

Nástrojová hlava pro frézku na výrobu desek plošných spojů

Diplomová práce

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Konstrukce strojů a zařízení

Autor práce:

Bc. Stanislav Aleshin

Vedoucí práce:

Ing. Michal Moučka, Ph.D.

Katedra výrobních systémů a automatizace





Zadání diplomové práce

Nástrojová hlava pro frézku na výrobu desek plošných spojů

Jméno a příjmení: **Bc. Stanislav Aleshin**
Osobní číslo: S18000240
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukce strojů a zařízení
Zadávací katedra: Katedra výrobních systémů a automatizace
Akademický rok: 2019/2020

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se se způsobem výroby desek plošných spojů technologií třískového obrábění.
2. Analyzujte konstrukci hlavy frézky LPKF Protomat E33, kterou katedra disponuje.
3. Navrhněte konstrukci nástrojové hlavy se zpětnovazebním řízením její vzdálenosti od obráběného materiálu tak, aby byla dosahována požadovaná hloubka vrtu v případě vrtání a požadovaná šířka izolačního kanálu v případě frézování. To stávající frézka neumožňuje. Zamyslete se také nad možností řízení otáček nástroje. V návrhu zohledněte požadavek na automatickou výměnu a identifikace nástroje, odsávání odebraného materiálu.
4. Specifikujte vhodné automatizační prostředky – motory, senzory, řídicí elektroniku atd. Výběr konzultujte s vedoucím diplomové práce.
5. Návrh namodelujte a vypracujte nezbytnou výkresovou dokumentaci.
6. V případě, že budou dostupné finanční a časové prostředky návrh zrealizujte.

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

dle potřeby
cca 45 stran plus přílohy
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] CHVÁLA B., NEDBAL J., DUNAY G. Automatizace. Praha: SNTL Nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 80-03-00090-4.
[2] KLOBOUČEK J. Snímače v průmyslu (skriptum). Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012. ISBN 978-80-7372-828-1.
[3] MAREK J. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM Publishing, 2014. ISBN 978-80-260-6780-1.

Vedoucí práce:

Ing. Michal Moučka, Ph.D.
Katedra výrobních systémů a automatizace

Datum zadání práce:

4. března 2020

Předpokládaný termín odevzdání:

4. září 2021

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

Ing. Petr Zelený, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 4. března 2020

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.

31. května 2021

Bc. Stanislav Aleshin

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu této diplomové práce panu doktoru Michalovi Moučkovi za vedení mé práce, a především za cenné rady, které mi během psaní této diplomové práce velmi pomohly. Pan doktor Moučka mi vždy vyšel vstříc, a to i v čase jeho osobního volna. Dále bych rád poděkoval své rodině a svým přátelům, kteří mi také pomáhali a podporovali mě.

Tato práce byla [částečně] podpořena Studentskou grantovou soutěží Technické univerzity v Liberci v rámci projektu Optimalizace v oblasti výrobních systémů, 3D technologií a automatizace č. SGS-2019-5011.

TÉMA: **NÁSTROJOVÁ HLAVA PRO FRÉZKU NA VÝROBU DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ**

ANOTACE: Diplomová práce se zabývá návrhem nástrojové hlavy pro frézku na výrobu desek plošných spojů (DPS) s automatickou výměnou nástroje (AVN) a řízením její vzdálenosti, od obrobeneho materiálu. V první části se tato práce věnuje teorii desek plošných spojů, jejich konstrukci, materiálům, metodám výroby, existujícím řešením na trhu, servopohony a také problematikou automatické výměny nástrojů. V praktické části je zároveň proveden krátký rozbor nástrojové hlavy u stolní frézky od společnosti LPKF ProtoMat E33, která je k dispozici na katedře Technické univerzity v Liberci. Nakonec je představen vlastní návrh řešení, včetně AVN a výpočtů.

KLÍČOVÁ SLOVA: desky plošných spojů, automatická výměna nástrojů, třískové obrábění, fréza.

THEME: **TOOL HEAD OF A MILLING MACHINE FOR PRINTED CIRCUIT BOARD**

ABSTRACT: This master thesis deals with a tool head design of a milling machine for printed circuit boards (PCB) with automatic tool change (ATC) and control of its distance to the machining materials. The first part focuses on the theoretical framework related to the printed circuit boards, specifically, their construction, production methods, existing solutions in the market, servomotors, and the automatic tool changer issues. In practical part is followed by a short analysis of the tool head of the benchtop milling machine LPKF ProtoMat E33, which is available in the department of the Technical University of Liberec and presents a new design including ATC and calculation.

KEY WORDS: printed circuit boards, automatic tool change, machining, milling machine.

POČET STRAN: 67

POČET PŘÍLOH: 25

POČET OBRÁZKŮ: 40

Obsah

I	Teoretická část.....	13
1	Úvod.....	13
2	Desky plošných spojů.....	14
2.1	Rozdělení DPS dle konstrukce	15
2.1.1	Ohebné DPS.....	15
2.2	Neohebné desky	15
2.2.1	Jednovrstvé DPS	15
2.2.2	Dvouvrstvé DPS	16
2.2.3	Vícevrstvé DPS.....	16
3	Základní materiály DPS	17
3.1	Organicky základní materiál	17
3.2	Kompozitní základní materiály	18
3.3	Anorganické základní materiály	18
3.3.1	Keramické materiály	18
4	Metody výroby DPS.....	20
4.1	Subtraktivní technologie	20
4.2	Aditivní technologie	20
4.3	Semiaditivní technologie	20
5	Řešení existující na trhu	21
5.1	Třískové obrábění	21
5.2	Vytváření vodivých struktur pomocí laseru.....	22
5.2.1	LPKF – LDS®	22
5.2.2	ADDIMID.....	24
5.2.3	MIPTEC	24
5.3	Vytváření struktur pomocí tisku	25
5.3.1	Aerozol-Jet®.....	25
5.3.2	Inkjet	27
5.4	Vytváření vodivých cest pomocí plazmy.....	28
5.4.1	Flamecon®.....	28
5.4.2	Plasmadust®	29
6	Automatická výměna nástrojů.....	31
6.1	Nosné zásobníky	32

6.2	Skladovací zásobníky	32
7	Servopohony.....	34
7.1	Rozdělení servopohonů podle funkce.....	34
7.2	Rozdělení servopohony dle typu použitého motoru	34
II	Praktická část.....	36
8	Analýza současně používané nástrojové hlavy	36
9	Řezné podmínky.....	39
10	Nalisování hřídele	40
10.1	Výpočet nalisovaného spoje a okrajových podmínek.....	40
11	Ložiska	44
11.1	Kontrola životnosti ložisek	44
11.2	Určení optimální vzdálenosti ložisek.....	46
12	Upínací mechanismus	50
13	Upínání nástroje	52
14	Rotační mechanismus.....	53
15	Posuvný mechanismus	57
16	Spojovací kolíky.....	58
16.1	Vypočet parametrů mezi kolíkem, nábojem a hřídelem hnacího motoru	58
16.2	Vypočet parametrů mezi kolíkem, nábojem a centrálním hřídelem	59
16.3	Vypočet parametrů mezi kolíkem, hřídelem krokového motoru a hnacím ozubeným kolem 60	
17	Odsávání třísky.....	61
	Závěr.....	62
	Bibliografie.....	64

Seznam použitých obrázků

Obr. 1: Technologie pájení PHT [1].....	14
Obr. 2: Technologie pájení SMT [1]	14
Obr. 3: Ohebné DPS [3]	15
Obr. 4: Jednovrstvé plošné spoje [3]	15
Obr. 5: Dvouvrstvé plošné spoje [3].....	16
Obr. 6: Vícevrstvé plošné spoje [3]	16
Obr. 7: Typy používaných vrtáků a fréz [15]	22
Obr. 8: Rozdělení aktuálně používaných materiálů [19].....	22
Obr. 9: Aditivní aktivace povrchů laserem [19].....	23
Obr. 10: Proces vytvoření vodivé cesty technologií ADDIMID - bez vrstvy SiO ₂ , platí i pro LPKF-LDS® [20]	24
Obr. 11: Možností výroby vodivých cest technologie MIPTEC [22]	25
Obr. 12: Technologie Aerosol-Jet® s pneumatickým a ultrazvukovým atomizérem [25] .	26
Obr. 13: Kontinuální Inkjet a pulzní Inkjet [18].....	27
Obr. 14: Ukázka principu systému Inkjet využívající metodu řízeného dávkování inkoustu a) tepelný aktuátor b) piezoelektrický aktuátor [23]	28
Obr. 15: Princip technologie Plasmadust® [18].....	30
Obr. 16: Rozdělení typů zásobníků z hlediska přenosu sil a výměny nástroje [26].....	31
Obr. 17: Hlava frézky LPKF ProtoMat E33 [29]	36
Obr. 18: Vlastní návrh hlavy s AVN a odměřováním vzdálenosti v reálném čase	38
Obr. 19: Řezné podmínky ze softwaru Walter Machining Calculator [30].....	39
Obr. 20: Funkční rozměry hřídele v místě nalisování	41
Obr. 21: Průběhy napětí v hřídeli a náboji po nalisování [32]	41
Obr. 22: Tolerance jmenovitých průměrů součástí spojených nalisováním [32].....	43
Obr. 23: Schéma výpočtu reakcí v ložiskách	44
Obr. 24: Výpočtový model vřetene [34].....	46
Obr. 25: Průhyb vřetene zatíženého silou F za předpokladu, že ložiska jsou tuhá [34].....	47
Obr. 26: Průhyb vřetene za předpokladu, že ložiska jsou poddajná a vřeteno tuhé [34]	47
Obr. 27: Závislost deformace vřetene na vzdálenosti ložisek	49
Obr. 28: Silové a momentové poměry svěrného spoje s kuželovou stykovou plochou při montáži [32].....	50
Obr. 29: Tremba HMA-2622d.002-24VDC [36]	51

Obr. 30: Silové a momentové poměry svěrného spoje s válcovou stykovou plochou [32]	52
Obr. 31: Sansor OD-Mini B100C50114 [37]	53
Obr. 32: Držák na laser SICK	53
Obr. 33: Rotační mechanismus	54
Obr. 34: ST2018L0804-B Stepper motor NEMA 8 [37]	54
Obr. 35: NORELEM: Spur gears in steel [39]	55
Obr. 36: CNC lineární pohon s krokovým motorem [40]	57
Obr. 37: Posuvná páka přivařená k tubusu	57
Obr. 38: Spojovací kolíky [32]	58
Obr. 39: 1 - Lineární pohon, 2 - Držák lineárního pohonu, 3 – Naváděcí kolík, 4 - Přítlačná deska, 5 – Odsávací zařízení	61
Obr. 40: Odsávací zařízení v detailu	61

Seznam tabulek

Tab. 1: Přibližné hodnoty součinitele tření f za klidu pro nalisovaný spoj [31]	40
Tab. 2: Doporučený koeficient bezpečnosti pro tažné materiály založený na mezi kluzu. [45]	40
Tab. 3: Hodnoty deformace ložisek a vřetene, jejich součet v závislosti na vzdálenosti ložisek	49
Tab. 4: Talířové pružiny DIN 2093 [35]	51
Tab. 5: NORELEM: Spur gears in steel [39]	55

Seznam použitých veličin

A	Integrační konstanta	[-]
B	Integrační konstanta	[-]
C	Dynamická únosnost	[N]
d	Průměr řezné částí nástroje	[mm]
d_p	Průměr kontaktní částí	[mm]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
F	Součinitel tření	[-]
F_c	Řezná síla	[N]
F_{M1}	Síla ve stykové ploše	[N]
F_{M2}	Síla ve stykové ploše	[N]
I	Kvadratický moment	[cm ⁴]
k_w	Koeficient bezpečnosti	[-]
L, l	Delka	[mm]
L_{h10}	Životnost ložisek	[hod]
M_k	Kroutící moment	[Nm]
p_{min}	Potřebný minimální tlak	[-]
R_e	Mez Kluzu	[MPa]
y_C	Optimální vzdálenost ložisek	[μ m]
$y_{Ložiska}$	Pružná deformaci	[μ m]
y_N	Deformace vřetene	[μ m]
y_P	Deformace ložisek	[μ m]
Δd_I^I	Pružná deformace	[μ m]
Δd_I^{II}	Pružná deformace	[μ m]
r_{1p}	Průměr nalisování	[mm]
ε_a	Součinitel trvání záběru	[-]
σ_{Dt}	Dovolené napětí	[MPa]
τ_s	Smykové napětí	[MPa]
Δd_{max}	Maximální přesah	[mm]
Δd_{min}	Minimální přesah	[mm]
μ	Poissonovo číslo	[-]
σ_r	Radiální napětí	[MPa]
σ_t	Tečné napětí	[MPa]

Seznam použitých zkratek

ATC	Automatic Tool Change
AVN	Automatická výměna nástrojů
CEM	Composite Epoxy Materials
CIJ	Kontinuální Inkjet
CNC	Computer Numerical Control
DoD	Pulzní Inkjet
DPS	Desky plošných spojů
FR	Fire Retardent
IR	Infračervené záření
LDS	Laser Direct Structuring
LED	Light-Emitting Diode
MID	Molded Interconnect Devices
Nd:YAG	Yttrium Aluminium Granátu, dopovaný ionty neodymu
NEMA	National Electrical Manufactures Association
PA	Pneumatický Atomizér
PCB	Printed Circuit Boards
PHT	Plated-Through Holes
PPA	Polyphthalamide
RTC	Robotic Tool Change
S	Shutter
SMT	Surface Mount Technology
T	Tryska
UA	Ultrazvukový atomizér
UV	Ultrafialové záření
VI	Virtuální Impactor
ZM	Základní materiál

I Teoretická část

1 Úvod

Žijeme v době, kde nás moderní technologie obklopují každý den a člověk si bez nich nedokáže představit svůj obvyklý život. Lidé, kteří žili před sto lety, si technologie dnešní doby ani nedovedli představit, což svědčí o neuvěřitelně rychlém vývoji. Elektronické přístroje nás obklopují naprosto všude. Doma, v autě, v práci a zkrátka jsou neodmyslitelnou součástí našeho života. Různá zařízení a jednotky jsou unikátní, nicméně mají jeden důležitý a společný základ a tím jsou desky plošných spojů neboli DPS. DPS jsou základním prvkem pro každý elektronický přístroj, protože díky nim můžeme vytvářet nové elektronické prvky. Na trhu existuje mnoho různých způsobů výroby DPS, které jsou také dále rozvedeny v této práci. Samotná výroba DPS je velmi náročná, jelikož musí být splněna řada vlastností ať už elektrických, mechanických nebo tepelných.

Hlavním cílem této diplomové práce je konstrukční návrh nástrojové hlavy s automatickou výměnou nástroje. Součástí tohoto návrhu je také systém odměřování skutečné vzdálenosti nástroje od povrchu obráběného materiálu, a to v reálném čase. Součástí tohoto návrhu je také systém pro odvod třísky, která při procesu obrábění vzniká. Celý konstrukční návrh by měl zároveň splňovat rozumnou ekonomickou náročnost, oproti existujícím řešením na trhu. Součástí této práce je také obecná teoretická rešerše na téma možností výroby DPS:

2 Desky plošných spojů

Desky plošných spojů (DPS, anglicky Printed Circuit Board – PCB), jsou základem všech elektronických přístrojů a jsou určeny k osazení elektronických komponent. Samotná deska je vyrobena z elektroizolačního materiálu nebo sklolaminátu s měděnými elektrickými spoji (cestami) a pájecími body, které jsou určeny pro montáž součástek. Vodivé cesty v DPS jsou vytvořeny za pomoci různých metod, které jsou detailněji rozebrány dále.

V dnešní době umožňují moderní technologie výrobu DPS z jedné, dvou, tří nebo i více vrstev. Při výrobě DPS musí být dosažena vysoká spolehlivost a funkčnost, která může být ovlivněna správným výběrem základního materiálu nebo technologickým procesem výroby.

