliminaci jemných vibrací v průběhu tisku.

V této fázi montáže se našroubují upínací páky DESTACO o síle upnutí 3200 N. Ty zajistí doraz a fixaci upínací desky s platformou v průběhu řezu. Menší upínací páka slouží k bezpečnému ustanovení vodorovné pozice, ve které se platforma s výtiskem upíná.

Po smontování komponent se deska namontuje na vozíky lineárního vedení (obr. 12 (c)).



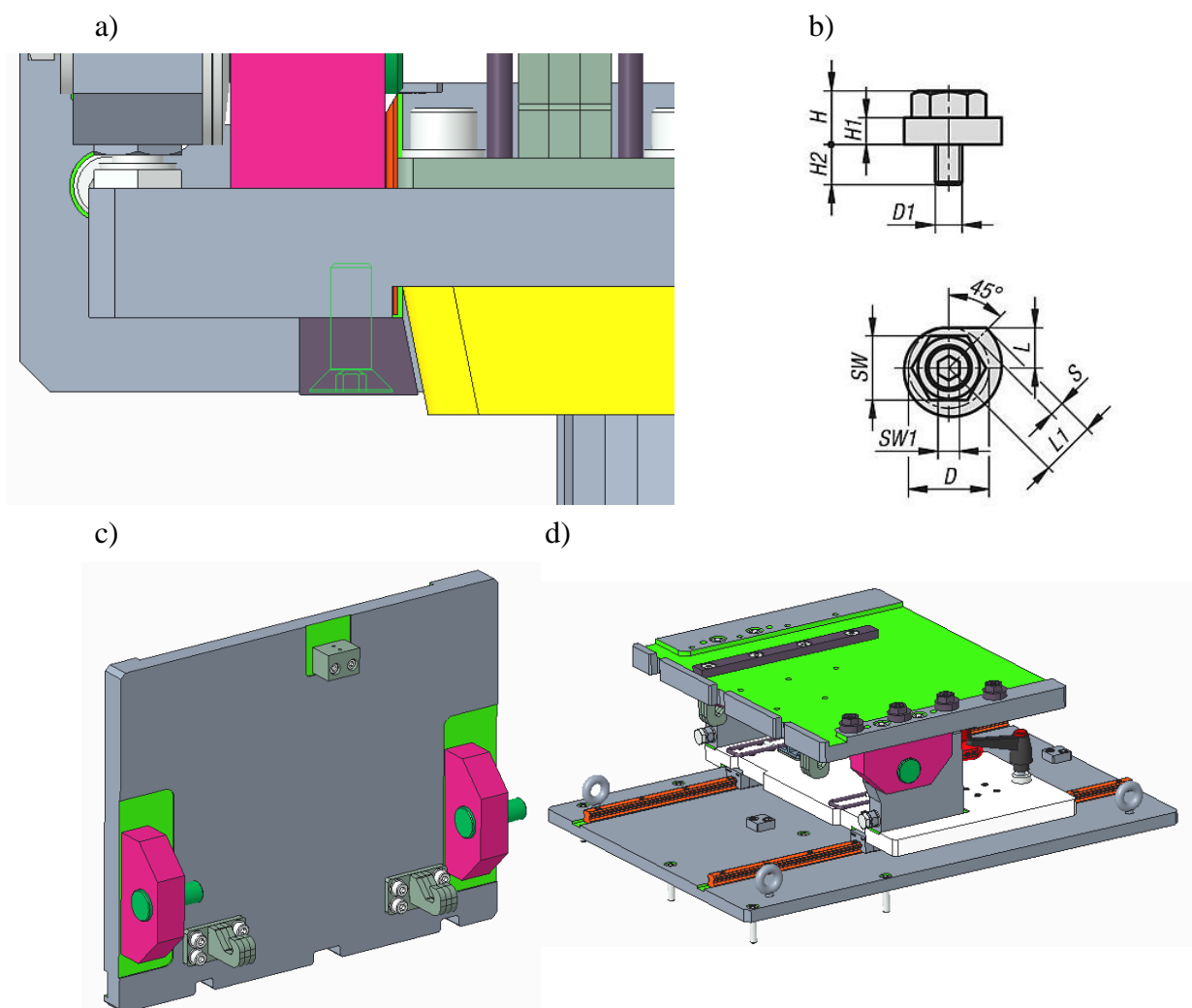
Obr. 18 (a) Spodní pohled na nosnou desku, (b) sestava, (c) druhý bod montáže

3) Sestava upínací desky

Upínací deska je vypálena z plechu tloušťky 25 mm. Rovina pro upínání platformy se obrábí na hloubku 6 mm pro vytvoření spodního dorazu. Z čelní strany se montuje 15 mm vysoká lišta se čtyřmi otvory se zahlabenou hlavou. Lišta slouží jako doraz při upínání platformy. Důležitým prvkem je zkosení lišty a platformy viz (obr. 19 (a)). Díky zkosení nedojde k vytržení platformy z přípravku v průběhu řezu. K vyvození upínací síly dojde díky kovanému excentrickému dílu s šestihranem pro dotažení vyráběného společností KIPP. Zdvih excentru jsou 4 mm a maximální síla upnutí je 5200 N (obr. 19 (b)).

Na zadní straně jsou konzoly upevněné pomocí šroubů M12 a středících kolíků pro dosažení maximální souososti čepů. Čepy (zelené) jsou uloženy v konzolách. Uložení je smykové se zaručenou malou vůlí H8/h9. Uložení se používá k zajištění polohy a středění součástí. Na (obr. 19 (c)) můžeme vidět taky sestavu háku svařených metodou TIG a kostku pro háček menší upínací páky.

Třetí bod montáže přípravku je na (obr. 19 (c)), kdy dojde k zasunutí čepů do konzol.

