

Inovace prototypu CNC stroje

Diplomová práce

Studijní program:

Autor práce:

Vedoucí práce:

N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení

Bc. Ondřej Moravec

Ing. Petr Zelený, Ph.D.

Katedra výrobních systémů a automatizace





Zadání diplomové práce

Inovace prototypu CNC stroje

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej Moravec**
Osobní číslo: S20000228
Studijní program: N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení
Zadávací katedra: Katedra výrobních systémů a automatizace
Akademický rok: **2021/2022**

Zásady pro vypracování:

Hlavním cílem diplomové práce je návrh a rozšíření technologických možností prototypu CNC stroje. Nyní lze na stroji pouze obrábět. Možné rozšíření o laserové gravírování / řezání a 3D tiskovou hlavu, případně další technologie.

1. Rešerše existujících řešení a stav výzkumu v této oblasti.
2. Definování požadovaných parametrů pro návrh.
3. Potřebné výpočty a návrhy.
4. Návrh řešení podle požadovaných parametrů.
5. Případná realizace a oživení.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle potřeby
60 stran
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] ZELENÝ, P. *Návrh a konstrukce prototypu víceúčelového CNC stroje*. Liberec, 2006. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, katedra výrobních systémů. Vedoucí práce: prof. Ing. Přemysl Pokorný, CSc.
- [2] SERTOGLU, Kubi. *Review: SNAPMAKER 2.0 –3-IN-1 3D Printer with CNC and Laser Capabilities*. 3D Printing Industry, 2021. Dostupné na: <https://3dprintingindustry.com/news/review-snapmaker-2-0-3-in-1-3d-printer-with-cnc-and-laser-capabilities-192268/>
- [3] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0*. Praha: MM publishing, 2018. ISBN 978-80-906310-8-3.
- [4] SHIGLEY, J. E., Ch. R. MISCHKE, R. G. BUDYNAS, M. HARTL a M. VLK. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2010, xxv, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [5] LEINVEBER, J. a P. VÁVRA. *Strojnické tabulky*. Praha: Albra, 2011. 927s. ISBN 978-80-7361-081-4.

Vedoucí práce:

Ing. Petr Zelený, Ph.D.
Katedra výrobních systémů a automatizace

Datum zadání práce:

15. listopadu 2021

Předpokládaný termín odevzdání:

15. května 2023

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

Ing. Petr Zelený, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 15. listopadu 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

20. května 2022

Bc. Ondřej Moravec

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá rozšířením prototypu CNC frézky o nové technologie za účelem vytvoření víceúčelového zařízení. Přidanými technologiemi jsou 3D tisk, laserové řezání a gravírování. V počátku práce je provedena rešerše podobných víceúčelových strojů a použitých technologií. Na základě těchto poznatků je z nabídky na trhu zvolena tisková hlava a laser. Je vytvořen jednoduchý a rychlý systém pro výměnu nástrojových periferií, a to bez nutnosti použití pracovního nářadí. Další zjednodušení bylo provedeno i u kabelového zapojování, díky tomu je urychlen proces výměny a je zamezeno vzniku chyb. Stroj je konstrukčně upraven tak, aby byly dané technologie použitelné a bezpečné. Pro celou konstrukci jsou zhotoveny modely a výkresová dokumentace v CAD softwaru. V závěru práce je konstrukce ekonomicky zhodnocena.

Klíčová slova

Víceúčelové zařízení, CNC frézka, 3D tiskárna, laserové řezání, laserové gravírování.

Abstract

This thesis deals with extension of a prototype CNC milling machine with new technologies in order to create a multipurpose device. Added technologies are 3D printing, laser cutting and laser engraving. Research of similar multipurpose machines and the technologies used is carried out at the beginning of the thesis. Based on this knowledge, the printing extruder and laser are selected from the market. A simple and fast system for changing tool peripherals is created, without the need of using the work tools. Further, the cable connection has been simplified, which speeds up the exchange process and prevents errors. The machine is structurally modified to make the technologies applicable and safe. Models and technical drawings are produced for the entire design in CAD software. At the end of the work, the design is economically evaluated.

Key words

Multipurpose machine, CNC milling machine, 3D printer, laser cutting, laser engraving.

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Petru Zelenému, Ph.D., za všechnen jeho čas strávený při vedení diplomové práce a za časté konzultace, které mě vedly kupředu a moc mi pomáhaly. Také děkuji rodičům a přátelům za poskytnutí podpory a času při studiu a řešení diplomové práce.

Obsah

| | |
|--|----|
| Seznam použitých zkratk a symbolů..... | 9 |
| 1 Úvod..... | 11 |
| 2 Cíl práce..... | 11 |
| 3 Rešerše podobných strojů..... | 12 |
| 3.1 Stroje na bázi 3D tiskáren..... | 13 |
| 3.1.1 Snapmaker 2.0..... | 13 |
| 3.1.2 ZMorph VX..... | 14 |
| 3.2 Hybridní obráběcí stroje..... | 16 |
| 3.2.1 Mazak Integrex i-400 AM..... | 16 |
| 3.2.2 DMG Mori Lasertec 65 DED hybrid..... | 16 |
| 3.3 Multifunkční hybridní stroje..... | 17 |
| 3.3.1 5-axismaker..... | 17 |
| 3.3.2 Diabase Engineering H5-400..... | 18 |
| 3.4 Porovnání strojů..... | 19 |
| 4 Popis výchozího CNC stroje..... | 21 |
| 4.1 Konstrukce stroje..... | 21 |
| 4.2 Parametry pohybových os..... | 22 |
| 4.3 Řídicí systém..... | 23 |
| 4.4 Zhodnocení..... | 23 |
| 5 Rešerše technologií..... | 24 |
| 5.1 Aditivní technologie..... | 24 |
| 5.2 Technologie FFF..... | 25 |
| 5.3 Tiskové hlavy pro 3D tisk..... | 25 |
| 5.3.1 Přímé extrudery..... | 26 |
| 5.3.2 Bodnenové extrudery..... | 26 |
| 5.3.3 Duální extrudery..... | 27 |
| 5.4 Laser..... | 28 |
| 5.4.1 Laserové řezání..... | 29 |
| 5.4.2 Laserové gravírování..... | 29 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.4.3 | Druhy laserů pro řezání a gravírování | 30 |
| 6 | Volba periferií | 30 |
| 6.1 | Volba extruderu | 30 |
| 6.2 | Volba laseru | 32 |
| 7 | Konstrukce pro jednoduchou výměnu periferií | 35 |
| 7.1 | Řezná síla | 35 |
| 7.2 | Výpočet dynamických parametrů | 35 |
| 7.3 | Varianta 1 | 36 |
| 7.3.1 | Výpočet upínací síly | 37 |
| 7.3.2 | Kontrola na otláčení styčných ploch | 40 |
| 7.4 | Varianta 2 | 40 |
| 7.4.1 | Výpočet upínací síly | 41 |
| 7.4.1 | Kontrola na otláčení styčných ploch | 42 |
| 7.5 | Volba konstrukční varianty | 43 |
| 7.6 | Možnosti zjednodušení zapojení kabelů | 43 |
| 7.6.1 | Připojovací adaptér | 43 |
| 7.6.2 | Připojení pomocí konektoru | 44 |
| 7.6.3 | Připojení při upnutí periferie | 45 |
| 7.6.4 | Výběr možnosti zapojení | 45 |
| 7.7 | Další části konstrukce | 47 |
| 7.7.1 | Volba energetického řetězu | 47 |
| 7.7.2 | Kryt konektoru | 48 |
| 7.7.3 | Držák cívky | 49 |
| 7.7.4 | Tiskový stůl | 50 |
| 7.7.5 | Stůl pro laserové řezání | 52 |
| 8 | Souhrn použití stroje | 53 |
| 9 | Ekonomické zhodnocení | 56 |
| 10 | Závěr | 58 |
| | Seznam použité literatury | 61 |
| | Seznam příloh | 64 |

Seznam použitých zkratk a symbolů

| | |
|--------------------------|--|
| 3D | třídimenzionální |
| a | celkové zrychlení [m/s^2] |
| ABS | Acrylonitril-Butadien-Styren |
| a_x, a_y, a_z | zrychlení v ose x, y, z [m/s^2] |
| CAD | Computer Aided Design (počítačem podporované navrhování) |
| CAM | Computer Aided Manufacturing (počítačem řízená výroba) |
| CNC | Computer Numerical Control (číslicové řízení počítačem) |
| f | součinitel smykového tření |
| F_d | dynamická síla [N] |
| FFF | Fused Filament Fabrication (aditivní technologie) |
| F_N | normálová síla [N] |
| F_p | síla upínací páky [N] |
| F_u | celková upínací síla [N] |
| F_{ux}, F_{uy}, F_{uz} | upínací síla v ose x, y, z [N] |
| HIPS | High Impact Polystyrene (houževnatý polystyren) |
| I | elektrický proud [A] |
| k | bezpečnost stroje |
| m_v | hmotnost včetně s upínací deskou [kg] |
| NYLON | obchodní označení pro polyamid |
| p | skutečný tlak [Pa] |
| P | příkon/výkon [W] |
| PC | Polykarbonát |

| | |
|-----------|---|
| p_D | dovolený tlak materiálu [Pa] |
| PEEK | Polyéteréterketon |
| PEI | Polyetherimid |
| PET | Polyethyltereftalát |
| PETG | Polyethyltereftalát-glykol |
| PLA | Polylactic acid |
| P_{max} | maximální příkon stroje [W] |
| PTC | Positive temperature coefficient (kladný teplotní koeficient) |
| PVA | Polyvinylalkohol |
| PVC | Polyvinylchlorid |
| RMS | Root mean square (statistická hodnota) |
| R_y | Reakce rámu v ose y [N] |
| S | styčná plocha [m ²] |
| TPE | termoplastický elastomer |
| TPU | termoplastický polyuretan |
| U | elektrické napětí [V] |
| USB | Universal Serial Bus (univerzální sériová sběrnice) |

1 Úvod

Počítačově řízené obráběcí stroje jsou v dnešní době velice rozšířené, ať už se jedná o stroje pro obrábění rotačních dílů (soustruhy) nebo plošných dílů (frézky). Jejich největší výhodou je, že oproti konvenčním strojům je lze řídit bez stálé obsluhy. Jsou totiž zcela ovládány a kontrolovány počítačem, je ale potřeba vytvořit program stroje. Ten je možné napsat ručně nebo ho vytvořit v počítačovém softwaru, generováním cest nástroje ve virtuálním prostředí. K tomu je nutné vytvořit virtuální model, který by měl reprezentovat finální výrobek.

Další výrobní operace, které se na obráběcích strojích běžně nevyskytují, jako je například laserové řezání, gravírování, přidávání materiálu tištěním nebo navařováním, se v dnešní době objevují i u obráběcích strojů. Všechny tyto procesy lze řídit pomocí počítače, a proto je možné vytvořit multifunkční stroje, které zvládnou několik výrobních operací najednou. Náklady na takové stroje jsou sice větší, ale tyto stroje jsou univerzálnější a mohou nám ušetřit prostor nebo čas. Kombinace výrobních operací nejsou vždy tak efektivní, jak bychom si přáli. Proto při návrhu těchto strojů je dobré promyslet kombinace použitých výrobních technologií a účel stroje na základě jeho konstrukce a ostatních parametrů. Prototyp CNC obráběcího stroje, který vznikl v disertační práci, byl již od začátku zamýšlen pro vykonávání několika operací.

2 Cíl práce

Cílem práce je rozšířit technologické možnosti CNC prototypu stroje. Jedná se o CNC ovládanou frézku složenou z hliníkových profilů a určenou zejména pro obrábění plastů, dřeva a lehce obrobitelných kovů.

Stroj bude rozšířen o technologii 3D tisku, laserového řezání a gravírování. Laserové řezání by mělo být vhodné pro navrhnutý stroj a jeho použitelné materiály jako: plast, dřevo, hliníkové slitiny, tenké kovové plechy a podobně. Dále je potřeba uzpůsobit stroj pro kompletní možnosti 3D tisku. To znamená vytvořit tiskový stůl, zásobník plastového materiálu a jeho vedení do tiskové hlavy, zabezpečit bezpečnostní podmínky pro laser, pokud to bude potřeba a pro obě nástrojové periferie vytvořit způsob jednoduchého zapojení kabelů.

Další podmínkou práce je vytvořit systém upnutí periferie a umožnit rychlé a jednoduché výměny nástrojových periferií, a to ručně a bez použití jakéhokoliv nářadí. Díky tomu pak lze zaručit, že přechod mezi výrobními operacemi bude rychlý a jednoduchý pro obsluhu. Úkolem je celou konstrukci vymodelovat v CAD softwaru a vytvořit příslušnou výkresovou dokumentaci. Na závěr je nutné ekonomicky zhodnotit celou přidanou konstrukci stroje.

3 Rešerše podobných strojů

Pro přehled si zde uvedeme několik strojů z nabídky na trhu, které se podobají inovovanému stroji v této práci. Stroje, které disponují hned několika technologickými možnostmi, se mohou nazývat jako hybridní stroje. K rozšíření těchto strojů došlo převážně v posledních několika letech, a to díky tomu, že technologie 3D tisku a laseru je rozšířenější a cenově dostupnější. Účelem těchto strojů je převážně zkracovat nevýrobní čas. V následující kapitole si popíšeme základní parametry stroje, konstrukci a jejich technologické možnosti.

Podobné stroje by se pro naše účely daly rozdělit na tři skupiny. První skupinou jsou stroje, které vznikly z konstrukce 3D tiskáren rozšířením jejich technologických možností – nejčastěji o laserové řezání a laserové gravírování nebo obrábění. Další skupinou jsou původně obráběcí stroje, soustruhy nebo frézy. Jsou to dražší stroje s tužší konstrukcí, které byly obohaceny o možnosti přidávat kovový materiál navařováním, popřípadě jsou rozšířeny o laserové řezání a gravírování. Tyto stroje se používají zejména pro výrobu prototypů nebo pro opravování výrobků. Třetí skupinou jsou stroje, které byly již navrženy jako hybridní s možností konat několik výrobních operací na jednom výrobním zařízení.

3.1 Stroje na bázi 3D tiskáren

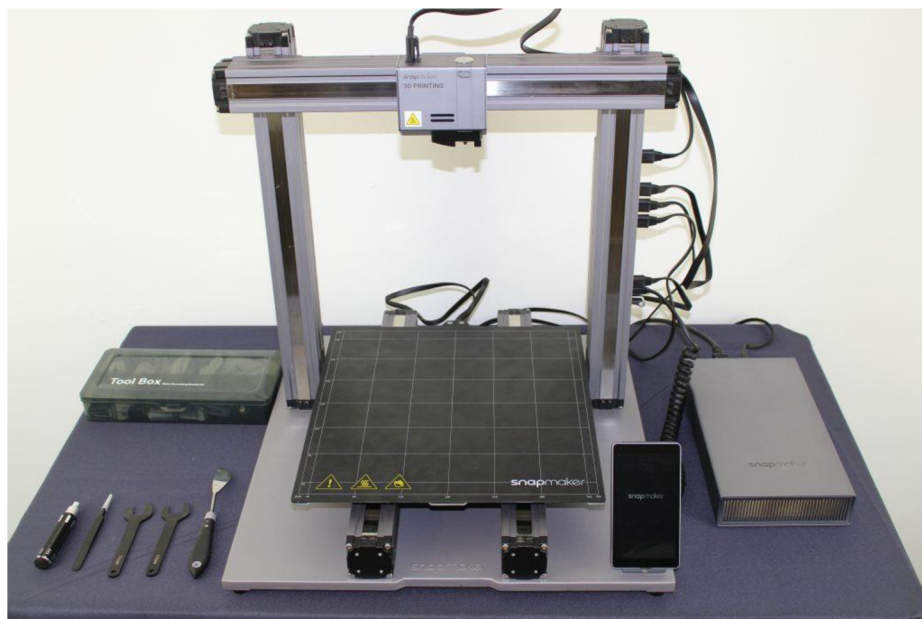
3.1.1 Snapmaker 2.0

Jedná se o 3D tiskárnu technologie FFF s možností CNC frézování, laserového řezání a gravírování. Je prodávána firmou Snapmaker, což je výrobce FFF 3D tiskáren. Tiskárna je sestavena z hliníkových profilů a využívá kartézský souřadnicový systém. Obsahuje tiskovou hlavu s přímým extruderem s maximální teplotou ohřevu až do teploty 275 °C. Umožňuje tisknout běžné a flexibilní plastové materiály, které lze do této teploty natavit.