Samotné komponenty lze umístit na desce v průchozích otvorech (technologie PTH) nebo na ploše desky (technologie SMT). Technologie umístění se od sebe liší jenom metodou pájení. U PTH technologie probíhá pájení na protilehlé straně, kdežto u SMT na straně umístění. [1]



Obr. 1: Technologie pájení PHT [1]

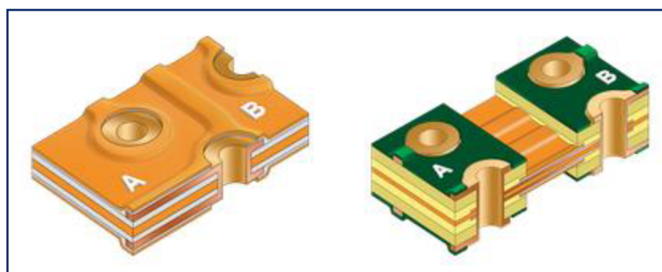


Obr. 2: Technologie pájení SMT [1]

2.1 Rozdělení DPS dle konstrukce

2.1.1 Ohebné DPS

Ohebné plošné spoje byly vyrobeny s cílem nahradit tradiční drátové kabeláže. Hlavní fundamentální výhodou těchto spojů je jejich ohebnost. Díky této základní vlastnosti umožňují ohebné spoje snadnější instalaci a servis, zvýšenou spolehlivost, úsporu hmotnosti a místa. Návrh ohebných spojů musí proběhnout s cílem zajistit vysokou spolehlivost bez poruch i při milionech ohybů, což je nezbytný předpoklad pro instalace v místech, kde nelze využít jiný typ DPS. Výhody ohebných desek byly poprvé využity v automobilovém průmyslu a nyní se využívají především jako náhrada za svazky vodičů nacházejícími se pod karoserií vozů. [2]

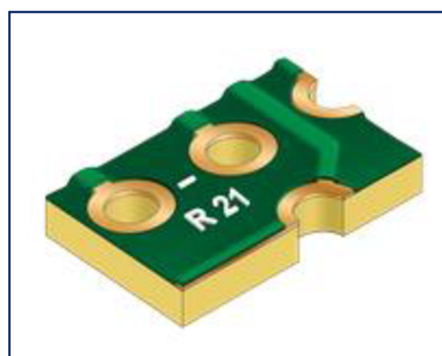


Obr. 3: Ohebné DPS [3]

2.2 Neohebné desky

2.2.1 Jednovrstvé DPS

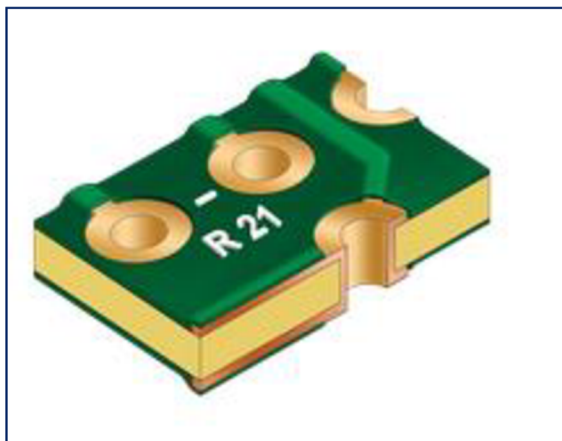
Nezákladnější plošné spoje, které mají elektronické součástky na jedné straně a na druhé straně mají vodivé cesty – spoje. Vzhledem k tomu, že je vodič jen na jedné straně nazývá se tento DPS jednostranný nebo jednovrstvý. Tento typ desky je vhodný pouze pro jednoduché obvody, protože spoje jsou jen na jedné straně, nelze je vést na straně druhé, a proto musí vést jen kolem sebe.[1]



Obr. 4: Jednovrstvé plošné spoje [3]

2.2.2 Dvouvrstvé DPS

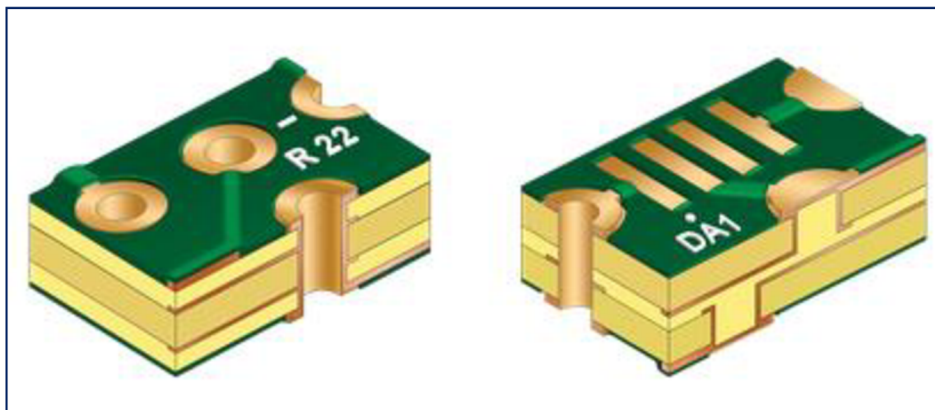
Dvouvrstvé (dvoustranné) plošné spoje jsou vhodnější pro náročnější obvody, protože mají dvojnásobnou plochu pro vedení spojů (cest) ve srovnání s jednovrstvými plošnými spoji. Dvouvrstvé desky mají vodiče na obou stranách a ty jsou spojené pokovenými otvory. [1]



Obr. 5: Dvouvrstvé plošné spoje [3]

2.2.3 Vícevrstvé DPS

Vícevrstvé plošné spoje mají jednu nebo více vnitřních vodivých vrstev. Toto je dosaženo slisováním jádra, měděných vrstev a izolačních prepregů. Počet vrstev se označuje jako počet všech motivů. Otvory ve vícevrstevných deskách jsou oboustranné, které proniknou celou deskou. Slepé otvory (blind vias) spojují jednu z vnějších vrstev s jednou nebo více vnitřními vrstvy. Ke spojení pouze vnitřních vrstev je vhodné využít tzv. pohřbených otvorů (buried vias). [1]



Obr. 6: Vícevrstvé plošné spoje [3]

3 Základní materiály DPS

Základní materiál (ZM) je charakterizován podle normy NEMA (National Electrical Manufactures Association). Tato norma charakterizuje základní laminát podle použitého substrátu a použitého typu pryskyřice.

Substrát, který se používá na zhotovení vodivého motivu, sloužícího k montáži elektronických součástek. Základní materiál může být různých rozměrů, tvaru a pružnosti. ZM pro desky plošných spojů můžeme rozdělit na organické, anorganické a kompozitní materiály.

DPS musí být odolné vůči teplotnímu, elektrickému, mechanickému a chemickému namáhání.

3.1 Organicky základní materiál

Organické základní materiály mohou být na bázi papíru, případně skleněné tkaniny s reaktoplastovou pryskyřicí, epoxidovou nebo fenolovou, které nejsou pružné.

Mezi hlavní výhody organických substrátů je jejich hmotnost a dielektrická vlastnost. Mezi zápory patří malá tepelná vodivost, velký součinitel teplotní roztažnosti a občasná navlhavost

FR-1 a FR-2 – obsahují jako základní složku celulósový papír nasycený fenol formaldehydovou pryskyřicí. Z angličtiny označení FR značí Fire Retardent, což znamená zpomalovač hoření. Rozdíl mezi deskami je v teplotě skleněného přechodu. Tyto materiály jsou určeny pro nenáročné aplikace. FR-1 a FR-2 jsou málo odolné proti vlhkosti a mají horší mechanické vlastnosti. [5]

FR-3 – obsahuje opět jako základní složku celulósový papír, oproti FR-1 a FR-2 je však nasycený epoxidovou pryskyřicí. FR-3 je vhodný pro náročnější aplikace. Materiál má lepší mechanické, elektrické a tepelné vlastnosti. [5]

FR-4 – základní složkou je skleněná tkanina nasycená epoxidovou pryskyřicí. Má dobré elektrické a mechanické vlastnosti, chemickou odolnost a je samo hasící. FR-4 lze použít pro teploty do 150 °C. [5]

FR-5 - je podobný jako FR-4, ale má lepší vlastnosti a je možné jej používat do teploty 180 ° C. [5]

3.2 Kompozitní základní materiály

Materiál pod názvem CEM1 (Composite Epoxy Materials) je kompozitní materiál, který je nejčastěji použit jako levnější náhrada za materiál FR4. Základ je tvořen z papíru nebo skleněné rohože CEM3, s přidavkem jedné vrstvy skleněné tkaniny. CEM1 nelze pokovovat. [4]

Desky vyrobené z kompozitních materiálu mají lepší elektrické a mechanické vlastnosti. V závislosti na tloušťce mají lepší odolnost v ohybu, lepší izolační vlastnosti a odolnost vůči vlhkosti. Mají vysoký izolační odpor a nízkou hořlavost. [5]

3.3 Anorganické základní materiály

Oproti organickým materiálům mají vyšší teplotní odolnost, díky tomu vydrží i teplotu výpalu tlustých vrstev. Na druhou stranu má tento typ nižší koeficient teplotní roztažnosti. Desky z anorganického materiálu jsou dražší, mají větší hmotnost, jsou křehké a mají rozměrová omezení. Některé materiály mohou být i toxické.

3.3.1 Keramické materiály

Tento typ materiálů se používá při výrobě zvláštních typů DPS se specifickými vlastnostmi. Nejčastěji jsou použity jako podložky pro tlusté vrstvy, jelikož mají vysokou teplotní odolnost a vydrží tedy výpal tlustých vrstev. Keramické materiály jsou velmi křehké, na druhou stranu mají však vysokou chemickou odolnost. V elektrotechnice se keramické materiály dělí na dvě skupiny podle relativní permitivity. Jestliže je hodnota vyšší než 12, používá se tento typ pro výrobu kondenzátorového dielektrika. Jestliže je nižší, používá se jako substrát. [4][6]

Keramické substráty můžeme rozdělit na 3 skupiny:

Korundová keramika – vyrábí se z oxidu hlinitého litím nebo válcováním jemných prášku oxidů kovů a skla. Korundové substráty mají poměrně vysokou tepelnou odolnost (přibližně 25 W/mK), dobrou mechanickou odolnost, tepelnou stabilitu a dielektrické vlastnosti. [4][6][7]

Beryliová keramika – vyrábí se z oxidu berylnatého. Tento typ materiálu má nejvyšší tepelnou vodivost (250 W/mK) a je proto vhodný pro výkonové obvody. Hlavní nevýhodou tohoto materiálu je jeho toxicita při výrobě. Má menší pevnost a je dražší než korundová keramika. [7]

Aluminium – nitridová keramika (AlN) – používá se jako substrát k beryliovému substrátu pro použití ve výkonových obvodech. Materiál má vyšší teplotní vodivost než korundová keramika (170 W/mK), má nízký koeficient teplotní roztažnosti, není toxický, má dobré elektrické a mechanické vlastnosti a je levný. [7][8]

4 Metody výroby DPS

V dnešní době se k výrobě desek plošných spojů používají tři druhy výrobních postupů.

- **Subtraktivní** – metoda spočívá v odstraňování zbytečné mědi leptáním
- **Aditivní** – metoda spočívá v nanášení vodivých cest
- **Semiaditivní** – kombinovaný postup subtraktivní a aditivní

4.1 Subtraktivní technologie

Subtraktivní metoda převládá ve světové výrobě DPS, kvůli její nízké ceně. Tento proces je založen na principu odebrání přebytečné mědi leptáním ze substrátu, přičemž vodivý motiv je chráněn leptuvzdorným rezistem. Subtraktivní technologie můžeme rozdělit na dva druhy:

- **Pattern platin (pokovení motivu)** – tato technologie je nejrozšířenější. Využívá se zde Sn, Sn/Pb nebo Al jako leptuodolné vrstvy. [9]
- **Panel plating (pokovení desky)** – před vyleptáním jsou otvory a vodivé cesty kryty fotorezistem. [9]

4.2 Aditivní technologie

Aditivní technologie je založena pouze na chemickém procesu a nevyužívá elektrického proudu. Proces leptání se v této technologii vůbec nevyužívá a odpadají tedy i veškeré nevýhody s ním spojené. Nejvíce se zde využívá tvrzený papír nebo sklolaminát, materiály jsou bez krycí vrstvy a jsou napuštěny palladiem. Hlavním rozdílem mezi aditivní a subtraktivní technologií je, že základní materiál je zpracován bez použití měděné fólie. Díky tomu nedochází k mechanické deformaci vyvolané vnitřním pnutím. [10]

4.3 Semiaditivní technologie

Semiaditivní technologie kombinuje subtraktivní a aditivní technologie. Je založena na principu pokovení vyvrtných otvorů i celého povrchu desky mědí. Následně dojde k vyleptání vodivého motivu za použití leptuodolné masky. Semiaditivní technologií lze vyrábět jednovrstvé, dvouvrstvé a vícevrstvé DPS. [11]

5 Řešení existující na trhu

Plošné spoje lze v dnešní době vytvořit jak ve formě desek (2D), tak i ve formě tvarovaného povrchu (3D). Molded Interconnect Devices (MID), neboli 3D plošné spoje, postupně nahrazují spoje deskové, z důvodů zmenšování rozměrů, snižování hmotnosti a z důvodu lepšího prostorového využití. Technologie pro výrobu MID lze využít také na výrobu DPS. Díky tomu lze říci, že na trhu existují 4 druhy metod výroby vodivých struktur.

- Třískovým obráběním
- Laserem (LPKF-LDP®, ADDIMID, MIPTEC)
- 3D tiskem (Aerosol-Jet®, Inkjet)
- Plazmou (Flamecon®, Plasmadust®)

5.1 Třískové obrábění

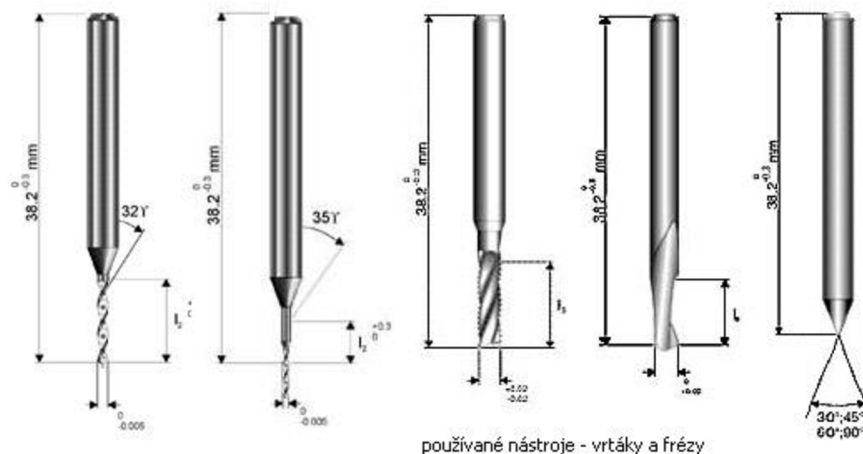
Frézka je ideální pro rychlou tvorbu prototypu desek plošných spojů. Stolní frézka na plošné spoje výrazně snižuje čas návrhu a vývojáři mohou desky vytvářet přímo na svém pracovišti. Díky tomu je možné projekty rychle dokončit a produkt uvést na trh. [12]

Hlavní výhoda stolní frézky oproti ostatním druhům je její cena, na druhou stranu je občas nezbytné po třískovém leptání využít chemického procesu leptání ke zlepšení kvality povrchu DPS:

Optimální podmínky při třískovém obrábění jsou dány výrobcem nástrojů. V závislosti na typu materiálu, průměru drážky nebo otvoru, musí být správně zvolena rychlost posuvu a otáčky, které výrobce nástrojů uvádí v rozmezí od 3000 do 100000 ot/min. Obecně platí pravidlo, že vrstva mědi by měla být odebrána během jedné otáčky. [13]

Při obrábění materiálu vznikají otřepy z obou stran DPS, tomu se dá zabránit použitím dalšího materiálu přiloženého k desce. Díky tomu, že jsou materiály dobře stlačeny k sobě, se minimalizuje riziko otřepu vrchních a spodních stran.

K nejnáročnějším operacím se používají nástroje s rychlořezné oceli, za podmínky, že víme správné parametry nastavení. Také je možné použít nástroje ze slinutého karbidu wolframu, které jsou méně citlivé na nesprávné nastavení. [13]



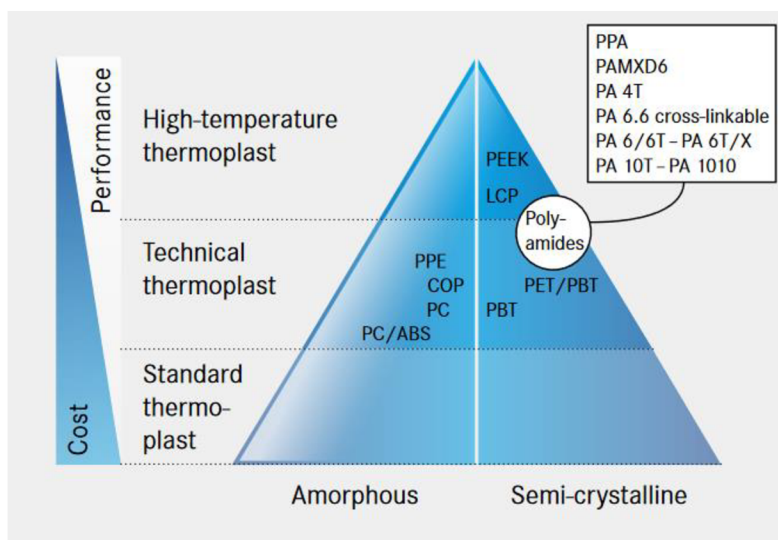
používané nástroje - vrtáky a frézy

Obr. 7: Typy používaných vrtáků a fréz [14]

5.2 Vytváření vodivých struktur pomocí laseru

5.2.1 LPKF – LDS®

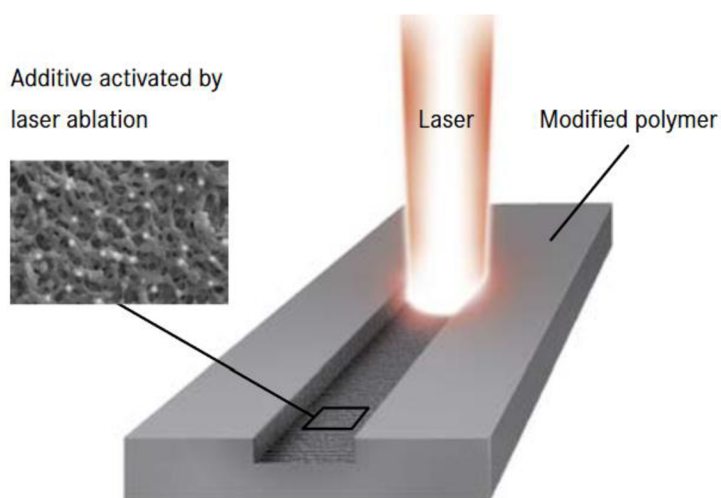
Jedná se o nejpoužívanější metodu na trhu pro výrobu vodivých vrstev. Tato metoda pokrývá téměř 50 % trhu. Díky její univerzálnosti je vhodná jak pro výrobu prototypů, tak i pro sériovou výrobu. Umožňuje vytváření jemných struktur s velkým stupněm volnosti při projektování ve 3D. [15] LDS spadá pod metody One-shot Molding [15], což je technologie vhodná pro velkosériovou výrobu díky nízké ceně za kus. Tato metoda je založena na principu vstřikování roztaveného plastu do formy, ve které získá svůj konečný tvar. Po vychladnutí dojde k jejímu otevření a vyndání vytvarovaných dílů.



Obr. 8: Rozdělení aktuálně používaných materiálů [18]

Laser Direct Structuring (LDS) je aditivní metoda, která je šetrná k životnímu prostředí což je v dnešní době významné pozitivum. Výrobní proces probíhá bez procesu leptání, a substrát je tvořen z recyklovatelného materiálu.