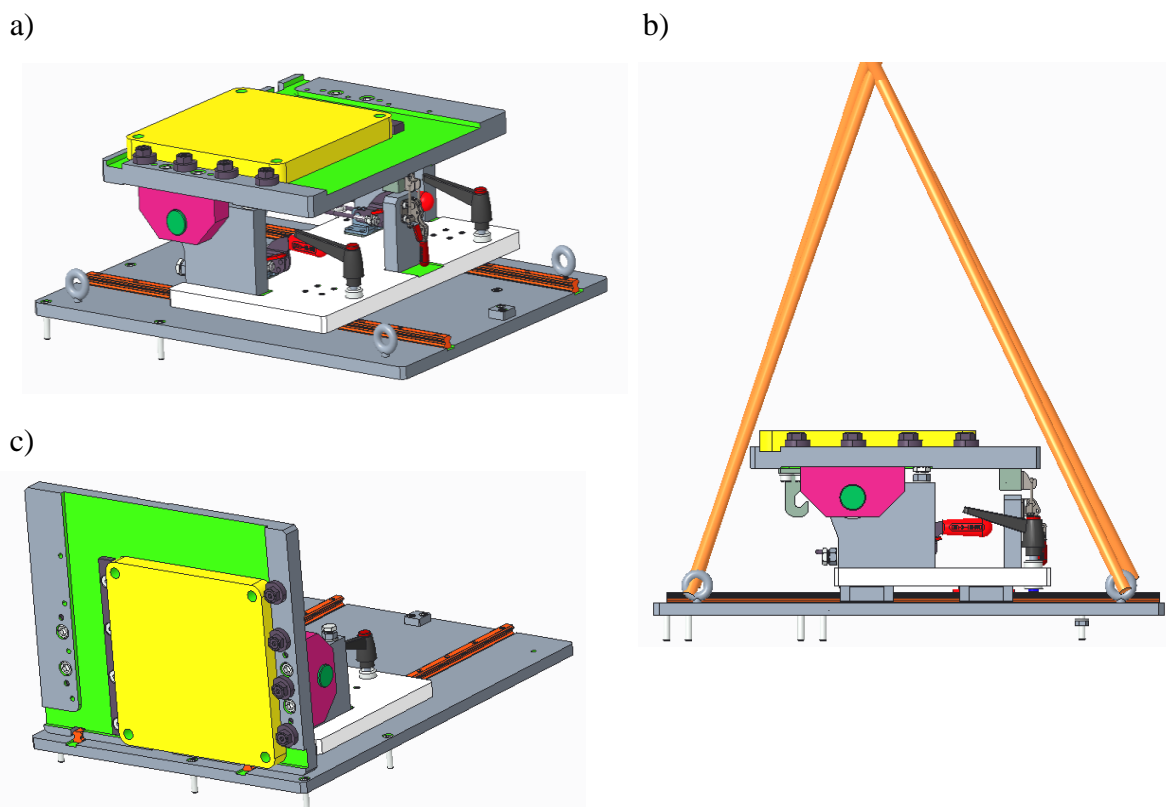


Obr. 19 (a) Zkosení platformy a lišty, (b) obrázek upínacího excentru, (c) upínací deska zezadu, (d) třetí bod montáže

4) Upnutí desky s výtiskem a manipulace s přípravkem

Upínání platformy s výtiskem probíhá vždy ve vodorovné pozici viz (obr. 20 (a)). Upínací moment pro dosažení maximální upínací síly je 50 Nm. V momentě upnutí desky a namontování závěsných ok pro jeřáb, může být sestava přemístěna do prostoru svěráků pásové pily. Při přepravě je nutné zajistit pohyb sestavy nad lineárním vedením dotažením kličky. Až při dotažení šroubů (v případě montáže na 360x500 SHI-LR), nebo uložení přípravku v prostoru svěráku (v případě aplikace na jiné pásové pile s šířkou upnutí min. 440 mm, např CALIBER 440), je možné oddělat háky lan a odmontovat závěsná oka.

Po upnutí spodní desky ve svěráku můžeme povolit kličku a sklopit upínací desku s upnutou platformou. Změříme kolmost platformy s výtiskem. Zafixujeme kolmou pozici upínkami DESTACO a posuneme do pracovní polohy definované laserovou linií přesně pod pilový pás (obr. 20 (a)). Pozici opět zafixujeme kličkou upínající lineární vedení.



Obr. 20 (a) Upnutí desky v transportní pozici, (b) zavěšení při transportu na pásovou pilu, (c) Nastavení pracovní pozice

6.2 Nezbytné výpočty

Výpočet byl proveden v aplikaci přípravku na pile 440 Caliber z důvodu většího zatížení přípravku.

Vstupní parametry

Průměr kladky: $D_{kl} = 0,5 \text{ m}$

Výkon motoru: $P_m = 4 \text{ kW}$

Otáčky motoru: $n_m = 1460 \text{ min}^{-1}$

Krouticí moment motoru: $M_{km} = 26,2 \text{ N} \cdot \text{m}$

Převodový poměr převodovky: $i_p = 29,2$

Maximální krouticí moment převodovky: $M_{kpmax} = 663 \text{ N} \cdot \text{m}$

Účinnost převodovky: $\eta_p = 0,86$

Účinnost systému: $\eta_{sys} = 0,7 - 0,8$

Hydraulická centrála

Systémový (maximální) tlak: $p = 50 \text{ bar} = 5 \text{ MPa}$

Vnitřní průměr trubky hydraulického válce: $D_v = 70 \text{ mm}$

Průměr pístní tyče hydraulického válce: $D_p = 36 \text{ mm}$

Výpočet výstupních parametrů převodovky

Otáčky na výstupu převodovky:

$$n_p = \frac{n_m}{i_p} = \frac{1460}{29,2} = 50 \text{ min}^{-1} \quad (1)$$

Krouticí moment na výstupu převodovky (obr. 21(a)):

$$M_{kp} = M_{km} \cdot i_p \cdot \eta_p \cdot \eta_{sys} = 26,2 \cdot 29,2 \cdot 0,86 \cdot 0,8 = 526,3 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (2)$$

Výpočet řezných podmínek

$$\text{Řezná síla: } F_c = \frac{M_{kp}}{\frac{D_{kl}}{2}} = \frac{526,3}{\frac{0,5}{2}} = 2105,2 \text{ N} \quad (4)$$

Síla ramene do řezu (zvolena*), (obr. 21(b)): $F_h = 500 \text{ N}$

$$\text{Plocha vnitřního průřezu válce: } S_v = \frac{D_v^2 \cdot \pi}{4} = \frac{0,07^2 \cdot \pi}{4} = 0,0038 \text{ m}^2 \quad (5)$$

$$\text{Plocha pístní tyče válce: } S_p = \frac{D_p^2 \cdot \pi}{4} = \frac{0,036^2 \cdot \pi}{4} = 0,00102 \text{ m}^2 \quad (6)$$

$$\text{Plocha mezikruží: } S = S_v - S_p = 0,0038 - 0,00102 = 0,00278 \text{ m}^2 \quad (7)$$

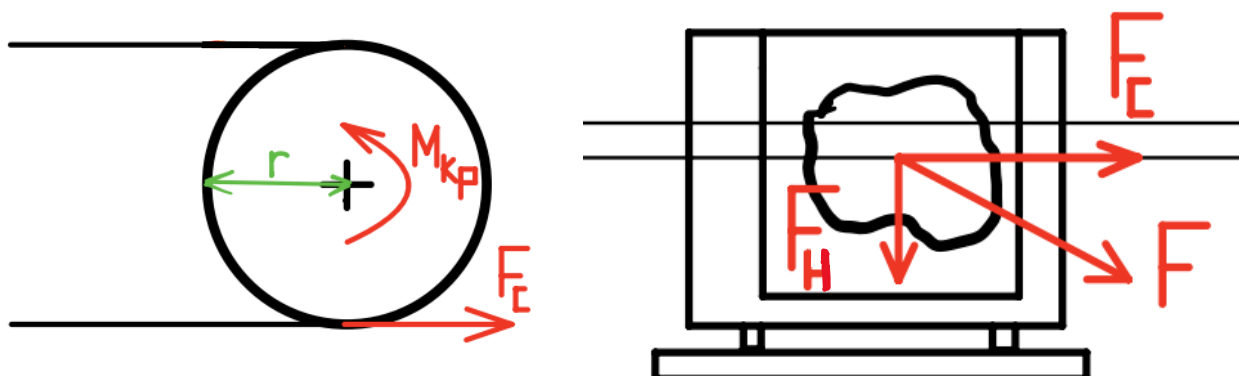
Maximální síla hydraulického válce pásové pily:

$$F_{hmax} = p \cdot S = 5000000 \cdot 0,00278 = 13900 \text{ N} \quad (8)$$

Síla hydraulického válce zvedá celé rameno pásové pily, které váží 605 kg. Síla vyvinutá hydraulickým válcem ovlivňuje sílu řezného posuvu pásové pily v průběhu řezu.