Tisknuto je na magnetickou podložku připevněnou na stůl, který má možnost ohřevu na teplotu 80 °C. Pro umožnění automatické kalibrace se na tiskárně nachází magnetický snímač, který dokáže naměřit souřadnici v ose z. Díky tomu by uživatel měl být schopný lehce vytvořit první vrstvu tisku bez jakéhokoliv ručního nastavování. Ovládání je zajištěno speciálním softwarem od výrobce a informace jsou přeneseny buď přes Wi-Fi, nebo pomocí USB portu. Ke stroji je možno zakoupit mnoho rozšiřujících zařízení, jako je například: zakrytování stroje či rotační modul pro soustružení. Cena nejlevnějšího typu stroje začíná přibližně na 30 000 Kč.

Laserová hlava má modrou diodu s výkonem 1,4 W a vlnovou délkou 450 nm. Obsahuje vestavěnou kameru pro náhled návrhů před gravírováním. Výrobce udává, že laser je vhodný pro dřevo, plasty, akryl, karton, textil a kůži. Pro laserové gravírování se na stroj přidělá hliníkový laserový stůl, který snižuje odrazivost.

Pro frézování je potřeba vyměnit nástrojovou hlavu za kleštinu ER11. Otáčky vřetena je možné nastavovat v rozsahu 6 000–12 000 otáček za minutu. Pro obrábění je na stroji odnímatelné obráběcí lůžko. Po obvodu je deska opatřena závit, do kterých je možné našroubovat upínky pro upnutí obráběného materiálu [1].



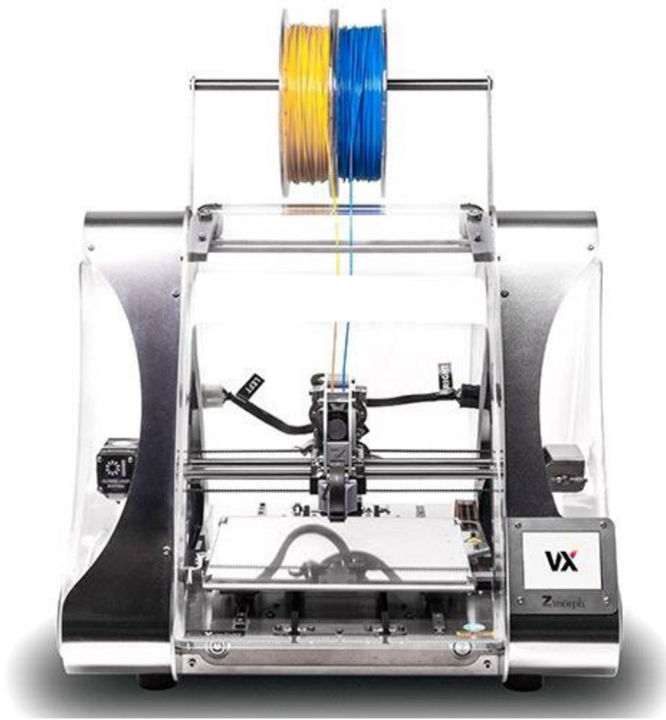
Obrázek 1: Fotografie zařízení Snapmaker 2.0 [1]

3.1.2 ZMorph VX

Výrobce je firma ZMorph, která vyrábí stolní 3D tiskárny. Zařízení umožňuje 3D tisk technologií FFF, CNC obrábění, laserové řezání, gravírování a vytlačování pasty. Pro všechny technologie používá vlastní software. Je vybaveno duální tiskovou hlavou, proto je možné tisknout výrobek ze dvou materiálů nebo směsi dvou materiálů. Pracovní plocha stroje je $235 \times 250 \times 165$. Maximální teplota tiskové hlavy je $250 \text{ }^\circ\text{C}$. Udávaná přesnost tisku je $\pm 0,2 \text{ mm}$.

Navazuje na odkaz modulárních multifunkčních strojů, který vznikl v roce 2012 jako odnož 3D tiskárny Prusa Mendel RepRap. Rám je sestaven z hliníkových profilů, je vyztužen a tvoří lichoběžníkový tvar. Používá vyměnitelné nástrojové hlavy. Konstrukce stroje klade důraz na tuhost, která je převážně potřeba při obrábění, ale i 3D tisku. Stůl je tvořen těžkými hliníkovými deskami a kartézský pohybový systém využívá dva řemeny se skelnými vlákny. U vyměnitelných prvků je využito magnetů pro jednoznačnost a intuitivnost při změně pracovních režimů stroje. Příkladem je i plastový kryt stroje, který je držen magnetem, pro chod stroje je nutné ho ručně zaklapnout. Díky odolné konstrukci se vyhřívané tiskové skleněné lože neopírá o žádné pružiny ani šrouby, které by sloužily k ručnímu vyrovnání stolu. Automatická kalibrace je zajištěna dotykovou sondou, která měří souřadnici v ose z pro několik bodů na tiskovém loži.

Jsou použity tiché krokové motory, pro snížení hluku zařízení. Pro zajištění správné funkce byl vyvinut speciální software pro toto zařízení s názvem Voxeliser 2.



Obrázek 2: Zařízení ZMorph VX [3]

Nástrojová hlava laseru má výkon 2,8 W, to může být nebezpečné pro sítnici, protože ani rám stroje paprsky nemusí zachytit, a proto jsou ke stroji dodávané ochranné brýle. Řezání a gravírování je určeno pro tyto materiály: dřevo, kůže, plst', fólie, pěnové desky apod.

Upínání nástrojů pro obrábění je zajištěno pomocí kleštiny ER11. Otáčky vřetena je možné měnit přírůstkem po 25 %. Hliníková materiállová deska je opatřena závity pro šrouby s drážkami a čtyřhranné matice, které slouží k upevnění držáků materiálu. Obrábění je určeno pro tyto materiály: karton, dřevo, plasty, hliník, mosaz, měď atd. [2], [7].

3.2 Hybridní obráběcí stroje

3.2.1 Mazak Integrex i-400 AM

Jedná se o pětiosý obráběcí stroj od výrobce Mazak, který zároveň umožňuje aditivní výrobu a vysoce přesné dokončovací operace. Aditivní technologie funguje tak, že je kovový prášek roztaven vláknovým laserem, ten je poté nanesen pomocí trysky na potřebné místo a tvoří vrstvu naneseného materiálu. Materiál je nejčastěji poté obroben pro dosažení lepší kvality povrchu. Stroj také dokáže spojovat různé druhy kovů a převážně se uplatní pro výrobu malých sérií nebo pro opravy opotřebovaných a poškozených dílů jako například lopatky turbín. Pomocí laseru je možné značit díly. Výměna všech nástrojů probíhá automaticky. Upínat a obrábět je možné rotační a prizmatické díly, odlitky, tvarově složité díly a díly vyrobené aditivní technologií [4].



Obrázek 3: Stroj Mazak Integrex i-400 AM [4]

3.2.2 DMG Mori Lasertec 65 DED hybrid

Stroj od firmy DMG Mori umožňuje pětiosé obrábění a nanášení roztaveného kovového materiálu pomocí koaxiální trysky. Proces této aditivní technologie je až desetkrát rychlejší než technologie, kde je prášek nanášen na tiskový stůl a poté nataven. U této technologie také není nutné vytvářet podpůrné struktury. Je možné rychle vytvářet díly s komplexní geometrií. Celý proces je v průběhu monitorován a řízen. Obsahuje speciálně vyvinutý software s rozhraním orientovaným na operátora. Pomocí jednoho integrovaného CAD/CAM softwaru je vytvářen výrobní model, a to včetně 3D simulace a systému předcházení kolizí. Možné je také vytvářet nové kombinace materiálů z kovových prášků [5].



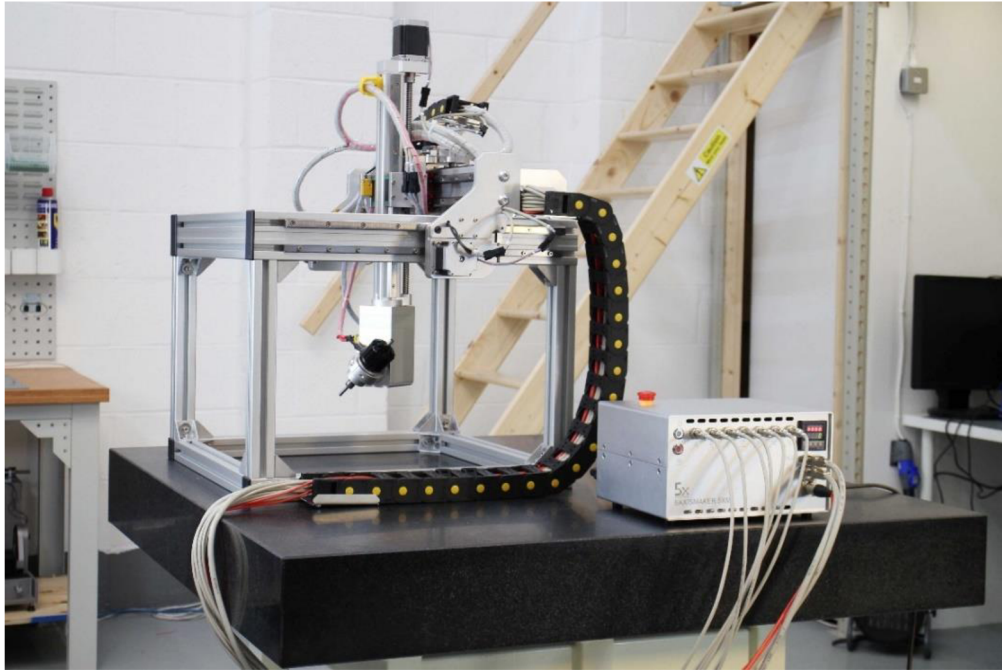
Obrázek 4: Stroj DMG Mori Lasertec 65 DED hybrid [5]

3.3 Multifunkční hybridní stroje

3.3.1 5–axismaker

Výrobce je britská firma 5AXISWORKS. Jedná se o pětiosý stroj, který umožňuje technologii 3D tisku, obrábění a měření dotykovou sondou. Jedná se o kartézskou konstrukci stroje složeného z hliníkových profilů s možností rotace nástrojů kolem dvou pracovních os. Upínání nástrojových periferií je provedeno pomocí svěrného spoje. Pro obrábění na stroji najdeme vřeteno s upínací kleštinou ER11. Motor vřetena je bezkartáčový a umožňuje rychlost otáčení až 15 000 otáček za minutu. Obrábění je určeno převážně pro dřevo, akryláty, technické plasty, pěny či polyuretan. Pro tisk běžných plastových materiálů slouží tisková hlava s průměrem filamentu 1,75 mm. Pro materiály, jako je ABS, je určena vyhřívaná tisková podložka. Stroj umožňuje automaticky kalibrovat nástroje pomocí dotykové plošky. K práci je potřeba CAM software, proto je ke stroji dodána roční licence od softwaru Autodesk Fusion 360.

Výrobce dále uvádí, že je možné stroj rozšířit i o další technologie. Je prodáván ve dvou variantách pracovního prostoru – 3×400 mm nebo 3×600 mm. Uvedená cena se pohybuje přibližně okolo 145 000 Kč [6].

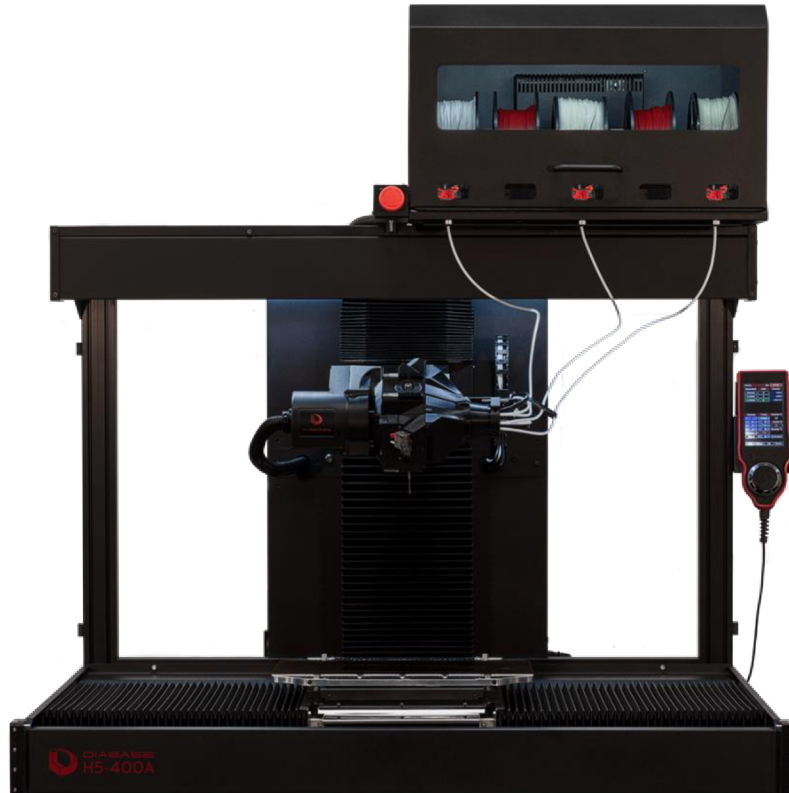


Obrázek 5: Fotografie stroje 5–axismaker [6]

3.3.2 Diabase Engineering H5-400

Stroj od firmy Diabase Engineering kombinuje CNC obrábění a technologii 3D tisku, konkrétně technologii FFF. Obsahuje zásobník se čtrnácti upínacími kleštinami ER11 pro obráběcí nástroje, přičemž jejich výměna do revolverové hlavě probíhá automaticky. Zároveň disponuje třemi tiskovými hlavami, a díky tomu je možné při tisku kombinovat materiály. Na stroji je i měřicí sonda, pomocí které se stroj kalibruje a s níž je možné přesně měřit. Stroj byl pečlivě navržen tak, aby řešil skutečné problémy v řetězci nástrojů stolní výroby. Je určen pro výrobu funkčních výrobků s velkou přesností a povrchovou úpravou. V základním provedení je stroj tříosý, ale je možné ho rozšířit na čtyři nebo pět pracovních os. Pro rychlý přechod mezi výrobními operacemi je použito speciální upínání pracovního stolu. Ovládání a nastavení stroje probíhá přes internetový prohlížeč, navíc je k němu dodáván ruční řídicí ovladač. Pro změření přesné upínací polohy nástroje slouží sonda s dotykovou ploškou.

Pracovní prostor stroje je v základu $416 \times 186 \times 375$ mm. Udávaná přesnost polohování je 0,01 mm. Vřeteno dosahuje rychlosti otáčení až 16 000 otáček za minutu při výkonu 320 W. Tisková hlava podporuje všechny běžně tisknutelné materiály do teploty tisku $310\text{ }^{\circ}\text{C}$ a s průměrem materiálu 1,75 mm [7].



Obrázek 6: Stroj H5-400 [8]

3.4 Porovnání strojů

Jednotlivé zmíněné stroje jsou porovnány v tabulce. Mezi stroji jsou velké rozdíly v ceně, ve velikosti pracovního prostoru, počtu pohybových os i typu aditivních a přídatných technologií. Všechny stroje umožňují obrábět, to v tabulce není uváděno.

Srovnání nám dopomůže k tomu, abychom si uvědomili, přibližně v jaké cenové kategorii se náš stroj nachází. Dále dokážeme určit trendy použitých technologií a konstrukcí strojů.