Materiály používané při LDS obsahují jako aditivum organokovy, které jsou rozprostřeny v celém objemu materiálu. Materiály, které neobsahují aditivum, lze ošetřit pomocí spreje LPKF ProtoPaint [15][16]. Díky teplotní roztažnosti organokovů, nedochází k aktivaci aditiva během procesu lisování základního substrátu, kdy je materiál zahříván na vysokou teplotu. Je to dáno tím, že aditivum tvoří zhruba 4-10 % celkové hmotnostní výlisků a jeho vliv na mechanické vlastnosti je zanedbatelný [17]. Přímé laserové strukturování je založeno na principu ozáření a následné aktivace jader pod paprskem. Pro strukturování se obvykle používá laser Nd:YAG s vlnovou délkou 1064 nm [15]. Po ozáření laserem dochází k rozkmitání molekul polymeru a následnému rozrušení jejich struktury [17]. Během ozáření laserem dochází k odpaření vrstvy o tloušťce 1 až 2 μm , důsledkem toho se na povrchu vytvoří mikroskopická drsná struktura, která poskytuje dostatek adheze a zároveň odkryje částičky aditiva [16]. Finálním krokem je chemické pokovení částí, které byly zasaženy laserem.

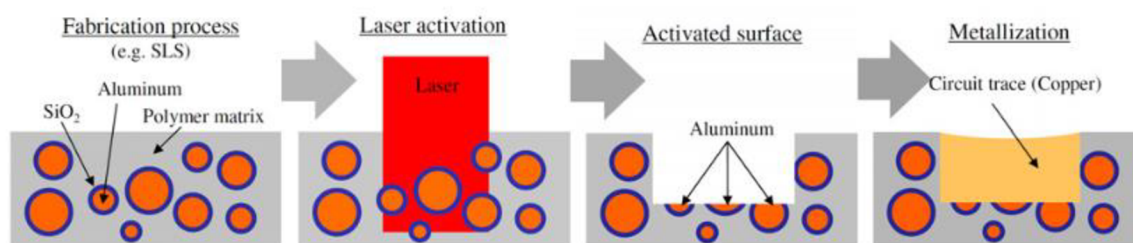


Obr. 9: Aditivní aktivace povrchů laserem [18]

Standardně se nyní dodržuje minimální šířka vodivé cesty zhruba 150 μm při minimálním intervalu 200 μm . Z technologického hlediska lze vyrobit i vodivé cesty s šířkou 100 μm a méně, musí být nicméně předem upraven technologický proces. V dnešní době je technologický limit šířky vodivé cesty zhruba 50 až 55 μm . Rychlost opotřebení vodivých cest může dosáhnout 4000 mm/s, závisí to však na tvaru. Čím je tvar složitější, tím se rychlost opotřebení snižuje.

5.2.2 ADDIMID

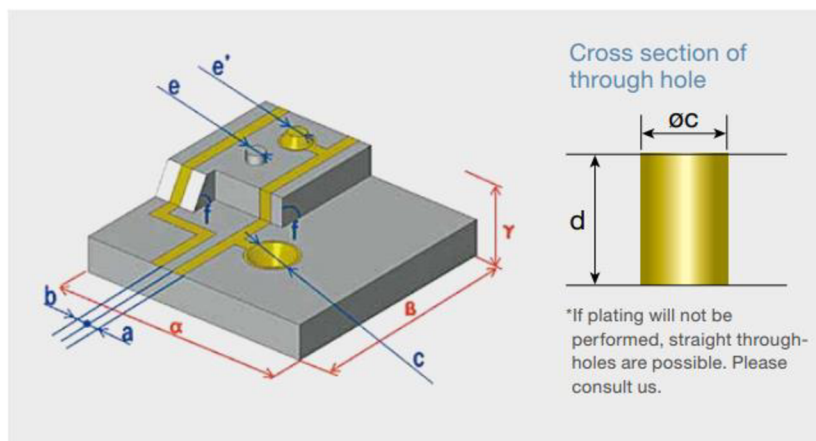
Technologie ADDIMID využívá materiálu obohaceného aditivu podobně jako při technologii LPKF-LDS®, avšak jako aditivum se využívá kovových prášku Cu, Al nebo Ni. [15] Velikost zrnka musí být v rozmezí od 0,5 do 1,2 μm . [19] Vytváření vodivých cest probíhá obdobně jako u LPKF-LDS® a to za pomoci laseru. Druhy použitého laseru jsou buď Nd:YAG s vlnovou délkou 1064 nm nebo laser na základě CO₂ s vlnovou délkou 10,6 μm [15]. Zrnka, která se nachází na povrchu, jsou obaleny ve vrstvě izolačního materiálu, aby se předešlo jejich metalizaci. [19] Minimální šířka vodivých cest je obdobně jako u LPKF – LDS® přibližně 50 μm . [20] Díky nízké ceně hliníku lze využít velké množství ne příliš drahých ale poměrně kvalitních polymerů, což zvyšuje ekonomický potenciál technologie. Tato technologie je momentálně ve stádiu vývoje. [15]



Obr. 10: Proces vytvoření vodivé cesty technologií ADDIMID - bez vrstvy SiO₂, platí i pro LPKF-LDS® [19]

5.2.3 MIPTEC

Semiaditivní metoda strukturování od společnosti Panasonic MIPTEC se zásadně liší od metody výroby u technologií LPKF-LDS® a ADDIMID. Po vytvarování dochází ihned k chemickému pokovení mědi po celé části povrchu. Dále dochází k odstranění materiálu pomocí UV nebo IR záření. Jako další krok je galvanické zesílení mědi, přičemž se nežádoucí měď následně odleptá. Díky tomu je možné dosáhnout šířky vodivých cest 50 μm . Úhel dopadu laseru při vytváření cest může být i 90 stupňů. Moderní je využití materiálu PPA (polyphthalamide), přičemž jako základní substrát jsou použity keramické materiály Al₂O₃ nebo AlN, a to především pro jejich dobrou tepelnou vodivost a rozměrovou stabilitu. [15][21]



Obr. 11: Možnosti výroby vodivých cest technologie MIPTEC [21]

5.3 Vytváření struktur pomocí tisku

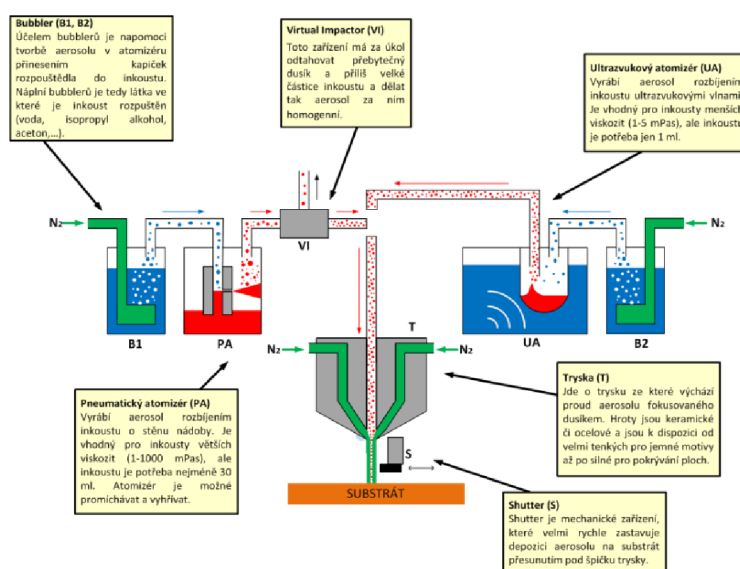
Tisková elektronika má v porovnání s konvenční elektronikou obrovský ekonomický přínos, neboť přináší nová a efektivní řešení při její výrobě. [22] Proces vytváření plošných spojů sestává z natisknutí materiálu na 3D substrát a následného sinterování. [17] Jedná se o funkční tisk, na který jsou kladeny jiné nároky než na běžný grafický tisk, který je tvořen homogenní vrstvou. [23] Proces tiskového vyrábění můžeme rozdělit na kontaktní a bezkontaktní.

5.3.1 Aerosol-Jet®

Technologie Aerosol-Jet® je bezkontaktní metoda. Tištění probíhá bez použití šablony a nanášený materiál vstupuje ve formě koloidní disperze. [15][17] Koloidní disperze je mikroheterogenní látka obsahující částice velké od 1 nm do 500 nm (pro Aerosol-Jet® zhruba 50 nm), s obsahem pevných částic od 60 do 70 %. [15][17]

První část, do které inkoust vstupuje, se nazývá bubbler. Bubbler obsahuje rozpouštědlo (voda, izopropylalkohol, aceton) a napomáhá k přeměně inkoustu v aerosol v atomizéru, který je vyplněn inertním plynem N₂. [17][24] Existují dva typy atomizérů – pneumatický a ultrazvukový. Odlišují se způsobem vzniku aerosolu. Pneumatický atomizér je založen na rozbíjení inkoustu o stěny nádoby, kdežto ultrazvukový rozbíjí inkoust pomocí ultrazvukových vln. [24]

Pneumatický atomizér (PA) je vhodný pro inkousty o viskozitě 1-1000 mPa×s, kdežto ultrazvukový atomizér (UA) je vhodný pro inkousty o viskozitě 1-5 mPa×s. Velkou výhodou UA je minimální použitelné množství inkoustu přibližně 1 ml, oproti 30 ml u PA. [22] U PA prochází směs na výstupu přes Virtuální Impactor (VI), který má za úkol odlučovat přebytečný dusík a příliš velké částice inkoustu. Po výstupu z VI má aerosol homogenní strukturu. Následně je aerosol vháněn do trysky (T) s keramickými nebo ocelovými hroty. Z trysky vychází proud aerosolu usměrněný dusíkem. V blízkosti hlavy se nachází také tzv. Shutter (S), což je zařízení, které velmi rychle dokáže zastavit proud dopadajícího aerosolu na substrát tím, že se přesune pod špičku trysky. [24]

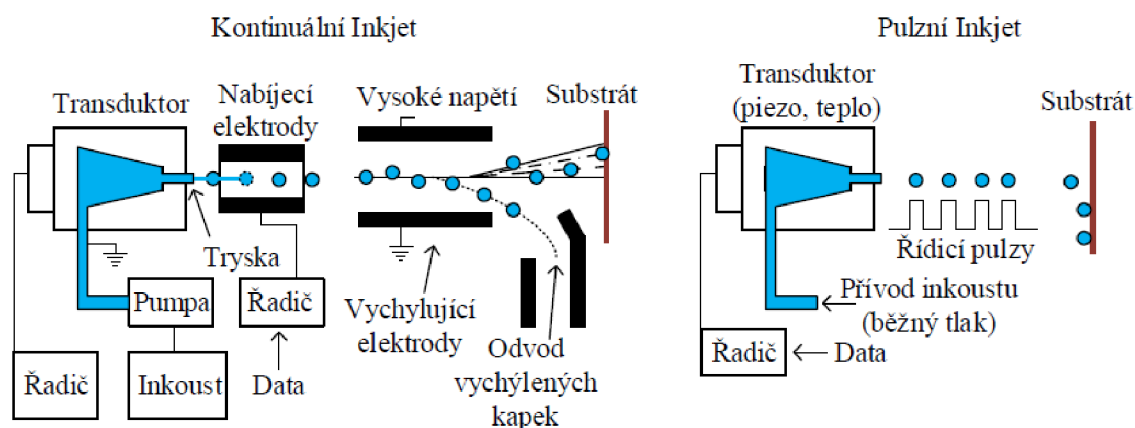


Obr. 12: Technologie Aerosol-Jet® s pneumatickým a ultrazvukovým atomizérem [24]

Vytvrzování je proces oddělení tekutých částí inkoustu od pevných částic. Existuje několik způsobů vytvrzování komponent vytištěných aerosolem. Standardně se používá sušicí pec nebo pájecí pec. Doba vydržení je přímo navázána na teplotou vytvrzování. Při malých teplotách je doba vydržení větší, to má vliv na elektrickou vodivost, která má tendenci se zvětšovat se zvětšující se teplotou spékání. Dalším způsobem vytvrzování je za použití laseru s IR zářením nebo světelným paprskem z UV světla. Jako zdroj světla se používá LED modré barvy, který je zaostřen pomocí skleněné čočky. Pro lepší pájení za pomoci UV, je nutné vzít v úvahu jeho vlnovou délku a intenzitu. [15]

5.3.2 Inkjet

Inkjet je selektivní aditivní technologie tisku struktur. [17] Elektrické vodivé inkousty musí obsahovat pevné nanočástice, aby nedošlo k ucpání tiskové hlavy. Pro lepší výstup z této hlavy by viskozita částic neměla přesáhnout $20 \text{ mPa}\cdot\text{s}$. Povrchové napětí, které je odpovědné za kulatý tvar inkoustu, musí být v rozsahu od 28 do 350 mN/m . Běžně se používají částice o velikosti 50 nm. Koncentrace atomů na povrchu je vyšší, proto je potřeba menší energie na rozbití mřížky. Problémem je, že pevné nanočástice mají tendenci k aglomeraci (spojení do větších celků). Aby k tomu nedocházelo, obalují se částice tenkou organickou vrstvou, která je odděluje. Obalené částice mají nižší hustotu, díky čemuž se nanočástice neusazují na dně nádoby s inkoustem. [15]



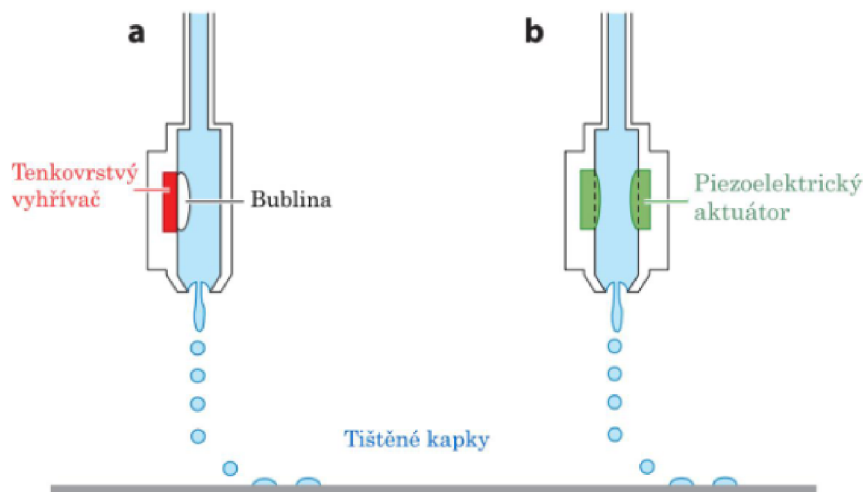
Obr. 13: Kontinuální Inkjet a pulzní Inkjet [17]

Dávkování kapek z tiskové hlavy může být nepřetržité (CIJ – Kontinuální Inkjet) nebo na vyžádání (DoD – Pulzní Inkjet). Při kontinuálním tisku se svázané struktury vytváří za pomoci rovnoměrně dodaného inkoustu. Tento režim se používá pro rychlý tisk s tloušťkou vodivých cest $2 \text{ }\mu\text{m}$ a šířkou mezi 50 až $150 \text{ }\mu\text{m}$. Zesílení vodivých cest lze provést například natisknutím dalších vrstev na povrch předchozích vrstev. Nevýhodou metody CIJ je především to, že tisk probíhá také na místech, které k tomu nejsou určené, což je způsobeno nepřetržitým dávkováním inkoustu. Kapky se musí tedy elektricky odklonit. [15]

DoD umožňuje na rozdíl od CIJ dávkování kapek. Metoda má větší přesnost ale menší rychlost tisku. Tištění je založeno na principu řízení tlaku v komoře, díky čemuž je možné řídit objem i rychlost kapek. Uvnitř tiskové hlavy je umístěn transduktor, který je založen na tepelném nebo piezoelektrickém principu, a který řídí množství kapek dopadajících na substrát. [17] V případě tepelného Inkjetu je uvnitř komory vedoucí do

trysky umístěn malý tenkovrstvý ohřívač, který ohřívá kapalinu v jeho těsné blízkosti nad teplotu varu, čímž se vytváří malé bubliny výparů. [22]

Piezelektricky inkjet využívá přímé mechanické dávkování, které působí na membránu komory s inkoustem. Piezo krystal se pod napětím deformuje, díky čemuž se mění objem komory. [4] Vytvrzování probíhá stejně jak u procesu Aerosol-Jet®. [15]



Obr. 14: Ukázka principu systému Inkjet využívající metodu řízeného dávkování inkoustu a) tepelný aktuátor b) piezoelektrický aktuátor [22]

5.4 Vytváření vodivých cest pomocí plazmy

Plazma neboli vysokoenergetický plynový paprsek, se používá pro roztavení metalického prášku obsahujícího nanočástice. Tímto způsobem je možné nanášet materiál přímo na substrát. Největší výhodou je krátký výrobní proces, současné strukturování a metalizace, ale také možnost formování vrstev s velkou tloušťkou a jejich rychlé nanášení. Díky tomu má plazmová technologie veliký potenciál. [15]

