



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# NÁVRH PENDLOVACÍ HLAVY PRO PLOŠNÉ NAVAŘOVÁNÍ INCONELU 625

DESIGN OF OSCILLATING HEAD FOR SURFACE WELDING OF INCONEL 625

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tadeáš Franc

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.

BRNO 2021

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Tadeáš Franc</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jan Zouhar, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2020/21

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

## Návrh pendlovací hlavy pro plošné navařování Inconelu 625

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navařování Inconelu 625 je jedním z klíčových prvků pro výrobu potrubních systémů určených pro spalovny. Inconel 625 je využit zejména pro svou korozní odolnost za vysokých teplot (až do 950 °C). Technologie navařování a její optimalizace je dnes velmi žádaná, jedna z technik pro zvýšení efektivity celého procesu je tzv. pendlování, které může být realizováno mnoha způsoby. Úkolem práce je najít vhodné řešení pro danou aplikaci – výroba membránových stěn, provést technický návrh a otestovat dané řešení.

### Cíle diplomové práce:

- Rešerše technologie navařování s aplikací pendlování.
- Výběr možných variant a jejich zhodnocení.
- Technická realizace, návrh vybraného řešení.
- Testování vybraného řešení.
- Technicko–ekonomické hodnocení.

### Seznam doporučené literatury:

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, 2009. 246 s. ISBN 978-8-214-4025-8.

KOCMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, 2002. 270 s. ISBN 80-21-1996-2.

LEINVEBER, J., ŘASA, J., VÁVRA, P. Strojnické tabulky. 3. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 2000. 986 s. ISBN 80-7183-164-6.

ŠTULPA, M. CNC obráběcí stroje. 2. dotisk 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008. 128 s.  
ISBN 978-80-7300-207-7.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem a výrobou pendlovací, tj. oscilující hlavy pro plošné navařování ochranné vrstvy superslitiny Inconel<sup>®</sup> 625 na membránové stěny. Konstrukčním návrhům předchází rešerše možných variant řešení. Ze dvou konstrukčních návrhů byl jeden úspěšně vyroben a sestaven a stanoveny podněty pro budoucí vylepšení. Pro snadnou optimalizaci a testování zařízení byl vytvořen program oscilačního pohybu v softwaru LinMoT Talk 6.9. Pro vyrobené zařízení byly následně vypočteny výrobní náklady a stanovena doporučená prodejní cena, na základě všeobecného kalkulačního vzorce. Výsledkem projektu je funkční zařízení, návrh na jeho řízení a technicko – ekonomické zhodnocení výrobního procesu.

### Klíčová slova

pendlovací hlava, oscilační pohyb, plošné navařování, CMT, membránové stěny, koroze, Inconel<sup>®</sup> 625, LinMoT Talk 6.9

## ABSTRACT

This diploma thesis deals with the structural design and production of a oscillating head for surface welding of a protective layer of Inconel<sup>®</sup> 625 superalloy on membrane walls. The design is preceded by a research for possible variants of the solution. Of the two designs, one was successfully manufactured and assembled, and incentives for future improvements were set. For easy optimization and testing of the device, an oscillating motion program was created in the LinMoT Talk 6.9 software. The production costs for the manufactured equipment were then calculated and the recommended selling price was determined, based on a general calculation formula. The result of the project is a functional device, a proposal for its control and a technical - economic evaluation of the production process.

### Key words

oscillating head, oscillating movement, weld overaly cladding, CMT, membrane walls, corrosion, Inconel<sup>®</sup> 625, LinMot Talk 6.9

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FRANC, Tadeáš. *Návrh pendlovací hlavy pro plošné navařování Inconelu 625* [online]. Brno, 2021. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132751>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Zouhar.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Návrh pendlovací hlavy pro plošné navařování Inconelu 625** vypracoval/la samostatně s použitím odborné literatury a pramenů a pod odborným vedením vedoucího mé diplomové práce.

.....  
V Brně dne 21. května 2021

Datum

.....  
Bc. Tadeáš Franc

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto Ing. Janu Zouharovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Rád bych také poděkoval všem pracovníkům na Ústavu strojírenské technologie, VUT Fakulty strojního inženýrství Brno, kteří mi byli nápomocni při vypracování praktické části práce

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	3
PROHLÁŠENÍ.....	4
PODĚKOVÁNÍ .....	5
OBSAH.....	6
ÚVOD.....	8
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	9
1.1 Vodní stěny spalovacích zařízení.....	9
1.1.1 Materiály membránových stěn.....	11
1.1.2 Poruchy membránových stěn.....	13
1.2 Zvýšení odolnosti membránových stěn.....	15
1.2.1 Materiály ochranných vrstev .....	15
1.2.2 Technologie pro vytvoření ochranné vrstvy .....	18
1.3 Mechanizace a automatizace navařovacího procesu.....	24
1.3.1 Oscilační pohyb navařovací hlavice .....	24
1.3.2 Lineární posuvové soustavy.....	25
2 ANALÝZA PROBLÉMU .....	29
2.1 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše .....	29
3 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ.....	31
3.1 Požadavky na konstrukci zařízení.....	31
3.2 Kontrolní výpočet oscilačních mechanismů.....	32
3.2.1 Lineární vedení s kuličkovým šroubem.....	32
3.2.2 Tubulární synchronní lineární motor s lineárním vedením .....	34
3.2.3 Celkové vyhodnocení pohonů oscilačních mechanismů.....	37
3.3 Uvažované komponenty zařízení.....	37
3.3.1 Navařovací hlavice Fronius .....	37
3.3.2 Lineární vedení Hiwin .....	38
3.3.3 Chlazení .....	39
3.4 Návrhy řešení pendlovací hlavice pro plošné navařování .....	40
3.4.1 První konstrukční návrh pendlovací hlavice.....	40
3.4.1.1 Zhodnocení prvního konstrukčního návrhu .....	42
3.4.2 Druhý konstrukční návrh pendlovací hlavice .....	43
3.4.2.1 Návrh materiálu a polotovaru vyráběných komponent.....	47
3.4.2.2 Zhodnocení druhého konstrukčního návrhu .....	48
4 REALIZACE ZVOLENÉHO KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ.....	49

4.1	Použité technologie a stroje .....	49
4.2	Volba nástrojů a řezných podmínek .....	52
4.3	Příprava NC programů .....	53
4.3.1	Programování v Inventor CAM 2021 .....	54
4.4	Výroba součástí.....	61
4.5	Montáž zařízení.....	65
4.6	Zhodnocení konstrukce a výroby .....	67
5	ŘÍZENÍ LINEÁRNÍHO MOTORU .....	69
5.1	Software LinMot Talk 6.9 .....	70
5.1.1	Konfigurace kontroleru pro oscilační pohyb navařovací hlavice .....	70
5.1.2	Programování oscilačního pohybu.....	70
5.1.3	První metoda–VAI 2 <i>Positions Continuous</i> .....	71
5.1.4	Druhá metoda–příkazová tabulka .....	72
5.2	Předpokládané zatížení motoru.....	75
5.2.1	Zhodnocení výsledků simulace.....	76
6	VÝPOČET VÝROBNÍCH NÁKLADŮ A PRODEJNÍ CENY.....	77
6.1	Vyhodnocení .....	80
	ZÁVĚR .....	81
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	82
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	88
	SEZNAM PŘÍLOH.....	90



## ÚVOD

Tepelné elektrárny, teplárny a některé typy spaloven – všechna tato zařízení využívají přeměny tepelné energie vázané v palivu k výrobě elektrické energie, popř. k vytápění objektů a budov za využití odpadního tepla. Principem je chemická přeměna paliva na tepelnou a tlakovou energii páry, která je následně využívána k pohonu turbíny a alternátoru. Palivem je obvykle fosilní palivo, ropa, biomasa a odpad.

Právě pro likvidaci spalitelného odpadu jsou určené spalovny, které ho využívají jako palivo buď samostatně, nebo s příměsí ušlechtilějšího paliva. K tomu dochází ve spalovací komoře, resp. kotli. Moderní energetické kotle jsou sofistikované jednotky založené na systému membránových vodních stěn. V trubkách stěn proudí voda, která se ve varném systému kotle mění na energeticky využitelnou páru. Vzhledem k atmosféře uvnitř kotle dochází ke značnému korozivnímu a erozivnímu opotřebení membránových stěn v řádu desetin milimetrů za rok. Především pak dochází k bodové korozi (*pitting*) a trhlinám na povrchu stěn. [1]

Tato diplomová práce je zaměřena na návrh a výrobu části prototypového zařízení, které slouží k plošnému navaření tenké vrstvy ochranného materiálu na povrch membránové stěny pomocí technologie CMT (*Cold Metal Transfer*) v kombinaci s aplikací oscilačního pohybu navařovací hlavy pro dosažení vyšší efektivity procesu a větší homogenity návaru. Tato ochranná vrstva poskytuje membránové stěně zvýšení odolnosti proti korozivním a erozivním podmínkám charakteristickým pro spalovací komory. Takové opatření vede k prodloužení životnosti membránové stěny až o 600 %. [1]

V následujících kapitolách je čtenáři představena rešeršní analýza problému s ohledem na použité technologie, konstrukční prvky a materiály. Následuje část zaměřena na vývoj a výrobu pendlovací, tj. oscilující hlavy pro plošné navařování, včetně návrhu jejího řízení. Výsledkem této diplomové práce je zařízení zajišťující oscilační pohyb navařovací hlavy, a také technicko – ekonomické zhodnocení nákladů výrobního procesu tohoto zařízení.



Obr.1 Návar ochranné vrstvy [2, 3]

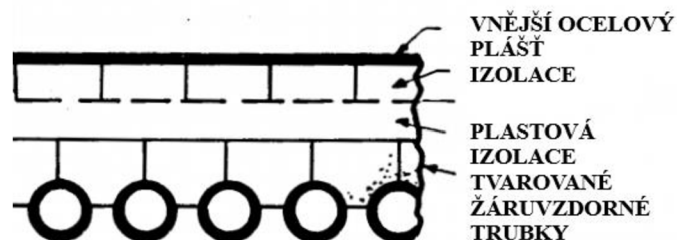
## 1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

V této kapitole je podrobněji vysvětlen vývoj konstrukce membránových a druhy opotřebení, ke kterým ve spalovacích zařízeních na vodních stěnách dochází. Na to přirozeně navazuje rozbor technologií, které se využívají na opravu takových poškození, či prevenci jejich vzniku. V závěru této kapitoly bude popsán vliv a způsoby mechanizace a automatizace zmíněných technologií.

### 1.1 Vodní stěny spalovacích zařízení

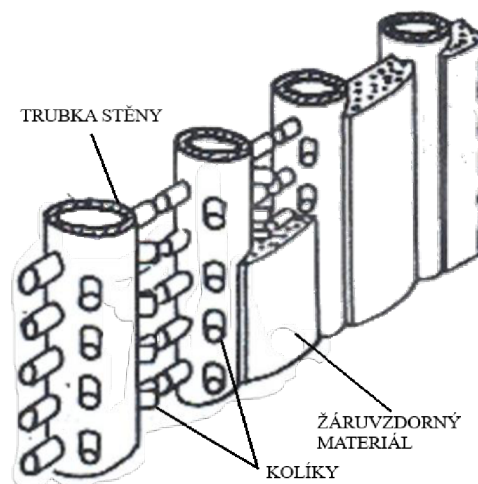
Obecně byly vodní stěny vyvinuty za účelem zvýšení spalovacího výkonu a výhřevnosti pece při současném snížení tepelných ztrát a nároků na údržbu. Přínosem konceptu vodních stěn je také nižší spotřeba žáruvzdorného materiálu, neboť voda proudící trubkami ochlazuje jejich stěny a chrání je před tepelným poškozením. Toto vylepšení spalovacích komor, jejich opláštění a tepelné izolace také přispělo ke snížení prosakování vzduchu do prostoru kotle. Celkově se tak zlepšila účinnost kotlů. Klíčovým faktorem vodních stěn je průměr trubek. Řada trubek s malým průměrem má větší funkční plochu pro přenos tepla na jednotku délky než srovnatelná stěna z trubek většího průměru, např. čtveřice trubek o průměru 50 mm má přibližně stejnou plochu průřezu jako jedna trubka o průměru 100 mm, ale povrchová plocha na jednotku délky je dvojnásobná. To znamená, že při použití menšího průměru trubek je možné použít vyšší tlaky při zachování tenké stěny trubky společně s větší plochou pro výměnu tepla z čehož vyplývá rovnoměrnější ohřev vody a tím pádem i vyšší míra vypařování. Navíc jsou tenkostěnné trubky snazší na výrobu a ohyb do požadovaných tvarů. Výhodou je také nízká hmotnost, a to díky menšímu množství vody v celém systému. Na druhou stranu vyžaduje malé množství rezervní vody a páry pečlivou a efektivní kontrolu její hladiny. Průměry použitých trubek vodních stěn závisí na typu kotle a také na jeho jednotlivých sekcích. U vodních stěn identifikujeme tyto čtyři základní konstrukční řešení: [4, 5, 6]

1. **Zasazení do žáruvzdorných cihel (*tube and tile*)** – prvotní konstrukce, která poskytovala pouze částečné řešení nutnosti údržby a tepelných ztrát. Pro zachování možnosti použití tohoto typu stěny pro výrobu tvarově složitých částí kotle je nutné dodržet minimální rozestupy mezi jednotlivými trubkami. [4]



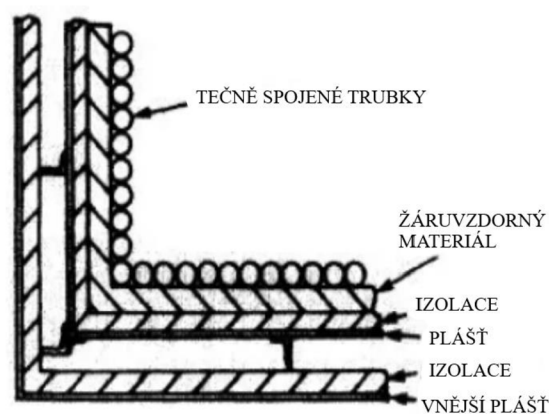
Obr. 2–Schéma vodní stěny „*Tube and tile*“. [4]

2. **Vodní stěna kolíkového typu**–je dalším typem vodní stěny využívající žáruvzdorný materiál přímo v prostoru kotle. Trubky poseté mnoha kolíky, které slouží k upevnění žáruvzdorného materiálu vyplňujícího prostor mezi jednotlivými trubkami. Vhodné jsou především do vysokoteplotních částí kotle jako jsou přemostění a klenby spalovací komory. Nicméně spaliny stále mohou za určitých podmínek pronikat do konstrukce stěny, což vede ke korozi samotných trubek i tepelné izolace. [4, 7]



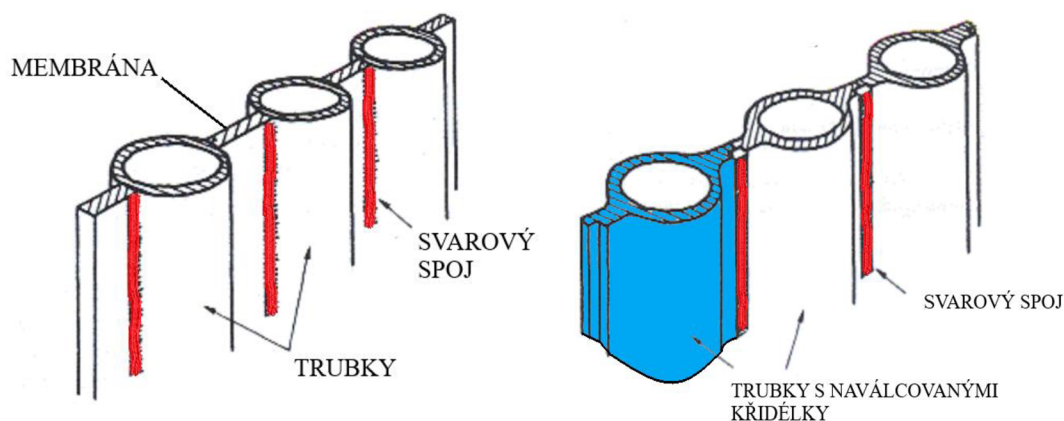
Obr. 3–Schéma stěny kolíkového typu. [4]

3. **Tangenciální typ vodní stěny**–první typ vodní stěny, kde není použit žáruvzdorný materiál na vnitřní straně stěn kotle, ale pouze jako tepelná ochrana před sálavým teplem, které stále v určitém množství proniká skrze systém tečně spojených trubek. Nevýhodou tohoto typu konstrukce je problematická oprava v případě poruchy stěny. Poškozená trubka musí být kompletně vyjmuta z řady a opravena, případně nahrazena žáruvzdorným materiálem, aby nedošlo k narušení tepelné izolace. [8, 6]



Obr.4–Schéma tangenciální vodní stěny. [8]

4. **Membránové vodní stěny**–jelikož tyto stěny nepropustí žádné sálavé teplo, poskytují kompletní plynotěsnost a maximální tepelný přenos. U této struktury se díky plynotěsnosti nevyužívá žáruvzdorného materiálu, komplikace s ním spojené jsou tak eliminovány. Celková struktura se tak skládá pouze ze svařeného panelu trubek, izolační vrstvy a opláštění na vnější straně kotle. Membránová stěna je nejlepším, ačkoliv nejdražším konstrukčním řešením vodních stěn. Existují dva poddruhy, které se liší základním konstrukčním prvkem. V prvním případě je membránová stěna tvořena trubkami, které jsou spojeny navařením na plochou tyč, tzv. membránu. Druhá koncepce–tzv. monostěna, se skládá z trubek s naválcovanými „křídélky“ a předpřipraveným odsazením, které pasuje na přilehlý kus. Průměr trubek membránových stěn je různý (28–112 mm) v závislosti na části spalovacího kotle, kde je panel použit. Nevýhodou membránových stěn je složitá oprava v případě selhání panelu trubek. Prosté vyjmutí poškozené části panelu již není možné v důsledku jednoplášťové konstrukce, která by se, vzhledem k absenci žáruvzdorné vrstvy, rychle přehřála. Místo toho se na místě provádí oprava například pomocí technologie navařování. [4, 6, 8, 9]



Obr. 5 Membránová stěna (vpravo) a monostěna (vlevo).