Tabulka 1: Porovnání hybridních strojů

| Zařízení | Cena [Kč] | Pracovní prostor [mm] | Pohybové osy | Aditivní technologie | Další technologie |
|------------------------|---------------|-----------------------|--------------|---------------------------|--|
| Snapmaker 2.0 A350 | 57 000 | 495 × 506 × 580 | 3 | extruze materiálu – FFF | laserové řezání, gravírování |
| ZMorph VX | 63 000 | 235 × 250 × 165 | 3 | extruze materiálu – FFF | laserové řezání, gravírování, nanášení pasty |
| Integrex i-400 AM | 20–30 milionů | Ø 658 × 1519 | 5 | řízená energie natavování | laserové gravírování |
| Lasertec 65 DED hybrid | 22 000 000 | Ø 500 × 400 | 5 | řízená energie natavování | – |
| 5-axismaker | 145 000 | 400 × 400 × 400 | 5 | extruze materiálu – FFF | měřicí sonda |
| H5-400 | 356 000 | 416 × 186 × 375 | 3 a více | extruze materiálu – FFF | měřicí sonda |

V dnešní době je v prodeji mnoho druhů hybridních strojů, ať už se jedná o 3D tiskárny rozšířené o laser nebo drahé obráběcí stroje určené pro přesné obrábění a rozšířené o navařování kovového materiálu umožňující vytvářet komplexní drahé výrobky určené pro náročné průmyslové aplikace. Stroje se rozlišují zásadně v ceně, 3D tiskárny se pohybují zpravidla pod částkou sto tisíc korun, komplexnější stroje stojí stovky tisíc korun a obráběcí stroje až několik milionů korun. 3D tiskárny jsou zpravidla tříosé, zatímco obráběcí stroje zpravidla pětiosé. Přejít mezi nimi opět tvoří multifunkční

hybridní stroje, které mají tři až pět pohybových os a zpravidla nabízejí i nějaké funkce nebo technologie navíc.

Cena zařízení je převážně určena tím, jaké materiály je možné obrábět, s jakou přesností a jakým druhem aditivní technologie. Zatímco drahé hybridní obráběcí stroje jsou určeny pro přesnou výrobu ve výrobních podnicích, stroje na bázi 3D tiskáren mohou být určeny i pro jednotlivce jako hobby výroba.

4 Popis výchozího CNC stroje

Všechny následující informace této kapitoly jsou čerpány ze zdroje [9].

4.1 Konstrukce stroje

Jedná se o kartézský souřadnicový stroj o velikosti pracovní plochy $229 \times 234 \times 127$ mm.

Je sestaven z hliníkových profilů od firmy ITEM o velikosti profilu 8. Využívá kladičkové vedení, kde je jeden pár uložen excentricky a umožňuje vymezení vůle. Profily jsou spojeny pomocí šroubů a tvarových spojů.

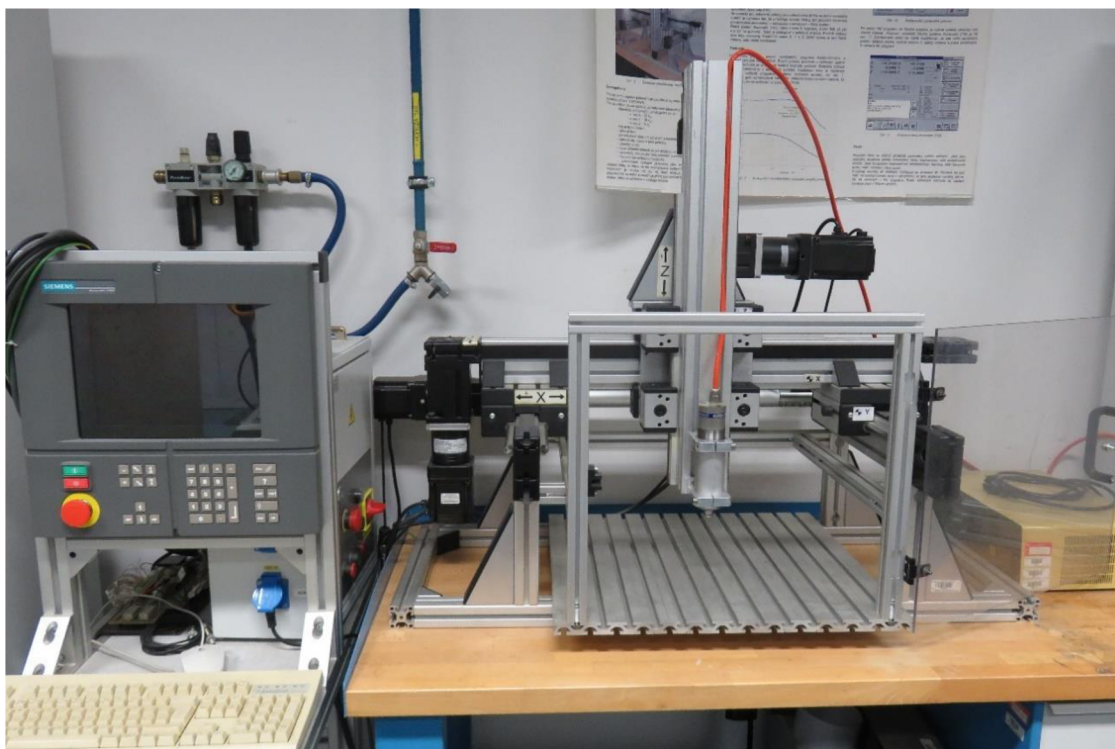
Byly zvoleny servopohony pohánějící ozubené řemeny pro pohon všech tří lineárních os.

Servopohony pro osu x a y: SGMPH04AAE41D od firmy YASKAWA [10].

Servopohon pro osu z je stejný jako u zbývajících os, pouze má navíc brzdu pro fixaci polohy. Jedná se o typ: SGMPH04AAE4CD.

Tabulka 2: Parametry servomotoru

| | |
|------------------|--------------|
| Výkon | 400 W |
| Krouticí moment | 1,27 Nm |
| Maximální otáčky | 3 000 ot/min |



Obrázek 7: Fotografie prototypu CNC stroje

Bylo zvoleno vysokofrekvenční elektrovřeteno od firmy IBAG typu HF 45.2 S 80 CP s výkonem 375 W. Obsahuje keramická ložiska s trvalou tukovou náplní bez vnějšího chlazení. Umožňuje upnout nástroje průměru 1 mm až 7 mm do kleštin typu ER11.

Součástí stroje je také měnič frekvence, který umožňuje plynule měnit otáčky vřetene v rozsahu 5 000 ot/min až 50 000 ot/min. Měnič je možné připojit k řídicímu systému stroje.

Součástí stroje je hliníkový pracovní stůl s T-drážkami, který slouží pro upínání obrobků pomocí upínek, svěráku nebo jiných upínacích přípravků.

4.2 Parametry pohybových os

Pro budoucí práci je dobré znát parametry pohybových os stroje. Do tabulky jsme zanesli nejdůležitější parametry stroje, jako jsou: opakovatelná přesnost polohování, tuhost všech pohybových os, jejich maximální rychlost a zrychlení.

Tabulka 3: Parametry pohybových os

| | | |
|---|-------|-------|
| Maximální posuv os [m/min] | 10 | |
| Maximální zrychlení [m/s ²] | 0,5 | |
| Přesnost polohování [mm] | osa x | ±0,08 |
| | osa y | ±0,04 |
| | osa z | ±0,04 |
| Tuhost os [N/μm] | osa x | 0,25 |
| | osa y | 0,14 |

4.3 Řídicí systém

Řídicím systémem stroje je Acramatic 2100. Tento systém je schopen řídit až pět souřadnicových os. Používá se pro řízení CNC obráběcích center.

4.4 Zhodnocení

Konstrukce stroje z hliníkových profilů je vhodná pro levnější zařízení, která nemají tak velkou hmotnost a tuhost, oproti jiným ráům jsou vytvořené například z oceli nebo litiny. Velká tuhost je potřeba zejména pro přesné obrábění, při kterém vznikají velké řezné síly. Pro naši aplikaci to není tolik potřeba, jelikož obrábění není určeno pro tak pevné materiály, kvůli tomu tak velké síly nevznikají. Při laserovém řezání a tisknutí nevznikají dokonce žádné odporové síly materiálu. Co se týče pracovního prostoru, stroj by se při porovnání s ostatními stroji dal zařadit do skupiny strojů s menším pracovním prostorem. Je určen pro menší výrobky do 20 cm na délku. Upínání obráběcích nástrojů do kleštiny ER11 je dostačující pro většinu obráběcích nástrojů, tato kleština je použita u většiny hybridních strojů zmíněných v rešerši.

Stroj nebylo možné spustit po několika letech nepoužívání, a to zejména kvůli řídicímu systému. Řídicí systém stroje je potřeba vyměnit za nový, aby bylo možné přidat nové periferie a jednoduše je ovládat. Program stroje je čten z disket, tento systém je už velice zastaralý a pro stroj se nehodí, je potřeba ho nahradit novějším. Volba nového řídicího systému a jeho instalace není předmětem této práce.

5 Rešerše technologií

5.1 Aditivní technologie

Technologie 3D tisku se řadí mezi aditivní technologie, to znamená, že výsledný 3D objekt je vytvořen postupně přidávanými vrstvami materiálu. K jeho zhotovení je potřeba vstupní digitální počítačový model. Na rozdíl od konvenčních technologií, kde je materiál odebírán od počátečního kusu materiálu, u aditivních technologií začínáme z ničeho. Materiál je tisknut ve vrstvách, které postupně vytváří výsledný objekt. Výška jednotlivé tisknuté vrstvy je rozdílná na základě druhu technologie a pohybuje se obvykle od několika mikrometrů až po 0,25 mm. V dnešní době lze použít široké spektrum materiálů.

První koncepty těchto technologií vznikaly koncem 19. století, kdy se objevovaly první metody ke zhotovení 3D map z topologických modelů terénu. Za začátek moderních aditivních technologií by se dal pokládat patent, který byl udělen v roce 1951. Patent může být považován za vznik moderní technologie stereolitografie, ta funguje na principu nanášení vrstvy fotopolymeru, který je následně vytvrzen na místech potřebných k vytvoření konečného modelu. Vzniklá vrstva je poté posunuta vertikálně a celý proces se opakuje [11].

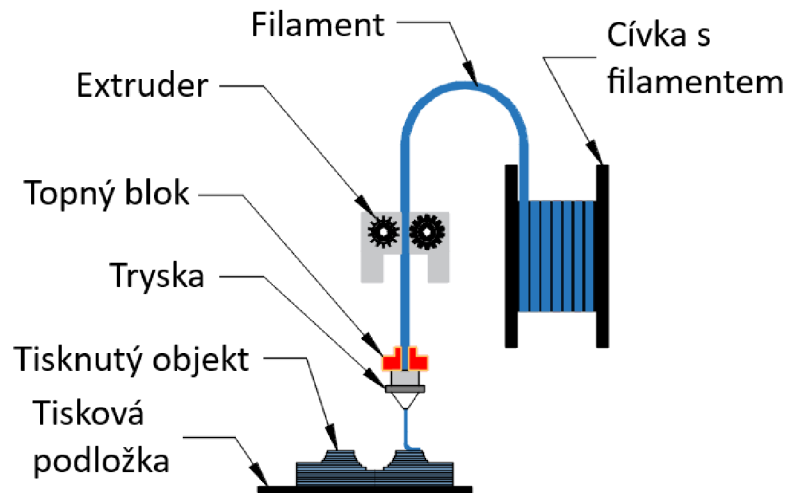
Za posledních několik let se aditivní technologie významně rozšířily a komerčně je nabízeno velké množství zařízení.

Dle normy ISO/ASTM 52900 se aditivní technologie rozdělují na sedm skupin: vytlačování (extrudování) materiálu, tryskání materiálu, tryskání pojiva, laminování deskového materiálu, fotopolymerizace, spojení prášku ve vrstvách teplem, řízená energie natavování [12].

Pro náš stroj je v kombinaci třískového obrábění nejvhodnější použít technologii vytlačování materiálu. Ostatní technologie jsou buď velice drahé, nebo vyžadují větší pracovní prostor.

5.2 Technologie FFF

Fused Filament Fabrication je technologie, při níž je termoplast ve formě tiskové struny, (tzv. filament) nataven pomocí tiskové hlavy, následně je tryskou vytlačován a tvoří jednotlivé vrstvy tištěného objektu. Pohyb tiskové hlavy nebo stolu zajišťují automaticky řízené pohybové osy stroje. Jedná se o jednu z nejrozšířenějších technologií 3D tisku, a to zejména díky nenáročnému procesu a levné konstrukci tiskáren.



Obrázek 8: Princip technologie FFF [13]

5.3 Tiskové hlavy pro 3D tisk

Tisková hlava neboli extruder se skládá z několika dílů, které slouží k vedení filamentu, jeho roztavení a vytlačení pomocí trysky. Filament je vtlačěn mezi ozubený pastorek a volně otočnou kladku. Tyto části jsou stlačeny pružinou. Pastorek je hnaný přímo krokovým motorem nebo přes převod ozubenými koly, pastorek se otáčí a posouvá tím filament do tiskové hlavy. Může také konat opačný pohyb, tím pádem je filament tažen zpátky a jedná se o retrakci. Retrakce je nutná při přejíždění míst, kde nechceme vytlačovat materiál z trysky. Filament je veden přes chladič do topného bloku. Chladič odvádí teplo, zmenšuje tak oblast mezi nataveným a nenataveným materiálem. Chladič bývá zpravidla vybaven ventilátorem. Na topném bloku je umístěno topné těleso, které blok vyhřívá, a termistor pro umožnění regulace teploty. Posledním článkem pro přesné vytlačení roztaveného materiálu je kuželová mosazná tryska s přesným výstupním průměrem. Záměnou trysek s jinými průměry je možné ovlivnit kvalitu a rychlost tisku [14].

Extrudery se rozdělují na přímé a bovdenové. Zároveň se vyskytují tiskové hlavy, které umožňují tisk ze dvou materiálů – tzv. duální extrudery.

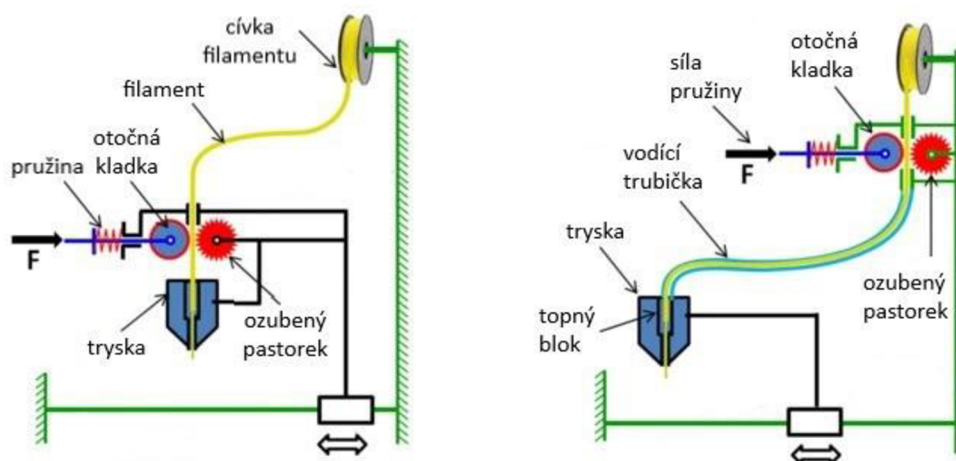
5.3.1 Přímé extrudery

U přímých extruderů dochází k tažení filamentu přímo před tryskou, všechny části jsou tedy uchyceny jako jeden celek. To má hned několik výhod, a to například: větší spolehlivost extruze, lepší schopnost retrakce, potřeba menšího krouticího momentu na motoru. Všechny tyto výhody jsou převážně díky zkrácené dopravní vzdálenosti filamentu. Poslední výhodou je možnost použití materiálů, které by u bovdenových extruderů nebylo možné použít, jedná se převážně o pružné materiály.

Mezi největší nevýhody tohoto konstrukčního uspořádání patří větší hmotnost, vznik vibrací a jejich přenos do trysky. Dalšími nevýhodami může být složitější údržba nebo horší přístupnost k tiskové hlavě [15].

5.3.2 Bovdenové extrudery

U bovdenových extruderů dochází k tažení filamentu ve značné vzdálenosti od trysky, filament je veden poddajnou trubičkou do trysky. Nejčastěji se používá teflonová trubička – kvůli jejímu nízkému koeficientu tření. Krokový motor s pastorkem je uchycen samostatně na rámu tiskárny, kvůli tomu tedy nedochází k přenosu vibrací do trysky, může se tak dosahovat vyšších přesností tisku. Poslední výhodou je menší hmotnost extruderu, díky které není při zrychlení potřeba překonávat tak velké dynamické síly [15].