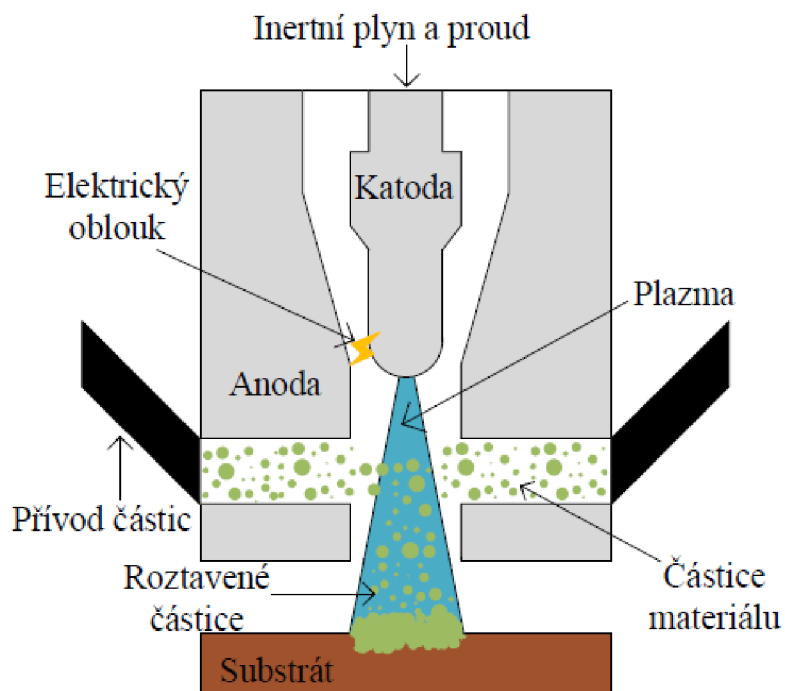
5.4.1 Flamecon®

Jedná se o automatizovaný termokinetický aditivní proces metalizace, který umožňuje nanášet tenké metalické vrstvy na velké spektrum substrátů. Před použitím této metody musí být substrát očištěn a zdrsňen některou z dostupných metod, například laserem nebo pískováním. Při procesu Flamecon® jsou metalické nanočástice požadovaného materiálu vstřikovány do horké komory za pomoci vysoce přesného dávkovače. Následně jsou částice roztaveny a skrz trysku s nosným plynem dopraveny na povrch substrátu. [15]

Největší výhodou procesu je možnost nanášení vodivých vrstev s vysokou proudovou zátěží za krátký čas. Při každém kroku nanášení může být vytvořena vrstva o tloušťce 20 až 100 μm , opakovaným vrstvením lze dosáhnout tloušťky až 1000 μm . Díky pórovitosti a dalším faktorům lze u materiálů v pevném stavu dosáhnout vodivosti struktur až 50 %. Adheze struktur k substrátu závisí na diametru, vlastnostech částic, a také na termické energii a rychlosti při dopadu. Jako substrát lze použít plasty, dřevo, keramiku či kovy. Tato technologii se nachází ve fázi vývoje. [15]

5.4.2 Plasmadust®

Plasmadust® je patentovaná technologie od společnosti Reinhausen Plasma GmbH, která funguje na principu studené plazmy. Teplota studené plazmy se pohybuje v rozmezí 10 až 150 $^{\circ}\text{C}$. Díky tomu může být tato technologie použita pro substráty, které mají vysokou teplotní náchylnost, jako je papír nebo karton. Z kazet je prášek přes hadici pomocí nosného plynu vháněn do tiskové hlavy, tzv. trysky plazmy. Díky vibračnímu přístroji, který brání aglomeraci prášku a umožňuje nanášení homogenních vrstev, je zaručena vysoká přesnost dávkování prášku. Tisková hlava se skládá z duté katody, skrze kterou prochází inertní plyn a také z anody, kterou obklopuje. Při použití vysokofrekvenčního proudu, vzniká mezi katodou a anodou impulsní oblouk, který ionizuje plyn a vytváří tak nízkoteplotní nestabilní plazmu dopadající na povrch substrátu. Před dopadem na substrát jsou částice ochlazovány na teplotu, při které substrát nedegraduje. [15]



Obr. 15: Princip technologie Plasmadust® [17]

Moderní technologie umožňují vyrobit vodivé cesty o šířce od 2 do 5 mm. Za použití krycí masky lze dosáhnout šířky 200 μm , nicméně tato maska zpomaluje celý proces. V závislosti na počtu průchoďů jedním bodem lze vytvářet vrstvy o tloušťce 1 až 100 μm při maximální rychlosti 50 m/min.[15]

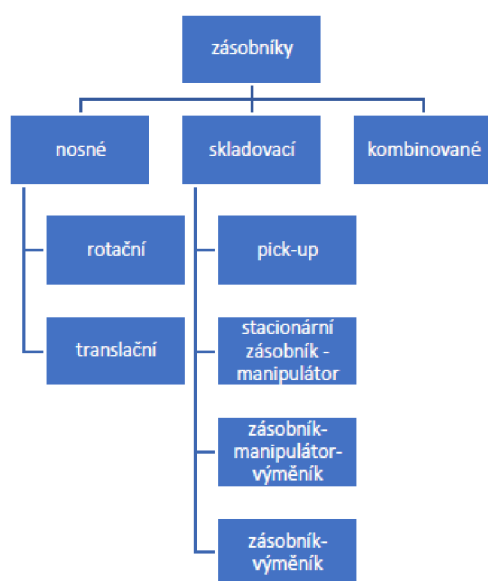
Prášek musí být možné roztavit ve studené plazmě. Substrátem zde může být kov, plast, papír, karton, sklo, keramika, či například textilie.

Plasmadust® je technologie šetrná k životnímu prostředí, jelikož pracuje bez pomoci jakýchkoliv škodlivých látek, bez procesu aktivace, vysušení a očištění.[15]

6 Automatická výměna nástrojů

Automatická výměna nástroje, ve zkratce AVN, je seskupení uzlů, které slouží k práci s nástrojovou jednotkou v obráběcích centrech: odkládání, manipulace, polohování a upnutí. Výhoda AVN je především v tom, že není třeba použití lidské síly. AVN je jedna z nejdůležitějších součástí moderních CNC, které umožňují jejich plynulý a nepřetržitý chod. Díky velké škále konstrukčních řešení můžeme zajistit optimální využití AVN v CNC při daných technologických operacích.

Při konstrukci AVN je nutné brát ohled na specifické požadavky. Doba trvání výměny nástrojů musí být co nejkratší, jelikož spadá do skupiny vedlejších časů. Od AVN se očekává vysoká pracovní spolehlivost s ohledem na vysokou cenu stroje a velkou četnost výměny nástrojů. Pro konkrétní oblast využití a technologie je důležité zvážit optimální kapacitu zásobníku, správný typ zásobníku a manipulátoru, které by měli mít správně ustavení polohy v místě výměny. AVN musí být odolná proti všem druhům znečištění (řezné kapaliny, trysky, ...).[25]



Obr. 16: Rozdělení typů zásobníků z hlediska přenosu sil a výměny nástroje [25]

To, jak budou nástroje skladovány, tedy konstrukční řešení zásobníku, je dáno typem používaných nástrojů a typem nástrojového držáku. Typ nástrojů a typ použitého držáku ovlivňuje následně také způsob upnutí v zásobníku. Při návrhu je nutné znát parametry stroje (maximální rozměr, hmotnost), což následně určuje tuhost konstrukce. Nelze zapomenout také na bezpečnost, jelikož pohyblivé části představují vysoké riziko pro člověka, a proto musí být odděleny tak, aby se do tohoto prostoru za chodu stroje nemohla dostat žádná osoba.

6.1 Nosné zásobníky

Zásobníky nástrojů lze rozdělit na dvě skupiny podle toho, jestli přenáší řezné síly nebo nepřenášejí. Nosné zásobníky přenášejí řezné síly od nástroje do rámu stroje. Nejčastěji se tato konstrukce objevuje v podobě revolverové hlavy. Nástroj upnutý ve stroji může být buď poháněn nebo nepoháněn. Výhodou tohoto řešení je rychlá výměna nástrojů a kompaktní řešení, lze do něj však upnout pouze omezené množství nástrojů, pro daný pracovní stroj. Nejčastěji se lze setkat s revolverovými hlavami diskovými, vícebokými, korunkového typu a méně častými translačního typu. [25]

6.2 Skladovací zásobníky

Dalším typem zásobníků, který se používá v AVN, je skladovací. Tento typ se dělí dle toho, jakým způsobem je nástroj dopraven do vřetene.

První typ zásobníku je tzv. pick-up, který se nachází v prostoru CNC. Umístění zásobníku uvnitř CNC má za následek jeho kompaktnost, je však zapotřebí vyřešit přiblížení zásobníku k vřetenu. Toto řešení snižuje náklady na CNC, má však výraznou nevýhodu v množství nástrojů, které v něm lze uskladnit. Výměna nástrojů probíhá tak, že vřeteno umístí nástroj na prázdném místě, které je určeno pro tento nástroj a poté najede na pozici nástroje, který je potřebný a upne ho. Typ pick-up je vhodný pro výměnu frézovacích hlav. [25]

Druhým typem je zásobník-výměník. Toto řešení je vhodné pro obráběcí centra s velkým počtem nástrojů, kde by byla problematická přímá výměna pomocí typu pick-up. Pro výměnu slouží jednoúčelový manipulátor, který zajistí výměnu mezi zásobníkem a vřetenem. Výměna nástrojů je velice rychlá a zpravidla trvá do pěti sekund, nicméně v určitých případech může proběhnout i v čase do jedné sekundy. [25]

Třetím typem je zásobník-manipulátor-výměník. Přeprava mezi zásobníkem a výměníkem probíhá za pomoci manipulátoru. Toto řešení se používá v případě, že je zásobník umístěn daleko od vřetena, například u strojů, kde původně AVN nebyla součástí a doplňovala se až později. Díky tomu, že je zásobník umístěn mimo obráběcí centrum, není zde příliš velké konstrukční omezení z hlediska prostoru. Občas lze narazit také na zásobník umístěný na manipulátoru.

Posledním typem je stacionární zásobník-manipulátor. Zde se jako manipulátor používá průmyslový robot sloužící jako výměník, který používá uchopovací rameno pro dva nástroje, tzv. efektor. Tento systém se nazývá RTC, neboli robotická výměna nástrojů (Robotic Tool Change). Výhodou tohoto typu je neomezený počet nástrojů. Existují tři druhy řešení RTC – stacionární, nezávislé a posuvné. [26]

- **Stacionární** – zásobník nástrojů je statický a robot je umístěn na základně. [26]
- **Nezávislé** – zásobník nástrojů je staticky umístěný na základně a robot se pohybuje nezávisle. [26]
- **Posuvné** – zásobník i robot je posuvný se strojem. [26]

7 Servopohony

Elektrický servopohon je regulační pohon, sestávající se z motoru, přímo napájeného nebo polovodičového měniče, řídicích a regulačních obvodů. Pohon musí umožňovat oba směry točení a momentu. Výhoda servopohonu je v tom, že vždy pracuje v uzavřené regulační smyčce se zpětnou vazbou. Součástí motoru bývají obvykle snímače polohy a rychlosti.

7.1 Rozdělení servopohonů podle funkce

Rychlostní (otáčkový) servopohon – má pouze otáčkovou zpětnou vazbu a umožňuje sledovat zadávané rychlosti. [27]

Polohový servopohon – je určen pro řízení polohy (úhel natočení nebo posuvné dráhy). Polohové servopohony lze rozdělit z hlediska aplikace na dvě skupiny: cílové a sledovací. Při cílové regulaci je možné optimální nastavení polohy. Sledovací regulace umožňuje sledovat zadávání trajektorií, to umožňuje přesné zadávání rychlosti. [27]

7.2 Rozdělení servopohony dle typu použitého motoru

Stejnoseměrný motor

Tento typ motoru patří k nejstarším elektronickým strojům, a to kvůli tomu, že první elektrické rozvody byli stejnosměrné. Ve stejnosměrném motoru lze plynule měnit otáčky změnou přidávaného napětí. Pro servopohony se používá zejména stejnosměrných motorů s buzením permanentních magnetů ve statoru. Magnety se nejčastěji vyrábí z anizotropního feritu, Al-Ni-Co, Samarium-Kobaltu nebo neodým-železo-boru.

Aktivními částmi motoru jsou stator s permanentními magnety a kovovými nástavci z měkkého železa pro koncentraci magnetického toku do vzduchové mezery, rotor (kotva) s vinutím, tvořeným jednotlivými cívkami, uloženými v drážkách a vyvedenými na komutátor, který spolu s uhlíkovými kartáči a kartáčovými držáky tvoří tzv. sběrací ústrojí. Pro větší výkon se používá motory s cizím buzením, v nichž se magnetické pole vytváří proudem budícího vinutí. Nevýhoda stejnosměrného motoru je Jouleova ztráta. [27]

Elektronicky komutovaný motory

V podstatě “obrácený” stejnosměrný motor, proto se někdy lze setkat s názvem bez komutátorový stejnosměrný motor. Tento motor má oproti klasickému stejnosměrnému motoru magnety na rotoru a vinutí na statoru. Funkce komutátoru přebírá tranzistorový měnič. Pro elektronicky komutovaný motor má výstupní proud měniče obdélníkový tvar a napájeny jsou v každém okamžiku cyklicky pouze dvě ze tří fází. Diskrétní snímání polohy je vždy po 60 el. stupních. [27]

Asynchronní motor

Jedná se o nejrozšířenější typ motoru. V dnešní době probíhá renesance tohoto typu motoru v důsledku jejich používání v pohonech s regulací rychlosti a polohy. Princip asynchronního motoru spočívá ve vytvoření točivého magnetického pole ve vzduchové mezeře stroje. Točivé magnetické pole vzniká prostorovým rozložením třífázových vynutí ve statorových drážkách stroje a jejich napájením třífázovým harmonickým napětím. Fázové napětí je posunuto o jednu třetinu času. Asynchronní motor je robustní a spolehlivý, jediná nevýhoda motoru je obtížná regulace otáček. [27]

Synchronní motor

Jedná se o motor, který pracuje synchronně s otáčením točivého magnetického pole statoru. Stator je shodný se státorem u asynchronního motoru. Konstrukčně je podobný jako elektricky komutovaný motor s magnety uloženými uvnitř rotoru, rozdíl spočívá pouze ve způsobu řízení. Synchronní motor je napájen třífázovým sinusovým proudem. Další odlišnost od elektricky komutovaného motoru je princip snímání polohy pro účely řízení tranzistorového měniče. Synchronní motor potřebuje trvalou informaci o poloze motoru. [27]

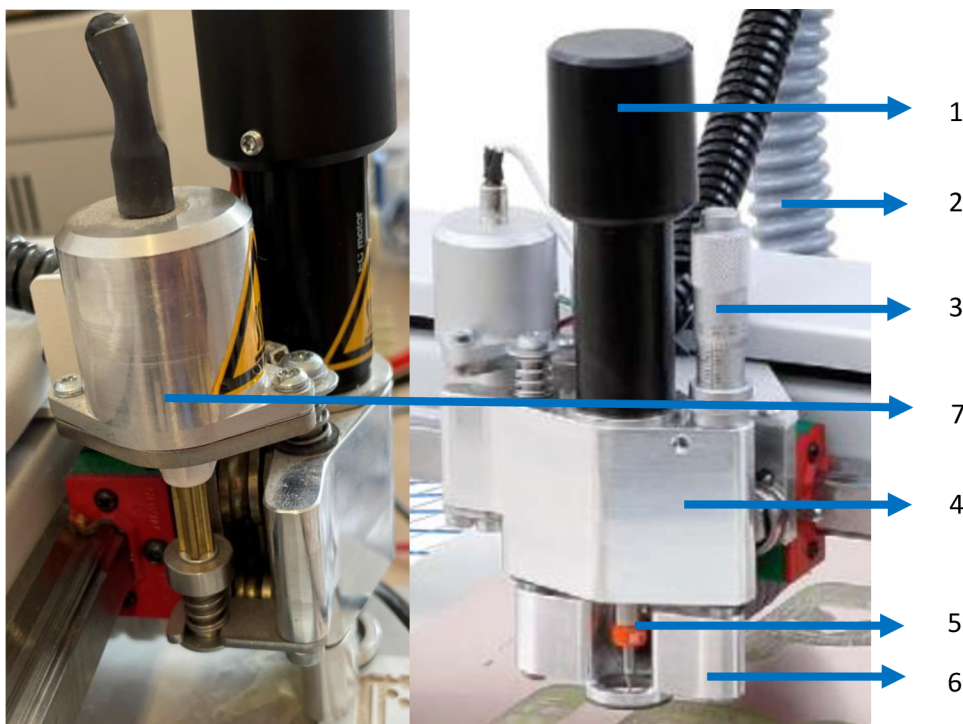
Krokový motor

Jedná se o nejjednodušší akční člen pro převedení digitálního signálu na pohon za účelem natočení úhlu rotoru. Krokový motor si můžeme představit jako synchronní motor, v němž je místo točivého pole generováno “poskakující” magnetické pole postupným napájením jednotlivých pólových dvojic stejnosměrným proudem. Počet stabilních poloh rotoru je dán počtem kroků motoru na jednu otáčku. [27]

II Praktická část

8 Analýza současně používané nástrojové hlavy

Cílem této diplomové práce je provést návrh nástrojové hlavy s automatickou výměnou nástrojů a skutečným měřením vzdálenosti od obrobeneho materiálu. Tato nově navrhovaná nástrojová hlava má za cíl odstranit nevýhody současně používané nástrojové hlavy a zároveň by měla být ekonomicky výhodnější než dostupná řešení na trhu. Nejdříve je nutné provést konstrukční analýzu současné nástrojové hlavy u frézky LPKF ProtoMat E33, kterou katedra disponuje.