### 1.1.1 Materiály membránových stěn

Obecné požadavky na kovové materiály trubek a membrán můžeme rozdělit na dvě skupiny. První skupinu tvoří požadavky na vlastnosti materiálu, mezi které řadíme žárupevnost (odolnost proti porušení za tepla), korozivzdornost a žáruvzdornost (odolnost proti chemickému a elektrochemickému napadení povrchu kovu), odolnost proti erozi (abraze částicemi obsaženými ve spalinách), odolnost proti křehkému lomu (náhlá porucha bez měřitelné plastické deformace) a proti tepelné únavě. Druhá skupina pak zohledňuje požadavky na technologické vlastnosti, jako je dobrá svařitelnost, tvárnost, obrobitelnost a zachování jemnozrnné struktury při tepelném zpracování. Používají se zpravidla uhlíkové a nízkolegované oceli, kde jsou klíčovými přísadami Cr a Mo. Všechny tyto materiály jsou rozděleny v normě ČSN 42 0090–Materiály pro tepelná energetická zařízení. Výběr oceli

na trubky membránových stěn pak závisí především na provozní teplotě. Mezi nejčastěji používané materiály řadíme oceli P265GH a P235GH, 16Mo3, T91, a 13CrMo4-5. [14]

**P265GH**–je neušlechtilá, nízkouhlíková, nelegovaná ocel s označením ČSN 11 418. Patří do skupiny ocelí pro vyšší teploty a oceli žárovevné. Písmena v označení mají následující význam: **P**–svařitelná, **G**–změkčená žíhaná a **H**–kalená. Vhodná pro souvislé tepelné zatížení do 450 °C. Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli, viz tab.1. [15]

**P235GH**–dle ČSN 11 368 ze stejné skupiny jako předchozí materiál. Pro provozní teploty do 450 °C. Oproti oceli P265GH má nižší výtěžek a pevnost v tahu. Dobře svařitelná. Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli, viz tab.1. [16]

**16Mo3**–dle ČSN 15 020 patří mezi nízkolegované oceli se zvýšenou tepelnou odolností, odolností proti vysokoteplotní korozi a tečení. Provozní teploty této oceli sahají až do 500 °C. Je velice dobře svařitelná. Mechanické vlastnosti lze normalizačním žíháním zvýšit přibližně o 15-20 %. Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli, viz tab.1. [18, 19]

**T91**–feriticko martenzitická ocel s pracovními parametry do tlaku páry 27MPa a teploty až 600 °C. Charakteristickým zachováním si dobrých mechanických vlastností při vysokých teplotách, dobrou svařitelností a technologickými vlastnostmi. Obsahuje přísady Nb a V. Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli, viz tab.1. [14, 19, 20]

**13CrMo4-5**–dle ČSN 15 121 nízkolegovaná ušlechtilá ocel, vhodná pro práci do teplot 530 °C. Odolná proti korozi, se zaručenou mezí tečení, dobře svařitelná. Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli, viz tab.1. [21]

Tab. 1 Chemické složení ocelí a mechanické vlastnosti [16, 17, 18, 19, 20, 21].

	P265GH	P235GH	16Mo3	T91	13CrMo4-5
hm. % C ≤	0,2	0,16	0,2	0,13	0,18
hm. % Si ≤	0,4	0,35	0,35	0,5	0,35
hm. % Mn ≤	0,8–1,4	0,6 - 1,2	0,9	0,6	0,4 - 1
hm. % P <sub>max</sub>	0,025	0,025	0,025	0,02	0,025
hm. % S <sub>max</sub>	0,01	0,015	0,020	0,01	0,01
hm. % Cr ≤	0,3	0,3	0,3	9,5	1,15
hm. % Cu ≤	0,3	0,3	0,3		0,3
hm. % Ni ≤	0,3	0,3	0,3	0,4	0,01
hm. % Mo ≤	0,08	0,08	0,35	1,05	0,6
R <sub>e</sub> mez kluzu (MPa)	265	235	280	415	290
R <sub>m</sub> mez pevnosti (MPa)	410-530	360-500	450-600	585	450-600
Celkové prodloužení A <sub>5</sub> (%)	22	23	22	20	21
R <sub>p0,2</sub> sml. m. kluzu při 450 °C (MPa)	133	108	150	147	175

\* Uvedené hodnoty napětí platí pro tloušťku stěny e < 16 mm.

### 1.1.2 Poruchy membránových stěn

Během provozu kotle je ohřívána strana membránové stěny vystavena intenzivním tepelným vlivům a chemickým složkám, včetně pevných částic obsažených ve spalinách. Konkrétně ve spalovnách odpadu, kde je palivem směs odpadů (plasty, papír, dřevo, biomasa a průmyslový odpad) bohatých na chlór, síru a další potenciálně nebezpečné chemické sloučeniny vytvářejí korozivní plyny, roztavené soli a popel. To vede ke korozi a opotřebení, které trvale poškozuje trubky a ovlivňuje tak jejich životnost a pracovní výkon membránových panelů. I když může probíhat souběžně několik korozivních dějů, nejvíce typické je pro spalovny vysokoteplotní opotřebení, vliv chlóru a vliv solí. V takovýchto podmínkách uhlíkové a nízkolegované oceli používané pro výrobu membránových stěn rapidně podléhají lokální korozi způsobené různými chemickými reakcemi. Když se vyskytnou tato opotřebení, dojde ke ztenčení stěn trubek. Typická rychlost ztenčení stěn trubek membránových panelů leží v rozmezí 0,15–0,30 mm za rok a v extrémních případech až 2 mm za rok. Provozní životnost membránových stěn tak zpravidla nepřesahuje dobu 6–9 měsíců, v závislosti na teplotě a korozivním médiu. [1, 9]

Mezi hlavní typy koroze, ke kterým u membránových stěn se řadí vysokoteplotní koroze, bodová koroze, trhlinová koroze a erozivní koroze.

**Vysokoteplotní koroze**, viz obr. 6a, (za teplot okolo 460 °C na straně stěny a přibližně 1400 °C na straně spalin u kotlů s podkritickými parametry) vzniká v důsledku přítomnosti volného chlóru, který na povrchu materiálu vytváří chlorid železnatý. Následuje zplyňování chloridu železnatého v závislosti na lokální provozní teplotě a jeho rozklad reakcí s kyslíkem a kysličníkem síry, které difundují ze spalin směrem ke stěně trubky. Oxid se vytváří vzdáleně od trubky a znemožňuje vznik plynotěsné ochranné oxidační vrstvy oxidu železnato-železitého. Kyslík se spotřebovává na vnějších vrstvách povrchu stěny, jako jsou okuje a nánosy. Tím se na korozi frontě vytváří redukční atmosféra, která pak umožňuje tvorbu chloridu železa na stěně trubky. Sulfatace chloridů obsažených v popelovém nánosu pak přispívá k dosažení dostatečně vysokého parciálního tlaku chlóru na materiál stěny. Možné příčiny vysokoteplotní koroze jsou například redukční podmínky vzniklé nedokonalým spalováním, vysoký obsah chlóru v palivu, nedostatečné chlazení trubek nebo vysoký tepelný tok. Rychlosti vysokoteplotní koroze se mohou pohybovat v rozmezí od 25–500 nm·h<sup>-1</sup>. [10]

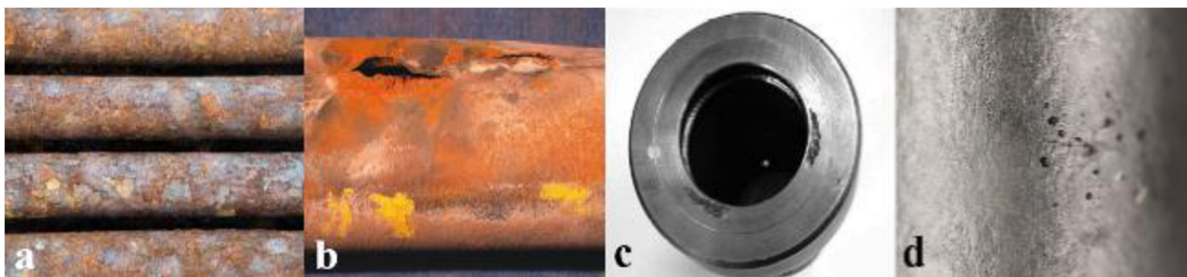
**Erozivní koroze**, viz obr. 6b, může vznikat při styku rychle proudící kapaliny nebo plynu s kovovým materiálem, jehož odolnost vůči korozi spočívá v pasivitě, tedy v existenci povrchové vrstvy korozi produktů, která potlačuje anodické rozpouštění. Pokud proudící médium obsahuje částice, ať už pevné nebo kapalné v plynu, nebo pevné a plynné (bubliny) v kapalině, poškození se dále zvýší. Směrodatným faktorem je také typ proudění média. Podstatně vyšší korozi-erozivní účinky pozorujeme u turbulentního proudění než u laminárního. Poškození také roste s rychlostí proudění daného média. Z výzkumu firmy Siemens AG vyplývá, že odolnost vůči erozivní korozi uhlíkových a nízkolegovaných ocelí, které se pro výrobu membránových stěn používají, se zvyšuje příměsí chromu, molybdenu a dokonce i mědi. Dále také, že povlaky bohaté na chrom vykazují větší odolnost proti erozivní korozi než niklové povlaky. V případě membránových stěn, jsou proudícím médiem spaliny, a to jak v plynném, tak v pevném skupenství. [11, 13]

**Bodová koroze (*pitting*)**, viz obr. 6d, se projevuje vznikem důlků na povrchu kovu bez pozorovatelného napadení jeho okolí. U membránových stěn může způsobena několika faktory, a to nedostatečnou homogenitou kovového povrchu v podobě částic jiné fáze (precipitátů) a chemických sloučenin a nekovů (inkluzí), místním vyčerpáním chromu nebo molybdenu, nebo popraskáním pasivační vrstvy. Růst důlku můžeme rozdělit do stádia zárodku a do stádia růstu. Doba nukleačního stádia je závislá na koncentraci halogenidů a platí, že čím vyšší koncentrace, tím kratší je toto stádium. Obecně pak platí, že čím více vznikne zárodků důlků, tím je menší jejich hloubka. Fáze šíření bodové koroze je usnadněna nejen zvýšenou koncentrací agresivního halogenidu, ale i přítomností oxidujících látek, zvýšenou teplotou a nízkou hodnotou pH. Ochrana před bodovou korozi spočívá především ve volbě odolného materiálu. Odolnosti lze dosáhnout například legováním molybdenem. K hodnocení odolnosti vůči bodové korozi se používá empirická hodnota indexu PRE (*pitting resistance equivalent*), viz vztah č.1. Čím je tato hodnota vyšší, tím se zlepšuje odolnost daného kovu vůči bodové korozi. Pokud index PRE dosáhne hodnoty 40, považuje se takový materiál za zcela odolný korozi. Mezi takové materiály se řadí i niklové slitiny. Snížení pravděpodobnosti vzniku tohoto typu koroze je možno dosáhnout snížením oxidačních schopností prostředí, nebo přítomností některých iontů s inhibiční schopností (dusičnany). Naopak ke vzniku tohoto typu porušení přispívá hrubě obrobený povrch, nebo přítomnost okují. [11, 12]

$$PRE = hm. \% Cr + 3,3 \cdot hm. \% Mo + X \cdot hm. \% N \quad (1)$$

Kde  $X \in (16; 30)$

**Štěrbínová koroze (*crevice corrosion*)**, viz obr. 6c, vzniká v oblastech pod různými druhy nánosů pasivních kovů, která brání pasivaci. Fáze štěrbinové koroze zahrnují vyčerpání kyslíku, nahromadění pozitivně nabitých kovových iontů, přenos negativně nabitých iontů chloridu do praskliny a jejich následnou hydrolyzu za vzniku kyseliny. Z počátku lze sledovat vytvoření důlků, které se následně spojí do trhlin. Vzniká převážně ve stísněných prostorech, kde se hromadí rezidua agresivního media, které za zvýšených teplot působí ještě prudčeji. Jedná se například o konstrukční štěrbinu, póry svarů, spoje, nebo pod povlaky, které ztratily adhezi ke kovu. Odolnosti vůči vzniku trhlin může být zvýšena přidávkou molybdenu do slitin a obecně souvisí s odolností vůči bodové korozi ve smyslu lineárního průběhu funkce indexu PRE a kritické teploty trhlin. [12]



Obr. 6 a, Vysokoteplotní koroze b, Erozivní koroze c, Štěrbínová koroze d, Bodová koroze [13, 14, 15, 16].

## 1.2 Zvýšení odolnosti membránových stěn

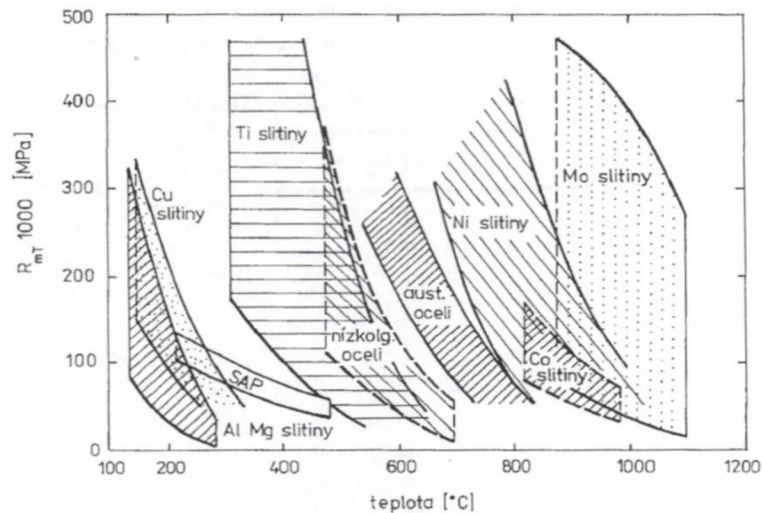
K obnově tloušťky, resp. k prodloužení životnosti stěn trubek membránových panelů existují tři základní přístupy. První možností je poškozené trubky vyjmout a nahradit novými. Výměna je ale velice nákladná v důsledku zastavení provozu spalovací komory až na několik měsíců. Navíc hrozí kolaps skladovacích prostor spaloven, které mají omezenou kapacitu. Druhou možností, jak prodloužit životnost trubek je snížení provozní teploty páry. To ovšem nepříznivě ovlivní produkci celého energetického zařízení. Posledním a aktuálně neoptimálnějším způsobem, jak se s opotřebením vypořádat, je povlakování protikorozními slitinami, konkrétně pak superslitinami na bázi niklu. Vytvoření ochranné vrstvy na membránovou stěnu lze realizovat několika způsoby, jako například pomocí ručního obloukového navařování obalenou elektrodou, navařování MIG/MAG metodou, technologií CMT, nebo za využití technologie termických nástřiků. Nejběžněji používanou technologií pro tento typ operace zůstává navařování v ochranné atmosféře inertního plynu (MIG), a to z důvodu snadné automatizace, vysoké produktivity a možnosti navařovat ve většině svařovacích pozic. Využití automatizace, mechanizace a robotizace je v oblasti svařování i navařování nezanedbatelným faktorem, neboť z hlediska kvality navařené vrstvy a produktivity je ruční navařování zejména u rozměrných a tvarově složitých součástí velice pracné a náchylné ke vzniku chyb. [1, 9]

### 1.2.1 Materiály ochranných vrstev

Jak již bylo zmíněno v předchozích podkapitolách, nejvýraznějšími korozními činiteli jsou v případě spalovacích komor agresivní chemické vlivy chloru a solí v kombinaci s vysokými teplotami a abrazivními vlastnostmi částic obsažených ve spalinách. Z tohoto důvodu se na ochranné vrstvy membránových stěn a dalších kritických komponent energetického systému používají korozivzdorné slitiny. Materiálů s takovýmto potenciálem existuje hned několik, jako například slitiny se značným podílem chromu a molybdenu, nebo superslitiny na bázi niklu.