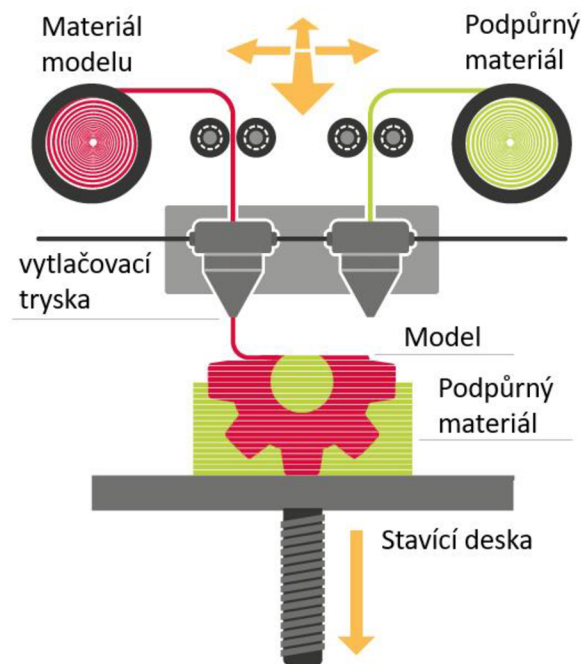


Obrázek 9: Srovnání přímého a bovdenového extruderu [15]

5.3.3 Duální extrudery

Jedná se o speciální přímý extruder se dvěma vstupy pro filament a dvěma vytlačovacími tryskami umístěnými paralelně vedle sebe. Najednou je vytlačován pouze jeden z materiálů. Využití toho můžeme pro dvoubarevný tisk nebo pro tisk rozpustitelných podpor pod tiskový model. Nevýhodou jsou větší rozměry hlavy, větší hmotnost a potřeba ohřívat dva materiály (ve většině případů pomocí dvou topných bloků). Jelikož se trysky u většiny těchto hlav nachází vedle sebe, pracovní prostor stroje je částečně omezen. Je také nutné seřadit trysky tak, aby byly stejně vysunuty ve vertikálním směru, jinak by mohlo dojít ke kolizi trysky.

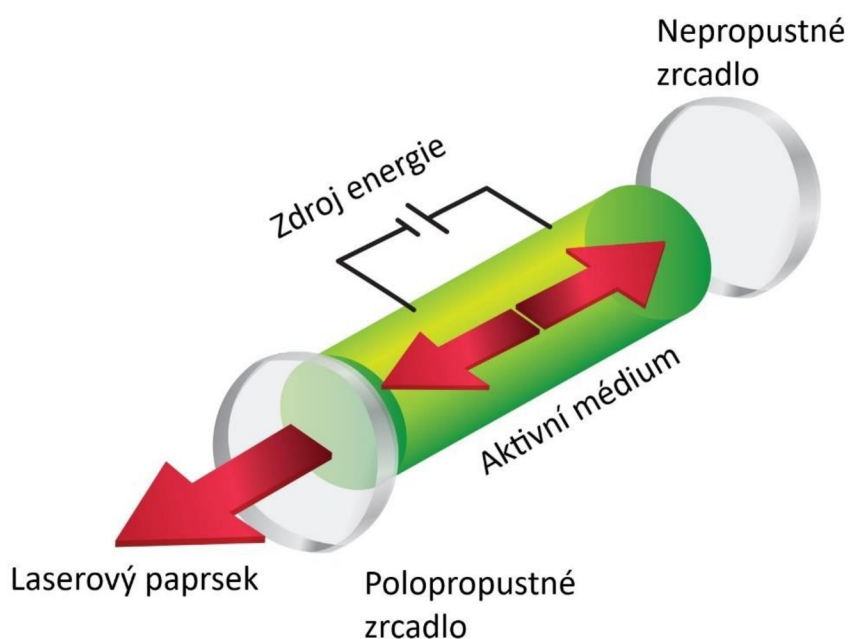
Existují i jiné konstrukce, kde se nachází dva vstupy pro materiál, ale dochází k vytlačování z jedné trysky a vyhřívání je dosaženo pomocí jednoho topného bloku. U těchto tiskových hlav je potřeba při změně materiálu část směsi vytlačit jako odpad, jinak by docházelo k míchání dvou jiných materiálů [15].



Obrázek 10: Princip tisku duální hlavou [16]

5.4 Laser

Laser je zařízení vyzařující paprsek elektromagnetického záření, který je opticky usměrňován. Jedná se o koherentní a monochromatické záření. Mezi základní komponenty patří aktivní médium schopné udržet stimulovanou emisi, zdroj energie, rezonátor. Rezonátor slouží k zesilování paprsku světla a dá se popsat jako optická dutina zakončená navzájem rovnoběžnými zrcadly, z nichž jedno je nepropustné a druhé částečně propustné. Princip laseru je založen na stimulované neboli vynucené emisi záření. Ta vzniká tím, že je elektron z atomu látky aktivního prostředí excitován na vyšší energetickou hladinu. Na této hladině se elektron neudrží a přeskočí na pracovní hladinu. Tento jev trvá přibližně jednu miliontinu sekundy a nastává při něm vyzáření fotonu. Dochází ke vzniku identických fotonů, které mají stejnou vlnovou délku a stejný směr [19].



Obrázek 11: Schéma principu laseru [17]

Lasery z hlediska aktivního prostředí rozdělujeme na: pevnolátkové, plynové a kapalinové. Mají mnohé využití v průmyslu, pro nás jsou důležité zejména díky technologii řezání a gravírování, těmito technologiemi se budeme dále zabývat.

5.4.1 Laserové řezání

Pro řezání materiálu využíváme výkonný laser. Materiál je pomocí fokusovaného laserového paprsku nataven a kompletně vypařen. Při procesu je nejčastěji foukán proud plynu po obvodu trysky, který zabraňuje vypařujícímu materiálu, aby se dostal do čočky nebo fokusačního zrcadla. Protože je roztavený materiál odfukován pryč, není potřeba natavovat tak velké množství materiálu, díky tomu se zvyšuje rychlost a kvalita řezu. Existují tři kategorie, jak zajistit pohyb paprsku vůči stolu či výrobku. Jedná se o fixní paprsek a pohyblivý stůl, fixní stůl a pohyb paprsku a poslední možností je pohyb stolu i paprsku. Obvykle proces využívá řídicí systém sledující CNC nebo g-kód vytvořený z obrysu CAD modelu vyřezávané součásti.

Řezání vytváří kvalitní hrany a je možné dosáhnout povrchové drsnosti menší než 100 μm RMS. Tepelně ovlivněné oblasti jsou obvykle menší než 25 μm . Tloušťka laserového paprsku je obvykle pod 0,32 mm v průměru, ale je možné dosáhnout i tloušťky řezu 0,1 mm, to však také záleží na tloušťce řezaného materiálu [18].

5.4.2 Laserové gravírování

V průmyslu lze laser také využít pro gravírování. Je to proces, při kterém je materiál odpařován a tvoří trvalé hluboké stopy. Paprsek působí na oblasti velkým množstvím energie, díky tomu vytváří vysoké teplo k odpaření materiálu. Dochází k odstraňování vrstev materiálu a vytváření značek. Značky jsou tmavší, protože světlo je zachyceno v hlubokých štěrbinách.

Hloubka gravírování může dosahovat až 0,5 mm. Obvyklá rychlost je 50 cm/s. Používá se nejčastěji k vytvoření popisů, log, identifikátorů, sériových čísel nebo jiných grafických úprav. Je možné gravírovat téměř všechny druhy materiálu, ať už se jedná o oceli, hliníkové slitiny, dřevo, plasty či karton [18].

5.4.3 Druhy laserů pro řezání a gravírování

Z pevnolátkových laserů se pro strojní výrobu používají rubínové, neodmyové (Nd) a neodmyové yttrium-aluminium-garnetové lasery (Nd YAG). Z plyných laserů je zásadní zmínit lasery s oxidem uhličitým (CO₂), helium-neonové (HeNe) a argonové lasery (Ar).

Kovy a polymery mohou být řezány pomocí CO₂ laserů, ale pro dosažení lepší kvality je dobré použít pulzní lasery Nd-YAG. Ty se používají pro řezání kovů, a to včetně slitin mědi a žáruvzdorných materiálů až do tloušťky 10 mm.

Výkon CO₂ laserů se pohybuje od desítek až po tisíce wattů. Mají nejširší oblast využití v průmyslu, a to díky jejich aplikacím a rozsahu materiálů, na které mohou být použity. Zvládnou řezat měkké oceli do tloušťky 3 mm. Používají směs plynů oxidu uhličitého, dusíku a helia. Vlnová délka paprsku je 10,6 μm, kvůli tomu nejsou příliš vhodné pro řezání kovových materiálů, ty totiž mají velkou odrazivost vůči této vlnové délce světla.

Pro gravírování se dají použít Nd-YAG lasery, ale převážně se používají CO₂ lasery. Ty zpravidla posílají krátké laserové pulzy s energií okolo deseti joulů na jeden pulz. Jsou zejména výhodné pro gravírování nekovových materiálů. Pokud je potřeba hlubokého gravírování, jsou použity vysokovýkonné CO₂ lasery. Nd-YAG lasery se používají pro kovové materiály. Jsou vybaveny speciálním počítačem ovládaným zrcadlem pro vytvoření správného rozptylu paprsku. Optika gravírovacích laserů bývá chráněna proti vypařujícím se plynům vyměnitelnou skleněnou destičkou [18].

6 Volba periferií

6.1 Volba extruderu

Je nutno vybrat typ extruderu, který bude pro náš stroj výhodnější. Přímý extruder je oproti bodnovému univerzálnější, má lepší kontrolu filamentu, lze ho použít pro více druhů materiálů, ale má větší hmotnost a může přenášet vibrace z krokového motoru. Volíme přímý extruder, protože náš stroj má dostatečnou tuhost a dostatečný výkon servopohonů. Neměl by tedy být problém s vibracemi, nebo s nedostatečnou dynamikou

tiskové hlavy. Zároveň nechceme duální extruder z důvodu větších rozměrů, hmotnosti či omezení pracovního prostoru. Vybírat budeme z přímých extruderů, nejprve je porovnáme a následně zvolíme nejvhodnější pro naši aplikaci.

Tabulka 4: Srovnání tiskových hlav

| Název extruderu | Cena [Kč] | Max. teplota [°C] | Hmotnost [g] | Poznámka |
|---------------------------------|-----------|-------------------|--------------|--|
| E3D Hemera | 3 130 | 285 | 388 | |
| E3D Revo Hemera | 4 470 | 300 | 352 | Rychle vyměnitelné trysky |
| Diabase single flexion extruder | 3 066 | 300 | 347 | neobsahuje krokový motor |
| Kit DyzeXtruder GT + DyzeEND-X | 5 403 | 420 | 327 | |
| LGX ACE Mosquito Printhead | 6 635 | 450 | 300 | neobsahuje termistor, topné těleso, větrák |

Vytvořili jsme tabulku nabízených extruderů na trhu. Mnoho produktů nebylo přidáno k porovnání, protože jsou určeny jako výměnný kus pro určitý typ tiskárny a nedaly by se použít pro vlastní konstrukci, montáž na náš stroj by byla zbytečně komplikovaná. Porovnání proběhlo z hlediska použitelné maximální teploty, tiskového materiálu, hmotnosti a ceny. Ceny jsou do tabulky uvedeny z webů oficiálního výrobce. Některé z tiskových hlav jsou prodávány bez určitých komponent, protože jsou určeny pro rozšíření stávající 3D tiskárny. Tiskové hlavy, které jsou bez komponent, jsou uvedeny v poznámce tabulky.

Nejdůležitějším kritériem pro náš výběr je cena a maximální použitelná teplota tisku. Větší teploty tisku umožní používat více materiálů. Teploty nad 400 °C jsou určeny pro tisk speciálních inženýrských materiálů. Další rozhodující parametry není možné porovnat jednoduše v tabulce, jde například o rychlost výměny trysek, rozměry atp. Některé z těchto parametrů jsou uvedeny v poznámce tabulky a bude na ně brán zřetel při výběru nejvhodnějšího produktu. Rozměry tiskových hlav jsou důležité zejména kvůli tomu, že čím větší jsou, tím více omezují pracovní prostor stroje. Rychlá výměna trysky

je také důležitá vlastnost, ale není až tak zásadní, jelikož výměna trysky by neměla probíhat příliš často. Pravděpodobně k ní bude docházet před vložením tiskové hlavy do stroje.

Vybrali jsme tiskovou hlavu DyzeEND-X + DyzeXtruder GT. Tisková hlava je prodávána jako celek od firmy Dyze Design, je předem sestavena a není potřeba dokupovat další komponenty. Byla vybrána z důvodu přijatelné ceny a díky tomu, že má vysokou teplotou použití, přijatelné rozměry a nízkou hmotnost. S dodávaným topným blokem je možné dosáhnout teploty až 420 °C. Taková teplota dovoluje tisk široké škály materiálů. Při potřebě je možné pořídit nový topný blok s větším výkonem a dosáhnout až teplot 500 °C.

Více informací ohledně extruderu poskytuje příloha 1, ohledně hotendu příloha 2.



Obrázek 12: Tisková hlava DyzeEND-X a extruder DyzeXtruder GT [19]

6.2 Volba laseru

Pro náš stroj je potřeba pořídit takový laser, který bude umožňovat řezání a gravírování pro dřevo, plasty, karton a lehké kovy nebo tenké vrstvy kovů. Budeme vybírat laser s modrým spektrem, který má větší hodnotu vlnové délky, díky tomu se používá pro řezání a gravírování nekovových materiálů. Laser je nutné pořídit se všemi prvky, jako je napájecí zdroj, potřebné vodiče, chlazení, kabely pro zapojení, ochranné pomůcky.

Tabulka 5: Srovnání laserových hlav

| Název laseru | Cena [Kč] | Optický výkon [W] | Průměr paprsku [mm] | Hmotnost [g] | Poznámka |
|----------------------------------|-----------|-------------------|---------------------|--------------|---------------------------------|
| PLH3D-15W Upgrade kit for CNC | 55 150 | 15 | 0,18 | 790 | vysokotlaká vzduchová tryska |
| PLH3D-6W-XF+ Upgrade kit for CNC | 19 830 | 6 | 0,18 | 210 | |
| 10W Endurance laser PLUS | 16 430 | 10 | 0,1 | 595 | chlazení vzduchovým kompresorem |
| 10W Endurance laser | 8 718 | 10 | 0,1 | 216 | |

V tabulce vidíme, že vybrané laserové hlavy se cenově dost liší. Vybírali jsme hlavy s optickým výkonem okolo 10 W. Optický výkon je důležitým parametrem, ale nerozhoduje jednoznačně o efektivitě použití laseru. Záleží, na jak velkou plochu energie laseru působí. Zároveň je důležité, jak je laserová dioda chlazena, popřípadě jestli je vzduch přiváděn i k laserovému paprsku.