(*hydraulická centrála vyvíjí maximální – systémový tlak 5MPa, tento tlak působí na hydraulický válec ramene. Funkce RTR – Regulace Tlaku Řezu, omezuje tlak působící na h. v. a zároveň eliminuje hmotnost ramene. Funkce RTR pracuje v silovém rozsahu 0-1000 N. Touto silou pouští rameno do řezu.)

$$\text{Výsledná síla v řezu: } F = \sqrt{F_c^2 + F_h^2} = \sqrt{2105,2^2 + 500^2} = 2163,8 \text{ N} \quad (9)$$



Obr. 21 (a) Nákres hnací kladky stroje, (b) rozklad výsledné síly v řezu

Výpočet sil působících na sestavu nesenou lineárním vedením

Gravitační zrychlení: $g = 10 \frac{m}{s^2}$

Gravitační síla sestavy nad lineárním vedením:

$$F_g = m \cdot g = 107,6 \cdot 10 = 1076 \text{ N} \quad (10)$$

Výsledná síla působící na sestavu v ose Z:

$$F_f = F_h + F_g = 500 + 1076 = 1576 \text{ N} \quad (11)$$

Těžiště sestavy, kde působí gravitační síla F_g a působiště síly F_f leží na společné ose.

Síly na průřezu rovin lineárních vedení a působiště O výsledné síly působící na sestavu

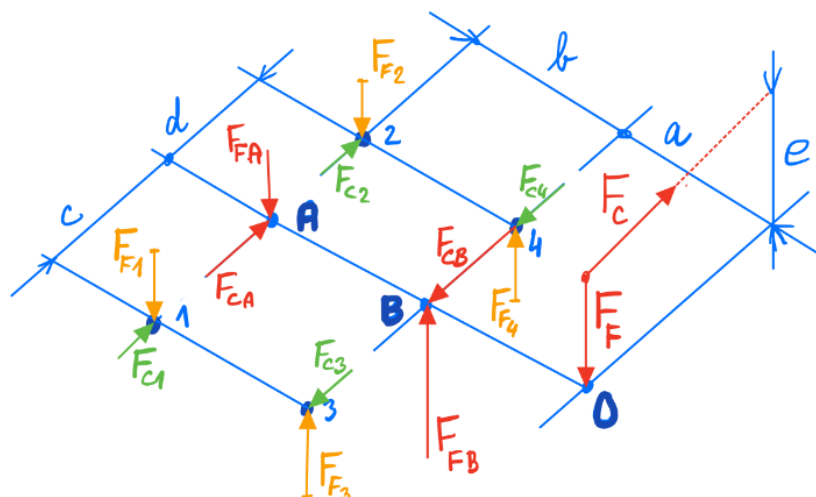
Vzhledem k tuhosti sestavy, která upíná platformu nad vozíky lineárního vedení, považují tuto sestavu jako těleso zatížené v ose Z silou F_f a silou F_c na rameni 325 až 0 mm.

V průběhu řezu, kdy je soustava nejvíce zatěžovaná, odpovídají síly na vozíky reakcím ve vazbách. Tyto reakce jsou spočteny na základě momentové rovnováhy zatíženého tělesa.

Pro zajištění funkčnosti sestavy, bude sestava nejvíce zatížena v ose vozíků 3 a 4. Méně zatížené budou vozíky 1 a 2. Síly jsou znázorněny na (obr. 22)

Vzdálenosti mezi vozíky a působištěm výsledné síly:

$$a = 92,3 \text{ mm}, b = 138 \text{ mm}, c = 165 \text{ mm}, d = 108 \text{ mm}, e_{max} = 325 \text{ mm}$$



Obr. 22 Zjednodušený náčrt sil zatěžujících vozíky lineárního vedení

Výpočet v ose Z – rozklad síly F_f :

Momentová rovnováha k bodu A:

$$M_A = 0: M_B - M_O = F_{fB} \cdot b - F_f \cdot (a + b) = 0 \quad (12)$$

$$F_{fB} = \frac{F_f \cdot (a+b)}{b} = \frac{1576 \cdot (0,0923+0,138)}{0,138} = 2630 \text{ N} \quad (13)$$

Momentová rovnováha k bodu B:

$$M_B = 0: M_A - M_O = F_{fA} \cdot b - F_f \cdot a = 0 \quad (14)$$

$$F_{fA} = \frac{F_f \cdot a}{b} = \frac{1576 \cdot 0,0923}{0,138} = 1054 \text{ N} \quad (15)$$

Kontrola silové rovnováhy:

$$F_{fA} - F_{fB} + F_f = 0 \quad (16)$$

$$1054 - 2630 + 1576 = 0 \quad (17)$$

Rozklad síly F_{fA} do sil působících na vozíky 1 a 2:

$$M_1 = 0: M_A - M_2 = F_{fA} \cdot c - F_{f2} \cdot (c + d) = 0 \quad (18)$$

$$F_{f2} = \frac{F_{fA} \cdot c}{(c+d)} = \frac{1054 \cdot 0,165}{0,165+0,108} = 637 \text{ N} \quad (19)$$

$$M_{fA} = 0: M_1 - M_2 = F_{f1} \cdot c - F_{f2} \cdot d = 0 \quad (20)$$

$$F_{f1} = \frac{F_{f2} \cdot d}{c} = \frac{637 \cdot 0,108}{0,165} = 417 \text{ N} \quad (21)$$

Rozklad síly F_{fB} do sil působících na vozíky 3 a 4:

$$M_3 = 0: M_B - M_4 = F_{fB} \cdot c - F_{f4} \cdot (c + d) = 0 \quad (21)$$

$$F_{f4} = \frac{F_{fB} \cdot c}{(c+d)} = \frac{2630 \cdot 0,165}{0,165+0,108} = 1589 \text{ N} \quad (22)$$

$$M_{fB} = 0: M_3 - M_4 = F_{f3} \cdot c - F_{f4} \cdot d = 0 \quad (23)$$

$$F_{f3} = \frac{F_{f4} \cdot d}{c} = \frac{1589 \cdot 0,108}{0,165} = 1040 \text{ N} \quad (24)$$

Výpočet v ose Y – rozklad síly F_c :

Momentová rovnováha k bodu A:

$$M_A = 0: M_B - M_O = F_{cB} \cdot b - F_c \cdot (a + b) = 0 \quad (25)$$

$$F_{cB} = \frac{F_c \cdot (a+b)}{b} = \frac{2105,2 \cdot (0,0923+0,138)}{0,138} = 3513,2 \text{ N} \quad (26)$$

Momentová rovnováha k bodu B:

$$M_B = 0: M_A - M_O = F_{cA} \cdot b - F_c \cdot a = 0 \quad (27)$$

$$F_{cA} = \frac{F_c \cdot a}{b} = \frac{2105,2 \cdot 0,0923}{0,138} = 1408 \text{ N} \quad (28)$$

Kontrola silové rovnováhy:

$$F_{cA} - F_{cB} + F_f = 0 \quad (29)$$

$$1408 - 3513,2 + 2105,2 = 0 \quad (30)$$

Rozklad síly F_{cA} do sil působících na vozíky 1 a 2:

$$F_{c1} = F_{c2} = \frac{F_{cA}}{2} = \frac{1408}{2} = 704 \text{ N} \quad (31)$$

Rozklad síly F_{cB} do sil působících na vozíky 3 a 4:

$$F_{c3} = F_{c4} = \frac{F_{cB}}{2} = \frac{3513,2}{2} = 1756,6 \text{ N} \quad (32)$$

Výpočet všech momentů na vozíky vlivem řezné síly F_c a síly F_f kvůli malé velikosti sil a velké tuhosti celé sestavy zanedbám (obr.23 (a),(b)). Moment od síly F_c se projeví v silových účincích na vozíky. Rameno tohoto působení bude $c + d$.