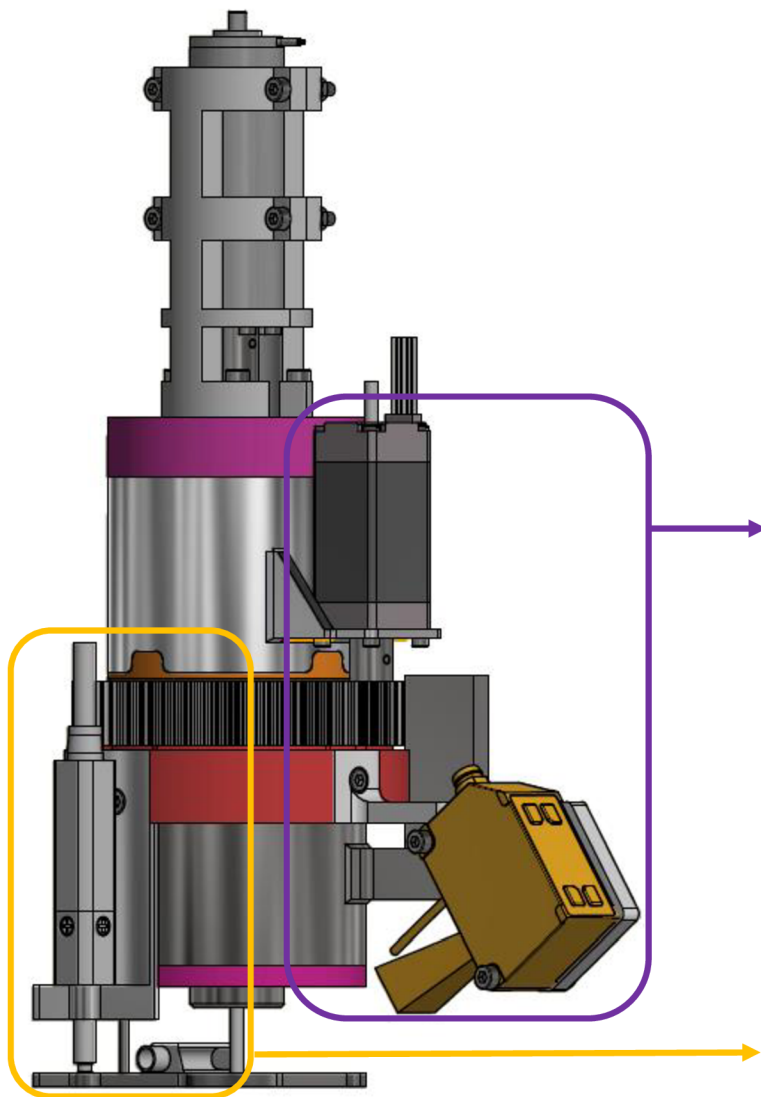


Obr. 17: Hlava frézky LPKF ProtoMat E33 *Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.*

- 1 – Motor (33 000 ot/min)
- 2 – Hadice pro odvod třísky
- 3 – Ruční regulace šířky frézování (mikrometrická hlava)
- 4 – Tělo nástrojové hlavy
- 5 – Nástroj (fréza/vrták)
- 6 – Přítlačný mechanismus
- 7 – Posuvný elektromagnet

Frézka LPKF ProtoMat E33, kterou katedra disponuje, slouží pro výrobu plošných spojů. Na základě několika nevýhod vzniklo téma pro tuto diplomovou práci, jejímž cílem je návrh dokonalejší nástrojové hlavy, která tyto nedostatky eliminuje. Hlavní nevýhodou této frézy je absence automatické výměny nástrojů, pro výměnu nástroje je tedy nutné celý proces pozastavit a provést ruční výměnu nástroje. Nástroj upnutý do kleštiny je poháněn elektromotorem s otáčkami 33 000 ot/min. [28] Šířka frézované drážky je nastavena pomocí mikrometrické hlavy a přítlačného mechanismu. Součástí této nástrojové hlavy je také hadice pro odvod třísky, která vzniká při procesu obrábění. Toto odsávání třísky probíhá za provozu a zamezuje zanášení bezprostředního okolí nástroje.

Další zásadní nevýhodou současně používané frézky je neschopnost měřit vzdálenost od povrchu materiálu v reálném čase. Kvůli tomu, že materiál nebývá dokonale rovný, může nastat situace, kdy fréza bude operovat příliš hluboko v materiálu. Poté musí některý ze zaměstnanců katedry přenastavit výšku frézovací hlavy ručně. Nebo naopak může nastat situace, kdy hloubka řezné drážky je nedostatečná a materiál se tedy neobrobí dle očekávání a proces obrábění se musí tedy zopakovat nebo dokončit ručně.



Vlastní návrh je poháněn hnacím servopohonem a splňuje hlavní podmínku danou zadáním DP, čímž je AVN. Kapitoly věnující se návrhu AVN jsou uvedeny dále v práci

Rotační mechanismus se skenerem SICK. Díky této sestavě je možné měnit polohu snímače od 0° do 180°. Laser umožňuje odměřovat vzdálenost nástroje od materiálu v reálném čase.

Přítlačný mechanismus řízený elektrickým lineárním pohonem s odsávacím zařízením.

Obr. 18: Vlastní návrh hlavy s AVN a odměřováním vzdálenosti v reálném čase

9 Řezné podmínky

Cílem této diplomové práce je navrhnout řešení vřetene s AVN. Pro konstrukční návrh je nutné nejprve určit řezné podmínky. Vřeteno je navrženo s ohledem na použití nástrojů firmy LPKF. Bohužel výrobce neuvádí veřejně řezné podmínky pro jednotlivé nástroje a bylo tedy nutné pro konstrukční návrh tyto řezné podmínky zvolit. Pro volbu řezných podmínek byl využit software Walter Machining Calculator. Řezné podmínky jsou blíže rozepsány v následující podkapitole.

Jako vstupní parametry pro software Walter Machining Calculator byly použity následující veličiny. Jako první byl zvolen průměr řezné části nástroje 0,15 mm, což odpovídá průměru nejmenšího předpokládaného použitého nástroje. Hloubka řezu byla zvolena 1,5 mm s ohledem na tloušťku předpokládaného obráběného materiálu. Dále by vybrán servopohon, který vyrábí německá společnost Faulhaber a jedná se konkrétně o typ Series 2264 024 BP4. Tento motor byl zvolen s ohledem na optimální otáčky a kroutící moment.

Na základě těchto vstupních parametrů bylo možné získat další řezné podmínky, které jsou uvedeny na obrázku níže. Pro další návrh je podstatný především kroutící moment, který byl stanoven na 0,01 Nm.

Síla třísky	0.04 hm mm
objem materiálu za jednotku času	0.66 cm ³ /min
Doba obrábění	2.03 sec.
Kroutící moment	0.01 Mc Nm
Potřebný výkon	0.01 Pmot KW

Obr. 19: Řezné podmínky ze softwaru Walter Machining Calculator [29]

Díky zjištěné hodnotě kroutícího momentu $M_k = 10 \text{ mNm}$ bylo možné následně dopočítat také řeznou sílu pomocí vztahů uvedených níže.

$M_k = 10 \text{ mNm} = 0,01 \text{ Nm}$ – Kroutící moment

$d = 0,15 \text{ mm} = 0,00015 \text{ m}$ – Průměr řezné části nástroje

Řezná síla [43]

$$F_c = \frac{M_k}{d} * 2 = \frac{0,01}{0,00015} * 2 = \mathbf{133,3 \text{ N}} \quad (1)$$

10 Nalisování hřídele

Ke spojení hřídele s kleštinou bylo zvoleno řešení pomocí lisovaného spoje. Spoj nalisováním je jednoduchý, spolehlivý a hospodárný. Z hlediska pevnosti má výhodu v tom, že nezmenšuje nosný průřez hřídele. Uvažováno je konkrétně nalisování za tepla, jelikož při nalisování za studena dochází k poškození stykových ploch a část přesahu by se tedy strhla.

Základním materiálem kleštiny byla zvolena ocel typu ČSN 16341, která má nejmenší mez kluzu $Re = 1222$ MPa. Tento typ oceli je vhodný k zušlechťování a má požadovanou vysokou pevnost. Pro následující výpočty je dalším důležitým parametrem součinitel tření f . Hodnota součinitele tření je zvolena na základě níže uvedené tabulky. Pro nalisování za tepla jsou zvoleny hodnoty jednotlivých veličin následovně: součinitel tření $f = 0,15$ poissonovo číslo $\mu = 0,15$ a koeficient bezpečnosti $k_w = 1,5$

<i>materiál součástí, způsob výroby a lisování</i>	<i>f</i>
obě součásti z oceli, kalené a broušené, lisováno za studena	0,10 až 0,15
stejné materiály, plochy hladce obrobené, lisováno za studena	0,12 až 0,20
náboj z litiny, čep z oceli, lisováno za studena	0,10 až 0,16
obě součásti z oceli, plochy hladce obrobené, lisováno za tepla	0,15 až 0,25

Tab. 1: Přibližné hodnoty součinitele tření f za klidu pro nalisovaný spoj [30]

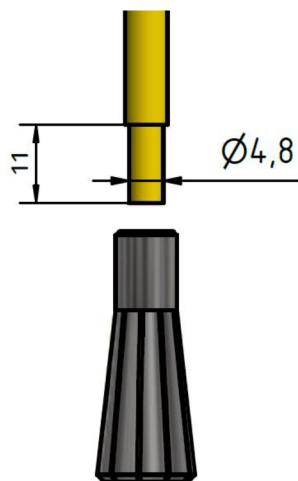
Koeficient bezpečnosti	Znalost zatížení	Znalost dovoleného napětí	Znalost vlastností materiálu	Znalost prostředí
1.2-1.5	přesná	přesná	velmi dobrá	plně pod kontrolou
1.5-2.0	dobrá	dobrá	velmi dobrá	neměnná
2.0-2.5	dobrá	dobrá	průměrná	běžná
2.5-3.0	průměrná	průměrná	náhodně testovaná	běžná
3.0-4.0	průměrná	průměrná	nezkoušená	běžná
3.0-4.0	neurčitá	neurčitá		neurčitá

Tab. 2: Doporučený koeficient bezpečnosti pro tažné materiály založený na mezi kluzu. [44]

10.1 Výpočet nalisovaného spoje a okrajových podmínek

Pro výpočtový návrh nalisování hřídele do kleštiny lze použít postup pro návrh plného hřídele a náboje. Nejprve je nutné určit potřebný tlak p_{min} , který vznikne ve stykové ploše po nalisování v důsledku pružných deformací. Pro určení tohoto tlaku byl využit vztah uvedený níže. [31] Průměr hřídele v místě nalisování je $d_p = 4,8$ mm.

$$p_{min} = \frac{2 * k_w * M_k}{\pi * f * l * d_p^2} = \frac{2 * 1,5 * 0,059}{\pi * 0,15 * 0,11 * 0,0048^2} = \mathbf{1,48 \text{ MPa}} \quad (2)$$



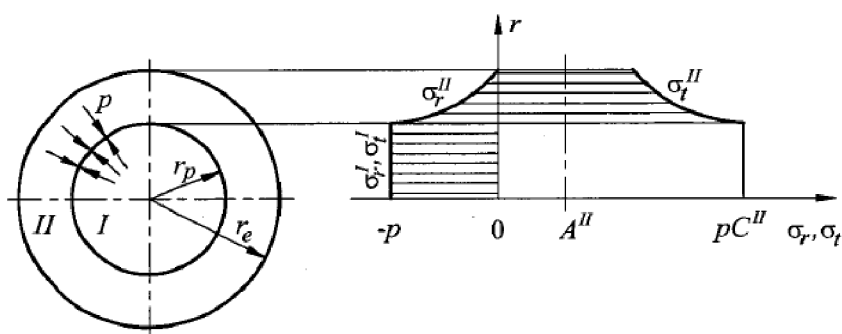
Obr. 20: Funkční rozměry hřídele v místě nalisování

Dalším krokem návrhu nalisovaného spoje je určení hlavních napětí, tedy radiálního σ_r a tečného σ_t . Pro tato napětí platí vztahy uvedené níže, kde A a B jsou integrační konstanty, které lze určit z okrajových podmínek. [31]

$$\sigma_r(r) = A - \frac{B}{r^2} \quad (3)$$

$$\sigma_t(r) = A + \frac{B}{r^2} \quad (4)$$

Pro určení přesahu na průměru nalisování, resp. poloměru r_{1p} , je nutné stanovit již zmíněná napětí. To však není možné bez stanovení okrajových podmínek. Pro případ nalisování plného hřídele a náboje jsou okrajové podmínky dány následujícími vztahy. [31]



Obr. 21: Průběhy napětí v hřídeli a náboji po nalisování [31]

Pro náboj:[31]

$$\sigma_r^{II}(r_{1P}) = -p_{min} \quad (5)$$

$$\sigma_r^{II}(r_e) = 0 \quad (6)$$

Pro hřídel:[31]

$$\sigma_r^I(r_{1P}) = -p_{min} \quad (7)$$

$$\sigma_r^I(0) = \sigma_t^I(0) \quad (8)$$

Po dosazení a úpravě vznikne vztah:[31]

$$\sigma_r^{II}(r_{1P}) = -p_{min} \quad (9)$$

$$\sigma_t^{II}(r_{1P}) = -p_{min} * \frac{r_2^2 + r_{1P}^2}{r_2^2 - r_{1P}^2} = p_{min} * C^{II} = \mathbf{1,89 MPa} \quad (10)$$

$$\sigma_r^I(r_{1P}) = -p_{min} \quad (11)$$

$$\sigma_t^I(r_{1P}) = -p_{min} \quad (11)$$

Díky zjištěným hodnotám radiálního a tečného napětí na průměru nalisování r_{1p} lze následně dopočítat také pružné deformace Δd_I^I a Δd_I^{II} , které vznikají při montáži spoje na průměru nalisování. Vztahy pro výpočet těchto deformací jsou uvedeny níže.[31]

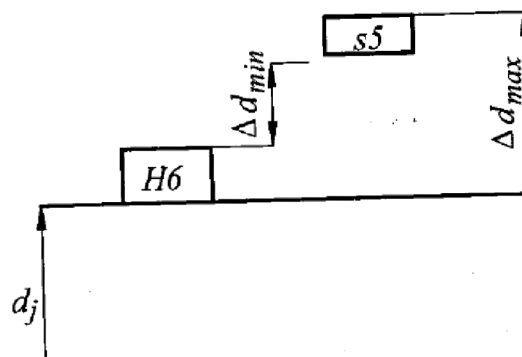
$$\begin{aligned} \Delta d_I^I &= \frac{d_I}{E} * [\sigma_t^I(r_{1P}) - \mu * \sigma_r^I(r_{1P})] = \frac{d_1}{E} [-p_{min} + \mu * p_{min}] \\ &= \frac{4.8}{2.1 * 10^5} * [-1,48 MPa + 0.3 * 1,48 MPa] \\ &= \mathbf{-0,0000237 m} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \Delta d_I^{II} &= \frac{d_I}{E} * [\sigma_t^{II}(r_{1P}) - \mu * \sigma_r^{II}(r_{1P})] = \frac{d_1}{E} [p_{min} * C^{II} + \mu * p_{min}] \\ &= \frac{4.8}{2.1 * 10^5} * [1,48 MPa * 1,89 + 0.3 * 1,48 MPa] \\ &= \mathbf{0,0000743 m} \end{aligned} \quad (13)$$

Následně je nezbytné dopočítat minimální přesah Δd_{min} , který způsobí ve stykové ploše minimální tlak p_{min} . Minimální přesah lze určit ze vztahu pro případ nalisování plného hřídele a náboje, který je uveden níže. [31]

$$\Delta d_{min} = \frac{d_l}{E} * p_{min} * (1 + C^{II}) = \frac{4,8}{2,1 * 10^5} * 1,48 * (1 + 1,89) = 0,098 \mu m \quad (14)$$

Nakonec bylo zvoleno toleranční pole H6 s tolerancí 0 μm až 8 μm . Minimální rozměr hřídele se následně určí přičtením minimálního přesahu k větší z hodnot tolerance H6. Výsledkem je tedy minimální průměr hřídele $d_{min} = 4,80898$. Toleranční pole hřídele bylo zvoleno p5, pro které platí rozmezí 12 μm až 17 μm . Jedná se o přechodné uložení, za uvažovaných podmínek bude však s přesahem v rozmezí 4 μm až 17 μm .



Obr. 22: Tolerance jmenovitých průměrů součástí spojených nalisováním [31]

Pro maximální hodnotu přesahu musí z hlediska pevnostní kontroly náboje platit, že: [31]

$$\sigma_{Dt} = \frac{R_e}{k_w} = \frac{1222}{1,5} = 814,6 \text{ MPa} \quad (15)$$

$$\Delta d_{max} \leq \frac{d_p}{E} * \sigma_{Dt} \quad (16)$$

Což je splněno, protože pravá strana nerovnosti Δd_{max} má hodnotu 18,6 μm .

11 Ložiska

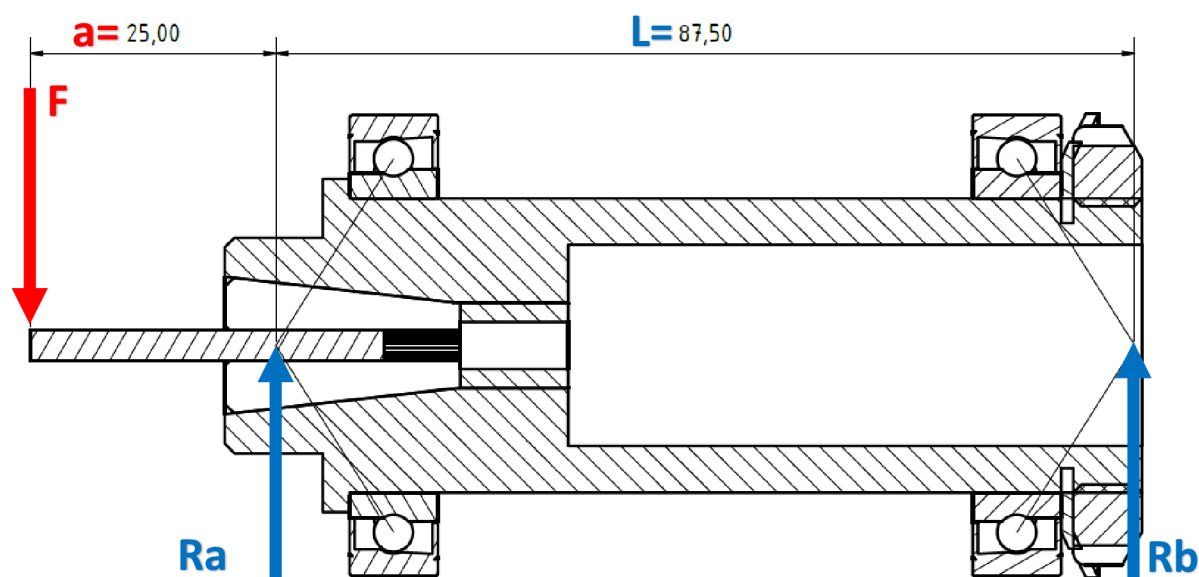
Na základě požadavků na kompaktnost celého návrhu byla zvolena vysoce přesná kuličková ložiska s kosoúhlým stykem. Tento typ byl zvolen, protože dokáže přenášet velké otáčky. Kuličková ložiska s kosoúhlým stykem se vyznačují vysokou přesností chodu, výkonností při vysokých otáčkách a vysokou tuhostí systému. Jsou ideální pro aplikace s velkými požadavky na přesnost, dále minimalizují hlučnost, vibrace a generování tepla.