Superslitiny na bázi niklu jsou nekomplexnějším a nejpoužívanějším druhem slitin, a vedle slitin na bázi kobaltu, niklu a hliníku, železa a niklu jednou ze čtyř skupin superslitin. Dle použití se obvykle rozdělují na konstrukční slitiny, slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi a na slitiny žáruvzdorné a žárupevné. Dle technologie výroby je lze třídit na lité slitiny, tvářené slitiny a na slitiny vyrobené práškovou metalurgií. Jedná se o polykomponentní materiály vyznačující se vysokou pevností za vysokých teplot, odolností proti tečení, korozi únavovým procesům. Matrice je dle báze Ni–Cr tvořena plošně centrovanou kubickou krystalovou mřížkou ( $\gamma$ -austenit) a zpevnění je dosaženo intermetalickými uspořádanými fázemi  $\text{Ni}_3\text{X}$  (X–Al, Ti, Nb), neboli  $\gamma'$ . Platí, že s rostoucím objemovým procentem fáze  $\gamma'$  roste i žárupevnost. Odolnost proti oxidaci a korozi mají niklové superslitiny díky legování hliníkem a chromem, které při kontaktu s pracovním prostředím okamžitě vytvářejí ochrannou vrstvu oxidů ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Mez pevnosti  $R_{mT}$  při tečení niklových slitin v porovnání s ostatními skupinami konstrukčních materiálů je znázorněna na obr. 7. V případě ochrany membránových stěn se běžně používají například niklové super slitiny Alloy 22, Alloy 86 a Alloy 625, známé též jako Inconel® 625. Z termických nástřiků používaných pro opravy a ochranu membránových stěn lze použít slitiny niklu a chromu s keramickou přísadou, případně nikl-chromové slitiny s přísadami titanu, nebo kobaltu. [1, 26, 27, 28, 29]





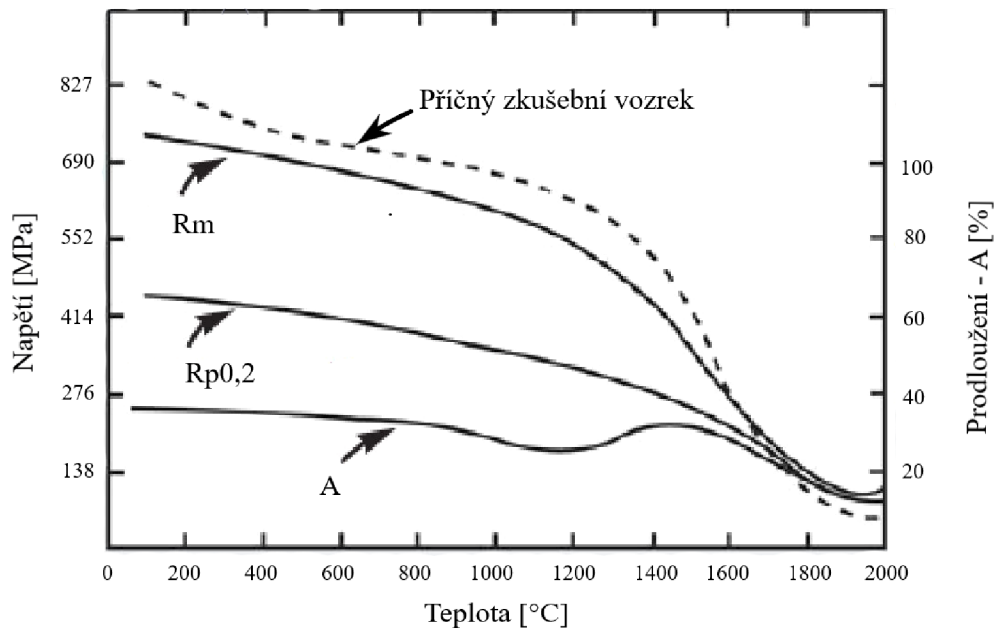
Obr. 7 Mez pevnosti  $R_{mT}$  při tečení hlavních skupin konstrukčních kovových materiálů, doba expozice 1000 h. [27]

**Slitina Inconel® 625** je ochranná známka firmy Special Metals Corporation pro superslitinu na bázi niklu, chromu a molybdenu s přidavkem niobu, který v kombinaci s molybdenem způsobuje zpevnění austenitické matrice. Vykazuje vysokou pevnost bez nutnosti tepelného zpracování, s provozními teplotami od kryogenních teplot až do 980 °C. Tato slitina odolává široké škále prudce korozivních prostředí a je obzvláště odolná vůči bodové korozi (*pitting*) a štěrbinové korozi (*crevice corrosion*). Pro tyto vlastnosti nachází použití v chemickém, jaderném, leteckém a lodním průmyslu. Ve spalovnách odpadu se často používá pro navařování ochranné vrstvy membránových stěn, výparníků a přehřívačů. Navařená vrstva nepotřebuje žádné další tepelné zpracování a toleruje vysoký stupeň zředění při zachování charakteristických vlastností. Forma drátu *Inconel Filler Metal 625* je navržena pro TIG/MIG svařovací procesy. V případě ručního obloukového navařování obalenou elektrodou dochází k vytvoření tvrdé strusky, která se po oklepaní odlupuje po velkých kusech a zanechává čistý kovový povrch návaru. Některé studie ukazují, že v případě spaloven odpadu dochází při dlouhotrvajících provozních teplotách nad 450 °C ke zvýšené míře koroze. Proto se u slitiny Inconel® 625 nedoporučují provozní teploty nad tuto hodnotu, tzn. nevhodnost použití pro panely přehřívače. Chemické složení a mechanické vlastnosti slitiny, viz tab. 2 a obr. 8. [30, 31]

Tab. 2 Chemické složení slitiny Inconel® 625 v hm. %. [30]

Ni <sub>min</sub>	Cr	Fe	Mo	Nb	C	Mn	Si	P	S	Al	Ti	Co
58	23	5	10	4,15	0,1	0,5	0,5	0,015	0,015	0,4	0,4	1

\*Uvedené hodnoty značí horní hranici obsahu daného prvku.



Obr. 8 Mechanické vlastnosti slitiny Inconel<sup>®</sup> 625 za zvýšených teplot. [30]

**Slitina Inconel<sup>®</sup> Alloy 686** má podobně jako předchozí slitina základ v jednofázové austenitické matici, která je v tomto případě zpevněna přídavkem wolframu. Vyšší obsah chromu, molybdenu a přídavek wolframu má za následek mimořádné vlastnosti vůči korozi redukčního i oxidačního charakteru. Obzvláště pak vůči bodové korozi. Z hlediska indexu PRE s hodnotou 51 zcela předčí ostatní kandidáty ze skupiny superslitin na bázi niklu ( $PRE_{\text{Inconel 625}} = 40$ ). Vzhledem k vyšší odolnosti vůči korozivním podmínkám než slitina 625 je vhodný i pro spojování a ochranu trubek přehřívače. Inconel<sup>®</sup> 686 je velice dobře svařitelný a návar nevyžaduje tepelné zpracování pro zachování korozní odolnosti. Chemické složení a mechanické vlastnosti, viz tab. 3 a 4. [32]

Tab. 3 Chemické složení slitiny Inconel<sup>®</sup> 686 v hm. %. [32]

Ni <sub>min</sub>	Cr	Fe	Mo	W	C	Mn	Si	P	S	Al	Ti
57	23	1	17	4,4	0,01	0,75	0,08	0,04	0,02	0,4	0,25

\*Uvedené hodnoty značí horní hranici obsahu daného prvku.

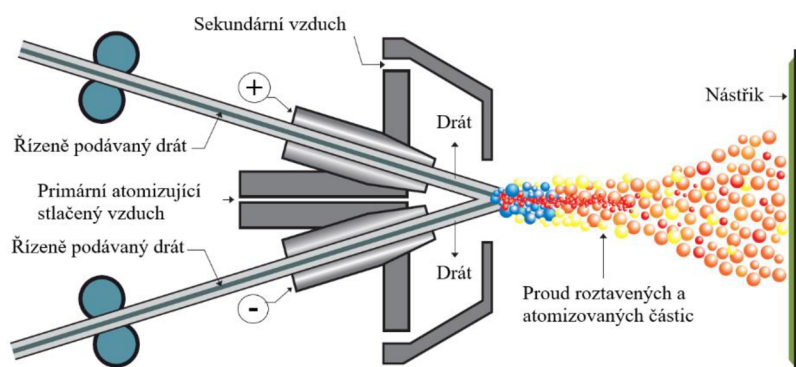
Tab. 4 Mechanické vlastnosti Inconel<sup>®</sup> 686. [32]

R <sub>m</sub> mez pevnosti [MPa]	722
R <sub>e</sub> mez kluzu [MPa]	396
R <sub>p0,2</sub> smluvní mez kluzu [MPa]	364
Prodloužení A <sub>5</sub> [%]	71

### 1.2.2 Technologie pro vytvoření ochranné vrstvy

Jak již bylo zmíněno, k vytvoření ochranné vrstvy na membránových stěnách aktuálně existují dva přístupy. Prvním, méně konvenčním způsobem je nanesení vrstvy za použití technologie žárových nástřiků, kde se ze čtyř základních metod využívá především nástřik elektrickým obloukem a vysokorychlostní nástřiky. Mezi typické vlastnosti povlaků vytvořených žárovým nástřikem patří oxidické vměstky, přilnavost a pórovitost, která je ovlivněna dopadovou rychlostí a dopadovým úhlem částic. V případě protikorozních povlaků může dojít k vytvoření průchozích kanálů pro průnik korozních činitelů, pokud je obsah pórů nad hranicí 10 %. Přilnavost, jako jedna z nejdůležitějších vlastností povlaku, je dána výslednicí sil mechanického zakotvení, Van der Waalsových sil, sil chemické vazby kovalentního a kovového druhu a metalurgickými procesy v okolí mikrosvarů. Velikost přilnavosti se pak v závislosti na metodě pohybuje v rozmezí 10–90 MPa. Další důležitá kritéria povlaků jsou kohezní pevnost, tloušťka povlaku, drsnost povlaku a teplotní roztažnost. [33]

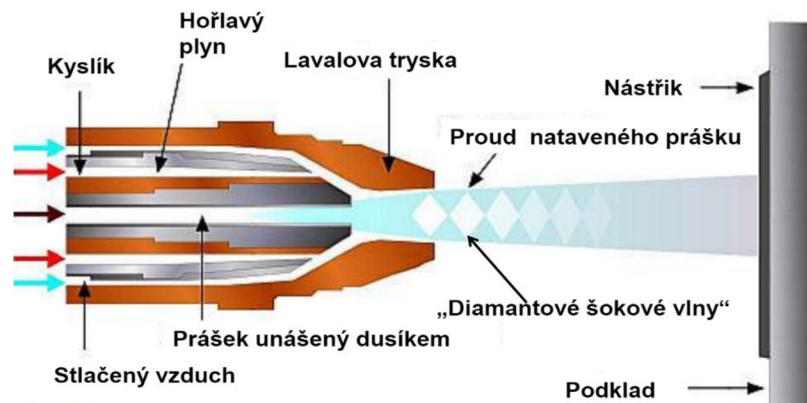
**Žárový nástřik elektrickým obloukem** je nejvýkonnější z metod žárových nástřiků, která funguje na principu vytvoření elektrického oblouku mezi dvěma nezávisle se pohybujícími, elektricky vodivými dráty napájenými stejnosměrným proudem, který vytvoří nástřikovaný materiál. Atomizace roztaveného materiálu do drobných kapek je dosaženo stlačeným vzduchem, který tyto drobné kapky zároveň urychluje, viz obr. 9. Produktivita této metody dosahuje v případě membránových stěn hodnotám do  $25 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ . Proces může být prováděn jak ručně, tak automaticky. Ve srovnání s technologií navařování má tato technologie vyšší produktivitu, nedochází k tepelné deformaci, je možné aplikovat speciální slitiny, z hlediska operátora je manipulace jednodušší a lze ji použít ve všech svařovacích pozicích. Z používaných materiálů pro povlakování membránových stěn lze uvést například materiály SK-868-M a SK-WiNi WiCo od firmy Voestalpine. Jedná se o korozi a abrazi vzdorné materiály s vysokým obsahem chromu a přídavkem titanu (SK-868-M), nebo s přídavkem kobaltu (SK-WiNi WiCö). [9, 33]



Obr. 9 Schéma nástřiku elektrickým obloukem. [9]

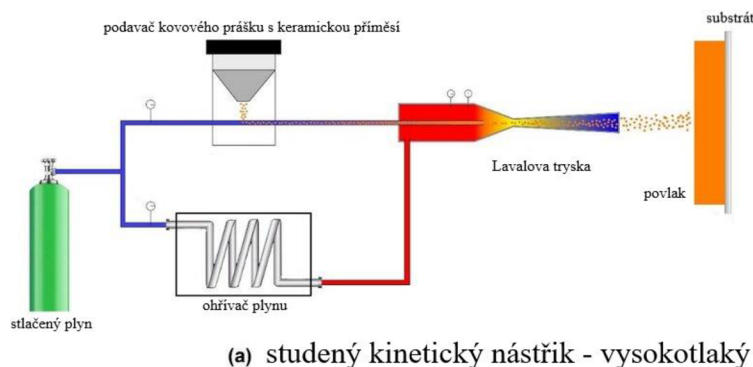
**Žárový vysokorychlostní nástřik (HVOF)**, viz obr. 10, je metoda termického nástřiku, kde se částice z hořáku pohybují rychlostí až 2 Mach ( $686 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Princip spočívá v přívodu paliva do spalovací komory zakončené Lavalovou tryskou, ze které je palivo vymrštěno vysokou rychlostí, která je dána průtokem plynu a vysokou teplotou. Přídavný materiál se používá ve formě prášku, který je unášený dusíkem. Pracovní medium tvoří směs

hořlavého plynu a kyslíku. Kritickým faktorem této metody je nutnost důmyslného chlazení a řízení podávání prášku. Příkladem může být nástřik AmStar888<sup>®</sup> od firmy GE Power, slitina niklu a chromu s keramickou přísadou, která výrazně snižuje pnutí v nástřikované vrstvě. Výrobce udává více než stonásobně vyšší odolnost proti korozi a pětinasobnou odolnost vůči erozi za teplot nad 500 °C v porovnání s uhlíkovou ocelí. [33, 29]

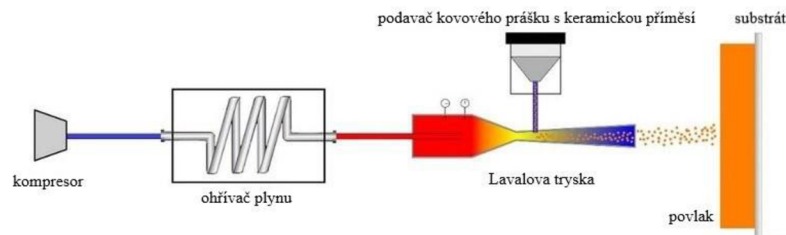


Obr. 10 Schéma nástřiku HVOF. [33]