Moment od síly F_c :

$$M_{F_c} = F_c \cdot e = 2105,2 \cdot 0,325 = 684,2 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (33)$$

Síla od momentu na vozíky (1 a 3 budou zatíženy tahem a vozíky 2 a 4 tlakem):

$$F_{M1} = F_{M2} = F_{M3} = F_{M4} = \frac{M_{F_c}}{c+d} = \frac{684,2}{\frac{0,165+0,108}{2}} = \frac{2506}{2} = 1253 \text{ N} \quad (34)$$

Výsledná síla nejvíce zatíženého vozíku:

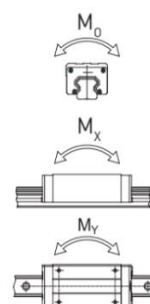
$$F_4 = \sqrt{F_{c4}^2 + (F_{M4} + F_{f4})^2} = \sqrt{1756,6^2 + (1253 + 1589)^2} = 3341 \text{ N} \quad (35)$$

Dle tabulky výrobce lineárních vedení HIWIN je patrné, že žádná ze sil nepřesahuje maximální statické zatížení vozíku 25310 N.

a)

Modell	Schrauben für Schiene [mm]	dynamische Tragzahl C_{dyn} [N]	statische Tragzahl C_0 [N]	statisches Moment			Gewicht	
				M_0 [Nm]	M_x [Nm]	M_y [Nm]	Wagen [kg]	Schiene [kg/m]
HGH15CA	M4x16	11380	25310	17750	37840	380	270	270

b)



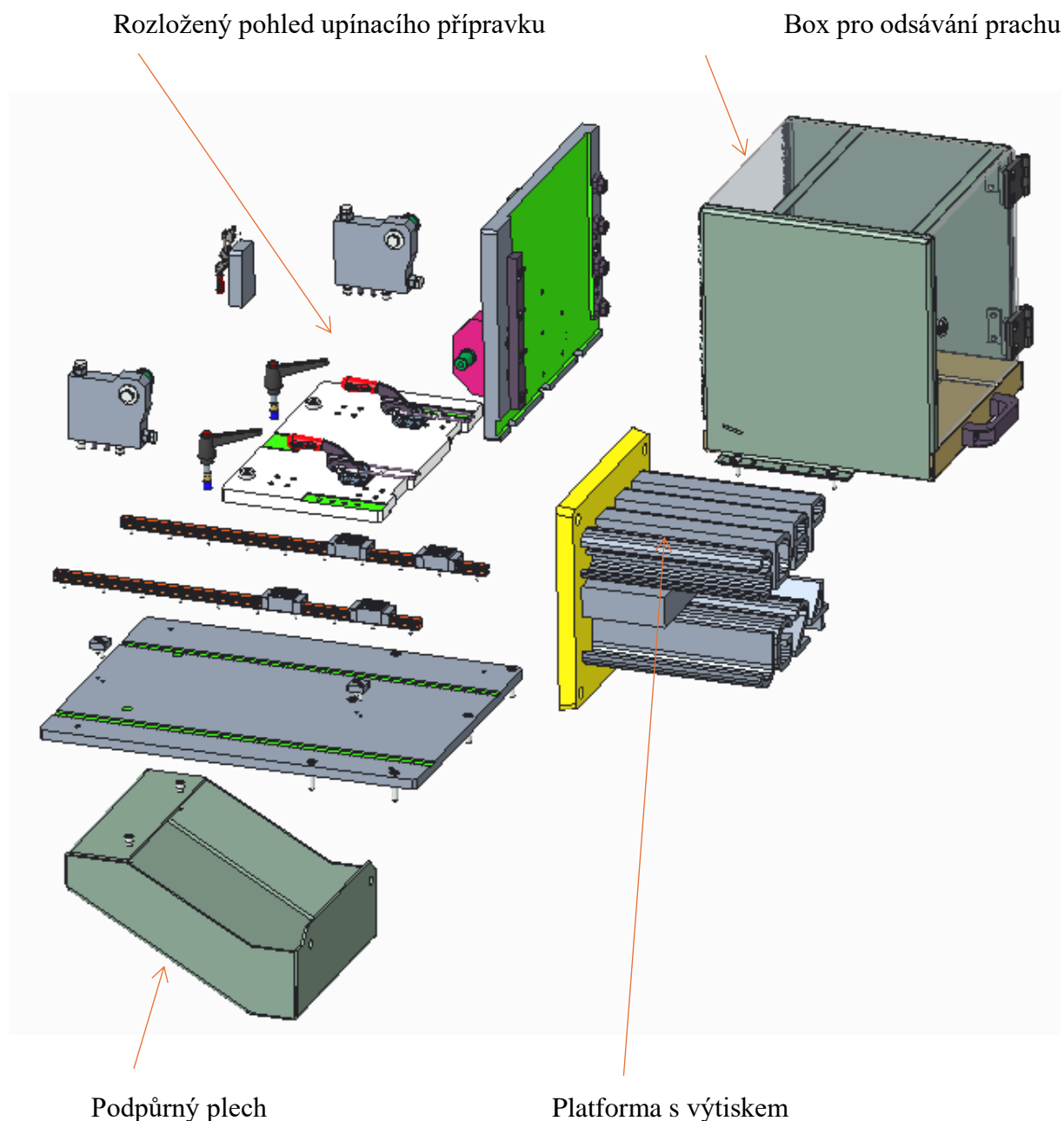
Obr. 23 (a) Tabulka použitého lineárního vedení, b) znázornění působících momentů

6.3 3D model

Na (obr. 24) je pohled na rozložený pohled sestavy přípravku. V popisu konstrukce nebyl popsán box. Tento box slouží jako krytování při odřezávání výtisků vyrobených některou z práškových metod. Odřezávání probíhá bez chlazení a vzniká jemný prach, který je potřeba odsát. Box obsahuje trubku viz (obr. 25 (b)) pro připojení vysavače prachu vzniklého při oddělování výtisku. V případě dělení výtisků metod DED musí dojít k chlazení a box není nutný.

Další příslušenství na obrázku je podpurný plech, který se montuje při aplikaci na pásovou pilu 360x500 SHI-LR.