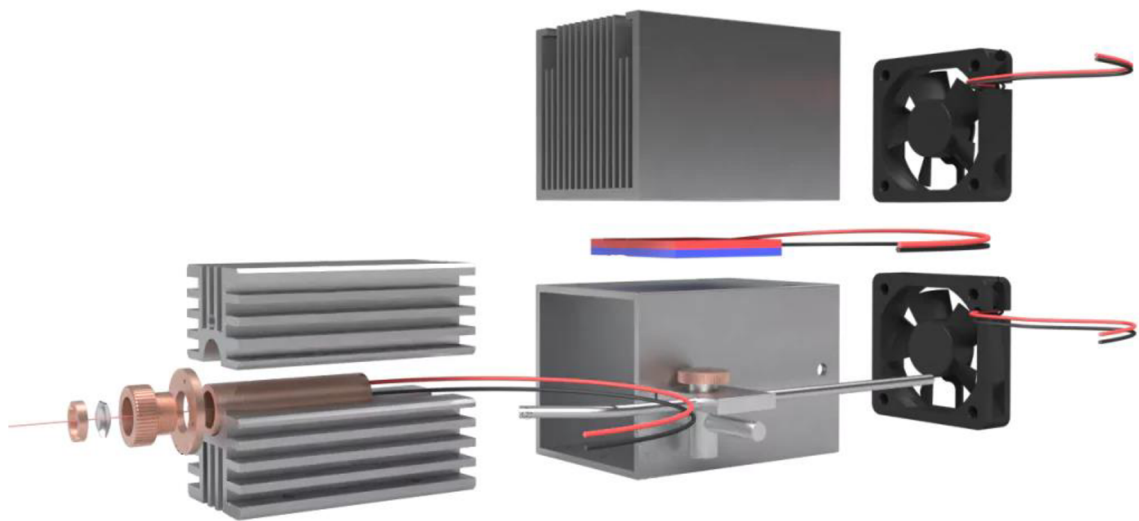
Vybrali jsme laserovou hlavu 10W Endurance laser PLUS. Součástí balení laseru je laserová dioda, ovládací kontrolní deska, napájecí zdroj, kabely pro zapojení, ochranné brýle, fixační laserové čočky, vzduchový kompresor, vzduchové hadice a vzduchová tryska.

Jedná se o laser vybavený vzduchovým kompresorem pro chlazení laserové diody i přívodu pro laserový paprsek. Určený je převážně pro gravírování materiálů, ale zvládne řezat dřevo, překližku, sklo, kůži, karton a většinu druhů polymerů. Gravírovat je možné dřevo, plasty, sklo, nerezovou ocel, měď, mosaz, eloxovaný hliník.

Laser je možné ovládat několika způsoby, jedním je zapnout laser na maximální výkon ručně pomocí tlačítka na ovládací desce. Druhý způsob umožňuje automatické zapínání a vypínání laseru řídicím systémem. Je potřeba připojit ovládací stejnosměrné napětí 12 V do ovládací desky a zapnout spínač určený k této funkci. Tento typ připojení budeme využívat. Poslední možností je úplné ovládání výkonu laseru pomocí rozhraní Arduino. Pro umožnění této funkce je možnost připojení přes microUSB port do ovládací desky.

Jedná se o bezpečnostní třídu laseru 4. U této bezpečnostní třídy hrozí poranění očí při pohledu na přímý nebo odražený paprsek, proto je nutné používat ochranné brýle. Laserový paprsek také nesmí přijít do kontaktu s kůží a obličejem. Dále může hrozit nebezpečí vzniku ohně. Je dovolené používat pouze dospělým osobám.

Více informací ohledně laserové hlavy lze nalézt v příloze 3.



Obrázek 13: Rozložený model laseru [20]

7 Konstrukce pro jednoduchou výměnu periferií

Pro jednoduchou a rychlou výměnu mezi jednotlivými periferiemi je potřeba navrhnout upínání. Upnutí musí být možné provést ručně a bez jakéhokoliv nástroje, nemělo by ovlivňovat tuhost nástrojů a zároveň musí být vypočítáno, že upínací síla je větší než maximální řezná síla, která vzniká při obrábění, popřípadě jakákoliv jiná odporová síla vznikající při technologiích.

Pro výměnu periferií byly navrženy dvě varianty, přičemž je potřeba rozhodnout, která je pro náš stroj vhodnější.

7.1 Řezná síla

Pro náš stroj byla řezná síla již zvolena konstruktérem v disertační práci [9]:

$$F_r = 100 \text{ N}$$

Tuto sílu budeme považovat za maximální řeznou sílu pro všechny osy. Je však nutné počítat s bezpečností upínacího mechanismu.

Minimální bezpečnost mechanismu volíme:

$$k \geq 1,2$$

7.2 Výpočet dynamických parametrů

Vřeteno má největší hmotnost ze všech periferií. Provedeme výpočet pouze pro případ upnutí vřetene, ostatní periferie budou vyhovovat.

Přibližná hmotnost vřetene s upínací deskou je: $m_v = 1,068 \text{ kg}$. (Získáno ze softwaru Autodesk Inventor.)

Hmotnost z důvodu bezpečnosti navýšíme na hodnotu $m_v = 2 \text{ kg}$.

Pro výpočet použijeme maximální hodnotu zrychlení všech tří os.

$$a_x = a_y = a_z = 0,5 \text{ m/s}^2$$

Nejprve spočítáme celkové zrychlení ze všech tří os najednou.

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} = \sqrt{0,5^2 + 0,5^2 + 0,5^2} = 0,866 \text{ m/s}^2 \quad (1)$$

Dynamická síla při maximálním zrychlení

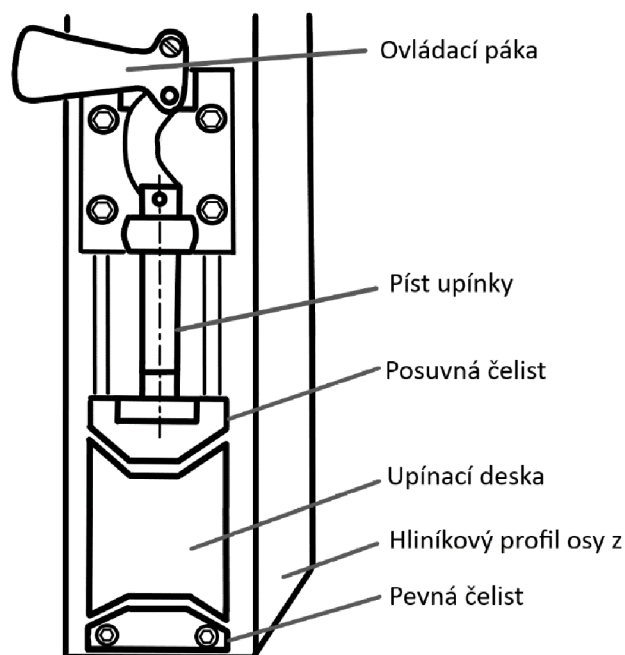
$$F_d = m_v \cdot a = 2 \cdot 0,866 = 1,732 \text{ N} \quad (2)$$

Při rychloposuvu všech tří os bude vřetenem působit dynamickou silou $F_d = 1,7 \text{ N}$ proti stroji. Směr této síly získáme vektorovým součtem jednotlivých sil, které vznikají proti směru pohybu v jednotlivé ose. Působíště této síly je v těžišti upínací soustavy a vřetenem.

Síla je přibližně padesátkrát menší než řezná síla, která vzniká při obrábění. Není potřeba počítat, jestli upínací soustava tuto sílu vydrží, v následující kapitole bude dimenzována pro větší – řeznou sílu.

7.3 Varianta 1

U této varianty je nástrojová periferie přišroubována k hliníkové upínací desce. Pro upnutí je nutno desku přiložit na hliníkový profil osy z, nad pevnou čelist, která je přišroubovaná k profilu. Nad naší deskou se nachází posuvná čelist na T-drážkách a při otočení ovládací páky dojde k jejímu utažení. Styková plocha čelistí je pod úhlem tak, aby při utahování došlo k zaklínění upínací desky do přesné polohy a nemohlo dojít k jejímu vysunutí.



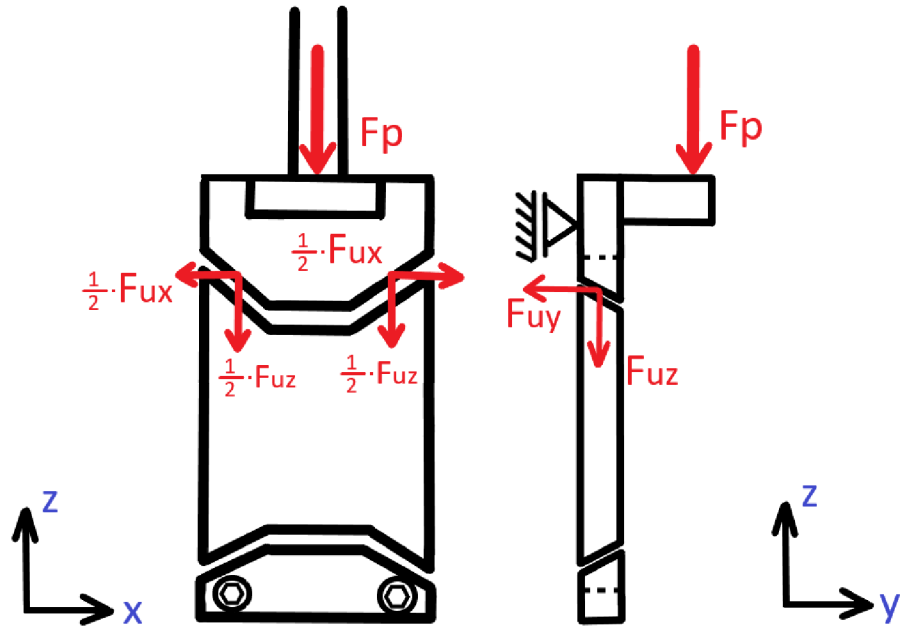
Obrázek 14: Princip upínání – varianta 1

Upínací páku nakupujeme od firmy JC-METAL [21]. Jedná se o rychloupínací přímou páku typu 305.

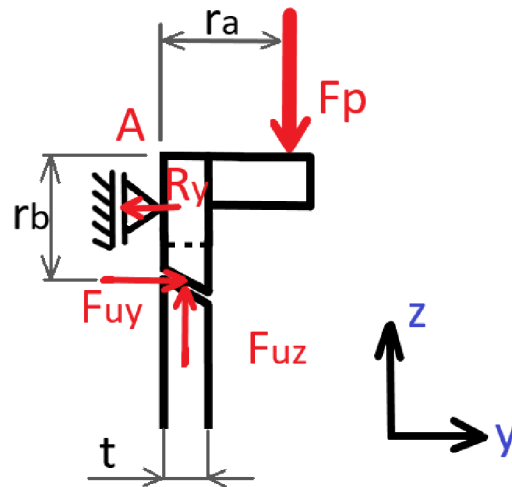
Síla upínací páky dle výrobce je: $F_p = 400 \text{ N}$.

7.3.1 Výpočet upínací síly

Abychom zjistili upínací síly v jednotlivých směrech, bylo nutné uvolnit horní dorazovou čelist ze sestavy a zatížit ji vnějšími silami, poté využít podmínek statické rovnováhy. Jelikož je upínací deska středově souměrná a dolní čelist má stejné stykové plochy úloha je symetrická, a proto řešíme pouze horní polovinu. V dolní polovině jsou stejně velké síly, jen se jedná o síly reakční.



Obrázek 15: Silové poměry upínací čelisti



Obrázek 16: Silové poměry upínací čelisti rovina yz

Rozměry: $r_a = 15 \text{ mm}$
 $r_b = 28 \text{ mm}$
 $t = 8 \text{ mm}$

Rovnice rovnováhy:

$$y: \quad F_{uy} - R_y = 0 \quad (3)$$

$$z: \quad F_p - F_{uz} = 0 \quad (4)$$

$$M_A: \quad F_p \cdot r_a - F_{uz} \cdot \frac{t}{2} - F_{uy} \cdot r_b = 0 \quad (5)$$

Upínací síla v ose z:

$$F_{uz} = F_p = 400 \text{ N} \quad (6)$$

Upínací síla v ose y:

$$F_{uy} = \frac{F_p \cdot r_a - F_{uz} \cdot t}{r_b} = \frac{400 \cdot 0,015 - 400 \cdot \frac{0,008}{2}}{0,028} = 157 \text{ N} \quad (7)$$

Reakce rámu v ose y:

$$R_y = F_{uy} = 157 \text{ N} \quad (8)$$

Celková působící síla na upínací desku:

$$F_u = \sqrt{F_{uy}^2 + F_{uz}^2} = \sqrt{157^2 + 400^2} = 430 \text{ N} \quad (9)$$

Bezpečnost upnutí v ose y:

$$k = \frac{F_{uy}}{F_{\check{y}}} = \frac{157}{100} = 1,57 \quad (10)$$

Bezpečnost upnutí v ose z:

$$k = \frac{F_{uz}}{F_{\check{z}}} = \frac{400}{100} = 4 \quad (11)$$

V ose z je upínací síla 4krát větší než řezná síla a v ose y je upínací síla 1,5krát větší než řezná síla. Poslední osa x je mechanicky zajištěna čelistmi proti vypadnutí upínací desky. Čelisti jsou přišroubované k hliníkovému profilu osy z pomocí dvou šroubů M6 ke kamenovým maticím uvnitř T-drážky. Upínací mechanismus vyhovuje.

7.3.2 Kontrola na otláčení styčných ploch

Kontaktní styčná plocha: $S = 150,7 \text{ mm}^2$ – změřeno v CAD softwaru Autodesk Inventor

Dovolený tlak: $p_D = 30 \text{ MPa}$

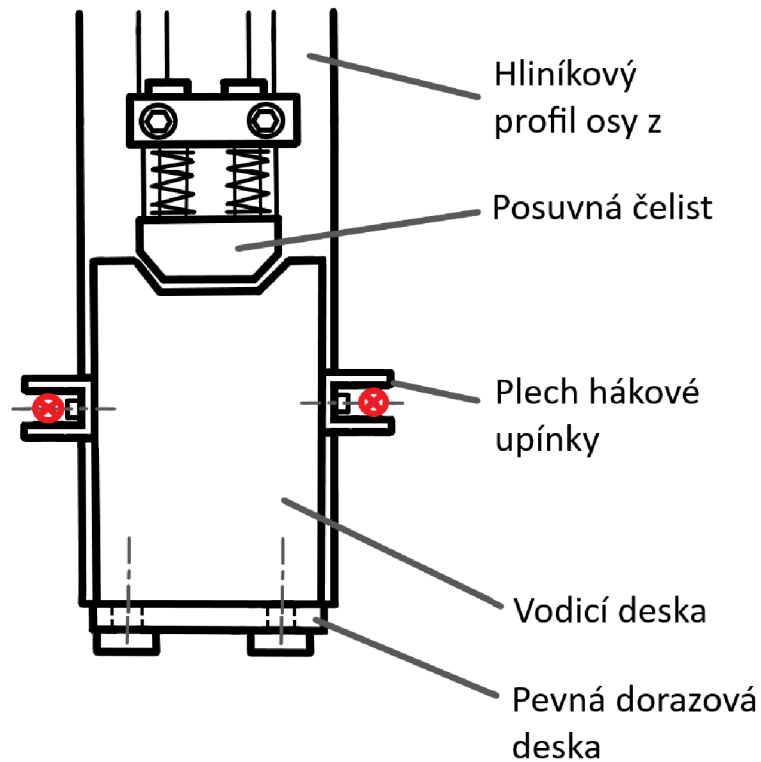
$$p = \frac{F_u}{S} = \frac{430}{150,7} = 2,85 \text{ MPa} \quad (12)$$

Otláčení vyhovuje, skutečný tlak je menší než dovolený $p_D = 30 \text{ MPa}$.

7.4 Varianta 2

U této varianty máme periferie stejně jako u první varianty připevněné k upínací hliníkové desce. Pro přesné upnutí nástroje slouží dolní dorazová deska, která je napevno přišroubovaná k hliníkové ose z. Horní doraz je posuvný s tlačnými pružinami a slouží pouze pro vycentrování vodící desky do přesné polohy.

Upínání je provedeno horizontálně z obou stran dvěma kloubovými pákami. Každá páka vytváří tahovou sílu ve směru y, dochází tedy k tažení vodící desky k hliníkovému rámu.



Obrázek 17: Princip upínání – varianta 2

Jedná se o hákové upínky od firmy JC Metal typu 410 [22].

Síla jedné hákové upínky je $F_p = 1\,500\text{ N}$.

U této varianty se jedná o normálovou sílu: $F_p = F_N = 1\,500\text{ N}$.

7.4.1 Výpočet upínací síly

Upínací síla v ose y:

$$F_{uy} = 2 \cdot F_N = 2 \cdot 1500 = 3000\text{ N} \quad (13)$$

V ostatních osách je upínací deska držena pouze pomocí třecí síly. Volíme součinitel smykové tření $f = 0,2$.