**Studený kinetický nástřik** (obr. 11a/b) je speciální technologie povlakování, u které na rozdíl od termických nástřiků nedochází k tavení nanášených částic. Podstata vytvoření povlaku touto metodou spočívá ve vysoké kinetické energii neroztavených kovových částic. Jako urychlovač přídavného materiálu je zde využit stlačený plyn (vzduch, dusík, helium), který je predehříván na 350–600 °C pro zvýšení viskozity. Takto ohřátý plyn pak v podtlakové zóně Lavalovy konvergentně-divergentní trysky nasává přídavný materiál a urychluje částice na rychlosti až 1200 m·s<sup>-1</sup>. Další inovací této technologie je změna složení přídavného materiálu. Do kovového prášku byly přidány jemné keramické částice, které při nárazu na substrát přenášejí svou kinetickou energii do podkladových vrstev, které tak zhutňují a snižují pórovitost povlaku. Nejčastěji se touto metodou nanáší prášky čistých kovů jako hliník, měď nebo zinek, popř. prášky na bázi niklu o velikosti zrna 1–50 μm. Celé zařízení má dvě varianty, a to vysokotlakou a nízkotlakou variantu, viz obr. 11a, b. Z hlediska provozních podmínek a pracovních prostor je tato technologie velice flexibilní. Povlaky zpravidla o tloušťce 0,1–30 mm vynikají vysokou přilnavostí (40–100 MPa), nízkou pórovitostí (1–3 %). Nevýhodou však je, že lze touto metodou vytvářet povlaky pouze z relativně tažných kovů. [34, 35]



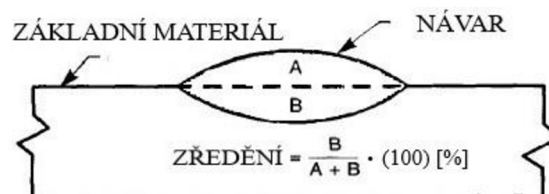
Obr. 11a Schéma studeného kinetického nástřiku. [36]



(b) studený kinetický nástřik - nízkotlaký

Obr. 11b Schéma studeného kinetického nástřiku. [36]

Druhým přístupem k vytvoření ochranné vrstvy na membránových stěnách je použití technologie navařování. Ta se od sesterské technologie svařování liší tím, že nedochází k vytváření permanentních spojů, nýbrž k nánosu přídavného materiálu, který mají obě technologie totožný. Stěžejním faktorem, který je při navařování žádoucí co nejvíce redukovat, je podíl zředění přídavného materiálu se základním materiálem. Nízká míra zředění, viz obr. 12, znamená ve výsledné vrstvě nižší vnitřní pnutí a menší deformace. Dalším faktorem, specifickým pro membránové stěny, je obsah železa ve výsledné vrstvě, který by měl být co nejnižší. To lze ovlivnit vhodným výběrem přídavného materiálu, navařovací pozicí, volbou přesahu a zajištěním cirkulace vody v trubkách stěny. Mezi výhody této technologie patří homogennost vytvořené vrstvy, pevné spojení se základním materiálem (kovová vazba) a libovolná tloušťka návaru. V porovnání s ostatními technologiemi však při navařování dochází k poměrně velkému tepelnému ovlivnění základního materiálu, nelze navařit tenké vrstvy, je energeticky náročnější a výsledný návar vyžaduje jistou formu opracování. Navařování zahrnuje mnoho metod lišících se primárně ve způsobu, kterým je taven přídavný materiál. Z běžně využívaných lze jmenovat navařování plamenem, plazmou, laserem, nebo elektrickým obloukem. V oblasti oprav a prevence korozních opotřebení membránových stěn se využívá především metody navařování elektrickým obloukem a navařuje se jak ručně obloukovým navařováním obalenou elektrodou, tak obloukovým navařováním v ochranné atmosféře inertního (MIG) nebo aktivního (MAG) plynu. Speciální formou technologie MIG/MAG je pak metoda CMT (*Cold Metal Transfer*). [37]



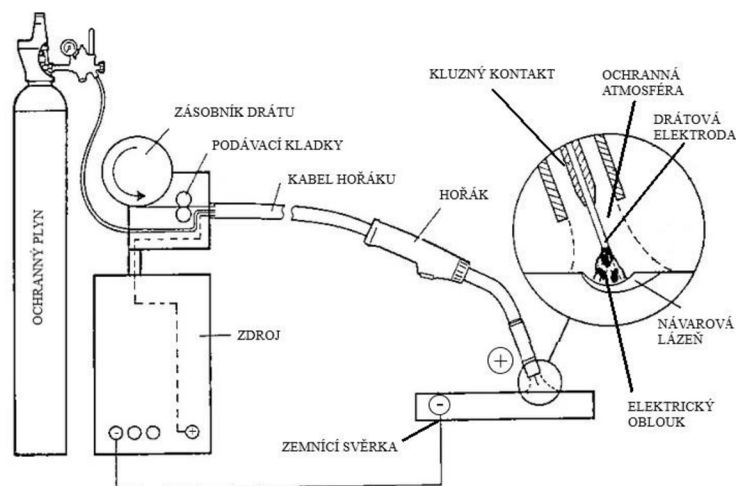
Obr. 12 Schéma a výpočet zředění.

**MIG/MAG je obloukové navařování v ochranné atmosféře**, viz obr. 13, kde jediným rozdílem mezi MIG a MAG je složení právě této ochranné atmosféry. V případě, že je ochranná atmosféra tvořena inertním, tj. nereaktivním plynem, hovoříme o metodě MIG (*Metal Inert Gas*). Jestliže ochrannou atmosféru tvoří aktivní plyny, tj. podílející se na chemických reakcích v návarové lázni, mluvíme o metodě MAG (*Metal Active Gas*). Výběr metody pak závisí na navařovaných materiálech. Jedná se o poloautomatické metody

navařování. Poloautomatické ve smyslu, že přídatný materiál–drát sloužící jako elektroda, je řízeně podáván ze zásobníku a bowdenem vede do navařovacího hořáku. Druhou elektrodu tvoří základní materiál, který je k zařízení připojený zemnicí svěrkou. Systém se skládá z důmyslného svařovacího zdroje (transformátor/invertor, usměrňovač), ve kterém dochází k přeměně síťového AC na potřebný DC, dále z podavače a plynem chlazeného hořáku, viz obr. 12. Moderní, procesorem řízené invertorové zdroje vyrábějí ze síťového napětí pulzní napětí a poskytují plynulou regulaci výstupního proudu a jeho udržení v oblasti ideálních podmínek. To má za následek téměř bezroztříkové navařování. [38, 39]

**MAG** v ochranné atmosféře oblouku před reaktivním kyslíkem využívá jako aktivní plyn zpravidla oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ), případně směsi argonu nebo kyslíku. Použití čistého  $\text{CO}_2$  je cenově výhodné, ale dochází k formování nepříznivých oxidů a karbidů a v důsledku vysokého napětí elektrického oblouku dochází k výraznému rozstříku. Používá se pro navařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Směs  $\text{CO}_2 + \text{Ar}$  je sice dražší, ale poskytuje kvalitnější návar. Směs  $\text{Ar} + \text{O}_2$  nachází použití při navařování vysocelegovaných ocelí. [38]

U metody **MIG** se používají inertní plyny jako argon, helium, nebo směs těchto dvou plynů a je vhodná pro navařování hliníku a jeho slitin, mědi, hořčíku, nebo titanu. Směs  $\text{Ar} + \text{He}$  se pak využívá především u automatizovaného navařování. Helium má také příznivý vliv na elektrický oblouk ve smyslu zvýšení jeho teploty. Navařování ocelí v inertní atmosféře je za určitých podmínek také možné, avšak v praxi ojedinělé. Pulsní MIG navařování je v případě navařování ochranné vrstvy na membránové stěny převážně volenou technologií. Pro dosažení co nejnižšího zředění a snížení obsahu železa v navařené vrstvě je třeba vhodně zvolit překrytí návaru a svařovací pozici. Ochrannou atmosféru pak tvoří čtyřsložkový plyn na bázi  $\text{Ar} + \text{He}$ . [1, 38]



Obr. 13 Schéma MIG/MAG navařovacího zařízení. [39]

**CMT (Cold Metal Transfer)**, viz obr. 15, svého času revoluční technologie od rakouské firmy Fronius na bázi MIG/MAG umožňující realizovat spoje, které dlouhou dobu platily za téměř neproveditelné. Vznikla za účelem termického spojování oceli a hliníku, hořčíku nebo tenkých plechů. Základním předpokladem pro takové spoje je proces s minimálním tepelným zatížením. Toho bylo dosaženo zcela novým způsobem uvolnění kapky, označovaným jako SFI (*Spatter Free Ignition*), které využívá oscilačního pohybu

drátu, tzv. *Push and Pull* systém a zároveň i povrchového napětí tavné lázně. V případě běžného, pouze dopředného pohybu drátu dochází k zapálení krátkého oblouku a nekontrolovatelnému přerušování zkratu, který je charakteristický vysokým zkratovým proudem, což má za následek vysoké tepelné zatížení a velký rozstřík. U CMT digitální regulace procesu rozpozná zkrat a drát pohybující se dopředu v tomto okamžiku zatáhne zpět, viz obr. 14. Takto oscilující drát s frekvencí až 130 Hz nejen podporuje uvolnění kapky, ale také kontroluje zkrat. Samotný svařovací oblouk tak během fáze hoření generuje teplo jen velmi krátce, což má za následek minimální vnos tepla. Regulovanou oscilací je při zkratu proud udržován na nízké hodnotě. Výsledkem je prakticky nulový rozstřík. Další předností je precizní kontrola délky oblouku, neboť je v případě CMT dána rychlostí drátu, a dobou, než dojde ke zkratu, nikoliv svařovacím napětím, jak je tomu při běžném svařování krátkým obloukem. Důležitým konstrukčním prvkem technologie CMT je absorpční člen. Motor v podavači drátu se totiž vzhledem k velké setrvačnosti pohybuje pouze vpřed a motor v posuvové jednotce hořáku oběma směry. V určitém okamžiku tak dochází k protichůdnému pohybu motorů, a proto byl mezi ně vložen tzv. absorbér, který zjednodušeně funguje jako zásobník odebírající drát z podavače a vytvářející zásobu „volného“ drátu pro pohon v hořáku, který si jej může odebírat téměř bez vynaložení síly. [40, 41]



Obr. 14 Fáze CMT cyklu: **I.** Fáze hoření oblouku–materiál veden do lázně. **II.** Fáze ponoření drátu do tavné lázně–oblouk zhasne, svařovací proud poklesne. **III.** Zpětný pohyb drátu–uvolnění kapky během zkratu, udržení nízkého proudu po přerušení zkrat. obvodu. **IV.** Změna směru pohybu drátu a opětovné spuštění procesu. [40]

Metodu CMT lze kombinovat s pulzním obloukem pro lepší přemostitelnost spáry a vyšší svařovací/nařovací rychlost–**CMT Pulse**. Dalším typem je **CMT Advanced**, kde je do regulace procesu integrována polarita svařovacího proudu. Lze tak dosáhnout ještě nižšího tepelného zatížení a zvýšení tavného výkonu. I CMT Advanced lze kombinovat s pulzním obloukem, což vede k maximální ovladatelnosti oblouku–**CMT Advanced Pulse**. Díky zcela mimořádné schopnosti regulace procesu vznikly i modifikace jako **CMT Pin** a **CMT Print**, které odpovídají spíše popisu aditivních technologií, jako forma 3D tisku kovových materiálů.

Výrobce udává následující přednosti a použití: [40]

- nejlepší přemostitelnost spár,
- o 50 % nižší promísení základního a přídavného materiálu,
- 100 % reprodukovatelnost a nejlepší regulace procesu,

- nejmenší rozstřík a deformace,
- až o 90 % menší vnos tepla v porovnání s metodou TIG,
- až desetinásobná rychlost procesu bez negativního vlivu na kvalitu.

Jak již bylo řečeno, v podstatě se jedná o speciální typ metody MIG/MAG a složení plynné ochranné atmosféry je i v tomto případě dáno pracovním materiálem a požadovanými vlastnostmi výsledného povrchu. Při použití  $\text{CO}_2$ , které je za normálních podmínek doprovázeno značným rozstříkem, uvádí firma Fronius snížení o 99 %. [40]

V případě navařování ochranných vrstev na membránové stěny dovoluje technologie CMT používat mnohem vyšší navařovací rychlosti (o více než 50 % v porovnání s TIG) a lze dosáhnout až o 75 % menšího promísení než u ostatních metod. Obsah Fe v navařené vrstvě se při využití metody CMT pohybuje do 2 %. Doporučená pozice navařování je PG (vertikální, směr dolů), která pomáhá snižovat obsah železa v návaru. Výkon se u této metody pohybuje zhruba do  $5 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  s tloušťkou vrstvy přibližně 2,5 mm. Navařuje se v ochranné atmosféře z argonu 4.6 (čistota 99,996 %) popř. ve čtyřsložkové směsi na bázi  $\text{Ar} + \text{He} + \text{CO}_2 + \text{H}_2$ . Stěnu je před navařováním nutné očistit, např. pískováním a při procesu chladit vodou cirkulující v trubkách stěny. [40]



Obr. 15 Svařovací/navarovací zařízení CMT od firmy Fronius. [40]



### 1.3 Mechanizace a automatizace navařovacího procesu

Efektivita navařování může být zvýšena použitím různých stupňů mechanizace. V případě sériové výroby, nebo monotónních operací je určitá mechanizace většinou nezbytná. Avšak nachází použití i v některých případech menšího objemu výroby tam, kde je kladen důraz na vysokou přesnost, opakovatelnost a rychlost procesu bez ovlivnění kvality výsledné vrstvy. Neméně důležitým faktorem mechanizace je také ekonomické hledisko. Práce dělníka je totiž jednou z hlavních položek celkových nákladů na ručně prováděný proces. Mechanizace podstatně mění nákladovou kalkulaci, především z hlediska procesních časů. Výsledkem důkladně naplánované a aplikované mechanizace/automatizace/robotizace je pak optimalizovaný proces z hlediska nákladů, pracovních podmínek a kvality navařené vrstvy. Stupně mechanizace: [42]

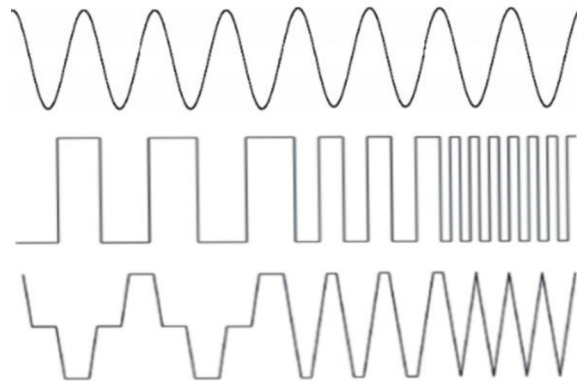
1. **prvním stupněm** mechanizace je automatické podávání přídatného materiálu (drát, prášek), který je charakteristický pro navařování poloautomatickou metodou MIG/MAG, resp. CMT,
2. **druhým stupněm** mechanizace je pak systém polohování navařované součásti a polohovací zařízení samotného hořáku,
3. **třetím stupněm** mechanizace je automatizace a robotizace procesu, který je zcela řízen předem vytvořeným programem.