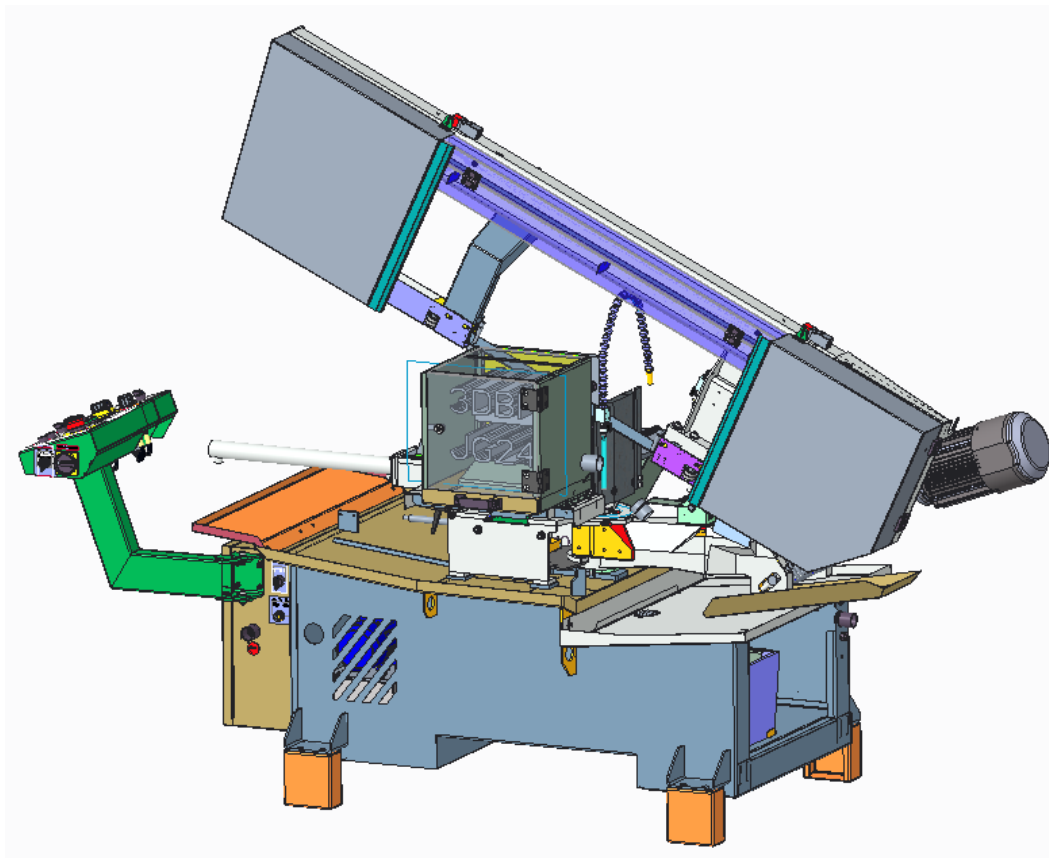
Sestava byla vytvořena v programu Creo Parametric 10 od AV Engineering.



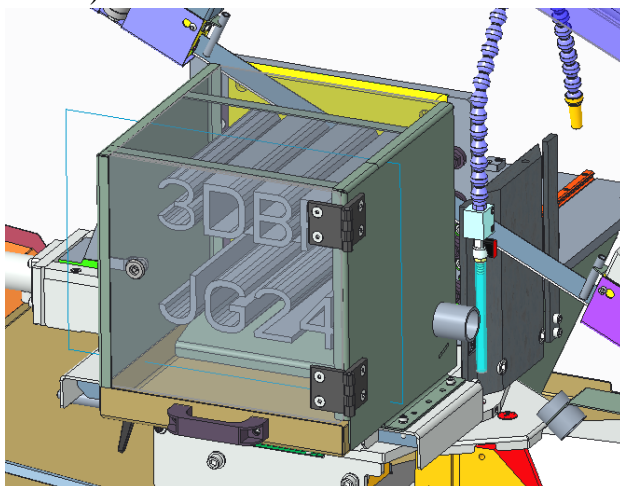
Obr. 24 (a) Rozložený pohled sestavy přípravku

6.4 Aplikace na pásové pile 360x500 SHI-LR

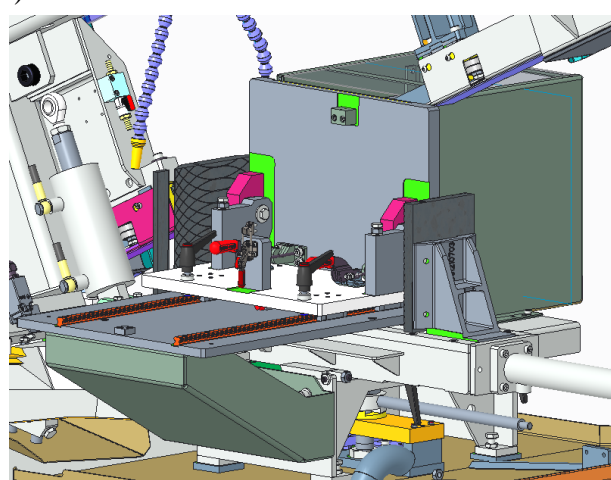
a)



b)



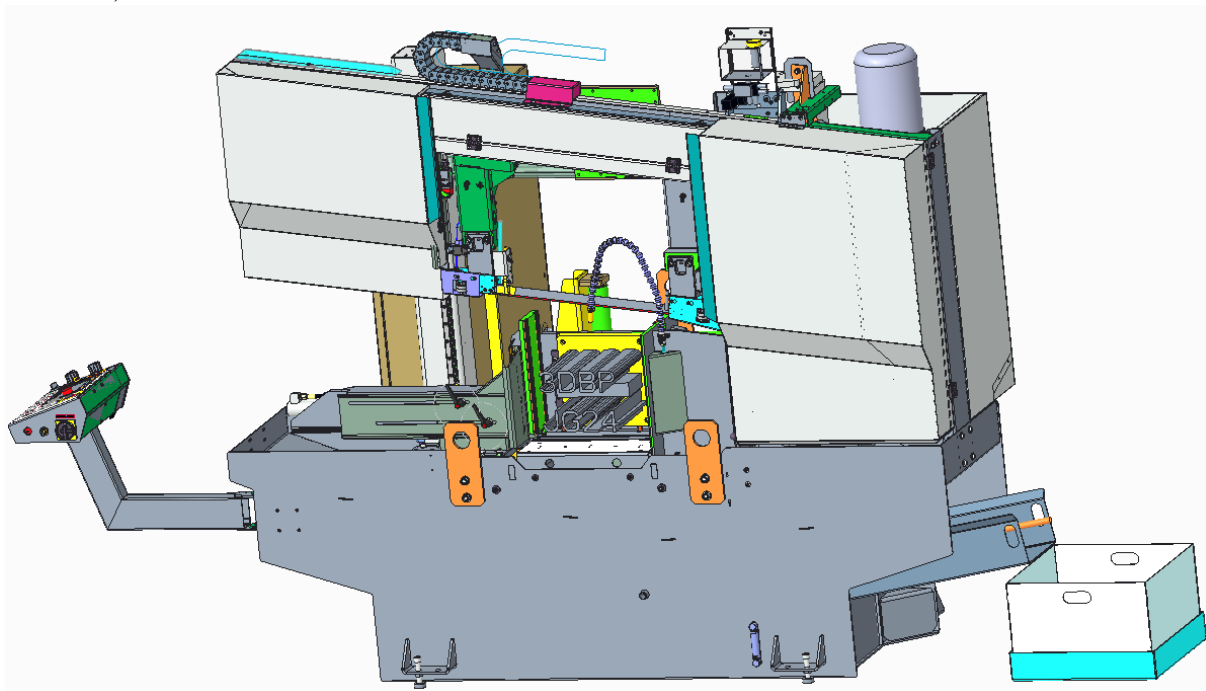
c)



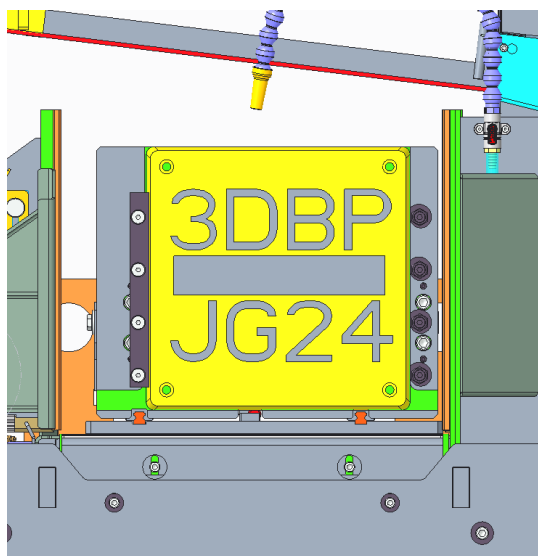
Obr. 25 (a) 360x500 SHI-LR s přípravkem, (b) detailní pohled zepředu, (c) detailní pohled ze zadní strany