Upínací síla v ose x:

$$F_{ux} = 2 \cdot F_N \cdot f = 2 \cdot 1500 \cdot 0,2 = 600\text{ N} \quad (14)$$

Upínací síla v ose z:

$$F_{uz} = 2 \cdot F_N \cdot f = 2 \cdot 1500 \cdot 0,2 = 600 \text{ N} \quad (15)$$

Bezpečnost upnutí v ose y:

$$k = \frac{F_{uy}}{F_{\check{y}}} = \frac{3000}{100} = 30 \quad (16)$$

Bezpečnost upnutí v ose x, z:

$$k = \frac{F_{ux}}{F_{\check{y}}} = \frac{F_{uz}}{F_{\check{y}}} = \frac{600}{100} = 6 \quad (17)$$

V ose y je upínací síla 30krát větší než řezná síla, v ose x a z je upínací síla 6krát větší než řezná síla. Upínací mechanismus vyhovuje, bezpečnost v ose y je však až zbytečně velká, je použito silné upínací páky.

7.4.1 Kontrola na otláčení styčných ploch

Kontaktní styčná plocha: $S = 460,1 \text{ mm}^2$ – změřeno v CAD softwaru Autodesk Inventor

Dovolený tlak: $p_D = 30 \text{ MPa}$

$$p = \frac{F_{uy}}{S} = \frac{3000}{460,1} = 6,52 \text{ MPa} \quad (18)$$

Otláčení vyhovuje, skutečný tlak je menší než dovolený $p_D = 30 \text{ MPa}$.

7.5 Volba konstrukční varianty

Pro naši aplikaci volíme variantu číslo 1.

Jedná se o konstrukčně jednodušší řešení. Je potřeba méně nakupovaných i vyráběných dílů, díky tomu je i jednodušší montáž stroje. Výhodou je i snazší upínání periferií do stroje. Nevýhodou této metody je menší upínací síla. Tato síla je však dostatečná, jelikož největší síla počítaná pro tento stroj vznikající při obrábění je 1,5krát menší než upínací.

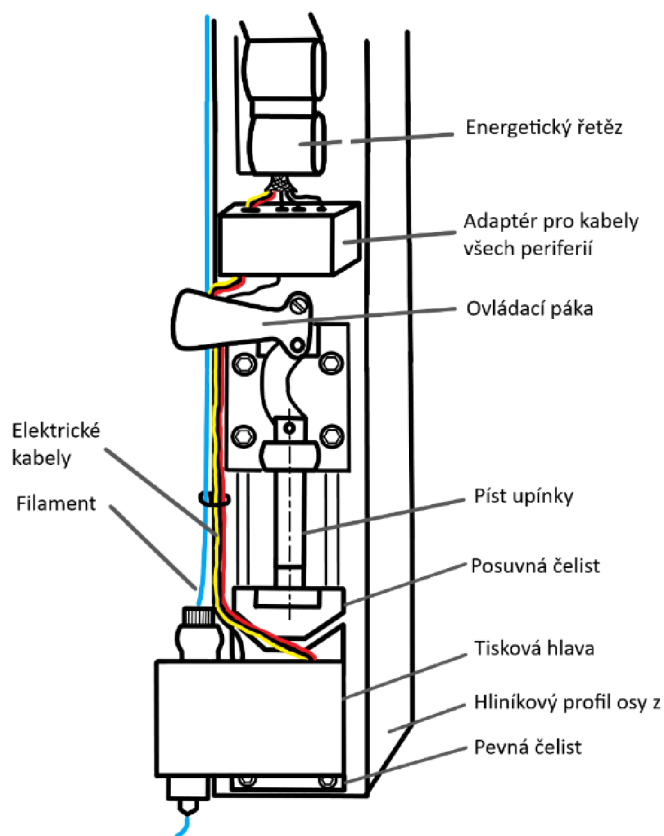
7.6 Možnosti zjednodušení zapojení kabelů

Při výměně periferií je potřeba přepojit jednotlivé kabely, které jsou pro každou periferii jiné. Aby bylo toto zapojení co nejjednodušší a nejrychlejší pro obsluhu, je potřeba ho zjednodušit. Kabely je nutné připojit do sběrné skříně stroje. Pro tiskovou hlavu je kabelů několik (u vřetena pouze jeden) a pro laserovou hlavu je potřeba zapojit jeden elektrický kabel a hadici pro vedení chlazení vzduchem.

Byly vytvořeny tři varianty pro zapojení kabelů periferií, každá z variant bude samostatně představena a jedna z nich zvolena.

7.6.1 Připojovací adaptér

Aby bylo umožněno rychlé zapojení připojované periferie, byla by všechna potřebná elektronická zapojení vedena nad periferií, kde by byl zřízen připojovací adaptér. Pomocí adaptéru by šlo připojit kabely z periferie přímo do pomocného adaptéru místo dlouhého vedení do stroje.



Obrázek 18: Koncept vedení kabelů stroje

Na ose z stroje by se využilo energetických řetězů, aby nedocházelo k deformaci kabelů. Celkově je tato metoda jednoduchá a levná pro realizaci, ale obsluze práci příliš neusnadní. Bude totiž nutné zapojovat velký počet kabelů, které je potřeba zapojit správně.

7.6.2 Připojení pomocí konektoru

Cílem této metody by bylo vytvořit jeden společný průmyslový konektor, který by měla každá z daných periférií a byla by zapojována do stejného konektoru umístěného na stroji. Každá periferie by zabrala na konektoru určitý počet pinů, při funkci jedné periferie by ostatní piny v danou chvíli nebyli pod elektrickým proudem. Je však nutné zjistit, jestli je možné takový konektor zakoupit, dále s kolika piny, pro jaký výkon, případně jestli by se musel vyrobit speciálně pro tuto aplikaci. Pro vedení kabelů by se využilo energetických řetězů, stejně jako u předchozí metody.

Tato metoda by přinášela výhodu velmi jednoduchého zapojení, nemohlo by dojít k chybě zapojení obsluhy a zrychlovala by celý proces výměny periferií.

7.6.3 Připojení při upnutí periferie

U této metody by se využilo konektoru z předchozí metody, avšak navíc by došlo k zapojení již při samotném upnutí periferie. Aby došlo k jednoznačnému zapojení obsluhou, bylo by využito mechanismu, který by správně navedl vodičí desku se sběrnici, a to například pomocí magnetu. Kabely by bylo nutné vést ze sběrné skříně až do hliníkového profilu, kde by byl ukotven konektor. Tato metoda je nejkomplikovanější ze všech zde uvedených, avšak kompletně zjednodušuje proces zapojení a zajišťuje eliminaci chyb ze strany obsluhy. Je nutné promyslet, zda je z konstrukčního hlediska tato možnost vůbec realizovatelná.

7.6.4 Výběr možnosti zapojení

Pro zrychlení zapojení a předejití problému při výměně periferie (a tedy i zapojování) je vhodné zhotovit společný průmyslový konektor. Konektor pro naši aplikaci se dá zakoupit a není třeba ho vyrábět. Z důvodu velkého počtu elektrických vodičů je, však průmyslový konektor veliký, a proto by jeho zabudování do hliníkového profilu značně komplikované. Vybrána je tedy metoda zhotovení společného průmyslového konektoru nad upínací pákou, do kterého budou výměnné periferie zapojovány. Kabely z něj budou vedeny do sběrné skříně stroje pomocí energetických řetězů.

Pro vybrání typu konektoru je potřeba spočítat potřebný počet pinů a výkon, který jím bude přenášen při každém zapojení. Zde je vypsán seznam vodičů od každé periferie, které je nutné zapojit.

Vřeteno

Sedmipólové kabelové zapojení: 3× fáze: $U=42\text{ V}$, $I=13\text{ A}$

1× uzemnění, 2× PTC termistor, 1× nezapojen

Celkový maximální příkon z katalogu: $P_{\max}=475\text{ W}$.

Tisková hlava

Všechny komponenty jsou napájeny stejnosměrným napětím $U = 24 \text{ V}$.

Krokový motor: 4pinový konektor DuPont, $P = 55 \text{ W}$

Ventilátor: 2pinový konektor Molex mini fit jr

Termistor: 2pinový konektor Molex mini fit jr

Topný blok: 2pinový konektor Molex mini fit jr, $P = 40 \text{ W}$

Celkový maximální příkon po součtu komponent: $P_{\max} = 120 \text{ W}$

Laser

Zdroj napětí: 2pinový, $U = 12 \text{ V}$, $I = 8 \text{ A}$

Signální kabel: 2pinový, stejnosměrné napětí $U = 12 \text{ V}$

Celkový maximální příkon: $P_{\max} = 120 \text{ W}$

Konektor

Minimální počet pinů: 21

Největší příkon při zapojení vřetena: $U = 42 \text{ V}$, $I = 13 \text{ A}$, $P_{\max} = 475 \text{ W}$

Využijeme průmyslový konektor z internetového obchodu SCHMACHTL. Výrobcem je firma Wieland Holding. Pro naši potřebu je nutné zakoupit tři vidlicové konektory a jeden zásuvkový konektor.

Jedná se o 25pólový konektor s ochranným vodičem. Jmenovité elektrické napětí konektoru je 250 V a jmenovitý proud 10 A. Jedná se o lisované připojení. Konektory jsou dodávány bez vodičů. Před objednáním tohoto průmyslového konektoru by bylo dobré kontaktovat technickou podporu internetového obchodu a ujistit se, že konektor je pro tuto aplikaci vhodný.

Více informací je možné nalézt na webu prodejce [23], [24].

| Horizontalní pohyb | | Vertikální pohyb | | | Kruhový pohyb | | Další pohyb |
|----------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|---|-------------|-------------|
| Samonosné | Kluzné | Zavěšené | Zavěšený | Čik-cak | "Sem a tam" | Nepřetržité | 3D |
| Max. dráha pojezdu | <input type="range"/> | <input type="text" value="0,2"/> m | Max. rychlost | <input type="range"/> | <input type="text" value="0,17"/> m/s | | |
| Max. hmotnost plnění | <input type="range"/> | <input type="text" value="0,2"/> kg/m | Max. zrychlení | <input type="range"/> | <input type="text" value="0,5"/> m/s ² | | |
| Max. teplota | <input type="range"/> | <input type="text" value="40"/> °C | Max. boční zrychlení (radiální) | <input type="range"/> | <input type="text" value="0"/> m/s ² | | |
| Min. teplota | <input type="range"/> | <input type="text" value="0"/> °C | Max. boční zrychlení (axiální) | <input type="range"/> | <input type="text" value="0"/> m/s ² | | |
| Max. hlučnost | <input type="range"/> | <input type="text" value="70"/> dBA | Čisté prostory | <input type="range"/> | ISO - třída 1 | | |
| Těsnost | <input type="range"/> | <input type="text" value="žádné"/> | Odolnost kabelů proti olejmům | <input type="range"/> | Nízký | | |

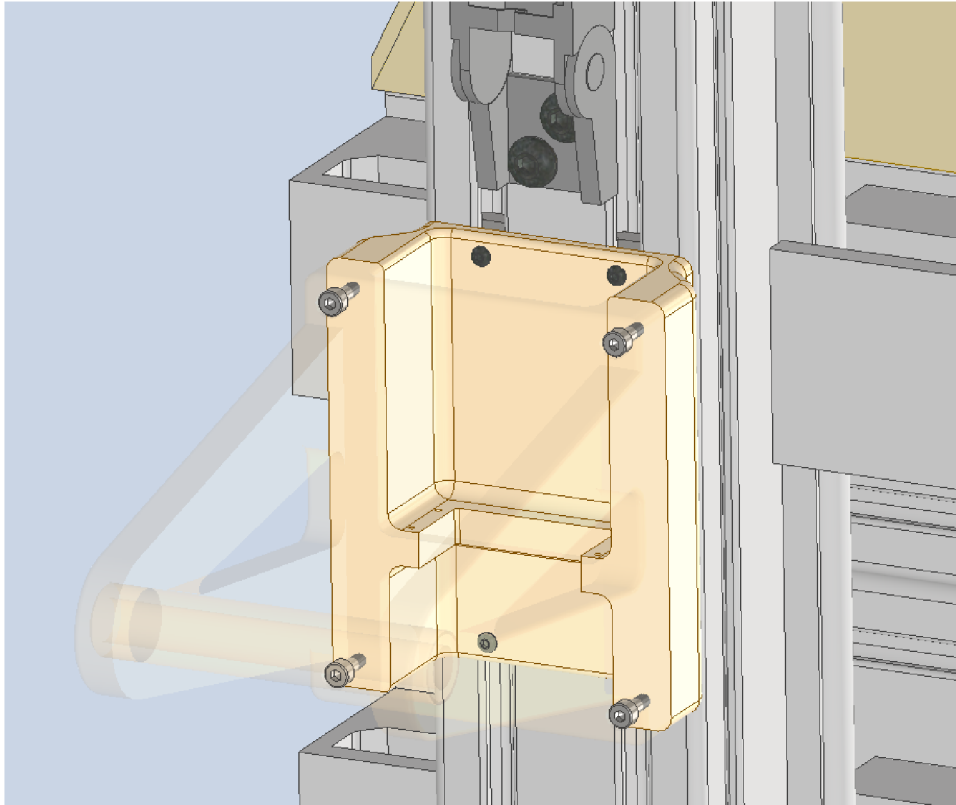
Obrázek 20: Vstupní parametry pro výběr energetického řetězu

Z deseti nabízených typů pro danou aplikaci byl zvolen nejlevnější typ řady E14.

Byl zvolen energetický řetěz E14.2.075.0 se sadou koncovek 114.2.12P.A4. Více informací lze nalézt na webu prodejce [25].

7.7.2 Kryt konektoru

Byl vytvořen kryt, do kterého jsou přivedeny elektrické vodiče z energetického řetězu. V krytu je našroubován vidlicový průmyslový konektor, do kterého bude napojen zásuvkový konektor z dané používané periferie.

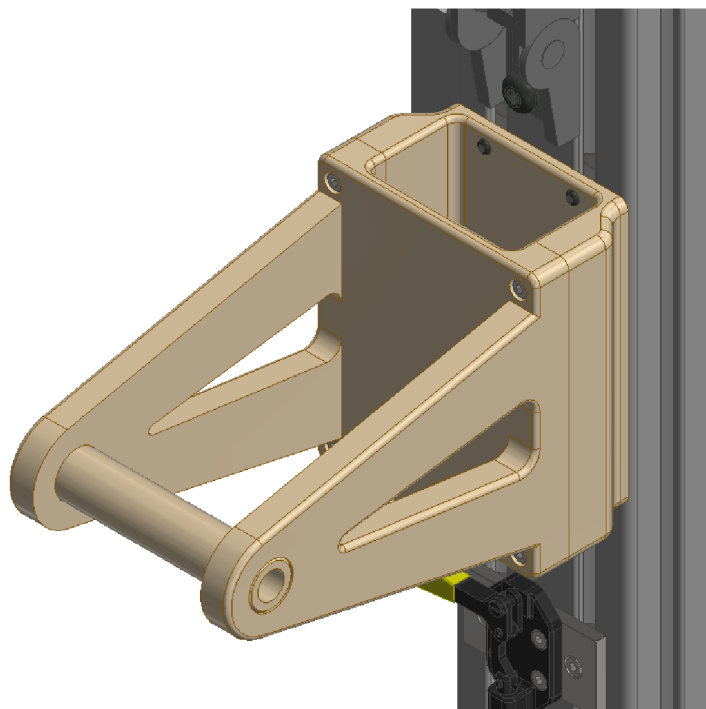


Obrázek 21: Model krytu konektoru

Kryt je tvořen z dvou částí, přičemž obě jsou vytvořené technologií 3D tisku z materiálu ABS. Tato technologie byla zvolena z důvodu levnější výroby při zachování složitého tvaru výrobku, a zároveň, protože na výrobek nejsou kladeny téměř žádné pevnostní nároky.

7.7.3 Držák cívky

Držák pro cívku s filamentem je vytvořen technologií 3D tisku a tvoří protikus krytu konektoru, díky tomu došlo k ušetření místa. Zároveň je jednoduché zapojit a přišroubovat potřebné elektrické vodiče, následně je zakrytovat tímto dílem. Je umístěný přímo nad upínací pákou, cesta vedení filamentu k tiskové hlavě je tedy krátká, což je výhoda. K uchycení cívky do držáku dojde pomocí plastové trubičky, která je vložena mezi dvě ramena držáku.