I přes mimořádnou zručnost zkušených odborníků vykonávajících navařování je dosažení stejného množství vneseného tepla podél dráhy navařování velice obtížné. Výsledkem je pak návar s oblastmi nerovnoměrného tepelného zatížení. Rozdílné tepelné zatížení znamená rozdílné rychlosti chladnutí a rozdílné mikrostruktury navařného materiálu. To má za následek různé mechanické vlastnosti nanesené vrstvy po délce návaru. Proto je automatizace procesu navařování velice žádoucí pro udržení jednotného tepelného zatížení, a to přesnou regulací rychlosti hořáku, posuvové rychlosti drátu, vzdálenosti hubice od povrchu součásti, nebo vzdálenosti mezi hubicí a elektrodou. Toho lze dosáhnout dvěma přístupy. Prvním je polohování navařované součásti pomocí různých manipulátorů, jako např. stolová polohovadla, kladková polohovadla a univerzální manipulátory. Druhou možností je mechanizace polohování hořáku. A to za využití lineárního motoru, kuličkového šroubu, ozubeného hřebenu, nebo řetězu. V praxi se pak běžně setkáváme s kombinací těchto možností, v podobě moderních navařovacích automatů, svařovacích traktorů a speciálních zařízení. [43, 44]

#### 1.3.1 Oscilační pohyb navařovací hlavičky

Důležitým mechanizačním prvkem plošného navařování je tzv. pendlování, tedy oscilační pohyb navařovací hlavičky. Význam pendlování spočívá ve zlepšení kvality navařené vrstvy z hlediska rovnoměrného tepelného zatížení a s ním spojené ovlivnění vnitřního pnutí a mikrostruktury přídatného materiálu. Dalším významným vlivem pendlování zvýšení produktivity celého procesu. Při využití oscilačního pohybu hořáku lze dosáhnout větší šířky návaru než při navařování statickým hořákem. S pendlováním se pojí téma navařovacích technik, tedy drah hořáku, po kterých se pendlující hořák pohybuje. Takové dráhy můžou mít například průběh sinusoidy, schodový tvar, nebo trojúhelníkový tvar, viz obr. 16. Při plánování a programování oscilačních drah je třeba vzít v úvahu setrvačnost oscilujícího břemena a také plynulost pohybu navařovací hlavy vertikálně od

shora dolů. To má za následek, že horizontální úseky dráhy nebudou nikdy (bez další synchronizace posuvů s ostatními mechanizačními prvky výsledného zařízení) čistě horizontální. Jednotlivých drah lze docílit kombinací oscilačního pohybu hořáku s posuvným pohybem polohovacího systému navařovacího aparátu. Polohovacího systému hořáku se skládá ze soustavy posuvných vedení, popř. kloubových mechanismů, nebo rotačních ramen. [45]



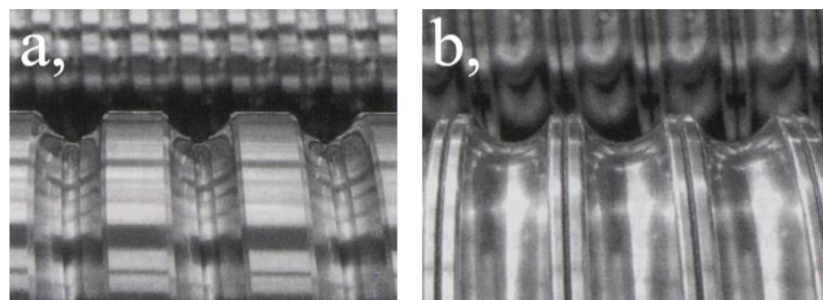
Obr. 16 Příklady oscilačních pohybů

### 1.3.2 Lineární posuvové soustavy

Oscilační lineární pohyb lze realizovat například kuličkovým šroubem, ozubeným kolem a hřebenem, nebo lineárním motorem:

**Kuličkový šroub** je mechanismus převádějící rotační pohyb na posuvný. Toho je docíleno vyplněním prostoru mezi šroubem a maticí valivými elementy (kuličkami). Kuličky se při otáčení šroubu odvalují a posouvají tak matici. Jejich účinnost dosahuje i více jak 90 %. Šroub i matice jsou vyrobené z oceli a povrchy závitů jsou kalené a broušené a jsou vyrobené s vysokou přesností. Používají se zpravidla dvě provedení profilu drážky pro odvalování kuliček a šroubu matice, a to:

- s **gotickým profilem**—nejčastější varianta, vysoce přesná, možnost předepnutí, viz obr. 17a;
- s **kruhovým profilem**—jednodušší na výrobu, malý stykový úhel, horší účinnost, viz obr. 17b.



Obr. 17 a, gotický profil; b, kruhový profil. [46]

Nejčastěji se využívá buď systému poháněného šroubu a posuvné matice, nebo systému pevného šroubu a poháněné matice. Matice je vybavena kanálkem, který slouží pro

transport kuliček na začátek jejich funkční dráhy. Standartně se jedná o interní převod v tzv. převáděcím lůžku v rámci stoupání jednoho závitu. Nestandardní maticové jednotky jsou vybaveny externím převodem kuliček a rychloběžné kuličkové šrouby využívají převodu podélným axiálním otvorem. Mezi maticí a šroubem vznikají vůle. Pro snížení axiální vůle matice lze předepnutím zvýšit její tuhost, a to buď pružinou, vymezení podložkou, diferencí ve stoupání, nebo vhodným výběrem kuliček. Předepnutí však zkracuje životnost kuličkového šroubu kvůli potřebě většího točivého momentu pro otočení šroubu. Důležitým parametrem tohoto mechanismu je statická tuhost, která závisí na způsobu axiálního uložení – jednostranné/oboustranné. Pro uložení kuličkového šroubu se doporučuje volit válečková/jehlová ložiska (ideálně předepnutá), vysokou jakost dosedacích ploch a maximální tuhost prvků uložení. S volbou kuličkového šroubu je úzce spjatá i volba vhodného servomotoru (elektromotor, výkonový polovodičový měnič, regulátor otáček) u kterého posuzujeme především propustné pásmo rychlostní smyčky, nerovnoměrnost malých rychlostí, dosažitelné zesílení polohové smyčky ( $K_{Vmax}$ ) a dynamickou tuhost. Rychlost zesílení  $K_v$  udává strmost charakteristiky zesilovače signálu odměřovacího zařízení. Čím je hodnota  $K_v$  vyšší, tím rychleji pohon reaguje. Hodnotu  $K_v$  je třeba konfrontovat s mechanickými vlastnostmi kuličkového šroubu. Při volbě velikosti pohánějícího elektromotoru je třeba vzít v úvahu statické, kinematické a dynamické hledisko současně s kontrolou oteplení. Statické hledisko řeší výpočet potřebného momentu motoru. Kinematické se zabývá pracovními cykly (jednoduché/složené), rychlostmi a zrychlením posuvu. Dynamické hledisko se zabývá momentem setrvačnosti a hledisko oteplení zase účinnost motoru a tepelné ztráty. Výhody a nevýhody kuličkového šroubu jsou: [46, 47]

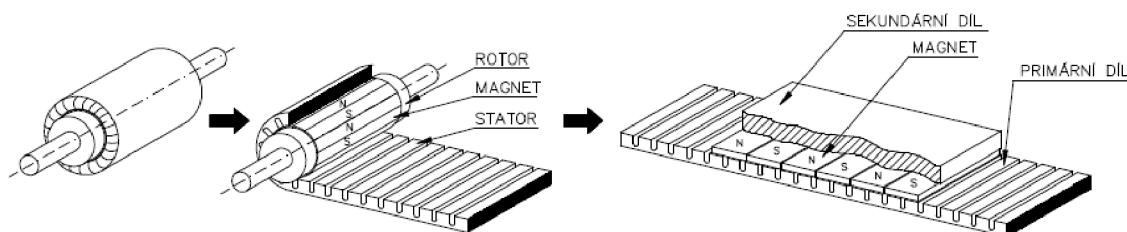


Obr. 18 Příklad lineární osy s kuličkovým šroubem. [48]

**Ozubený hřeben** je typ ozubeného převodu pastorek-hřeben převádějící rotační pohyb na posuvný. Skládá se tedy z ozubené hřebenové tyče s přímým, nebo šikmým ozubením a poháněného pastorku. Využití tohoto mechanismu je široké, od přesných ozubení používaných v měřící technice, po robustní průmyslové hřebeny např. u pracovních stolů obráběcích strojů. Předpětím pružinou nebo jiným mechanismem (hydraulika, elektronické předepnutí typu Master Slave, pružina) lze pro větší přesnost vymezit vůli mezi pastorkem a hřebenem. Výhodou tohoto typu vedení je tolerance vysoké zátěže v axiálním

směru a možnost dlouhých zdvihů. Oproti kuličkovému šroubu má menší převod a lepší účinnost. Nevýhodou je však zmiňovaná nesamosvornost s nutností předeptnutí. [46]

**Lineární motor** je elektromagnetický lineární pohon s vysokou dynamikou. Lineární elektromotory členíme na synchronní, asynchronní a krokové. Lze si jej představit jako klasický rotační elektromotor rozvinutý do roviny, viz obr. 19. **Krokové** lineární motory slouží k polohování lehčích břemen a z hlediska konstrukce je s nimi spjata komplikace pohyblivého přívodu napájecího napětí a vedení pohyblivé části. **Asynchronní** lineární motory pracují na principu asynchronního stroje a skládají se z trojfázového vinutí, sekundárního vinutí, klecového vinutí a kotvy. Postupné pole indukuje v kotvě vířivé proudy (Lenzův zákon), jejichž směr působí proti postupnému poli. To způsobuje vznik síly, která je zdrojem pohybu. **Synchronní** lineární motory fungují naopak než rotační elektromotory v tom smyslu, že primární, aktivní částí je u synchronních lineárních motorů stator s vinutím, a sekundární, neaktivní částí je ocelová podložka s permanentními magnety založenými střídavě, severní – jižní pól. [49]



Obr. 19 Princip lineárního motoru. [49]

Speciálním typem synchronního lineárního motoru je tzv. **tubulární synchronní lineární motor**, který funguje také na principu elektromagnetické indukce, ale skládá se pouze ze dvou částí, a to ze statoru a aktivního pístu, tzv. *slideru*. Stator se skládá z motorového vinutí, ložisek pro slider, senzorů polohy a teploty a mikroprocesoru pro sledování chodu motoru. Slider je vyroben z přesné nerezové trubky, ve které jsou zasazeny neodymové permanentní magnety. Jelikož se jedná o bezpřevodový motor – nevyužívá řemenů, kuličkových šroubů, či jiných mechanických dílů, dosahuje motor vysoké účinnosti bez nutnosti mazání a náchylnosti na opotřebení. Lineární motory nacházejí uplatnění v aplikacích, kde není kladen požadavek na vysoké síly, ale na přesnou a dynamickou manipulaci. Díky inovativním funkcím lze tyto pohony aplikovat na operace, která by tradičními technologiemi nebyly možné. Mezi tyto vlastnosti lze zařadit kompaktní rozměry, malý počet komponent a jejich integrace, nebo třeba certifikace IP67. Lineární motory disponují integrovaným odměřováním polohy a monitorováním teploty. Jakékoliv odchylky od požadovaného profilu pohybu způsobené např. mechanickou překážkou, prokluzem, nebo nečistotami jsou ihned identifikovány a kontrolérem nahlášeny obsluze. Navíc je tento mechanismus v porovnání např. s pneumatickými systémy až o 90 % energeticky úspornější. Výrobce lineárních motorů NTI AG LinMot & MagSpring uvádí posuvové rychlosti až  $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , zrychlení více než  $780 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  a až 600 cyklů za minutu. [49, 50, 51]

Tab. 5 Porovnání jednotlivých mechanismů. [46, 47, 49, 50, 51]

Mechanismus s kuličkovým šroubem	
VÝHODY	NEVÝHODY
Příznivá cena	Vznik tepla při vyšších rychlostech a zátěži
Vysoká účinnost	Tepelná roztažnost sestavy
Vysoká přesnost a regulovatelná tuhost	Omezené provozní teploty
Možnost přenosu velkých axiálních sil	Omezená rychlost posuvu
Možnost přenosu translačního pohybu na rotační	Nutnost mazání
Mechanismus s ozubeným hřebenem	
VÝHODY	NEVÝHODY
Tolerance vysokého axiálního zatížení	Nesamosvornost mechanismu
Možnost dlouhých zdvihů	Nutnost předepnutí
Menší převod oproti kuličkovému šroubu	
Lepší účinnost oproti KŠ	
Mechanismus se synchronním tubulárním lineárním motorem	
VÝHODY	NEVÝHODY
Teoreticky neomezený zdvih	Přítomnost poměrně silného magnetického pole
Extrémní dynamika	Menší posuvová síla
Dlouhá životnost	Vhodné pouze pro menší zatížení
Nepodléhá tepelné roztažnosti	
Vysoká přesnost a opakovatelnost pozice	
Bezpřevodý mechanismus	
Malé rozměry	

## 2 ANALÝZA PROBLÉMU

Membránové stěny ve spalovacích kotlích podléhají agresivním korozivním a erozivním vlivům, které snižují jejich životnost a nepříznivě tak ovlivňují provoz a produktivitu energetických zařízení. Způsobů, jak docílit vyšší životnosti je několik. Jedním řešením je použití speciálních korozivzdorných materiálů na výrobu samotných membránových stěn, popř. jejich výměna. Z důvodu vysoké ceny takových materiálů však není tento přístup lukrativní. Proto se v současné době klade důraz na zvýšení životnosti těchto komponent cestou vytváření ochranných vrstev, resp. povlaků. Významným faktorem při vytváření těchto vrstev je ohled na velikost daných komponent. Spalovací komory jsou sestaveny z mnoha panelů, jejichž velikost se může pohybovat od desetin až po desítky čtverečních metrů. Proto je u vytváření ochranných vrstev, resp. povlaků žádoucí použití určitého stupně mechanizace. Vedle kvalitativních aspektů hraje důležitou roli i ekonomické hledisko procesu. Mechanizací lze tento proces značně urychlit a snížit tak jeho náklady, ale především náklady spojené s přerušением provozu energetického zařízení.

Při návrhu konstrukčního řešení mechanizačního prvku, kterým je pendlování (oscilační pohyb) navařovací hlavice, je třeba zohlednit několik úskalí stanovených vybranou technologií a konstrukcí membránové stěny. Konkrétně je třeba zajistit dostatečnou přesnost, opakovatelnost a flexibilitu zařízení společně s možností modifikace výsledného pohybu. K tomu slouží řídicí systém mechanizační jednotky. Zařízení bude navrženo pro použití na membránových panelech, ale až po předchozím testování na rovných stěnách. Bude se zkoumat rozdíl v produktivitě procesu bez pendlování a s pendlováním. Závěrem bude teoretické technicko – ekonomické zhodnocení aplikace pendlování.

### 2.1 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše

Z úvodní části rešerše, kde byly rozebrány jednotlivé konstrukce a vývoj vodních stěn plyne, že v současné době je nejlepším konstrukčním řešením typ membránové stěny a typ monostěny. Tyto dvě principiálně stejné stěny se liší pouze základním stavebním prvkem – trubka a membrána v případě membránové stěny, trubka s nalisovanými „křídélky“ v případě monostěny. Zařízení, jehož součástí je pendlovací hlavice navrhovaná v této práci, je určeno právě pro tento typ stěn. Konkrétně pak pro membránové stěny použitých ve spalovacích kotlích spaloven odpadu. Pro konstrukci pendlovací hlavy je z této části rešerše podstatná především geometrie stěn ve smyslu různých průměrů trubek pro různé panely membránových stěn.

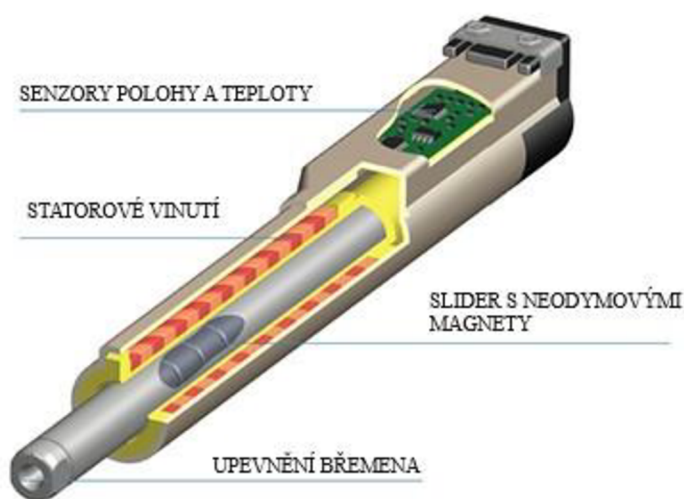
Z další části, kde jsou popsány druhy a rychlosti opotřebení membránových stěn lze lépe pochopit naléhavost situace. Nechráněné membránové stěny mají v extrémních korozivních podmínkách spalovacích zařízení spalujících odpad životnost pouze v řádu měsíců. V případě vytvoření ochranné vrstvy je životnost prodloužena na několik let. Motivace pro vývoj a aplikaci technologií sloužících k ochraně těchto komponent je proto vysoká.

S tím se pojí výběr a aplikace ochranného materiálu. Z podkapitoly *1.1.2 Poruchy membránových stěn* vyplývá požadavek na mimořádnou odolnost materiálů ochranných vrstev proti vysokoteplotní, erozivní, bodové a šterbinové korozi. Nejlepší vlastnosti ze zmiňovaných materiálů vykazovala superslitina na bázi niklu, známá pod názvem Inconel<sup>®</sup> 686, avšak pro použití v nižších teplotách se jeví jako ideální volbou superslitina

ze stejné třídy, a to Inconel<sup>®</sup> 625. Co se týče technologických možností, bylo popsáno několik hlavních metod, které by byly pro tento účel vhodné. Vedle termických a kinetických nástřiků, které vynikají především v jednoduchosti manuálního použití byla zmíněna technologie navařování. Právě technologie navařování byla zvolena pro tento typ operace, vzhledem k relativně snadné automatizaci této technologie. Konkrétně byla zvolena modifikace MIG/MAG poloautomatického navařování, známá pod názvem CMT. Metoda CMT je charakteristická minimálním rozstříkem, vysokou produktivitou, mimořádnou regulovatelností a minimální mírou zředění, které je pro ochranné vrstvy membránových stěn stěžejní.