6.5 Aplikace na pásové pile CALIBER 440

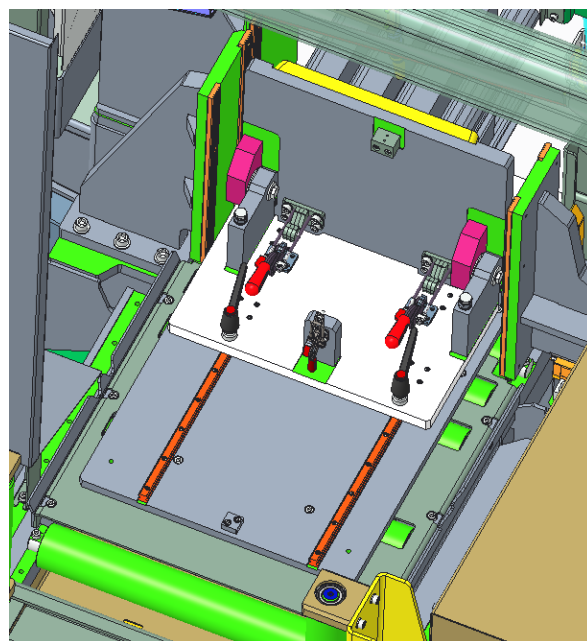
a)



b)



c)



Obr. 26 (a) 440 Caliber SHI s přípravkem, (b) detailní pohled zepředu, (c) detailní pohled ze zadní strany

7 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

V rámci bakalářské práce byl vytvořen model přípravku pro odřezání 3D výtisku od platformy na pásové pile na kov. Jednoduchost a přesnost konstrukčního řešení upínacího mechanismu umožní snadnou manipulaci obsluze mezi 3D tiskárnou a pásovou pilou na kov. Při konstrukci byl kladen důraz na splnění požadavků výrobce pásových pil a dodržení zadání práce.

Díky rozměrům a vlastnostem přípravku je možná aplikace na více pásových pilách bez nutnosti konstrukčních změn pásové pily. Přípravek je tedy použitelný na každé pásové pile s upnutím svěráku větším než 440 mm. Ideální pilou pro odřezávání je kloubová pila 360x500 SHI-LR. Pro náročnější, tvrdší materiály a dražší výtisky je doporučována aplikace na robustnější pásové pile 440 Caliber SHI. Tímto byl splněn cíl vytvořit univerzální přípravek.

Vzhledem k průzkumu trhu s 3D tiskárnami na kovové materiály byl přípravek uzpůsoben k řezání výtisků s šířkou platform 100, 200, 250 a 325 mm. Velikostí tiskových platform je v rozsahu 100-325 mm. Před zahájením výroby bude se zákazníkem konzultováno, pro jaké rozměry platform na 3D tiskárnách tisknou. S ohledem na širokou škálu materiálů, které je možné tisknout, bude i typ pilového pásu doporučován podle materiálů, se kterými zákazník pracuje.

Výpočty řešení potvrdily vhodnost výběru lineárních vedení a stanovily síly působící v řezu – tedy i na sestavu přípravku. Na základě výpočtů může dojít ke zvětšení rozměrů stávajícího řešení a použití při odřezávání rozměrnějších výtisků.

Vzhledem k neustálému vývoji trhu s kovovým 3D tiskem a celosvětovému důrazu na automatizaci výrobních procesů se dá předpokládat následující vývoj konstrukčního řešení přípravku. Nejvíce zajímavé řešení do budoucna spočívá v použití hydraulických zeropointů pro upínání platformy a konstrukci naklápěcích vodítek pro řezání ve vodorovné pozici. Systém by spočíval v podání platformy s výtiskem robotickým ramenem. Díky použití robota mezi 3D tiskárnou a pásovou pilou by bylo zaručeno přesné uložení na pozici, kde by došlo k upnutí. Po upnutí by se díky servopohonu platforma otočila o 180° a došlo by k posuvu k pilovému pásu a samotnému řezu. Výhodou takového řešení by byla automatizace části post-procesingu a výrazně větší bezpečnost a rychlost procesu. Tato myšlenka nabízí velice zajímavé řešení spolupráce mezi pásovou pilou a 3D tiskárnou (popř. soustavou 3D tiskáren).

Největší potenciál je v metodách BJ, MJ, ME a EBM, které tisknou bez nutnosti dalšího dělení. Tato výhoda extrémně zrychluje celý výrobní proces a způsobuje růst trhu těchto modernějších technologií. Na základě konverze s prodejci 3D tiskáren se nedá předpokládat snížení poptávky po klasických metodách PBF a DED.

8 ZÁVĚR

Zadání bakalářské práce vzešlo z nápadu reagovat na rozvíjející se trh s kovovým 3D tiskem. Důležitým cílem bylo zpracovat rešerši a průzkum trhu pro přehlednou orientaci v metodách kovového 3D tisku. Na základě rešerše a shrnutí řešení výrobců pásových pil byl vytvořen návrh příslušenství pásové pily, které rozšiřuje funkcionalitu o možnost oddělování výtisku od platformy. Spolu s 3D modelem byly vytvořeny výkresy vybraných uzlů řešení.

Na základě průzkumu trhu je vidět, že největší zastoupení MAM tvoří metody PBF a DED (70% trhu s kovovým 3D tiskem). V rámci průzkumu byla zpracována tabulka shrnující výrobce, metody MAM, 3D tiskárny a jejich velikosti tiskových prostor. Následuje návrh variant řešení a výběr ideální varianty díky multikriteriální analýze.

Důležitým faktorem je univerzálnost použití na více pásových pilách. Šířka spodní, základní desky činí 440 mm. Výška přípravku je 354 mm. Přípravek se tedy nejvíc hodí pro pásové pily 360x500 SHI-LR a 440 Caliber SHI. Je však použitelný na jakoukoli pilu s šířkou upnutí materiálu více než 440 mm. Pro využitelnost přípravku na upínání různě velkých výtisků byl zvolený maximální rozměr upnutí 325x325 mm. Přípravek tedy upne libovolný rozměr platformy v rozsahu 100x100 – 325x325, výška výtisku může dosahovat 350 mm.

Požadavky na řešení zahrnovaly univerzálnost použití, bezpečnost, jednoduchou manipulaci, škálovatelnost, funkčnost, přesnost a cenovou dostupnost. Splnění těchto požadavků a detailní popis řešení je shrnuté v kapitole 6. – popis konstrukčního řešení vybrané varianty.

Vzhledem k rychlému vývoji nových metod MAM a zvyšujícím se požadavkům na výrobní časy a kvalitu dílů, bude kovový 3D tisk významným prvkem strojírenství v následujících letech. Věřím, že většina výrobních firem půjde s dobou a 3D tiskáren bude stále přibývat. Proto vidím potenciál pro vylepšování řešení upínacího mechanismu a větší automatizaci procesu mezi 3D tiskárnou a pásovou pilou. Je to také důvod mého výběru ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky, kde bych rád na tuto problematiku navázal.