Tento typ ložisek umožňuje díky působení axiálních sil vymezit vůli mezi kroužky a valivými elementy. Dále lze nastavit vhodné předpětí a dosáhnout vyšší přesnosti při obrábění. Tento typ ložisek se instaluje v páru a jsou montována do „O“.

Na základě maximálních otáček servopohonu byl zvolen typ ložisek S71906 ACB/P4A od výrobce SKF. [40] Dále musí být dokoupena matice KM6 a pojistný kroužek MB6.[41][42]

11.1 Kontrola životnosti ložisek

U ložisek je důležité zkontrolovat jejich životnost, která je dána jejich dynamickou únosností a zatížením na jednotlivá ložiska. Řezná síla ($F = 133,3 \text{ N}$) působí na konci nástroje.[33]



Obr. 23: Schéma výpočtu reakcí v ložiskách

$$R_a + R_b = F \quad (17)$$

$$R_a * a = F * (a + L) \quad (18)$$

$$R_b = \frac{F * (a + L)}{a} = \frac{100 * (25 + 87,5)}{87,5} = \mathbf{171,4\ N} \quad (19)$$

$$R_a = F - R_b = 187 - 257 = \mathbf{-38,1\ N} \quad (20)$$

$R_a, R_b = [N]$ – Síly působící v jednotlivých ložiskách

Po určení velikosti sil na jednotlivá ložiska, je možné spočítat jejich životnost za pomoci vztahu uvedeného níže. Díky tomu, že obě ložiska jsou totožná, postačí kontrola pouze více zatěžovaného ložiska. Dynamická únosnost zvoleného ložiska je dle katalogu $C = 4620\ N$, a otáčky vřetena jsou totožné s optimálními katalogovými otáčkami motoru. V tomto případě je ekvivalentní zatížení dáno vztahem $P = R_b$, protože není počítáno s axiálními silami.[31]

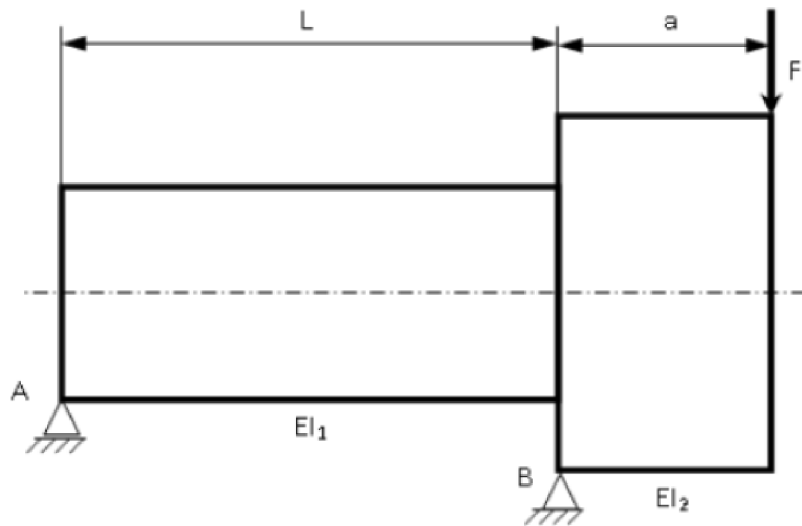
$$L_{h10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p * \frac{10^6}{60 * n} = \left(\frac{4620}{171,4}\right)^p * \frac{10^6}{60 * 21100} = \mathbf{15461,2\ hod} \quad (21)$$

V případě provozu servopohonu v blízkosti maximálních otáček, jejichž hodnota je $n_{max} = 34500\ ot/min$, se životnost ložisek sníží zhruba na $L_{h10} = \mathbf{9455,9\ hod}$.

11.2 Určení optimální vzdálenosti ložisek

Pro dosažení co nejlepší přesnosti obrábění je nezbytné stanovit správnou vzdálenost mezi ložisky. Tato vzdálenost přímo ovlivňuje deformaci a průhyb vřetene. Čím větší je vzdálenost mezi ložisky tím menší síly působí v ložiskách, ale roste průhyb vřetene a naopak. Z tohoto důvodu je nutné spočítat optimální vzdálenost mezi ložisky, kterou lze určit z celkové deformace, která je daná součtem deformace vřetene a ložisek.

Samotný výpočet se skládá z dvou částí. Nejprve je nutné stanovit průhyb vřetene, v případě že ložiska jsou uvažována jako tuhá. V druhé části se počítá deformace ložisek a průhyb vřetene, které je považováno za tuhé. Pro kompletní výpočet je nutné využít parametrického vyjádření průhybové čáry, z tohoto důvodu byl pro výpočet vytvořen zjednodušený model.



Obr. 24: Výpočtový model vřetene [33]

V prvním kroku je nutné spočítat kvadratický moment výpočtového modelu. Konkrétně se jedná o kvadratický moment v ohybu na obou koncích vřetene.[33]

$$I_1 = \frac{\pi * (D^4 - d_1^4)}{64} = \frac{\pi * (30^4 - 20.5^4)}{64} = 31091 \text{ cm}^4 \quad (22)$$

$$I_1 = \frac{\pi * (D^4 - d_2^4)}{64} = \frac{\pi * (30^4 - 14^4)}{64} = 37875 \text{ cm}^4 \quad (23)$$



Obr. 25: Průhyb vřetene zatíženého silou F za předpokladu, že ložiska jsou tuhá [33]

Dále je možné určit deformaci vřetene v závislosti na vzdálenosti L mezi ložisky za použití vztahu uvedeného níže.[33]

$$y_N = \frac{F * a^2 * L}{3 * E * I_1} + \frac{F * a^3}{3 * E * I_2} \quad (24)$$

Následně je možné spočítat deformaci jednotlivých ložisek a jejich vliv na průhyb vřetene. Ve výpočtu se vřeteno považuje za dokonale tuhé a je brána v úvahu pouze deformace ložisek. Výslednou deformaci lze určit z podobnosti trojúhelníku.[33]



Obr. 26: Průhyb vřetene za předpokladu, že ložiska jsou poddajná a vřeteno tuhé [33]

$$y_P = \frac{(y_A + y_B) * (a + L)}{L} - y_a \quad (25)$$

Pružnou deformaci vysoce přesných kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem lze určit ze vztahu.[33]

$$y_{\text{Ložiska}} = \frac{44 * 10^{-5}}{\cos \alpha} * \sqrt[3]{\frac{Q^2}{D_w}} \quad (26)$$

Kde	$\alpha = 25^\circ$	- úhel styku ložiska
	$D_w = 3,696$	- průměr valivého elementu [mm]
	F_r	- zatížení ložiska v radiálním směru
	$i = 1$	- počet řad valivých tělísek
	$z = 22$	- počet valivých tělísek v jedné řadě
	Q	- síla na valivý element, která je dána vztahem uvedeným níže[33]

$$Q = \frac{5 * F_r}{i * z * \cos\alpha} \quad (27)$$

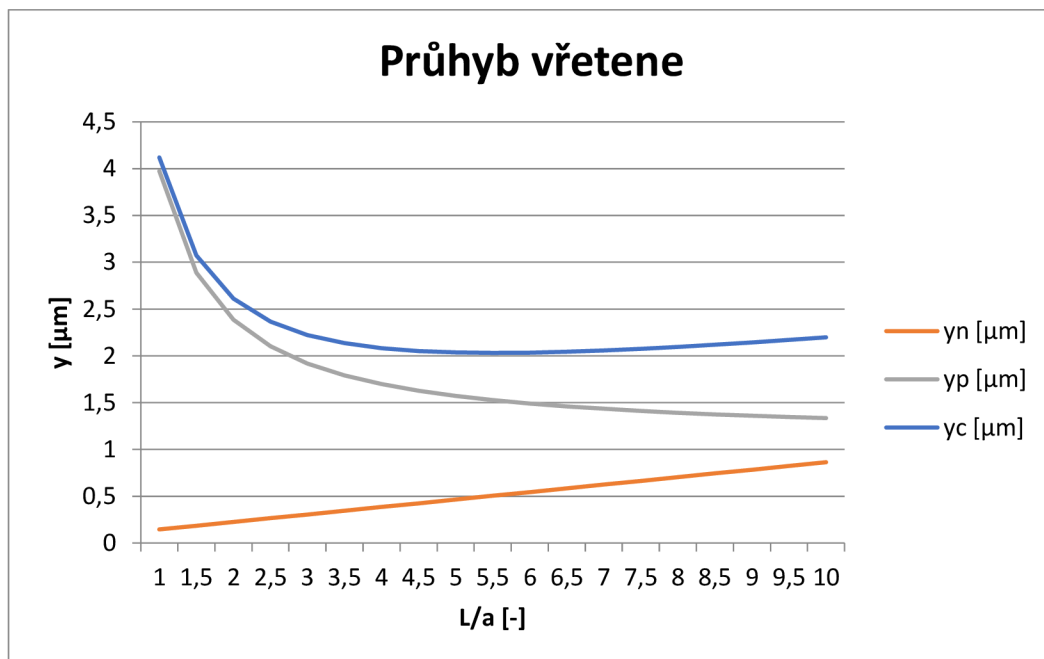
Optimální vzdálenost ložisek vřetene se určí jako nejmenší součet deformací ložisek a vřetene. Toto lze určit graficky v závislosti na hledané vzdálenosti ložisek L nebo poměru L/a. [33]

$$y_C = y_N + y_P \quad (28)$$

Z výše uvedených vztahů a hodnot je vytvořena tabulka a graf, ve kterých je uvedena a znázorněna deformace vřetene, ložisek a jejich součet.

L/a [-]	L [mm]	γ_n [μm]	γ_a [μm]	γ_b [μm]	γ_p [μm]	γ_c [μm]
1	25	0,1937	1,2430	1,5661	4,3751	4,5688
1,5	37,5	0,2468	1,0858	1,4737	3,1801	3,4270
2	50	0,3000	0,9866	1,4229	2,6276	2,9276
2,5	62,5	0,3532	0,9158	1,3905	2,3131	2,6663
3	75	0,4064	0,8618	1,3681	2,1114	2,5178
3,5	87,5	0,4596	0,8187	1,3516	1,9717	2,4312
4	100	0,5127	0,7830	1,3390	1,8695	2,3822
4,5	112,5	0,5659	0,7529	1,3290	1,7916	2,3575
5	125	0,6191	0,7269	1,3209	1,7304	2,3495
5,5	137,5	0,6723	0,7042	1,3142	1,6811	2,3534
6	150	0,7255	0,6840	1,3085	1,6406	2,3661
6,5	162,5	0,7786	0,6660	1,3037	1,6068	2,3854
7	175	0,8318	0,6498	1,2996	1,5780	2,4099
7,5	187,5	0,8850	0,6350	1,2959	1,5534	2,4384
8	200	0,9382	0,6215	1,2928	1,5320	2,4702
8,5	212,5	0,9914	0,6091	1,2899	1,5133	2,5047
9	225	1,0445	0,5976	1,2874	1,4969	2,5414
9,5	237,5	1,0977	0,5869	1,2852	1,4822	2,5799
10	250	1,1509	0,5769	1,2831	1,4691	2,6200

Tab. 3: Hodnoty deformace ložisek a vřetene, jejich součet v závislosti na vzdálenosti ložisek



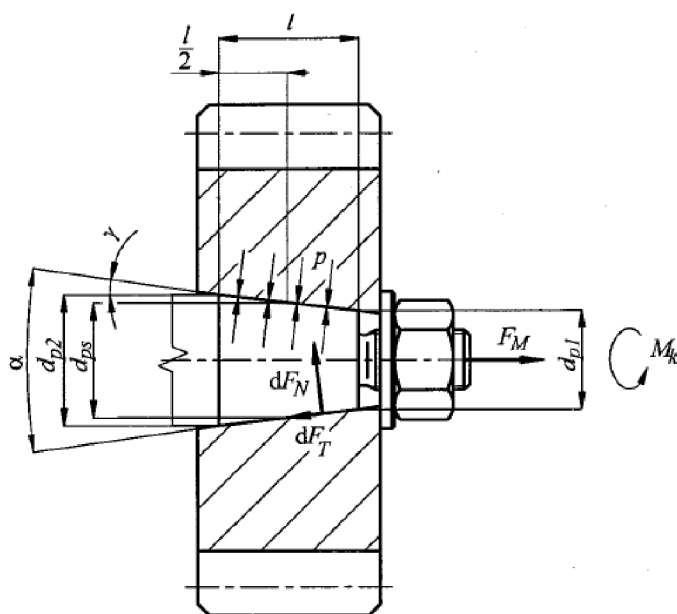
Obr. 27: Závislost deformace vřetene na vzdálenosti ložisek

Z vypočtených hodnot lze usoudit, že vhodná vzdálenost ložisek L je 3,5 až 5,5 násobek vzdálenosti a, čemuž odpovídá L=87,5–132,5 mm. S ohledem na co nejmenší rozměry celého konstrukčního řešení byla zvolena nejmenší možná vzdálenost v tomto intervalu a to L=87,5 mm.

12 Upínací mechanismus

V praxi se pro upínání nástroje obvykle používá normovaný kužel. S ohledem na požadavky na kompaktnost nástrojové hlavy, nebylo v tomto případě použito existující řešení, které lze na trhu najít. Důvodem je také nutnost nalisování hřídele do kleštiny. Tento upínací mechanismus je důkladněji popsán níže v dalších podkapitolách.

Navrhovaná kleština má kuželovou a válcovou část, avšak z výpočtového hlediska je podstatná především část kuželová, kde dochází k přenosu veškerého výkonu. K výpočtu jsou využity vzorce na výpočet svěrného spoje s kuželovou stykovou plochou.



Obr. 28: Silové a momentové poměry svěrného spoje s kuželovou stykovou plochou při montáži [31]

Parametry potřebné pro výpočet:[31]

$d_1 = 14 \text{ mm} = 0,014 \text{ m}$	- průměr širší části kužele
$d_2 = 8,8 \text{ mm} = 0,0088 \text{ m}$	- průměr užší části kužele
$l_2 = 24 \text{ mm} = 0,024 \text{ m}$	- délka kužele
$\gamma = 6,38^\circ$	- úhel kužele
$f = 0.05$	- třecí koeficient
$k_w = 1.5$	- koeficient bezpečnosti
$M_k = 59 \text{ mNm} = 0,059 \text{ Nm}$	- kroutící moment servopohonu
$d_{ps} = 11,4 \text{ mm} = 0,0114 \text{ m}$	- střední průměr kužele

$$p_{min} = \frac{2 * k_w * M_k * \cos\gamma}{\pi * f * l * d_{ps}^2} = \frac{2 * 0,059 * 1,5 * \cos 6,38}{\pi * 0,05 * 0,024 * 0,0114^2} \quad (29)$$

$$= \mathbf{0,359 MPa}$$

$$F_{M2} = \int_0^{2\pi} p_{min}(\sin\gamma + f\cos\gamma) \frac{l}{\cos\gamma} \frac{d_{ps}}{2} d\alpha \quad (30)$$

$$= \pi * p_{min} * (\tan\gamma + f) * l * d_{ps} = \mathbf{49,9 N}$$

Na základě těchto výpočtů bylo možné vybrat vhodnou pružinu. Vybrána byla talířová pružina číslo 0195 od výrobce Hennlich o parametrech uvedených v tabulce. Zvolena byla pružina s nejmenší nutnou silou pro její stlačení. Zvolenou pružinu lze stlačit o 0,1 mm při použití přitlačné síly 59 N. Při použití 50 takovýchto pružin lze dosáhnout maximálního zdvihu 5 mm.

D _e [mm]	D _i [mm]	t [mm]	l ₀ [mm]	S ₁ [mm]	F ₁ [N]	S ₂ [mm]	F ₂ [N]	S ₃ [mm]	F ₃ [N]	F _c [N]	M [g]	Číslo zboží
20,0	8,2	0,60	1,30	0,18	214	0,35	342	0,53	412	453	1,23	0190
	8,2	0,70	1,35	0,16	262	0,33	442	0,49	569	668	1,44	0191
	8,2	0,80	1,40	0,15	315	0,30	557	0,45	751	921	1,64	0192
	8,2	0,90	1,45	0,14	374	0,28	685	0,41	954	1201	1,85	0193
	8,2	1,00	1,55	0,14	494	0,28	917	0,41	1294	1648	2,05	0194
	10,2	0,50	0,90	0,10	59	0,20	102	0,30	136	165	0,91	0195
	10,2	0,50	1,15	0,16	141	0,33	219	0,49	254	268	0,91	C 0200
	10,2	0,80	1,35	0,14	304	0,28	547	0,41	748	929	1,46	B 0200
	10,2	0,90	1,45	0,14	412	0,28	754	0,41	1050	1323	1,64	0196
	10,2	1,00	1,55	0,14	544	0,28	1010	0,41	1425	1815	1,82	0197
	10,2	1,10	1,55	0,11	548	0,23	1050	0,34	1521	1976	2,01	A 0200
	10,2	1,25	1,75	0,13	890	0,25	1708	0,38	2477	3222	2,28	0198
	10,2	1,50	1,80	0,07	857	0,15	1695	0,23	2521	3340	2,74	0199

Tab. 4: Talířové pružiny DIN 2093 *Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.*

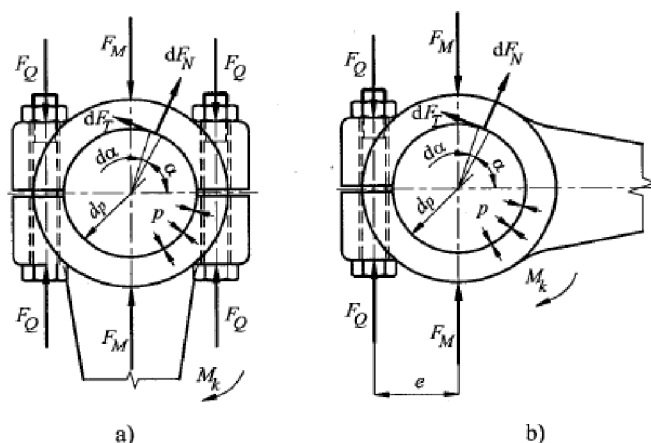
Pro stlačení těchto pružin je použit tlačný elektromagnet výrobce Tremba, a to konkrétně typ ITS-LS-4035-D-24VDC o síle 75 N. Cena tohoto elektromagnetu je 464 Kč. Pro tento typ jsou tedy parametry vybrané pružiny vhodné, jelikož jej nebude nutné využívat na plný výkon



Obr. 29: Tremba HMA-2622d.002-24VDC [35]

13 Upínání nástroje

Upínání nástroje je řešeno pomocí svěrného spoje s válcovou stykovou plochou. Princip upnutí je obdobný s upínáním kleštiny, avšak s tím rozdílem, že narozdíl od kleštiny je zde síla přenašena přes válcovou plochu. [31]



Obr. 30: Silové a momentové poměry svěrného spoje s válcovou stykovou plochou [31]

Pro výpočet síly působící mezi stykovými plochami lze využít níže uvedených vzorců.