V závěru rešerše byl věnován prostor významu a možnostem mechanizace navařovacího procesu. Z výše zmíněného vyplývá, že opodstatnění mechanizace spočívá v optimalizaci nákladů na proces a ve zvýšení jeho kvality. Existuje několik stupňů mechanizace, od automatického podávání přídavného materiálu až po zcela automatizované, popř. robotizované pracoviště. V případě návrhu pendlovací hlavičky pro plošné navařování Inconelu<sup>®</sup> 625 **bude využito** mechanizace ve smyslu polohování hořáku systémem **lineárního vedení** a oscilátoru v podobě **lineárního motoru** (obr.20) pro zajištění tzv. pendlování. V koncepčním návrhu zařízení bude uvažováno i **alternativní řešení** pohonu ve formě **kuličkového šroubu**. Použití pastorku a ozubeného hřebenu **NENÍ** pro tento konkrétní typ použití vhodný z důvodu komplikovaného předepnutí, nižší účinnosti a potenciál vysoké zátěže a dlouhých zdvihů není v tomto případě relevantní. Dále byl vysvětlen význam pendlování a jeho vliv na kvalitu navařené vrstvy a produktivitu procesu. Do budoucna bude nutné otestovat jednotlivé dráhy oscilace a porovnat jejich efektivitu a vlastnosti výsledných vrstev. V koncepční fázi návrhu bude uvažováno i alternativní řešení pohonu ve formě kuličkového šroubu.

Ve finálním zařízení pro navařování ochranných vrstev na povrch membránových stěn by pak měla být zapojena dvojice těchto současně pracujících pendlovacích hlavic pro ještě větší produktivitu.



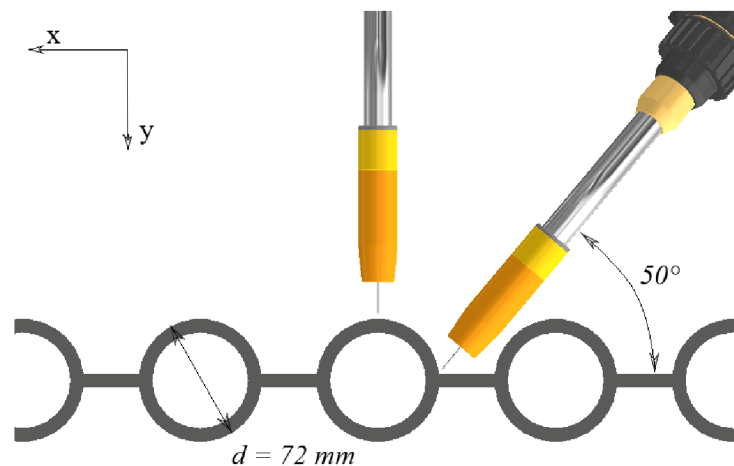
Obr. 20 Konstrukce tubulárního lineárního motoru. [50]

### 3 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

V této kapitole bude podrobně rozebrán vývoj zařízení pro zajištění oscilačního pohybu navařovací hlavice. Nejdříve budou ujasněny požadavky na konstrukci zařízení dané jak geometrií membránových stěn, tak použitou technologií. Dále bude proveden rozbor a výběr použitých komponent. Navazovat bude popis dvou konstrukčních řešení a vyhodnocení každého z nich. Na základě tohoto vyhodnocení bude jedno z řešení zvoleno k následné výrobě. Té bude věnována další kapitola, společně se sestavením celého zařízení.

#### 3.1 Požadavky na konstrukci zařízení

Návrh konstrukce daného zařízení je omezen hned několika faktory. Prvním hlediskem, které je potřeba brát v potaz je výsledná funkce zařízení, resp. finální oblast použití. Jak již bylo zmíněno, toto zařízení slouží k navařování ochranné vrstvy membránových stěn, které jsou tvořeny trubkami a membránou mezi nimi. Z toho pro konstruktéra plyne požadavek na dostatečnou flexibilitu zařízení a zároveň kompaktnost, neboť se od zařízení očekává volnost pohybu ve směru rotace až do  $40^\circ$  pro udržení schopnosti navaření ochranné vrstvy i v místě spojení trubky s membránou, viz obr. 21. Tímto kritériem je taktéž dán požadavek na kompaktní velikost zařízení, aby při extrémních natočeních nedošlo ke kolizi se stěnou.



Obr. 21 Natočení hořáku u zkušeni stěny  $d = 72 \text{ mm}$ .

Dalším zohledňovaným kritériem je ochrana funkčních součástí před rozstříkem navařovaného materiálu. Přestože byla zvolena navařovací metoda CMT, která vyniká mezi ostatními mimořádně malým rozstříkem materiálu, je žádoucí s ohledem na exponované součásti navrhnout jistý způsob krytí, popř. čištění. Plynulý a dlouhodobý chod zařízení, který se od něj očekává by mohlo kromě okují vzniklých při samotném procesu navařování ohrozit také prašné prostředí dílny. Neméně podstatným konstrukčním problémem je návrh systému chlazení pro bezproblémový chod motoru. Z hlediska uložení je potřeba dbát na souosost oscilujících členů, tuhosti celé sestavy a také na její složitost. Dodatečná kritéria pak určují rozměrové a technologické požadavky jednotlivých nakupovaných komponent.



### 3.2 Kontrolní výpočet oscilačních mechanismů

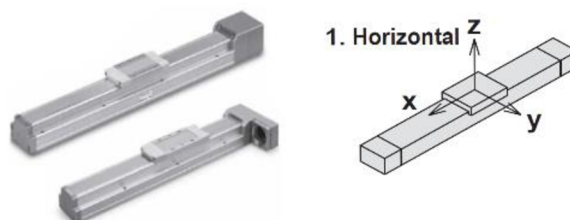
Z analýzy a poznatků rešeršní části plyne, že lze použít více konstrukčních řešení, pohonů a vedení jejichž vhodnost je třeba ověřit. V této podkapitole bude proveden výběr vhodného pohonu. Pro kontrolní výpočet vhodnosti uvažovaných pohonů byly použity tyto parametry.

Tab. 6 Vstupní parametry oscilačního pohybu.

<b>Uvažovaná hmotnost břemene <math>m</math></b>	5,0 kg
<b>Rychlost posuvu <math>v</math></b>	0,13 m·s <sup>-1</sup>
<b>Frekvence oscilace <math>f</math></b>	2–3 Hz
<b>Dráha <math>L</math></b>	30 mm
<b>Souřadnice těžiště <math>X_c</math></b>	3,026 mm
<b>Souřadnice těžiště <math>Y_c</math></b>	13,427 mm
<b>Souřadnice těžiště <math>Z_c</math></b>	113,256 mm

#### 3.2.1 Lineární vedení s kuličkovým šroubem

Vyřešení lineárního oscilačního pohybu po ose  $x$  je možné řešit několika přístupy. V této podkapitole budou rozebrána dvě z mnoha konstrukčních řešení. Prvním řešením je navrhnout lineární vedení poháněné kuličkovým šroubem. Jedná se o kompaktní zařízení kombinující mechanismus kuličkového šroubu s kuličkovým lineárním vedením. Z široké nabídky lineárních vedení bylo ke kontrole způsobnosti pro tento účel zvoleno uvažováno vedení typu **LEFS25NZB-50CK** (obr. 22) od firmy SMC. Z označení čteme LEFS–vedení s kuličkovým šroubem, 25–velikost, NZ–typ motoru, H–posuv na otáčku, 50–zdvih, C–jeden montážní držák automatického spínače, N–bez mazání, K–pozice otvorů pro kolíky v zespod těla na dvou místech. Při návrhu se nejdříve zjistí očekávané pracovní podmínky zařízení, které jsou uvedeny v tab. 5., na základě požadovaných posuvů se zvolí zkoumaný model. Z dostupných grafů v manuálu zařízení odečteme maximální dovolené hodnoty rychlosti, zrychlení/zpomalení, statického a dynamického zatížení dle vstupních parametrů požadovaného oscilačního pohybu a následně dopočteme, zda a s jakou rezervou dané zařízení tento oscilační pohyb provede.



Obr. 22 Lineární vedení LEFS25NZB-50CK s kuličkovým šroubem. [54]

Tab. 7 Charakteristiky vedení při vytížení (duty ratio) 100 % a zátěž 5 kg. [54]

Typ vedení	LEFS25Nzb-50CK
Max. dovolená posuvová rychlost	0,44 m·s <sup>-1</sup>
Max dovolené zrychlení/zpomalení	7,3 m·s <sup>-2</sup>
Posuv na otáčku	6 mm
Příkon motoru	100 W
Max. vzdálenost přesahu těžiště v ose X	L <sub>x</sub> = 210 mm
Max. vzdálenost přesahu těžiště v ose Y	L <sub>y</sub> = 160 mm
Max. vzdálenost přesahu těžiště v ose Z	L <sub>z</sub> = 500 mm

Hodnoty L<sub>x</sub>, L<sub>y</sub>, L<sub>z</sub> jsou vyčíslené s ohledem na maximální rychlost a zrychlení daného pohybu. Z těchto hodnot je pak možno dopočítat koeficient zatížení  $\alpha$ , kde platí následující vztah.

$$\alpha_x + \alpha_y + \alpha_z \leq 1 \quad (2)$$

$$\alpha_x = \frac{X_c}{L_x} = \frac{3,026}{210} = \mathbf{0,0144} ; \alpha_y = \frac{Y_c}{L_y} = \frac{13,427}{160} = \mathbf{0,0839} ; \quad (3)$$

$$\alpha_z = \frac{Z_c}{L_z} = \frac{113,256}{500} = \mathbf{0,2265}$$

$$0,0144 + 0,0839 + 0,2265 = \mathbf{0,3248} \leq 1 \quad (4)$$

Podmínka je splněna a z hlediska zatížení by tento typ vedení byl pro zmíněný účel vhodný. Následně se provede výpočet doby cyklu, kde cyklus definujeme jako pohyb tam a zpět. Následující vztahy proto ke konci násobíme hodnotou 2.

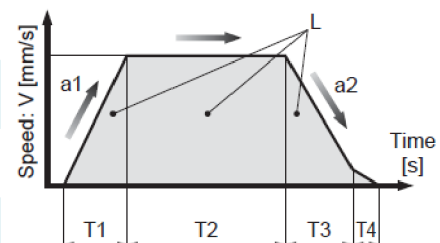
Tab. 8 Doba průběhu pohybu. [54]

**Doba zrychlení T1 [s]**

**Doba konstantní rychlosti T2 [s]**

**Doba zpomalení T3 [s]**

**Doba ustálení v pozici T4 [s]**



Pozn. Rychlost a dráha, viz tab. 6.

$$T = T1 + T2 + T3 + T4 \quad (5)$$

$$T1 = T3 = \frac{v}{a} = \frac{0,13}{7,3} = 0,0178 \text{ s} \quad (6)$$

$$T2 = \frac{L - 0,5 \cdot v \cdot (T1 + T3)}{v} = \frac{0,03 - 0,5 \cdot 0,13 \cdot (0,0178 + 0,0178)}{0,13} = 0,2129 \text{ s} \quad (7)$$

$$T4 = 0,05 \text{ s (doporučená hodnota)} \quad (8)$$

$$T = 0,0178 + 0,2129 + 0,0178 + 0,05 = 0,2985 \text{ s} = 298,5 \text{ ms} \quad (9)$$

$$Tc = 2 \cdot T = 2 \cdot 0,2985 = \mathbf{0,597 \text{ s} = 597 \text{ ms}}$$

**VYHODNOCENÍ:** z výpočtu plyne, že při podmínce frekvence 2-3 Hz není možné tímto pohonem při stávající hodnotě rychlosti  $130 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  dosáhnout. Při kontrole výpočtu s dvojnásobnou rychlostí, tedy  $260 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  se dostáváme na dobu  $Tc = 0,402 \text{ s}$ , která by splňovala spodní hranici podmínky frekvence oscilačního pohybu. Použití takové rychlosti by ale mohlo být v rozporu s použitou technologií a možné až po předchozí konzultaci s odborníky z oblasti navařování.

### 3.2.2 Tubulární synchronní lineární motor s lineárním vedením

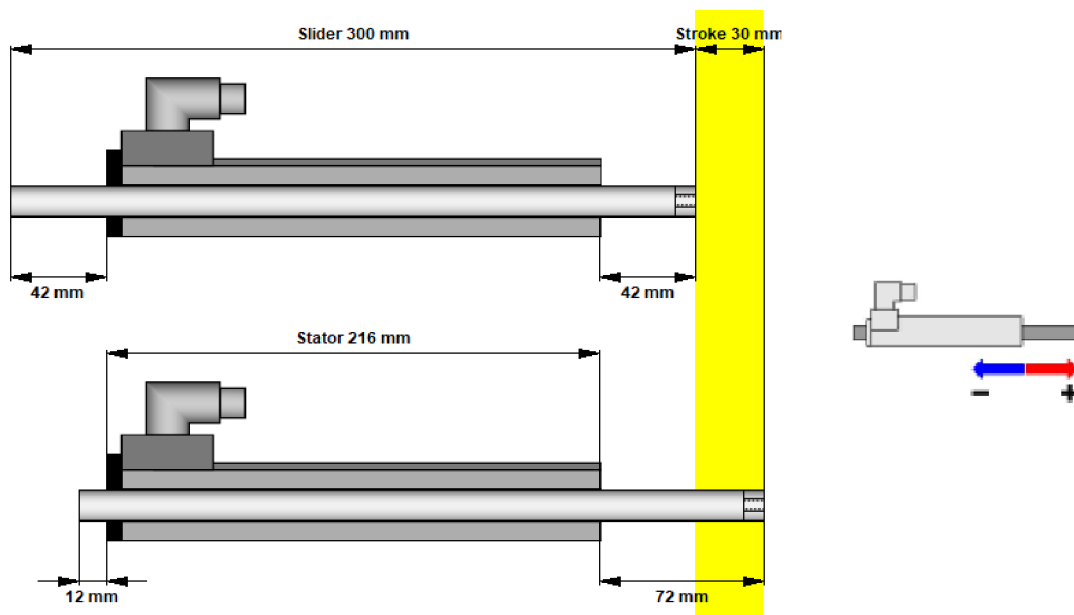
Pohon od firmy LinMot, typ PS01-37x120-C se sliderem PL01-20x320 a přírubou PF02-37x100 je vysoce dynamický lineární aktuátor, s možností velkého zdvihu a volitelným chlazením. Disponuje certifikací IP 67, díky které není tolik náchylný na prašné prostředí. K ochraně slideru slouží také koncové těsnění. Technická data dle tab. 9.

Tab. 9 Technická data k lineárnímu motoru PS01-37x120-C a slideru PL01-20x320. [56]

<b>Maximální zdvih</b>	1480 mm
<b>Maximální síla</b>	163 N
<b>Kontinuální síla bez/s chlazením</b>	28/52 N
<b>Maximální rychlost</b>	$3,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
<b>Opakovatelnost pozice</b>	$\pm 0,05 \text{ mm}$
<b>Hmotnost statoru/slideru</b>	740/630 g
<b>Délka statru/slideru</b>	227/300 mm
<b>Průměr statoru/slideru</b>	37/20 mm
<b>Standartní zdvih</b>	100 mm

Kontrola vhodnosti tohoto typu pohonu pro oscilační pohyb navařovací hlavičky byl použit software LinMot Designer 1.10.1. Pro adekvátní posouzení bude použita stejná dráha a rychlost oscilace jako u mechanismu s kuličkovým šroubem, tedy dráha, posuvová

rychlost  $0,13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a požadovaná frekvence 2–3 Hz. Hmotnost oscilující části je taktěž 5000 g. Do silových účinků byl započítán odpor dvou koncových těsnění (11 N) a vliv aktivního chlazení vzduchem. Rozdílné výsledky jsou očekávány z důvodu možnosti použití vyššího zrychlení, které lineární motor pro danou zátěž a zvolené parametry nabízí až  $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . Vyššího zrychlení nelze z důvodu překročení maximální vynaložené síly použít. Pro simulaci byly použity 2 jednoduché pohyby z bodu do bodu (*Point to Point*).