Obrázek 22: Držák cívky

7.7.4 Tiskový stůl

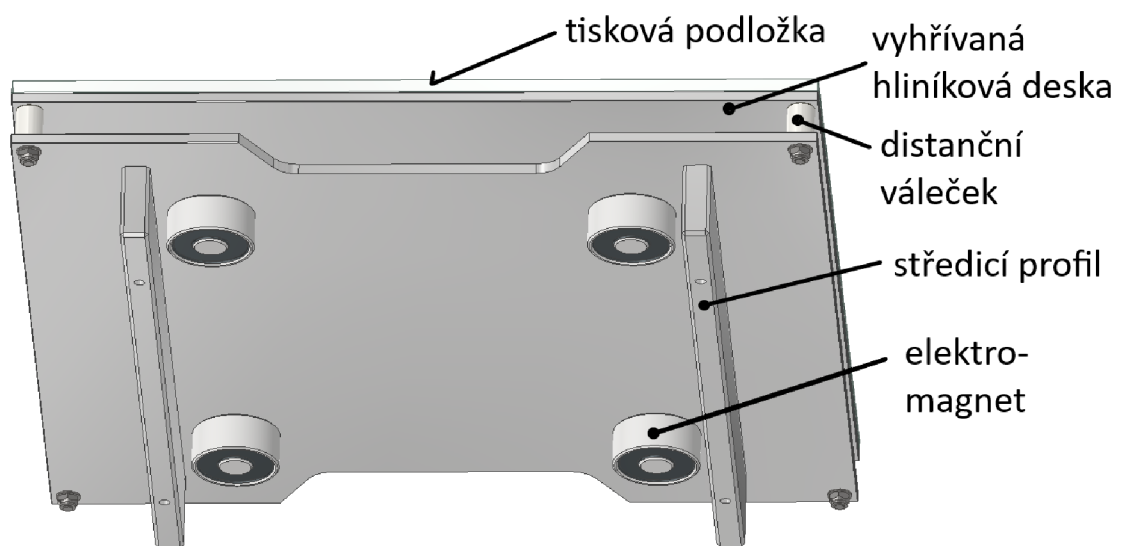
Je potřeba zajistit ohřev tiskové podložky nebo celého uzavřeného objemu pracovního prostoru. Díky ohřevu nedochází při vytlačování roztaveného materiálu k tak velkému ochlazení. Velké ochlazení při nanesení na tiskovou podložku způsobuje smrštění, které může mít za následek odlepení od podložky. Některé materiály mají velké smrštění a bez ohřevu podložky by jejich tisk byl téměř nemožný, dobrým příkladem je materiál ABS.

Pro náš stroj nám postačí zajistit tiskovou podložku s ohřevem. Stroj je možné kdykoliv v budoucnu rozšířit a vytvořit uzavřený objem, který napomáhá zajištění větší teploty v celém objemu, nejen pro několik prvních vrstev tisku.

Pro náš stroj používáme hliníkový stůl s drážkami T-profilu. Tento stůl se převážně hodí pro upínání obrobků. Naším úkolem je vytvořit vyhřívaný tiskový stůl, který bude možné jednoduše přimontovat a rozmontovat na původní stůl stroje.

Pro upínání využijeme čtyř elektromagnetů, každý elektromagnet je napájen stejnosměrným napětím 24 V. Při sepnutí spínače dojde k zapnutí elektromagnetů, přičemž každý z nich vytvoří přitlačnou magnetickou sílu 200 N. Protože se jedná o hliníkový stůl, který by nezajistil dostatečnou magnetickou sílu, bude do stolu v místech

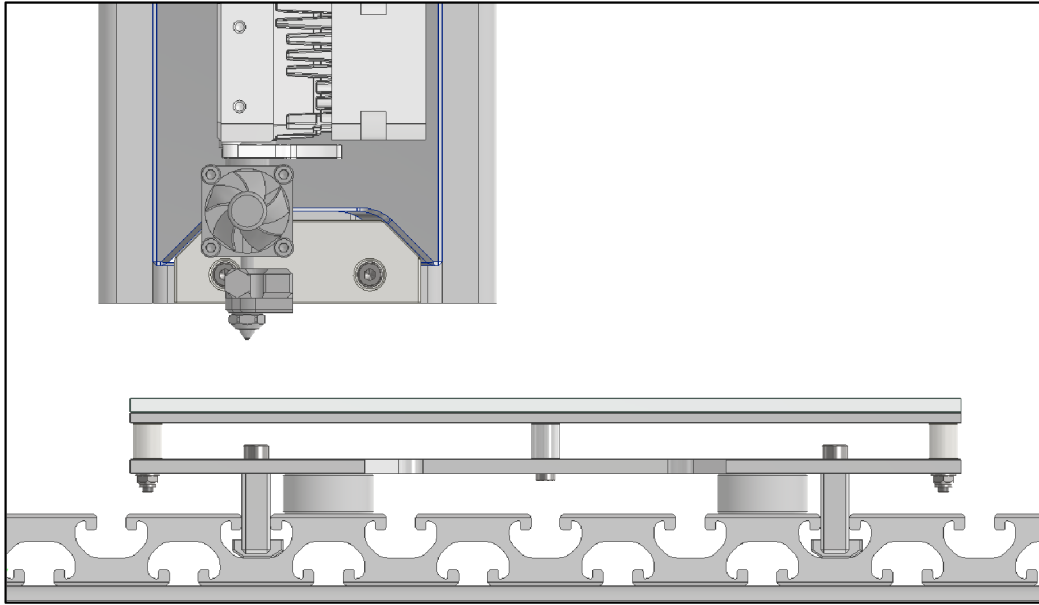
upínání navrtán ocelový leštěný kus. Pro tiskový stůl není potřeba zajistit velkou upínací sílu, jelikož při tisku materiálu nedochází k téměř žádným silám. Výhodou magnetů je, že vytvoří magnetické pole, namísto jedné nebo dvou upínacích sil. Při mechanickém upínání na jednom nebo dvou místech by mohlo dojít k deformaci stolu ve vzdálenosti od upínací síly, kvůli tomu by měl stůl menší tuhost. Aby bylo zajištěno dosažení opakované přesné polohy stolu při montáži, má stůl dva středící ploché profily, které je potřeba pro ustavení vsunout do T-drážek stolu. V T-drážkách stolu jsou zašroubované dva dorazy. Po vsunutí stolu do drážek až po dorazy je možné zapnout spínač pro vytvoření magnetických přitažlivých sil a stůl je zajištěn.



Obrázek 23: Model tiskového stolu

Stůl se skládá ze zakoupené vyhřívané hliníkové desky spojené s nosnou dolní hliníkovou deskou pomocí šroubů. Přesná vzdálenost mezi nimi je zajištěna pomocí šesti přesně vyrobených distančních válečků. Na spodní desku jsou přišroubované dva středící profily a přilepené magnety. Na vyhřívanou desku se pokládá poslední tisková podložka, na kterou je možné tisknout.

Tiskové podložky bývají skleněné, plastové nebo i jiné. Důležité je, aby na ně tisknutý materiál správně přilnul. Některé bývají upevněny magneticky, nemagnetické bývají upevněny pomocí jednoduchých sponek po obvodu.



Obrázek 24: Přední pohled – upnutí tiskového stolu

K vyhřívání desky dochází pomocí odporového topného článku. Na dolní straně hliníkové desky je navedený drátek po celé ploše desky. Přivedením elektrického napětí dochází k elektrickému odporu, tedy i vzniku tepla. Pro měření aktuální teploty desky používáme termistor, který většinou bývá navrtaný do hliníkové desky blízko jejímu středu.

Horní hliníková vyhřívaná deska je zakoupena od firmy RepRap [26]. Elektromagnety jsou zakoupeny od firmy Drátek.cz [27].

7.7.5 Stůl pro laserové řezání

Aby bylo možné bezpečně řezat materiály laserem a nedošlo k rozřezání pracovního stolu, je potřeba zakoupit nebo zhotovit stůl pro řezání. Při gravírování by k rozřezání pracovního stolu dojít nemělo, protože dochází pouze k odpařování určité hloubky materiálu na horním povrchu. Pokud dojde k chybě pracovní cesty laseru či určení špatné pozice výrobku, mohlo by nastat působení laseru na pracovní stůl, a proto bude lepší pro tento proces také využívat stůl pro laserové řezání.

Stoly pro laserové řezání se nejčastěji skládají z hliníkového rámu, který je spojen s plechovou výplní z galvanizované oceli. Je umožněno řezaný materiál položit na plechovou výplň a nehrozí u toho rozřezání žádné části stolu. Zároveň je uvnitř stolu zachycován prach z rozřezaného materiálu.



Obrázek 25: Stůl pro laserové řezání [28]

Stůl určený pro laserové řezání o rozměru 250 × 350 mm je zakoupen z internetového obchodu s příslušenstvím pro lasery Cloudray laser [28].

8 Souhrn použití stroje

V této kapitole bude zhodnoceno možné využití stroje z hlediska výrobních technologií, jejich rychlostí, možností kombinování a rychlostí přestavení mezi jednotlivými technologiemi.

Kompletně rozšířený stroj nyní umožňuje obrábět, vrtat a brousit materiály rychlostí:

40 cm³/min pro nekovové materiály,

10–20 cm³/min pro oceli,

60 cm³/min pro hliníkové slitiny.

Umožňuje tisknout vytlačováním (technologií FFF) materiály do teploty 420 °C. Příkladem jsou materiály: PLA, ABS, TPE, TPU, PVA, HIPS, PC, PET, PETG, NYLON, PEEK, PEI, materiály s kovovým plnivem či materiály s dřevěným plnivem. Rychlost tisku závisí na materiálu a velikosti průměru trysky, ale výrobcem udávaná rychlost je až 35 mm³/s při použití trysky o průměru 1,2 mm a materiálu PLA o teplotě 250 °C.

Poslední technologií je laserové řezání a gravírování. Vytvořili jsme tabulku materiálů, které je možné řezat a gravírovat, v tabulce je pro každý z nich uvedena tloušťka, počet opakování kontury a rychlost.

Tabulka 6: Parametry pro laserové řezání a gravírování

| Materiál | Řezání | | Gravírování [mm/min] |
|------------------|----------|-------------------------|----------------------|
| | Tloušťka | Počet opakování kontury | |
| nerezová ocel | – | – | 25–100 |
| měď/mosaz | – | – | 25–100 |
| hliník | – | – | 150–400 |
| přírodní kámen | lze | – | 150–400 |
| sklo | do 1 mm | – | 100–300 |
| kůže | 1–4 mm | 1–5 | 400–500 |
| papír | lze | – | 1000–1250 |
| tkanina | lze | – | 400–600 |
| plst' | lze | – | 400–600 |
| sololitová deska | 3–5 mm | 1–5 | 400–500 |
| karton | 4–5 mm | 1–5 | 500–1000 |
| PVC | 3–5 mm | 2–5 | 500–750 |
| ABC | 3–5 mm | 2–5 | 400–600 |
| PLA | 3–5 mm | 2–5 | 400–600 |
| plexisklo | 3–5 mm | 1–2 | 400–750 |
| dřevo | 3–5 mm | 1–3 | 400–750 |
| překližka | 8 mm | 3–10 | 400–750 |

Kombinace technologií

Některé kombinace po sobě jdoucích operací na stroji nelze provést na jedno upnutí, je nutné stroj kalibrovat, nastavovat nebo zaměňovat pracovní stoly, proto budou jednotlivé kombinace vysvětleny.

3D tisk a obrábění

Pokud chceme díl vytisknout a poté obrábět, je to možné, ale nelze to provést bez vyjmutí dílu z tiskového stolu a upnutí na obráběcí pracovní stůl. Vytisknutý díl na tiskovém stole drží adhezní silou, která není příliš velká, při obrábění by tak zcela jistě došlo k odtržení a případnému zničení výrobku.

3D tisk a řezání, gravírování

Pokud chceme vytisknutý díl následně řezat laserem, je potřeba díl oddělit od tiskového stolu a vložit na stůl pro laserové řezání. Při řezání na tiskovém stole by mohlo dojít k poničení či zničení tiskového stolu. Při tisknutí a následném gravírování je to vhodné udělat taktéž. Pokud by došlo k chybě programu či jinému důvodu pro vychýlení laseru mimo materiál, paprsek by mohl zničit tiskový stůl.

Obrábění a 3D tisk

Na obrobenu plochu je možné tisknout ihned po obrábění. Aby k tomu mohlo dojít, je však potřeba stroj náležitě uzpůsobit. Souřadný systém při nanášení vrstev bude posunutý, protože nebude tisknuto na tiskový stůl, ale přímo na upnutý obrobek. V řídicím systému je nutné přenastavit počátek tak, aby g-kód vytvořený ze softwaru fungoval, jak má. Je potřeba provést kalibraci tiskové hlavy a zaručit, že plocha, na kterou bude materiál nanášen, je kolmá na vodorovné osy stroje.

Obrábění a řezání, gravírování

Obrobený díl je možné řezat, pouze pokud je přemístěn na stůl pro laserové řezání. Oproti tomu gravírovat obrobek je možné přímo na pracovním stole. Když nastane chyba v programu, může dojít k vystavení laserového paprsku mimo výrobek, laser je však slabý na to, aby dokázal závratným způsobem stůl rozřezat. Tato možnost je tedy spíše ponechána na rozhodnutí uživatele.

9 Ekonomické zhodnocení

V této kapitole budou rozepsány ceny všech jednotlivých položek pro zhotovení rozšíření stroje. Jedná se o zakoupené a vyráběné díly. U vyráběných dílů bude cena stanovena přibližně, a to dle ceny materiálu a ceny výroby.

Celá konstrukce dle odhadu vyjde na 36 553 Kč. Nejdražšími položky jsou ty zakoupené, které vychází na 28 012 Kč, zatímco vyráběné díly vychází na 8 541 Kč. Vyráběné díly byly navrženy s ohledem na jednoduchost a levnou výrobu. Mezi výrazně nejdražší položku se řadí laser se všemi jeho komponenty. Pro výrazné zlevnění konstrukce by bylo možné zakoupit méně výkonný laser, který by dokázal materiál pouze gravírovat. Opuštěním od možnosti laserového řezání nebo kompletně od použití laserové periferie by se konstrukce zásadně zlevnila.

Tabulka 7: Ceny položek

| Zakoupené položky | počet [ks] | Cena [Kč] |
|---------------------------|-------------------|------------------|
| laser a příslušenství | 1 | 16 430 |
| tisková hlava a extruder | 1 | 5 403 |
| vyhřívaná hliníková deska | 1 | 1 786 |
| elektromagnet | 4 | 1 316 |
| rošt pro laserové řezání | 1 | 822 |
| energetický řetěz | 1 | 589 |
| zásuvkový konektor | 3 | 1 254 |
| vidlicový konektor | 1 | 412 |
| | | |
| vyráběné díly | počet [ks] | Cena [Kč] |
| horní čelist | 1 | 643 |
| posuvná deska | 1 | 610 |
| upínací deska | 3 | 2 243 |
| Stavící deska | 1 | 713 |
| středící profil | 2 | 750 |
| distanční váleček | 6 | 847 |
| kryt konektoru | 1 | 553 |
| držák cívky | 1 | 621 |
| trubička držáku | 1 | 250 |
| dolní čelist | 1 | 512 |
| upínací deska páky | 1 | 447 |
| spojovací materiál | 50 | 352 |
| Celkem | – | 36 553 |

10 Závěr

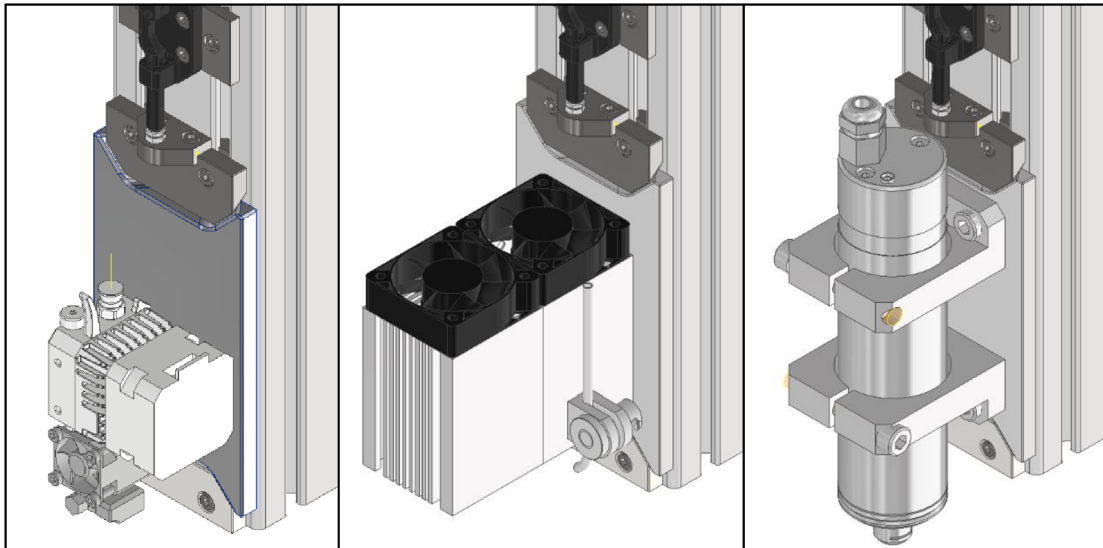
Naším úkolem bylo rozšířit prototyp CNC stroje o výrobní technologie a přizpůsobit stroj, tak, aby bylo jednoduché zaměnit nástrojové periferie.