$k_w = 1,5$ - koeficient bezpečnosti

$M_k = 59 \text{ mNm} = 0,059 \text{ Nm}$ - kroutící moment

$f = 0,05$ - třecí koeficient

$l = 16,5 \text{ mm} = 0,0165 \text{ m}$ - délka stykové plochy

$d_p = 3,175 \text{ mm} = 0,003175 \text{ m}$ - průměr nástroje

p_{min} - minimální tlak

$$p_{min} = \frac{2 * k_w * M_k}{\pi * f * l * d_p} = \frac{2 * 1,5 * 0,059}{\pi * 0,05 * 0,0165 * 0,003175^2} = \mathbf{6,7 \text{ MPa}} \quad (31)$$

$$F_{M1} = \int_0^{\pi} p_{min} * l * \frac{d_p}{2} * \sin \alpha d\alpha = p_{min} * l * d_p$$

$$= 5,4 * 10^6 * 0,0165 * 0,003175 = \mathbf{437,8 \text{ N}} \quad (32)$$

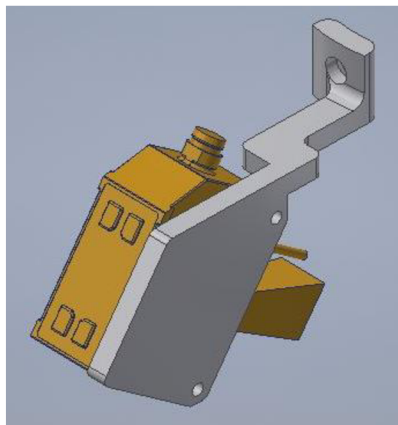
14 Rotační mechanismus

Navrhovaná fréza s AVM musí splňovat velmi důležitou podmínku a tou je odměřování vzdálenosti nástroje od obráběného materiálu v reálném čase s možností měnit svou pozici vůči vertikálnímu směru. K tomuto účelu byl po konzultaci s výrobcem vybrán triangulační snímač OD Mini OD1-B100C50I14 od společnosti SICK. Cena tohoto snímače je 24832 Kč a k tomu ještě nutně dokoupit kabel který stojí 219 Kč Tento snímač dokáže spolehlivě měřit vzdálenost pod sklonem až 45° za normálních podmínek, v případě vystavení přímému slunečnímu svitu pod sklonem maximálně 30° .

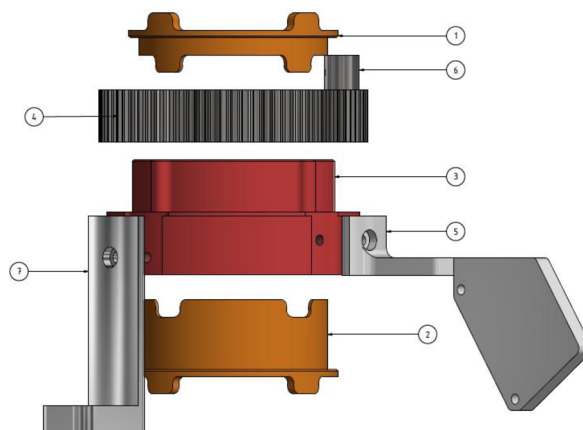


Obr. 31: Sensor OD-Mini B100C50I14 [37]

Ke správné funkci celého aparátu je nezbytné, aby laserový paprsek vždy snímal oblast před nástrojem ve směru jeho pohybu. Tato funkce je umožněna díky otočnému mechanismu, na kterém je laserový snímač připevněn. Otočný mechanismus se skládá z krokového motoru, dvou čelních ozubených kol (č.4 a č.6), dvou bronzových kluzných ložisek (č.1 a č.2) a otočného rámu (rotoru č.3), na kterém jsou umístěny držák miniaturního aktuátoru (č.7) a držák na laser (č.5)



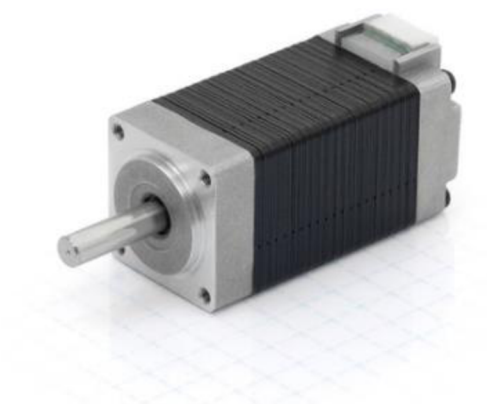
Obr. 32: Držák na laser SICK



Obr. 33: Rotační mechanismus

Většina z komponent rotačního mechanismu jsou kusové výroby, až na ozubené soukolí, které lze zakoupit z dostupných zdrojů na trhu a dodatečně obrobít podle výkresu. Součástí odměřovacího aparátu je také Micro Cylinder od společnosti IAI, který má zdvih 10 mm. Pohon je umístěn na držáku. Tento aparát slouží k přitlačování materiálu, má také funkci změny výšky vůči povrchu materiálu, aby nedošlo k poškození obráběného materiálu.

Na soukolí, které převádí kroutící moment z krokového motoru typu ST2018L0804-B od společnosti NANOTEC PLUG&DRIVE, nejsou kladeny nijak zásadní požadavky, jelikož se jedná pouze o otáčení rotačního mechanismu. Na základě známých rozměrů tohoto mechanismu bylo možné vybrat vhodné rozměry ozubených kol z katalogů výrobců NORELEM. Není tedy nutné řešit korekce zubů. Díky tomu nebylo nutné stanovit veškeré parametry ozubených kol a bylo možné přímo přejít k vypočtu součinitele trvání záběru pomocí následujících vztahů. Cena tohoto krokového motoru ke €46,50.

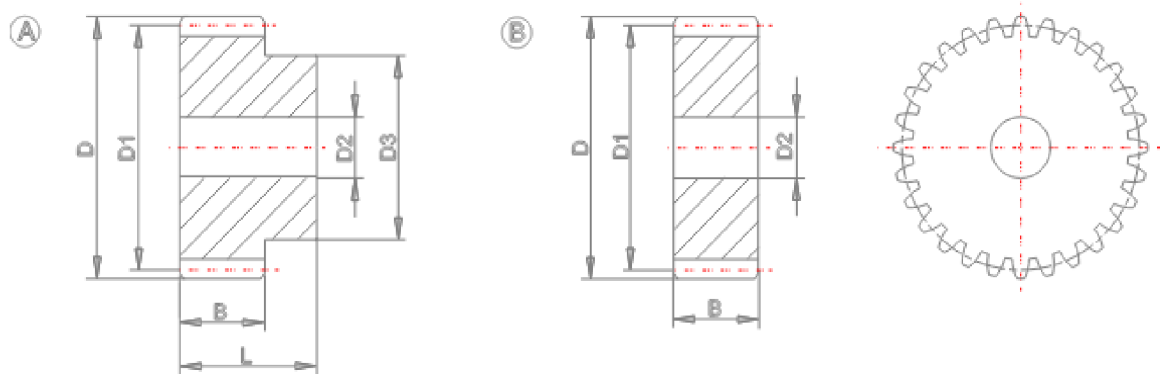


Obr. 34: ST2018L0804-B Stepper motor NEMA 8 [36]

Byla vybrána následující dvojice ozubených kol od výrobce NORELEM

	Hnací 22400-110150013	Hnané -22400-210150075
Počet zubů - z	13	75
Průměr hlavové kružnice - D	15 mm	77 mm
Průměr roztečné kružnice - D ₁	13 mm	75 mm
Modul ozubení - m	1	
Šířka ozubení - b	15 mm	
Tlakový úhel - α	20°	
Výška hlavy zubu - h _a [*]	1	
Cena	€ 3,8 = 96 Kč	€20,08 = 512 Kč

Tab. 5: NORELEM: Spur gears in steel [38]



Obr. 35: NORELEM: Spur gears in steel [38]

Nejprve stanovíme potřebné geometrické parametry soukolí jako je rozteč:[32]

$$p = m * \pi = 1 * 3,14 = \mathbf{3,14} \quad (33)$$

Výška hlavy:[32]

$$h_{a1} = h_a^* * m = 1 * 1 = \mathbf{1} \quad (34)$$

Poloměry roztečných válců:[32]

$$r_1 = \frac{m * z_1}{2} = \frac{1 * 13}{2} = \mathbf{6,5 \text{ mm}} \quad (35)$$

$$r_2 = \frac{m * z_2}{2} = \frac{1 * 75}{2} = \mathbf{37,5 \text{ mm}} \quad (36)$$

Poloměry hlavových válců:[32]

$$r_{a1} = r_1 + h_a = 6,5 + 1 = \mathbf{7,5 \text{ mm}} \quad (37)$$

$$r_{a2} = r_2 + h_a = 37,5 + 1 = \mathbf{38,5 \text{ mm}} \quad (38)$$

Poloměry základních válců:[32]

$$r_{b1} = r_1 \cos \alpha = 6,5 * \cos 20 = \mathbf{6,108 \text{ mm}} \quad (39)$$

$$r_{b2} = r_2 \cos \alpha = 37,5 * \cos 20 = \mathbf{35,2384 \text{ mm}} \quad (40)$$

Osová vzdálenost:[32]

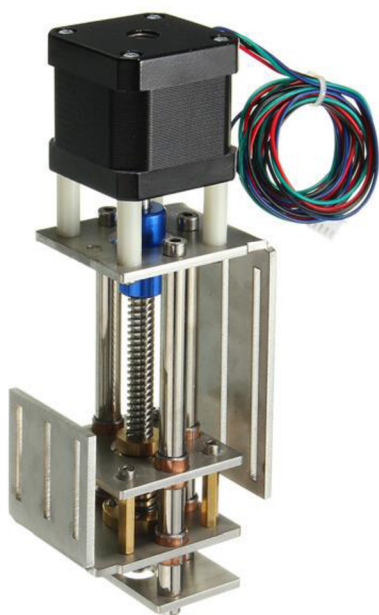
$$a = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{13 + 75}{2} = \mathbf{44 \text{ mm}} \quad (41)$$

Součinitel trvání záběru:[32]

$$\begin{aligned} \varepsilon_a &= \frac{\sqrt{r_{a1}^2 - r_{b1}^2} + \sqrt{r_{a2}^2 - r_{b2}^2} - a * \sin \alpha}{p * \cos \alpha} \\ &= \frac{\sqrt{7,5^2 - 6,108^2} + \sqrt{38,5^2 - 35,2384^2} - 44 * \sin 20}{3,14 * \cos 20} \quad (42) \\ &= \mathbf{1,62982} \end{aligned}$$

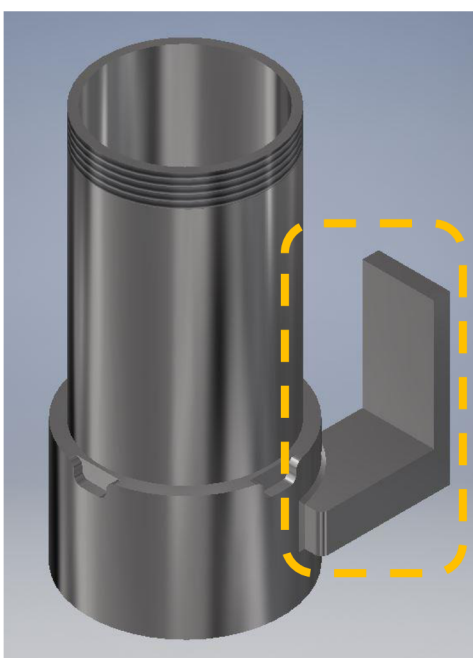
15 Posuvný mechanismus

Jak již bylo zmíněno dříve, jedna ze základních podmínek zadání této práce je funkce změny výšky frézovací hlavy v reálném čase. To je umožněno díky triangulačnímu laserovému snímači od společnosti SICK a CNC lineárnímu pohonu s krokovým motorem se závitovou tyčí. Krokový motor je bipolární, což umožňuje chod ve směru i proti směru otáčení hodinových ručiček.



Obr. 36: CNC lineární pohon s krokovým motorem [40]

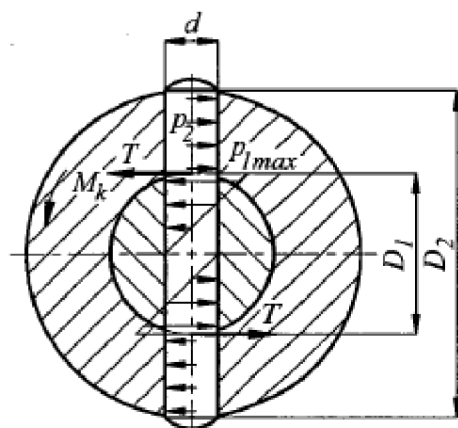
Tento CNC lineární pohon je řešení dostupné na trhu a umožňuje zdvih 50 až 60 mm. Cena této sestavy se liší dle obchodů, nicméně se pohybuje v rozmezí od přibližně 1300,- až do 3000,-. Tento lineární pohon je spojen s posuvnou pákou, která je přivařena k tělu nástrojové hlavy – tubusu, a to za pomoci šroubů. Posuvná páka (na obrázku vyznačená oranžově) je navržena v softwaru Autodesk Inventor jako prototyp, a to z důvodu, že při tvorbě této práce nebyl k dispozici 3D model uvažovaného lineárního pohonu. V případě zakoupení tohoto typu lineárního pohonu bude nezbytné konstrukci posuvné páky upravit tak, aby byla proveditelná montáž pohonu a posuvné páky.



Obr. 37: Posuvná páka přivařená k tubusu

16 Spojovací kolíky

Pro přenos kroutícího momentu mezi jednotlivými částmi byly použity spojovací kolíky. Namáhání těchto kolíků je za předpokladu správného lícování stejné jako u spojovacích čepů a také postup jejich dimenzování je obdobný. Rozložení tlaku po délce stykových ploch kolíků se spojovanými součástmi nemusí být však konstantní. Na obrázku je uveden příklad spojení součásti zatížené kroutícím momentem M_k pomocí kolíku, který je namáhán tlakem a smykem. Velikost tlaku p_{1max} se stanoví za předpokladu lineárního průběhu podél otvoru v hřídeli ze vztahu.[31] Všechny kolíky jsou zvoleny dle normy ISO 2338 z konstrukční oceli, která má minimální pevnost v tahu 350 MPa, dovolený tlak 90 MPa a dovolené napětí ve smyku $\tau_d = 50$ MPa.