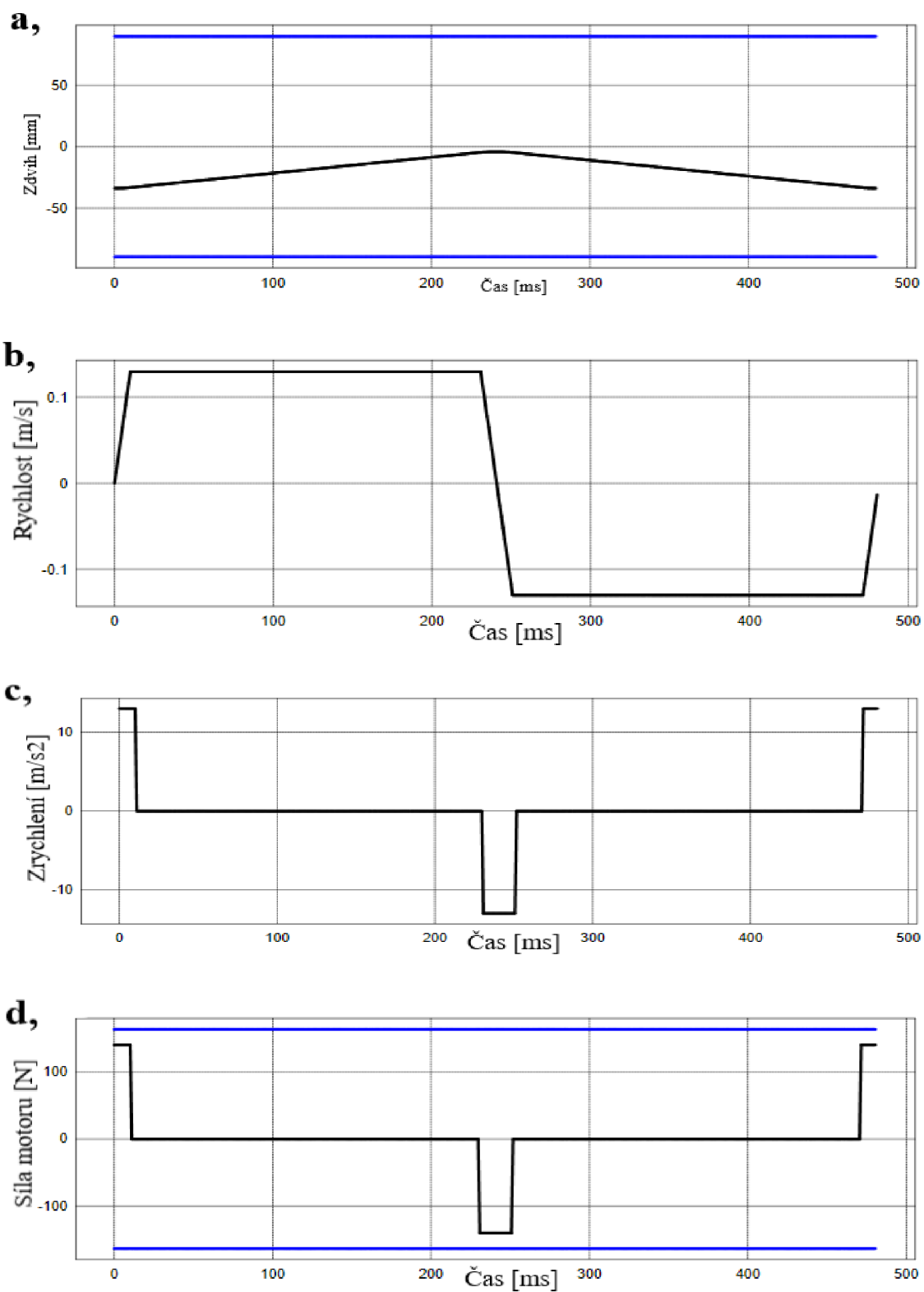


Obr. 23 Rozvržení pohybu.

Na obrázku vidíme rozvržení polohy statoru a slideru. Simulace byla provedena pro rovnoměrné vysunutí slideru při výchozí poloze. V praxi bude poloha slideru s největší pravděpodobností orientována s ohledem na sousost hořáku s otočným stolem. Strojní nulová poloha slideru je + 76 mm. Výsledky simulace pro daný pohyb, viz tab. 10 a obr. 24.

Tab. 10 Vyhodnocení oscilačního pohybu lineárního motoru.

Úsek	Kompensace	Zatížení	Kinematika	Síla a výkon			
Pohyb „tam“	t = 0 ms s = - 34 mm	m = 5000 g	a = d = $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ v = $0,13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	F <sub>max</sub> = 140 N F <sub>efekt.</sub> = 40 N P = 32,7 W			
Pohyb „zpět“	t = 240,8 ms s = - 4 mm	m = 5000 g	a = d = $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ v = $0,13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	F <sub>max</sub> = 140 N F <sub>efekt.</sub> = 40 N P = 32,7 W			
Celkový čas [ms]	Dráha [mm]	Max. síla [N]	Efektivní síla [N]	Maximální přetížení [%]	Tepelné zatížení [%]	Maximální příkon [W]	Střední příkon [W]
481,5	30	140	40,5	27,9	60,9	410	33



Obr. 24 Grafická znázornění průběhu: a, dráhy b, rychlosti c, zrychlení a zpomalení d, síly motoru.

**VYHODNOCENÍ:** z výsledků je zřejmé, že za daných podmínek je motor schopen splnit podmínku frekvence oscilace min 2 Hz. Lze také pozorovat poměrně velké tepelné zatížení, které bude předmětem k řešení při konstrukčním návrhu zařízení. Konkrétní charakteristiky zatížení motoru jsou znázorněny na následujících grafech, kde modré ohraničení značí limitní možnosti motoru při daném zatížení.

### 3.2.3 Celkové vyhodnocení pohonů oscilačních mechanismů

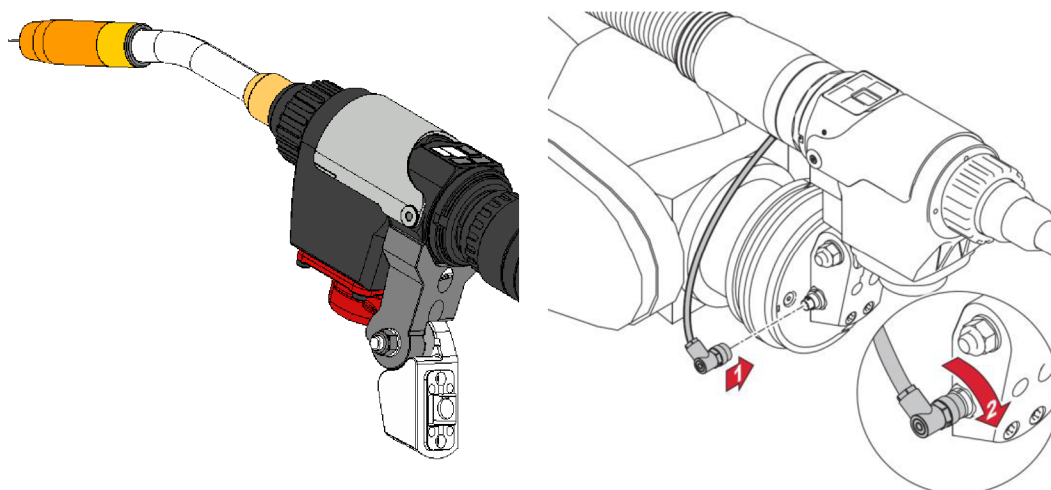
Z kontrolních výpočtů uvažovaných pohonů byl pro následná konstrukční řešení zvolen pohon lineárním tubulárním motorem v kombinaci s lineárním vedením Hiwin, z důvodu lepších kinematických vlastností, vyšší přesnosti, delší životnosti a kompaktních rozměrů.

### 3.3 Uvažované komponenty zařízení

Pro konstrukční návrhy zařízení bude použita navařovací hlavice Fronius, lineární tubulární motor v kombinaci s lineárním vedením Hiwin a aktivní chlazení v podobě ventilátorů.

#### 3.3.1 Navařovací hlavice Fronius

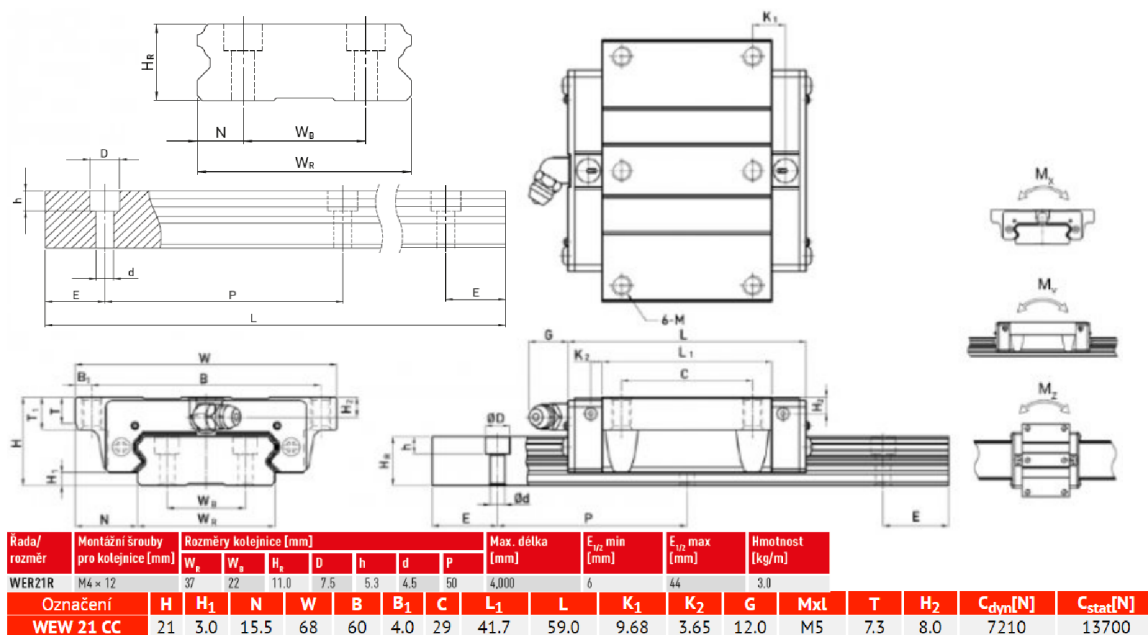
Proces navařování bude probíhat za využití systému CMT TPS 500i se standartním plynem chlazeným hořákem a s dynamickým podavačem drátu WF 60i ROBACTA Drive CMT/W, který je určený přednostně pro robotizované svařování, pro které výrobce poskytuje dodatečné díly pro snadnou a rychlou integraci. Mezi klíčové výhody tohoto systému patří intuitivní ovládání prostřednictvím grafického uživatelského rozhraní, centrální přípojka pro všechna média usnadňující zajištění hadicového vedení a výměnu spotřebních dílů, automatické rozpoznávání komponent eliminující nesprávné a neúčinné nastavení, nebo například vysokorychlostní sběrnici dat. Z konstrukčního hlediska se s hořákem pojí problém upnutí k zařízení, neboť komponenta sloužící k upevnění k robotu nebyla k dispozici, viz obr. 25. [53]



Obr. 25 Způsob upnutí ke standartnímu robotu. [53]

### 3.3.2 Lineární vedení Hiwin

Pro přenos oscilačního pohybu bylo vybráno lineární vedení Hiwin řady WE, které se skládá z vozíku WEW21 CC a z kolejničky WER21R, viz obr. 26. Jedná se o čtyřřadé kuličkové lineární vedení s kontaktním úhlem  $45^\circ$ , nízkou instalační výškou a vysokou momentovou únosností. Vyniká vysokou přesností polohování a nízká hnací síla díky minimálním třecím odporům. Proti klasickým kluzným vedením, u kterých může rozdílná tloušťka mazacího filmu způsobovat jisté nepřesnosti a opotřebení, závisí přesnost vedení s valivými elementy pouze na valivém odporu. Ten je ale velmi malý a přesnost vedení zůstává u tohoto typu vedení v podstatě stejná. Díky své konstrukci dokáže toto lineární vedení absorbovat jak svisle, tak vodorovně působící síly. V porovnání s kluzným vedením, které je náchylné na přesnou manipulaci při instalaci je u valivého typu vedení instalace a výměna velmi snadná. Navíc je vyžadována pouze nepatrná míra mazání, a to jednoduchým přívodem maziva do vozíku, nebo integrovaným zásobníkem. Výrobce mimo jiné nabízí i ochranu proti korozi, která závisí na způsobu použití. Příkladem může být ochrana různými povlaky, nebo vedení z nerezové oceli. Z označení vozíku WEW21CC čteme WE – modelová řada, W – přírubový vozík, 21 – velikost, C – určený pro vysoké zatížení a C – možná montáž vozíku shora nebo zespodu. Pro kolejničky WER21R pak platí WE – modelová řada, R – označen pro kolejničky, 21 – velikost, R – montáž shora. [55]



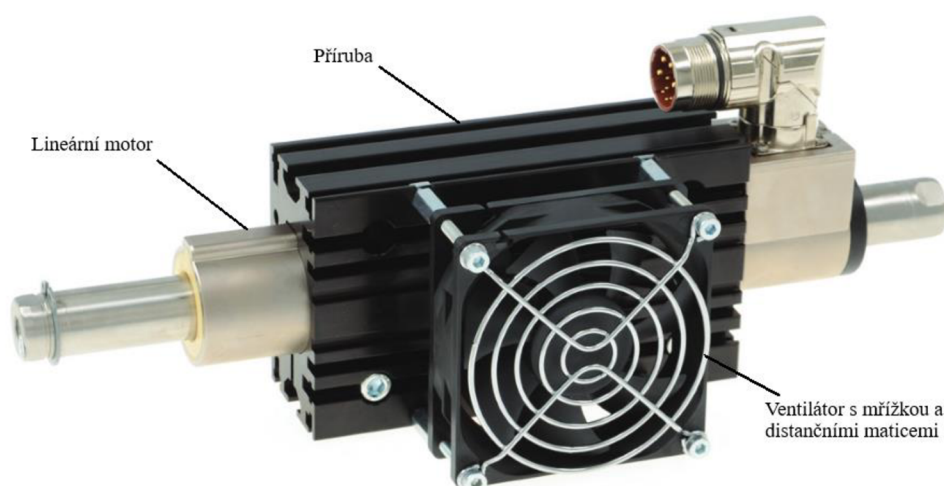
Obr. 26 Technické údaje vozíku a kolejničky. [55]

V případě zařízení pendlovací navařovací hlavy je vozík zatěžován pouze minimálně vzhledem k jeho jmenovité dynamické únosnosti, tudíž z důvodu naddimenzování součásti nebyl proveden kontrolní výpočet životnosti a statické konstrukční bezpečnosti. Do konstrukce zařízení je pak zahrnut pouze požadavek na výšku osazení a drážky. Doporučená výška osazení referenční hrany kolejničky je  $E_1 = 2,5$  mm. Význam spočívá v zamezení nepřesností montážních ploch a kolizím mezi kolejničkou a vozíkem.

### 3.3.3 Chlazení

Chlazení systému lze řešit taktéž několika způsoby. Buď pasivně vhodnou konstrukcí okolních součástí, nebo aktivně chladícím médiem, kterým může být vzduch nebo kapalina. Z aktivního způsobu chlazení bylo zvažováno použití ventilátorů, které by zvýšily průtok vzduchu zařízením. Co se týče samotných ventilátorů, bylo uvažováno chlazení jedním výkonným ventilátorem a chlazení systémem menších ventilátorů umístěných na taktických místech zařízení.

**První možností** je použití ventilátoru HV01-37/48 (obr. 27) přímo od firmy LinMot, na jehož upevnění je přizpůsobená i příruba lineárního motoru (PF02-37x100). Jedná se o ventilátor na 24 V stejnosměrného proudu 120 mA s průtokem vzduchu  $80 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  s vnějšími rozměry  $80 \times 80 \times 25 \text{ mm}$ . Součástí je i krycí mřížka a distanční matice na vymezení vzdálenosti od příruby lineárního motoru. [56]



Obr. 27 Sestava lineárního motoru. [56]

**Druhým uvažovaným řešením** bylo důmyslné rozmístění čtveřice ventilátorů MF 50152V1-1000U-A99 od výrobce SUNON, viz obr. 28. Jedná se o vysokorychlostní ventilátory s magnetickým bezdotykovým ložiskem, vnějším průměrem 50 mm a výškou 15 mm. Napájení je dimenzováno na 24 V DC/ 55 mA. Otáčky pak na  $7200 \text{ min}^{-1}$  a životnost přibližně na 70 000 hodin. Maximální průtok vzduchu udává výrobce  $33,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . [57]



Obr. 28 Ventilátor SUNON. [57]



### 3.4 Návrhy řešení pendlovací hlavičky pro plošné navařování

Jak již bylo zmíněno, z hlediska konstrukce byla navržena dvě možná řešení, jejichž modely byly vytvořeny v prostředí studentské verze CAD/CAM softwaru Autodesk Inventor Professional 2021.