V první řadě byla provedena rešerše strojů, které jsou nabízeny na trhu. Stroje byly rozděleny do kategorií a vybrané produkty byly popsány, porovnány byly i jejich technologické možnosti, cena a pracovní prostor. Dále jsme provedli rešerše technologií, které budou na stroj přidávány. Konkrétně se jedná o aditivní technologii vytlačování polymeru ve formě struny a technologii laserového řezání a gravírování. Byly vysvětleny a popsány technologické principy, a to zejména tak, abychom věděli, jaké druhy laseru a tiskové hlavy použít pro naši aplikaci. Nabízené produkty jsme porovnali v tabulkách, přičemž při výběru tiskové hlavy byl brán zřetel zejména na cenu, maximální teplotu tisknutého materiálu, hmotnost a provedení konstrukce. Při výběru laserové hlavy byl brán největší ohled na cenu, výkon laseru i na rozsah materiálového použití, rychlost řezání a maximální tloušťku řezaného materiálu.

Po výběru kupovaných periférií následovalo zhodnocení stavu a parametrů stroje, konkrétně se jednalo o přesnost, tuhost a dynamické parametry pohybových os. Díky tomu bylo možné si uvědomit, v jaké skupině strojů a cenové kategorii se přibližně bude stroj nacházet. Protože stroj pracuje na již starém řídicím systému Acramatic 2100, nebylo již možné stroj spustit. Aby stroj plnil správnou funkci, je potřeba nahradit stávající řídicí systém novým. Výběr a realizace řídicího systému však není předmětem této práce.

V konstrukční části byly zkonstruovány dvě metody pro upnutí desky s nástrojovou periférií. Tyto metody upínání byly vypočítány a jejich upínací síla byla navrhována s ohledem na maximální řeznou sílu. Poté došlo ke zhodnocení a výběru konstrukčně jednodušší a levnější varianty s optimální upínací silou.

Varianta využívá jednu upínací páku nad periférií, díky které je hliníková upínací deska sevřena do klínových čelistí. Hliníková upínací deska je pro všechny periferie stejná až na díry, které slouží k upnutí periferie. Deska je opatřena takovými zkoseními, aby nemohlo dojít k jejímu vysunutí nebo vytažení v žádném směru, zároveň je tím zajištěna jednoznačná pozice při upnutí.

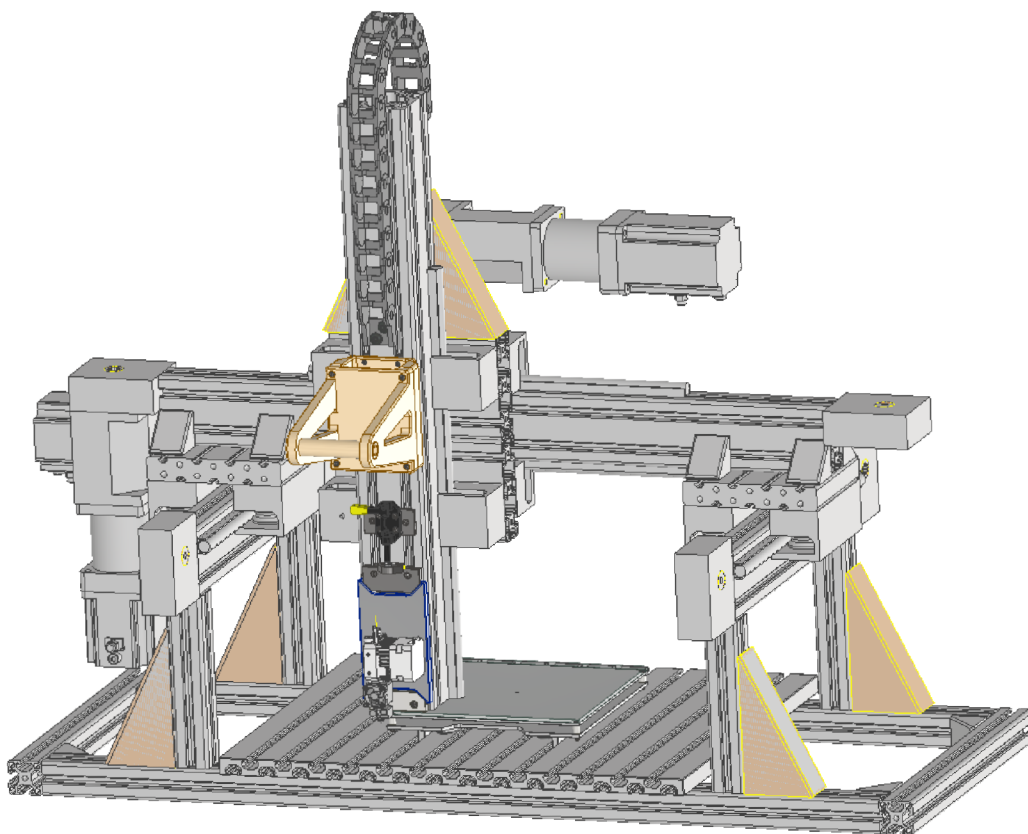


Obrázek 26: Upínání nástrojových periferií

V další části jsme řešili zapojení kabelů, které bylo potřeba zjednodušit tak, aby šlo rychle a jednoznačně zaměnit nástrojovou periferii stroje. Byly zváženy tři možnosti, jak dojít ke zjednodušení zapojení. Zvolena byla varianta připojení pomocí jednoho sdíleného průmyslového konektoru pro všechny tři periferie. Konektor splňující naše požadavky byl vybrán, konstrukce byla rozšířena o energetický řetěz a kryt průmyslového konektoru, kde budou všechny kabely vedeny.

Aby se na stroji daly provádět přidané technologie, byl stroj náležitě přizpůsoben. Na pracovní hliníkový stůl stroje byl vytvořen tiskový stůl se zakoupenou hliníkovou vyhřívanou deskou. Tiskový stůl je nasunut do T-drážek pracovního stolu a poté upnut pomocí čtyř magnetů rozmístěných po obvodu, ty zajišťují dostatečnou upínací sílu. Magnety jsou zapojeny do obvodu a ovládají se pomocí spínače. Následně byl vyroben držák pro cívku s filamentem. Zakoupil se plechový rošt pro laserové řezání a gravírování, který slouží k zachycení odpadového prachu a zamezuje odražení paprsku nebo zničení běžného stolu. Pro celou konstrukci byly zhotoveny modely v CAD softwaru s kompletní výkresovou dokumentací.

Pro celou práci a kompletní rozšíření CNC stroje bylo provedeno ekonomické zhodnocení. Výsledkem práce je návrh konstrukce multifunkčního stroje, který umožňuje technologii obrábění, 3D tisk, laserové řezání a gravírování.



Obrázek 27: Celá konstrukce stroje

Tato práce může pomoci zejména těm, kdo navrhují nebo rozšiřují hybridní CNC stroj, konkrétně například při výběru nakupovaných prvků, provedení upínání či realizaci kabelových zapojení.

Do budoucna by bylo možné stroj rozšířit o prvky jako je: snímač pro umožnění automatické kalibrace, měřicí dotykovou sondu, uzavřený objem tisku pro zlepšení kvality nebo o automatickou výměnu nástrojů. To by však bylo nutné posoudit po sestavení a zaběhnutí stroje, odzkoušení jeho funkčnosti, spolehlivosti a práci na něm.

Seznam použité literatury

- [1] SERTOGLU, Kubi. *Review: SNAPMAKER 2.0 – 3-IN-1 3D Printer with CNC and Laser Capabilities* [online]. 3D Printing Industry, 2021. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/review-snapmaker-2-0-3-in-1-3d-printer-with-cnc-and-laser-capabilities-192268/>
- [2] ALL3DP, *ZMorph VX Review: Best 3-in-1 3D Printer 2020* [online]. 2020 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/zmorph-vx-review-3d-printer-specs/>
- [3] 3Dnatives: *3Dnatives Lab, Testing the ZMorph VX 3D Printer* [online]. 2019 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/zmorph-vx-3d-printer-review-021020194/>
- [4] *Mazak Corporation* [online]. [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.mazakusa.com/machines/integrex-i-400am/>
- [5] *DMG MORI* [online]. [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/aditivni-vyroba/praskova-tryska/lasertec-65-ded-hybrid>
- [6] *5AXISMAKER* [online]. [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <http://www.5axismaker.com/5axis/>
- [7] 3Dnatives: *Hybrid 3D printers available on the market* [online]. 2020 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/hybrid-3d-printers-ranking-030920205/#!>
- [8] *Diabase engineering: 3D tiskárna H5-400* [online]. 2019 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://www.diabasemachines.com/hseries>
- [9] ZELENÝ, Petr. *Návrh a konstrukce prototypu víceúčelového CNC stroje*. Liberec, 2006. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [10] *Sigma II Servo System Product Catalog Supplement, elektronický katalog firmy YASKAWA* [online]. 2002 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.yaskawa.com/>

- [11] DIEGEL, Olaf, Axel NORDIN a Damien MOTTE. *A practical guide to design for additive manufacturing*. Singapore: Springer, [2020]. Springer series in advanced manufacturing. ISBN 978-981-13-8283-3.
- [12] KELLER, Petr. *Aditivní technologie: Úvod* (přednášky, podklad pro výuku předmětu Aditivní Technologie) [online]. In: Liberec: Technická univerzita v Liberci, katedra výrobních systémů a automatizace [cit. 2022-05-09].
- [13] 4.0 ANDCOM, *Princip technologie FDM* [online]. [cit. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://andcom.erasmus.site/3d-printing-as-an-adult-education-tool/>
- [14] STŘÍTESKÝ, Ondřej, Josef PRŮŠA a Martin BACH. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. Praha: Prusa Research, 2019 [cit. 2021-11-08]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
- [15] BOULAALA, Mohammed, Driss ELMESSAOUDI, Irene BUJ-CORRAL, Jihad EL MESBAHI, Omar EZBAKHE, Abdelali ASTITO, Mhamed EL MRABET a Abdelilah EL MESBAHI. Towards design of mechanical part and electronic control of multi-material/multicolor fused deposition modeling 3D printing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2020, 110(1-2), 45-55 [cit. 2022-05-19]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-020-05847-0
- [16] Ricoh: *technologie FDM duální extruder* [online]. [cit. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://rapidfab.ricoh-europe.com/technologies/fused-deposition-modelling/>
- [17] *Universal laser systems* [online]. [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.ulsinc.com/learn>
- [18] LUXON, J. T., D. E. PARKER a P. D. PLOTKOWSKI. *Lasers in Manufacturing: An Introduction to the Technology*. Berlin: Springer, 1987. ISBN 3-540-17427-3.
- [19] *Dyze Design: Tisková hlava DyzeEND-X a extruder DyzeXtruder GT* [online]. [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://dyzedesign.com/shop/kit/kit-dyzend-x-dyzextruder-gt-1-75mm-2/>
- [20] *Endurance lasers: An Endurance 10 Watt+ laser* [online]. [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://endurancelasers.com/diode-lasers/10watt-endurance-laser-plus/>
- [21] *JC-METAL: Přímá upínka 305* [online]. [cit. 2021-12-23]. Dostupné z: <https://www.jcmetal.cz/eshop/cs/prime-upinky/103-prima-upinka-305.html>

- [22] *JC-METAL: Háková upínka 410* [online]. [cit. 2021-12-23]. Dostupné z:
<https://www.jcmetal.cz/eshop/cs/hakove-upinky/69-hakova-upinka-410.html>
- [23] *Schmachtl: průmyslový zásuvkový konektor* [online]. [cit. 2022-04-24]. Dostupné z:
<https://www.schmachtl.cz/73-700-2553-0>
- [24] *Schmachtl: průmyslový vidlicový konektor* [online]. [cit. 2022-04-24]. Dostupné z:
<https://www.schmachtl.cz/73-710-2553-0>
- [25] *Igus: Energetické řetězy, řada E14* [online]. 2019 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z:
https://www.igus.cz/iPro/iPro_01_0009_0004_CZcs.htm?c=CZ&l=cs
- [26] *RepRap: Hliníková vyhřívaná deska* [online]. [cit. 2022-01-03]. Dostupné z:
<https://www.reprap.me/geeetech-230-230mm-4mm-superplate-black-glass-platform-aluminum-substrate-heatbed.html>
- [27] *Drátek.cz: Přidržený elektromagnet* [online]. [cit. 2022-04-21]. Dostupné z:
<https://dratek.cz/arduino/74545-pridrzny-elektromagnet-dc12v-20kg-200n-34x18mm.html>
- [28] *Cloudray laser: internetový obchod* [online]. [cit. 2022-04-20]. Dostupné z:
<https://www.cloudraylaser.com/collections/honeycomb-knife-working-table/products/cloudray-honeycomb-work-table-for-laser-engraver?variant=13048895930419>
- [29] ŘASA, Jaroslav a Josef ŠVERCL. *Strojnické tabulky 1: pro školu a praxi*. Praha: Scientia, 2004. ISBN 80-7183-312-6.
- [30] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky*. 5. vydání. Úvaly: Albra, 2011, 927 s. ISBN 978-80-7361-081-4.

Seznam příloh

Příloha 1: Technické parametry extruderu DyzeXtruder GT (5 listů)

Příloha 2: Technické parametry tiskové hlavy DyzeEnd-X (5 listů)

Příloha 3: Technické parametry laseru The Endurance 10 Watt+. (6 listů)

Příloha 4: Výkresová dokumentace (24 výkresů)

| | | |
|------------------------|-------------|------------------------------------|
| Seznam výkresů: | DP-00 | sestava – Hybridní CNC stroj |
| | DP-01-00 | sestava – Horní čelist |
| | DP-01-01 | výkres – Horní čelist |
| | DP-01-02 | výkres – Posuvná deska |
| | DP-02-00 | sestava – Upínání tisk. hlavy |
| | DP-02-01 | výkres – Upínací deska – tisk |
| | DP-03-00 | sestava – Tiskový stůl |
| | DP-03-00-SP | kusovník – Tiskový stůl |
| | DP-03-01 | výkres – Stavící deska |
| | DP-03-02 | výkres – Středící profil |
| | DP-03-03 | výkres – Distanční váleček |
| | DP-03-04 | výkres – Distanční váleček – závit |
| | DP-04-00 | sestava – Držák cívky |
| | DP-04-01 | výkres – Kryt konektoru |
| | DP-04-02 | výkres – Držák cívky |
| | DP-04-03 | výkres – Trubička držáku |
| | DP-05-00 | sestava – Dolní čelist |
| | DP-05-01 | výkres – Dolní čelist |
| | DP-06-00 | sestava – Upínání páky |
| | DP-06-01 | výkres – Upínací deska páky |
| | DP-07-00 | sestava – Upínání laser. hlavy |
| | DP-07-01 | výkres – Upínací deska – laser |
| | DP-08-00 | sestava – Upínání vřetene |
| | DP-08-01 | výkres – Upín. deska – vřeteno |