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SUDARSAMAN, Babu a BRADLEY, Jared. *Science, Technology and Applications of Metals in Additive Manufacturing*. Online. Google Books. 2022. Dostupné z : https://books.google.com/books/about/Science_Technology_and_Applications_of_M.html?hl=cs&id=4YmpDwAAQBAJ. [cit. 2024-05-15].
- [2] DOMMATI, Hitesh, Saikat Sinha RAY, Jia-Chang WANG a Shiao-Shing CHEN. A comprehensive review of recent developments in 3D printing technique for ceramic membrane fabrication for water purification. *RSC Advances* [online]. 2019, 2019-05-29, 9(29), 16869-16883 [cit. 2024-04-29]. ISSN 2046-2069. Dostupné z: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/ra/c9ra00872a>
- [3] NOORANI, Rafiq. *3D printing: technology, applications, and selection* [online]. Boca Raton, [2018] [cit. 2024-04-29]. ISBN 978-131-5155-494. Dostupné z: <https://doi-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.1201/9781315155494>
- [4] CAVALLO, Christian. Vše o selektivním tepelném slinování 3D tisk. [online]. 2022 [cit. 2024-04-22]. Dostupné z: <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/selective-heat-sintering-shs-3d-printing/>
- [5] FRAZIER, William E. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2014, 23(6), 1917-1928 [cit. 2024-05-01]. ISSN 1059-9495. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-014-0958-z#Fig1>
- [6] ARMSTRONG, Mark, Hamid MEHRABI a Nida NAVEED. An overview of modern metal additive manufacturing technology. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2022, 84(1), 1001-1029 [cit. 2024-05-01]. ISSN 15266125. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.060>
- [7] GONG, Guanghao, Jiajia YE, Yiming CHI, et al. Research status of laser additive manufacturing for metal: a review. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2021, 15(1), 855-884 [cit. 2024-05-01]. ISSN 22387854. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.050>
- [8] PRAGANA, J.P.M., R.F.V. SAMPAIO, I.M.F. BRAGANÇA, C.M.A. SILVA a P.A.F. MARTINS. Hybrid metal additive manufacturing: A state-of-the-art review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering* [online]. 2021, 2(1), 1-21 [cit. 2024-05-01]. ISSN 26669129. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.aime.2021.100032>
- [9] ISO/ASTM 52900: 2021. *ISO* [online]. 2021 [cit. 2024-05-02]. Dostupné z: <https://www.iso.org/standard/74514.html>
- [10] ONE3D. *Direct Metal Laser Sintering (DMLS)*. Online. ONE3D. 2019. Dostupné z: <https://www.one3d.cz/technologie/detail/direct-metal-laser-sintering-dmls/>. [cit. 2024-05-05].
- [11] Meena Pant a Leeladhar Nagdeve. A contemporary investigation of metal additive manufacturing techniques. *SpringerLink* [online]. 2021 [cit. 2024-05-02]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12046-021-01770-6>
- [12] O'NEILL, Benedict. *Kovové 3D tiskárny v roce 2024: komplexní průvodce*. Online. Aniwaa. 2024. Dostupné z: <https://www.aniwaa.com/buyers-guide/3d-printers/best-metal-3d-printer/>. [cit. 2024-05-05].

- [13] P., Madeleine. *Wohlersova zpráva 2024 zdůrazňuje růst výroby aditivních kovů*. Online. 3Dnatives. 2024. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/wohlers-report-2024-growth-of-metal-additive-manufacturing-040420245/>. [cit. 2024-05-05].
- [14] ATTARAN, Mohsen. *Vzestup 3D tisku: Výhody aditivní výroby oproti tradiční výrobě*. Online. ResearchGate. 2017. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/313904803_The_rise_of_3-D_printingThe_advantages_of_additive_manufacturing_over_traditional_manufacturing. [cit. 2024-05-05].
- [15] M.D. MONZÓN, Z. Ortega; S. SINGH, C. Prakash; A. BABBAR, V. Jain a P. LEON DHARMADURAI, *A review for advancements in standardization for additive manufacturing*. Online. ScienceDirect. 2021. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321062003>. [cit. 2024-05-05].
- [16] NOVOTNY, Karel. *PÁSOVÉ PILY NA KOV*. Online. PEGAS-GONDA - Pásové pily. 2024. Dostupné z: <https://www.pegas-gonda.cz/cs/categoryList/14/pasove-pily#category14>. [cit. 2024-05-21].
- [17] SAORIN, Jose Luis. *Design and Validation of an Open Source 3D Printer Based on Digital Ultraviolet Light Processing (DLP), for the Improvement of Traditional Artistic Casting Techniques for Microsculptures*. Online. MDPI. 2021. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/7/3197>. [cit. 2024-05-05].
- [18] LOTH, Nick. *Electron Beam Melting (EBM 3D Printing): The Complete Guide*. All3DP [online]. All3DP, 2022, 13. 10. 2022 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/electron-beam-melting-ebm-3d-printing-simply-explained/>
- [19] Carl Dittrich. *EBM (Electron Beam Melting)*. Online. Cotu.cz. 2021. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/en/blog/122/ebm-electron-beam-melting>. [cit. 2024-05-06].
- [20] VALDIVIESO, Carlota. *The Complete Guide to Electron Beam Melting (EBM) in 3D printing*. 3Dnatives [online]. 3Dnative, 2019, 7. 10. 2019 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/electron-beam-melting100420174/>.
- [21] *Meltio*. Online. 3Dwiser. Dostupné z: <https://3dwiser.com/produkty/3d-tiskarny/kovy/meltio/>. [cit. 2024-05-07]
- [22] *Electron Beam Welders & Custom EB Welding Solutions* [online]. Sciaky, © 2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.sciaky.com/eb-welding-systems/>
- [23] *Sciaky' EBAM Metal 3D Printers*. In: *Metalworking World Magazine* [online]. Milano: Tecniche Nuove Spa, 2015 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.metalworkingworldmagazine.com/sciaky-ebam-metal-3d-printers/>
- [24] Somayeh Pasebani. *Přehled výroby aditiv Binder Jet*. Online. MDPI. 2019. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2504-4494/3/3/82>. [cit. 2024-05-08].
- [25] *Company*. Online. Markforged. 2024. Dostupné z: <https://markforged.com/about/company>. [cit. 2024-05-08].
- [26] ADMIN. *NANO PARTICLE JETTING*. Online. XJET. 2024. Dostupné z: <https://xjet3d.com/npj-technology/direct-material-jetting/>. [cit. 2024-05-08].
- [27] 3D Systems. *DMP Flex 100*. Online. 3D Systems. 2024. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/3d-printers/dmp-flex-100>. [cit. 2024-05-09].

- [28] MAXSOFT.CZ - MARTIN@MAXSOFT.CZ. *Arcam EBM Spectra L - Colibrium Additive - Katalog - Misan*. Online. Misan. 2024. Dostupné z: <https://www.misan.cz/arcam/katalog-detail/spectra-l-arcam-ebm-spectra-l/>. [cit. 2024-05-09].
- [29] Pilous. *Xpert 3.0 3D*. Online. Nenalezený vydavatel. 2024. Dostupné z: <https://www.pilous.cz/kov/pasove-pily-na-kov/pasove-pily-pro-3d-tisk/xpert-3-0-3d>. [cit. 2024-05-10].
- [30] Meba sawing solutions. *MEBA3D*. Online. MEBA. 2024. Dostupné z: <https://meba-saw.com/produktfinder/nach-maschine/meba-3d/>. [cit. 2024-05-10].
- [31] Behringer. *3D pily Behringer*. Online. Pilové systémy a centra pro obrábění profilů. 2024. Dostupné z: <https://www.behringsaws.com/products/behringer-bandsaws/3d-saws.html>. [cit. 2024-05-10].