Obr. 38: Spojovací kolíky [31]

16.1 Výpočet parametrů mezi kolíkem, nábojem a hřídelem hnacího motoru

Výpočet tlaku mezi kolíkem a hřídelem motoru:[31]

$$p_{1max} = \frac{6 * M_k}{d * D_1^2} = \frac{6 * 0,059}{0,002 * 0,004^2} = \mathbf{11,1 MPa} \quad (43)$$

Výpočet tlaku mezi kolíkem a nábojem:[31]

$$p_2 = \frac{4 * M_k}{d * (D_2^2 - D_1^2)} = \frac{4 * 0,059}{0,002 * (0,01^2 - 0,004^2)} = \mathbf{1,4 MPa} \quad (44)$$

Smykové napětí:[31]

$$\tau_s = \frac{4 * M_k}{\pi * d^2 * D_1} = \frac{4 * 0,059}{\pi * 0,002^2 * 0,004} = \mathbf{4,7 MPa} \quad (45)$$

Napětí v krutu:[31]

$$\begin{aligned} \tau_s &= \frac{16 * M_k}{\pi * D_1^3 * \left(1 - 0,9 * \frac{d}{D_1}\right)} = \frac{16 * 0,059}{\pi * 0,004^3 * \left(1 - 0,9 * \frac{0,002}{0,004}\right)} \\ &= \mathbf{8,5 MPa} \end{aligned} \quad (46)$$

16.2 Vypočet parametrů mezi kolíkem, nábojem a centrálním hřídelem

Výpočet tlaku mezi kolíkem a centrálním hřídelem:[31]

$$p_{1max} = \frac{6 * M_k}{d * D_1^2} = \frac{6 * 0,059}{0,002 * 0,006^2} = \mathbf{5 MPa} \quad (47)$$

Výpočet tlaku mezi kolíkem a nábojem:[32]

$$p_2 = \frac{4 * M_k}{d * (D_2^2 - D_1^2)} = \frac{4 * 0,059}{0,002 * (0,01^2 - 0,006^2)} = \mathbf{1,8 MPa} \quad (48)$$

Smykové napětí:[31]

$$\tau_s = \frac{4 * M_k}{\pi * d^2 * D_1} = \frac{4 * 0,059}{\pi * 0,002^2 * 0,006} = \mathbf{3,1 MPa} \quad (49)$$

Napětí v krutu:[31]

$$\begin{aligned} \tau_s &= \frac{16 * M_k}{\pi * D_1^3 * \left(1 - 0,9 * \frac{d}{D_1}\right)} = \frac{16 * 0,059}{\pi * 0,006^3 * \left(1 - 0,9 * \frac{0,002}{0,006}\right)} \\ &= \mathbf{2 MPa} \end{aligned} \quad (50)$$

16.3 Výpočet parametrů mezi kolíkem, hřídelem krokového motoru a hnacím ozubeným kolem

Výpočet tlaku mezi kolíkem a hřídelem krokového motoru a hnacím ozubeným kolem:[31]

$$p_{1max} = \frac{6 * M_k}{d * D_1^2} = \frac{6 * 0,016}{0,002 * 0,004^2} = \mathbf{3 MPa} \quad (51)$$

Výpočet tlaku mezi kolíkem a hnacím ozubeným kolem:[32]

$$p_2 = \frac{4 * M_k}{d * (D_2^2 - D_1^2)} = \frac{4 * 0,016}{0,002 * (0,01^2 - 0,004^2)} = \mathbf{0,4 MPa} \quad (52)$$

Smykové napětí:[31]

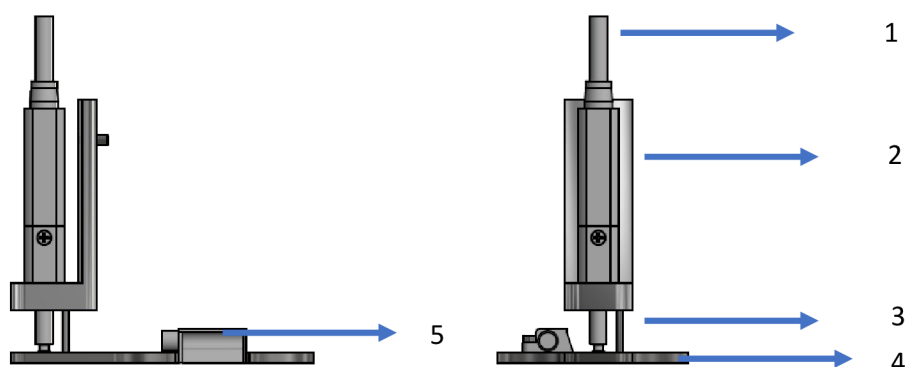
$$\tau_s = \frac{4 * M_k}{\pi * d^2 * D_1} = \frac{4 * 0,016}{\pi * 0,002^2 * 0,004} = \mathbf{1,3 MPa} \quad (53)$$

Napětí v krutu:[31]

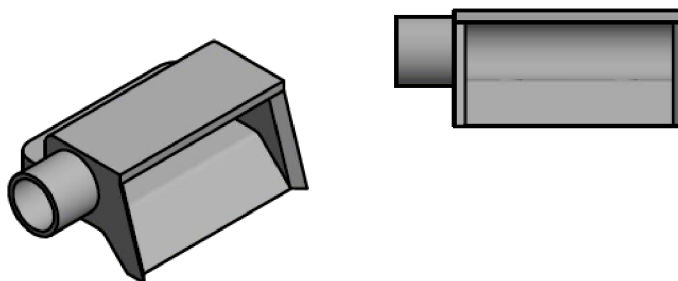
$$\tau_s = \frac{16 * M_k}{\pi * D_1^3 * \left(1 - 0,9 * \frac{d}{D_1}\right)} = \frac{16 * 0,016}{\pi * 0,004^3 * \left(1 - 0,9 * \frac{0,002}{0,004}\right)} = \mathbf{2,3 MPa} \quad (54)$$

17 Odsávání třísky

Odsávací zařízení třísek je umístěno na přítlačné desce hlavy, která je spojena s lineárním pohonem RCD-RA1DA-I-3-2-10-D5-P(0) od společností IAI. [45] Na hrdlo tohoto zařízení bude připojena pružná hadice o průměru přibližně 6 mm. Samotné odsávací zařízení bude zhotoveno za pomoci 3D tiskárny. Přítlačná deska, ke které je odsávací zařízení upevněno, je zhotovena jako výpalek pomocí laserového paprsku. Odsávací zařízení bude k desce připevněno za pomoci dvou šroubů.



Obr. 39: 1 - Lineární pohon, 2 - Držák lineárního pohonu, 3 – Naváděcí kolík, 4 - Přítlačná deska, 5 – Odsávací zařízení



Obr. 40: Odsávací zařízení v detailu

Závěr

Cílem této diplomové práce byl konstrukční návrh nástrojové hlavy s automatickou výměnou nástroje, která bude primárně sloužit k výrobě DPS. Konstrukční návrh musel splňovat určitá kritéria. Kromě automatické výměny nástroje bylo nutné zahrnout také systém odměřování skutečné vzdálenosti nástroje od povrchu obráběného materiálu, a to v reálném čase. Dalším požadavkem byl také systém odvodu třísek, které při procesu obrábění vznikají.

V první části se tato práce zaměřuje na rešerši existujících typů a řešení DPS. Dále shrnuje materiály používané k výrobě DPS. Následující kapitola se věnuje metodám výroby DPS, a nakonec je celá tato teoretická část zakončena souhrnem existujících řešení na trhu.

Následující kapitoly jsou věnovány obecnému pojednání o automatické výměně nástrojů a jejich možných konstrukčních variantách a také se zde krátce pojednává o servopohonech a jejich typech.

Hlavním cílem této práce je konstrukční návrh nástrojové hlavy s AVN. V úvodu samotného návrhu bylo nutné zvolit a dopočítat vhodné řezné podmínky. Tyto řezné podmínky jsou blíže specifikovány v příslušné kapitole. Na základě řezných podmínek byl vybrán servopohon, který disponoval vyhovujícím poměrem otáček a kroutícího momentu. Následně bylo možné na základě maximálních otáček motoru zvolit vhodná ložiska. Vybrána byla kuličková ložiska s kosoúhlým stykem, která dokáží přenášet vysoké otáčky. Součástí kapitoly věnované ložiskům byl také výpočtový návrh pro určení optimální vzdálenosti mezi ložisky. Následně bylo řešeno spojení hřídele a kleštiny, přičemž byl zvolen způsob nalisování s přesahem za tepla s tolerancí H6/p5. Dále byl řešen upínací mechanismus kleštiny a vřetena za pomoci svěrného spoje s kuželovou stykovou plochou. Na základě určené síly F_{M2} , tedy síly vznikající působením tlaku mezi styčnými plochami, bylo následně možné zvolit talířové pružiny, které ve spolupráci se zvoleným tlačným elektromagnetem, umožňují funkci AVN. Upínání nástroje v kleštině je řešeno pomocí svěrného spoje s válcovou stykovou plochou. Další důležitou součástí návrhu byl systém odměřování vzdálenosti nástroje od povrchu obráběného materiálu za pomoci laserového triangulačního snímače.

Tento laserový snímač je umístěn na rotačním mechanismu, který má funkci otáčet se podle směru frézování. Funkce otáčení rotačního mechanismu je umožněna díky krokovému motoru a soukolí s čelními ozubenými koly. Data ohledně vzdálenosti nástroje od povrchu materiálu jsou následně přenášena do CNC lineárního pohonu, který zajišťuje vertikální pohyb celé nástrojové hlavy. Odsávání třísek je řešeno pomocí pružné hadice přivedené do oblasti obrábění.

Tento prototyp nástrojové hlavy s AVN splňuje veškerá kritéria stanovená zadáním. Ekonomickou náročnost nebylo bohužel možné určit, jelikož výrobci některých komponent nebyli ochotni poskytnout cenovou nabídku. Zároveň se výsledná cena může odvíjet také podle toho, zdali budou veškeré komponenty vybrány z dostupných řešení na trhu, nebo zdali budou některé z nich například vyrobeny pomocí 3D tisku a podobně.

Bibliografie

- [1] MAPROS s.r.o.: *Dodávky plošných spojů* [online]. [cit. 2020-10-16]. Dostupné z: <http://www.marpos.cz/vyroba-plosnych-spoju/>
- [2] OLMR, Vít. Hw.cz. *Ohebné plošné spoje* [online]. 2006 [cit. 2020-10-16]. Dostupné z: <http://hw.cz/produkty/obecne-produkty/art1485-co-jsou-ohebne-plosne-spoje-a-k-cemu-se-hodi.html>
- [3] Технология производства печатных плат в картинках. *Rezonit* [online]. [cit. 2020-10-16]. Dostupné z: <https://www.rezonit.ru/directory/baza-znaniy/tekhnologiya-izgotovleniya-pechatnykh-plat-v-kartinkakh/>
- [4] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 2001. ISBN 9788001023921;8001023923;.
- [5] HRAŠNA, Ing. Michal. *Prehľad základných plátovaných materiálov na výrobu DPS* [online]. 2012-04 [cit. 2020-10-16]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:7333/prehľad-zakladnych-platovanych-materialov-na-vyrobu-dps>
- [6] ABEL, Martin. *Plošné spoje se SMD, návrh a konstrukce*. Pardubice. Platan, 2000. ISBN 80-902-7332-7.
- [7] HROMADKA, Karel. *Substráty pro výkonové aplikace v elektrotechnice*. Plzeň, 2015. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Aleš Hamáček. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/23041>
- [8] KALTMAYER, Jan. *Technologie pro výrobu desek plošných spojů*. Praha, 2018. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D. Dostupné z: <http://martin.feld.cvut.cz/~pelikano/vyuka/EMT/tlustvrsvy.pdf>
- [9] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03351-1.
- [10] MALUČKÝ, Michal. *Konstrukce dělicího stroje DPS*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 41 s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/13326>. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Dvořák, Zdeněk.
MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [11] SZENDIUCH, Ivan. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Brno: VUTIUM, 2006. ISBN 80-214-3292-6.
- [12] *Stolní frézka vytvoří chladič i plošný spoj* [online]. 2018-04-24 [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/stolni-frezka-bantam.html>

- [13] CHMELA, Ondřej. *Laboratorní a malosériová výroba dvouvrstvých desek s plošnými spoji v laboratoři PROTOCAD* [online]. Brno, 2011 [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/64169>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Jiří Starý.
- [14] Pragoboard s.r.o. *Pragoboard* [online]. [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: http://www.pragoboard.cz/vrtaky_frezy
- [15] FRANKE, Jörg. *Three-Dimensional Molded Interconnect Devices (3D-MID)*. Munich: Cincinnati, Ohio : Hanser Publishers, 2014. ISBN 978-1-56990-551-7.
- [16] Pfeffer, M., Goth, C., Craiovan, D., et al. (May 25–27, 2011). 3D-assembly of molded interconnect devices with standard SMD pick & place machines using an active multi axis workpiece carrier. 2011 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM). DOI: 10.1109/ISAM.2011.5942362
- [17] VECKO, Kamil. *Metody návrhu a výroby 3D plošných spojů: Methods for the design and fabrication of 3D printed circuit boards*. Plzeň, 2019. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/11025/37521>. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Kalaš David, Ing. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/37521>
- [18] LPKF Laser & Electronics AG: Laser Direct Structuring for 3D Molded Interconnect Devices [online] https://www.lpkf.com/fileadmin/mediafiles/user_upload/products/pdf/EQ/3D-MID-LDS/brochure_lpkf_laser_direct_structuring_en.pdf
- [19] AMEND, P., C. PSCHERER, T. RECHTENWALD, T. FRICK a M. SCHMIDT. A fast and flexible method for manufacturing 3D molded interconnect devices by the use of a rapid prototyping technology. *Physics Procedia* [online]. 2010, **5**, 561-572 [cit. 2021-03-17]. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2010.08.084
- [20] Hüske, M., Kickelhain, J., Müller, J., & Eßer, G. (2001). Laser supported activation and additive metallization of thermoplastics for 3D-MIDs. In Geiger, M.; Otto, A. (Eds.), *Laser Assisted Net Shape Engineering 3 - Proceedings of the LANE 2001, Erlangen 28.-31.08* (pp. 587-598). Bamberg: Meisenbach Verlag.
- [21] *Panasonic MID Technology MIPTEC* [online]. 2017-02 [cit. 2021-3-17]. Dostupné z: <https://www.panasonic-electricworks>.
- [22] KLÍMA, Filip. *Tištěné součástky pro elektroniku: Printed electronic components*. Plzeň, 2018. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Navrátil Jiří, Ing. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/32369>
- [23] ŘEBOUN, Jan. Studijní materiál k předmětu ITE1, Tisková a flexibilní elektronika-tiskové technologie. Západočeská univerzita v Plzni. Katedra technologií a měření. 2017.

- [24] HW.CZ. Aerosol Jet printing aneb když tranzistor prochází tryskou[online]. 2015 [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/trendy/aerosol-jet-printing-aneb-kdyz-tranzistor-prochazi-tryskou.html>
- [25] MAREK, Jiří. *MM Průmyslové spektrum: Konstrukce CNC obráběcích strojů*. 2006. Praha: Vogel Publishing, 1997-. ISBN 1212-2572.
- [26] Škoda machine tool. Škoda Machine Tool Příslušenstvístrojů. [Online] [Citace: 22-03-2021.] <https://skodamt.com/cs/produkty/prislusenstvi-stroju/vymeny-nastroju>.
- [27] SKALICKÝ, Jiří. *Elektrické servopohony*. Vyd. 2. Brno: Vysoké učení technické, 2001. ISBN 80-214-1978-4. Dostupné z [www: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewiBkbLThMvAhXok4sKHT-bD4wQFjAAegQIAxAD&url=https%3A%2F%2Fwww.vutbr.cz%2Fwww_base%2Fpriloha.php%3Fdpid%3D33400&usg=AOvVaw2DdgXx0-OK69WfvANKPUCg](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewiBkbLThMvAhXok4sKHT-bD4wQFjAAegQIAxAD&url=https%3A%2F%2Fwww.vutbr.cz%2Fwww_base%2Fpriloha.php%3Fdpid%3D33400&usg=AOvVaw2DdgXx0-OK69WfvANKPUCg)
- [28] LPKF: *ProtoMat E33* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.lpkfusa.com/datasheets/prototyping/e33.pdf>
- [29] Walter Machining Calculator
- [30] SHCHANKIN, Yan. *ANALÝZA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ NALISOVANÉHO SPOJE PŘI ZATÍŽENÍ SPOJE OSOVÝMI SILAMI: Analysis of the mechanical properties of pressed cylinders when loaded by axial forces*. Praha, 2017. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Vitek Karel. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/73022>
- [31] PEŠÍK, Lubomír. *Části strojů: stručný přehled*. 1. díl. Vyd. 3., dopl. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008, 191 s. ISBN 978-80-7372-319-4.
- [32] PEŠÍK, Lubomír. *Části strojů: stručný přehled*. 2. díl. Vyd. 3., dopl. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008, 201 s. ISBN 978-80-7372-320-0.
- [33] Petr Keller, Petr Zelený. Optimalizace uložení vřetena. *TKMOST*. [Online] 13. Květen 2014. [Citace:2021-03-15.] <http://tkmost.kez.tul.cz/vystupy-projektu/inovace-vyuky-v-oblasti-specializovanych-predmetu/vyrobní-stroje-i>.
- [34] HENNLICH s.r.o.: *TALÍŘOVÉ PRUŽINY DIN 2093* [online]. 2008/2009 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.hennlich.cz/produkty/pruziny-talirove-pruziny-157/talirove-pruziny-din-2093.html>
- [35] Tremba GmbH: *Tremba HMA-2622d.002-24VDC, 100% zdvihací magnet tlačný 0.1 N 70 N 24 V/DC 4 W* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/p/tremba-hma-2622d002-24vdc100-zdvihaci-magnet-tlacny-01-n-70-n-24-vdc-4-w-503760>
- [36] NANOTEC *PLUG&DRIVE: ST2018L0804-B – Stepper motor – NEMA 8* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://en.nanotec.com/products/444-st2018l0804-b>

- [37] *SICK: Senzory pro měření vzdálenosti OD Mini / OD Mini Prime* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.sick.com/cz/cs/snimace-mereni-vzdalenosti/senzory-pro-mereni-vzdalenosti/od-mini/od1-b100c50i14/p/p326948>
- [38] *NORELEM: Spur gears in steel, module 1 toothing milled, straight teeth, engagement angle 20°* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.norelem.com/cz/en/Products/Product-overview/Systems-and-components-for-machine-and-plant-construction/22000-Drive-technology/Gears-Gear-Racks-Bevel-Gears/22400-Spur-gears-in-steel-module-1-toothing-milled-straight-teeth-engagement-angle-20%C2%B0.html>
- [39] *Dratek.cz: CNC lineární pohon s krokovým motorem* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/5441-cnc-linearni-pohon-s-krokovym-motorem.html>
- [40] *SKF: S71906 ACB/P4A* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.skf.com/ru/products/super-precision-bearings/angular-contact-ball-bearings/productid-S71906%20ACB%2FP4A>
- [41] *SKF: Lock washers - MB6* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/accessories/lock-nuts/keyway/productid-MB%206>
- [42] *SKF: KM 6 Lock nuts requiring a keyway (metric)* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/accessories/lock-nuts/keyway/productid-KM%206>
- [43] ŠTĚPÁN, Laník. *Návrh automatické výměny nástrojů pro stolní CNC frézku: Design of automatic tool change for CNC table milling machine*. Liberec, 2020. Diplomová práce. Technická Univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Petr Keller, Ph.D.
- [44] *MITcalc: Koeficient bezpečnosti* [online]. [cit. 2021-5-29]. Dostupné z: https://www.mitcalc.com/doc/help/CZ/C_safety.htm
- [45] *IAI AUTOMATION: RCD-RAIDA-I-3-2-10-D5-P(0)* [online]. [cit. 2021-6-6]. Dostupné z: <https://www.iai-automation.com/en/micro-cylinder.html>