10 SEZNAM ZKRATEK, OBRÁZKŮ A TABULEK

10.1 Seznam zkratk

MAM - Metal Aditive Manufacturing
PBF - Powder Bed Fusion
DMLS - Direct Metal Laser Sintering
SLS - Selective Laser Sintering
SLM - Selective Laser Melting
EBM - Electron Beam Melting
DMP - Direct Metal Printing
DED - Direct Energy Deposition
WLAM - Wire-Laser Additive Manufacturing
LMD - Laser Metal Deposition
LENS - laser engineering net shaping
DMD - Direct metal deposition
LRF - Laser rapid forming
DLF - Direct laser fabrication
EBAM - Electron Beam Aditive Manufacturing
WAAM - Wire Arc Aditive Manufacturing
PAW - Plasma Arc Welding
TIG - Tungsten Inert Gas
MIG - Metal Inert Gas
MAG - Metal Activ Gas
CMT - Cold Metal Transfer
BJ - Binder Jetting
ME - Material Extrusion
MJ - Material Jetting
SL - Sheet Lamination
MJ - Material Jetting
VP - Vat Photopolymerization
DLP - Digital Light Processing
RTR - Regulace Tlaku Řezu

10.2 Seznam symbolů a značek

a, b, c, d	Vzdálenosti mezi vozíky a rovinou řezu
D_{kl}	Průměr kladky
D_p	Průměr pístní tyče hydraulického válce
D_v	Vnitřní průměr trubky hydraulického válce
e_{max}	Maximální rameno řezné síly
F	Výsledná síla v řezu
F_4	Výsledná síla nejvíce zatíženého vozíku
F_c	Řezná síla
F_{cA}	Reakce od síly F_c na zjednodušeném nosníku v místě A
F_{cB}	Reakce od síly F_c na zjednodušeném nosníku v místě B
F_{c1}	Reakce od síly F_c na vozíku 1 lineárního vedení
F_{c2}	Reakce od síly F_c na vozíku 2 lineárního vedení
F_{c3}	Reakce od síly F_c na vozíku 3 lineárního vedení
F_{c4}	Reakce od síly F_c na vozíku 4 lineárního vedení
F_f	Výsledná síla působící na sestavu v ose Z
F_{fA}	Reakce od síly F_f na zjednodušeném nosníku v místě A
F_{fB}	Reakce od síly F_f na zjednodušeném nosníku v místě B
F_{f1}	Reakce od síly F_f na vozíku 1 lineárního vedení
F_{f2}	Reakce od síly F_f na vozíku 2 lineárního vedení
F_{f3}	Reakce od síly F_f na vozíku 3 lineárního vedení
F_{f4}	Reakce od síly F_f na vozíku 4 lineárního vedení
F_g	Gravitační síla sestavy nad lineárním vedením
F_h	Síla ramene do řezu
F_{hmax}	Maximální síla hydraulického válce pásové pily
F_{M1}	Síla od momentu na vozík 1 lineárního vedení
F_{M2}	Síla od momentu na vozík 2 lineárního vedení
F_{M3}	Síla od momentu na vozík 3 lineárního vedení
F_{M4}	Síla od momentu na vozík 4 lineárního vedení
g	Gravitační zrychlení
i_p	Převodový poměr převodovky
M_A	Momentová rovnováha k bodu A
M_B	Momentová rovnováha k bodu B
M_{fA}	Momentová rovnováha k působišti síly F_{fA}
M_{fB}	Momentová rovnováha k působišti síly F_{fB}
M_{km}	Kroutící moment motoru
M_{kpmax}	Maximální kroutící moment převodovky

M_{kp}	Kroutící moment na výstupu převodovky
M_1	Momentová rovnováha k bodu 1
M_2	Momentová rovnováha k bodu 2
M_3	Momentová rovnováha k bodu 3
M_4	Momentová rovnováha k bodu 4
M_{F_c}	Moment od síly F_c
m	metr
N	Newton
n_m	Otáčky motoru
n_p	Otáčky na výstupu převodovky
η_p	Účinnost převodovky
η_{sys}	Účinnost systému
P_m	Výkon motoru
p	Systémový (maximální) tlak
S_v	Plocha vnitřního průřezu válce
S_p	Plocha pístití tyče válce
S	Plocha mezikruží

10.3 Seznam obrázků

- Obr. 1 (a) Rozdělení metod aditivní výroby dle normy ASTM [8]
 (b) Procentuální zastoupení metod (MJ a BJ zahrnuty společně) [12]
- Obr. 2 Přehled technologií a výrobců v roce 2024 [12]
- Obr. 3 (a) Celosvětový výnos z aditivní výroby [14],
 (b) Celosvětový výnos z kovové aditivní výroby v letech 2002-2023 [12]
- Obr. 4 Znázornění procesu výroby MAM [6]
- Obr. 5 a) Princip technologie DMSL a SLM [6],
 b) detailní výtisky technologie DMP [27]
- Obr. 6 Porovnání technologie SLM (vlevo) a EBM (vpravo) [8]
- Obr. 7 Podávání prášku při metodách LMD a) koaxiální, b) boční přívod [7]
- Obr. 8 a) Technologie EBAM [8],
 b) řešení firmy Sciaky s dvojitým podáváním drátu [23]
- Obr. 9 a) Průběh vstřebání pojiva [6],
 b) sestava BJ tiskárny (vlevo) a tisková hlava s kapkami pojiva (vpravo) [6]
- Obr. 10 a) Průběh tisku [25],
 b) průběh vstřebání materiálu v průběhu procesu [6],
 c) sestava ME tiskárny [6]
- Obr. 11 a) Xpert 3.0 3D, b) Náhled řešení, c) odsávací box [29]
- Obr. 12 a) MEBAeco3D, b) Náhled řešení, c) odsávací box [30]

- Obr. 13 a) Behringer HBE320-523, b) LPS-T 3D, c) řešení filtrace řezné emulze [31]
- Obr. 14 a) 360x500 SHI-LR,
b) 440 Caliber SHI [16]
- Obr. 15 a) Varianta 1 z přední strany,
b) pohled ze zadní strany
- Obr. 16 Varianta č. 2
- Obr. 17 (a) Základní deska,
(b) první bod montáže - deska s lineáry
- Obr. 18 (a) Spodní pohled na nosnou desku,
(b) sestava,
(c) druhý bod montáže
- Obr. 19 a) Zkosení platformy a lišty,
b) obrázek upínacího excentru,
c) upínací deska zezadu
d) třetí bod montáže
- Obr. 20 a) Upnutí desky v transportní pozici,
b) zavěšení při transportu na pásovou pilu,
c) Nastavení pracovní pozice
- Obr. 21 a) Nákres hnací kladky stroje,
b) rozklad výsledné síly v řezu
- Obr. 22 Zjednodušený nákres sil zatěžujících vozíky lineárního vedení
- Obr. 23 a) Tabulka použitého lineárního vedení,
b) znázornění působících momentů
- Obr. 24 a) Rozstřel sestavy přípravku
- Obr. 25 a) 360x500 SHI-LR s přípravkem,
b) detailní pohled zepředu,
c) detailní pohled ze zadní strany
- Obr. 26 a) 440 Caliber SHI s přípravkem,
b) detailní pohled zepředu,
c) detailní pohled ze zadní strany

10.4 Seznam tabulek

Tab. 1 – Přehled 3D tiskáren PBF, BJ, MJ a ME. [12]

Tab. 2 – Přehled 3D tiskáren DED. [12]

11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Výkresová dokumentace vybraných uzlů

Příloha 2 – 3D model přípravku