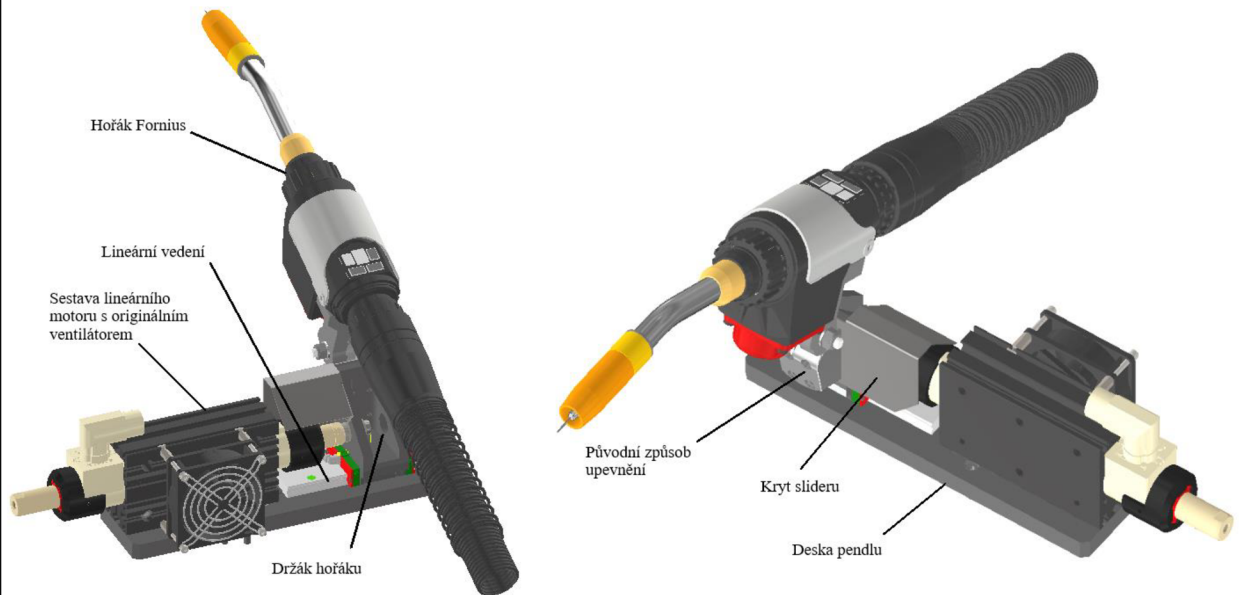
#### 3.4.1 První konstrukční návrh pendlovací hlavičky

Jako první vzniknul návrh pendlovací hlavičky s velice jednoduchým konstrukčním řešením ve smyslu realizace oscilačního pohybu a upevnění komponent. V této verzi se také počítalo s využitím chlazení pomocí jednoho výkonného ventilátoru připevněného přímo na přírubě lineárního motoru. Koncept je vytvořen s ohledem na minimální počet vyráběných součástí a pokud možno co nejjednodušší proces obrábění. Sestava se skládá ze základní desky, na které je pomocí T-matic upevněna příruba lineárního motoru, jejíž souosost s osou X je zajištěna dvojicí kalených kolíků. Vedle příruby je v mělké kapse usazeno lineární vedení, na jehož vozíku je připevněn držák hořáku, který slouží i k přichycení krycího plechu slideru. Sestava je znázorněna na obrázku 29. Dále bude rozebrán podrobný popis jednotlivých vyráběných součástí a na závěr zhodnocení tohoto konceptu. Technické údaje prvního návrhu jsou uvedené v tabulce 11.

Tab. 11 Základní údaje prvního konstrukčního návrhu.

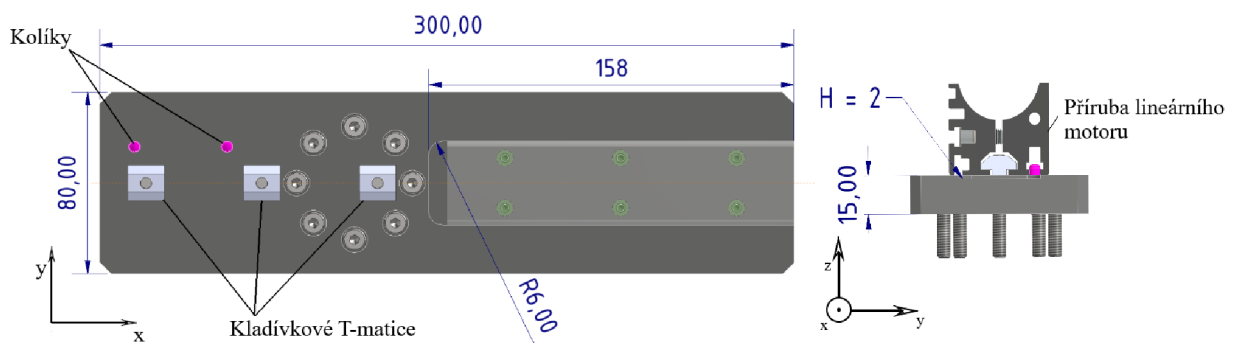
<b>Maximální délka</b>	399 mm
<b>Maximální šířka</b>	109,2 mm
<b>Maximální výška</b>	123,5 mm
<b>Hmotnost celé sestavy</b>	~ 6,5 kg
<b>Hmotnost oscilující části sestavy</b>	~ 2,8 kg
<b>Počet vyráběných součástí</b>	3
<b>Chlazení aktivní</b>	1 x ventilátor ( $80 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )
<b>Chlazení pasivní</b>	ANO

Pozn. Uvedené rozměry nezahrnují rozměry hořáku.



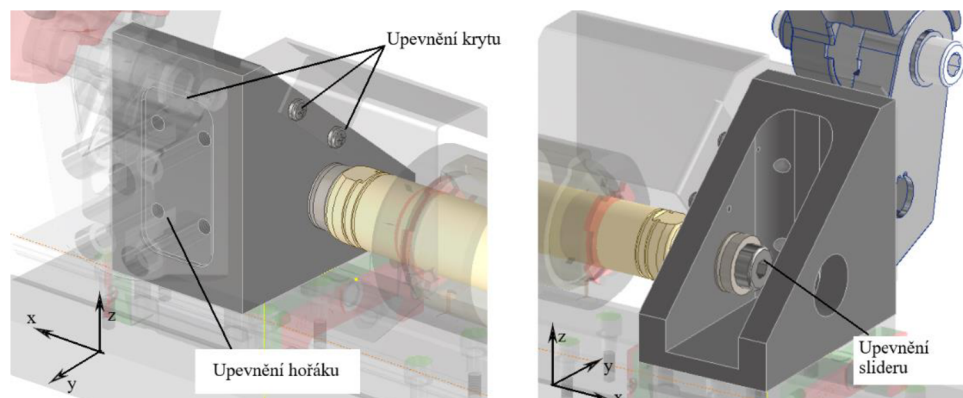
Obr. 29 Sestava prvního návrhu.

**Deska pendlu** souží jako spojovací prvek mezi oscilačním zařízením a otočným stolem. Uvažovaný způsob připojení příruby lineárního motoru je v tomto případě vertikálně za pomoci trojice šroubů s vnitřním šestihranem M6 x 16 a kladívkových T-matic. Přesné polohy příruby je docíleno dvojicí kolíků DIN EN ISO 8734 5 x 20 mm. Co se týče souososti slideru a lineárního vedení WEW21CC, byla v desce pendlu navržena kapsa s přesným dorazem. Polohu v ose X, na jejíž přesnost nejsou kladeny vysoké nároky, zajišťuje šroubové spojení šesticí šroubů M4 x 12 mm. Viz obr 30.



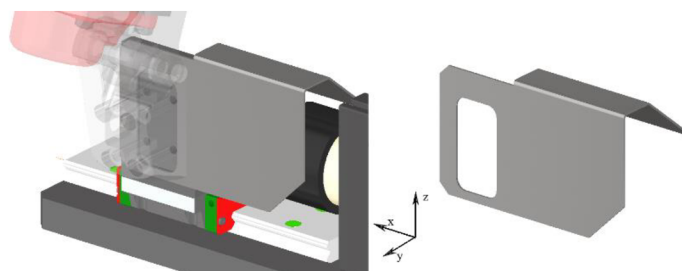
Obr. 30 Návrh desky pendlu.

**Držák hořáku** slouží k upevnění hořáku k vozíku lineárního vedení a zároveň k upevnění slideru a jeho krytí. Spojení se sliderem pomocí šroubu M8 x 30 mm s využitím kompaktních kulových podložek s kuželovou pánví. Upevnění hořáku čtveřicí šroubů M5 x 30 mm a usazení v pozici pomocí předem vyfrézované mělké kapsy. Mezi držákem hořáku a samotným hořákem je vložen speciálně upravený plechový kryt, který je následně pro zvýšení tuhosti spojení připevněn ještě ze strany dvěma šrouby M3. Viz obr. 31.



Obr. 31 Návrh držáku hořáku.

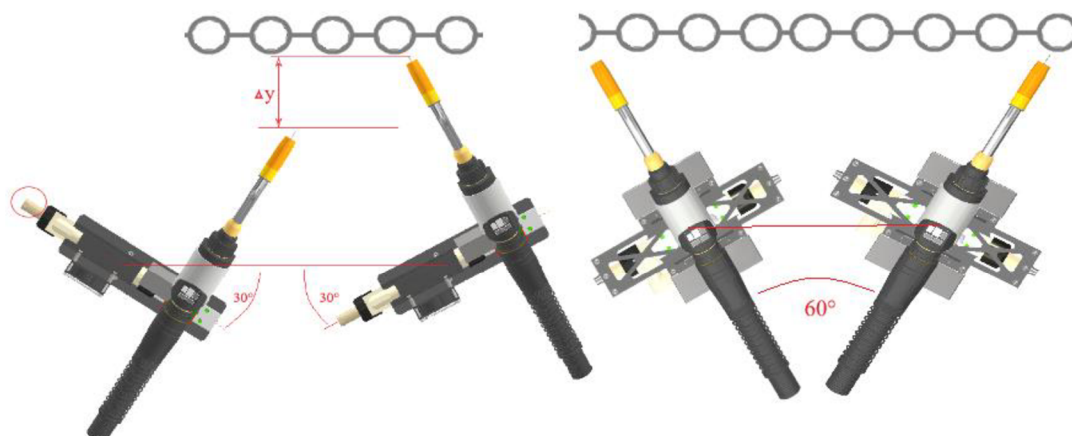
**Krycí plech** byl navržen pro dodatečnou ochranu slideru před rozstříkáním materiálu při procesu navařování a dalšími cizími předměty, které by mohly nepříznivě ovlivnit jeho chod. Plech byl uvažován pozinkovaný o tloušťce 1 mm a poloměr ohybu  $R = 1$  mm.



Obr. 32 Krycí plech.

### 3.4.1.1 Zhodnocení prvního konstrukčního návrhu

První koncepční řešení bylo vytvořeno se zaměřením na co nejmenší počet vyráběných součástí a na jednoduchost sestavení a s tím spojenou výměnu a opravy jednotlivých dílů. Výhodou je i vzdušnost celé sestavy, která by měla pozitivní vliv na odvod tepla ze systému. S tímto návrhem se ale pojí hned několik problémů. První a nejdůležitější vadou tohoto návrhu je, že se oscilující hořák nenachází v ose rotace otočného stolu. To má za následek nerovnoměrné natočení sestavy v tom smyslu, že při natočení ve směru hodinových ručiček dochází ke značnému oddálení hrotu hořáku od navařované stěny v záporném směru osy Y a zároveň se zvyšuje riziko kolize opačné strany sestavy s membránovou stěnou při vyrovnání rozdílu  $\Delta y$ , viz obr. 33. Navíc by v tomto případě docházelo k nerovnoměrnému zatěžování rotačního stolu a jeho řízení by bylo v důsledku této nerovnoměrnosti natočení značně komplikované. Další vadou této koncepce je způsob uchycení slideru k držáku hořáku, viz obr. 31 (vpravo). Zde je zvýšená pravděpodobnost vzniku defektu v důsledku cyklického namáhání. V případě realizace tohoto konceptu by bylo také vhodné dořešit otázku krytování.



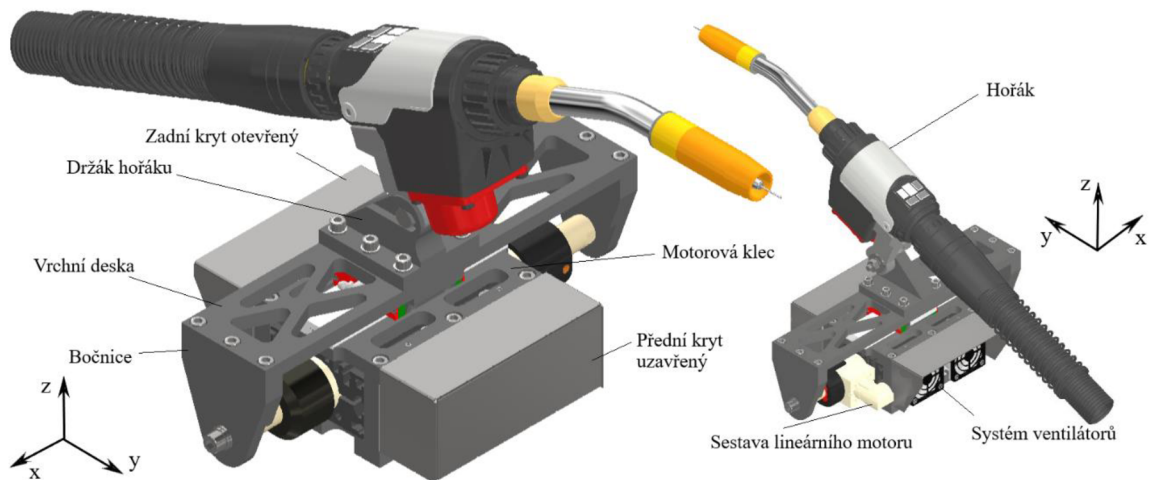
Obr. 33 Nevhodné natočení prvního návrhu vůči stěně (vlevo), rovnoměrné natočení druhého návrhu (vpravo).

### 3.4.2 Druhý konstrukční návrh pendlovací hlavice

Druhý koncept pendlovací hlavice byl zaměřen především na eliminaci problémů spjatých s předchozím návrhem. Hlavním cílem tedy bylo, aby hořák oscilloval v ose rotace otočného stolu. To by mělo za následek nejen rovnoměrné natáčení hořáku, viz obr. 33 (vpravo) jehož hrot by se tak pohyboval po kružnici, ale i rovnoměrné zatížení otočného stolu. Jeho řízení tak bude značně usnadněno. Dalším cílem bylo zvýšit tuhost sestavy, při současném zachování její vzdušnosti pro snadný odvod tepla od motoru. Také bylo potřeba vymyslet zcela nový způsob upnutí hořáku, neboť jak již bylo zmíněno, běžně dodávaný přípojovací díl hořáku ke standartnímu robotu (viz obr. 25 vpravo) nebyl k dispozici. Z hlediska chodu lineárního motoru, resp. jeho slideru byl brán také ohled na rovnoměrné vysunutí ze statoru, čímž se zmenší exponovaná délka slideru. Pro vyhovění těmto požadavkům na konstrukci zařízení se musel druhý koncept od základu změnit, viz obr. 34. Technické údaje druhé, viz tab. 12.

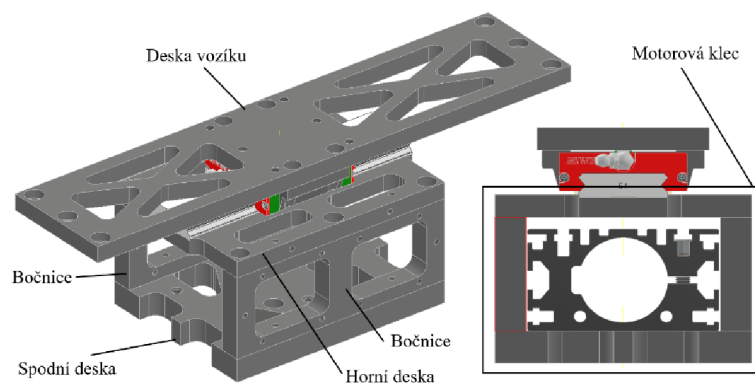
Tab. 12 Základní údaje druhého konstrukčního návrhu (rozměry bez hořáku).

<b>Maximální délka</b>	319 mm
<b>Maximální šířka</b>	207 mm
<b>Maximální výška</b>	157,5 mm
<b>Hmotnost celé sestavy</b>	~ 7,7 kg
<b>Hmotnost oscilující části sestavy</b>	~ 3,5 kg
<b>Počet vyráběných součástí</b>	10
<b>Chlazení aktivní</b>	4 x ventilátor ( $33,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )
<b>Chlazení pasivní</b>	ANO



Obr. 34 Sestava druhého návrhu.

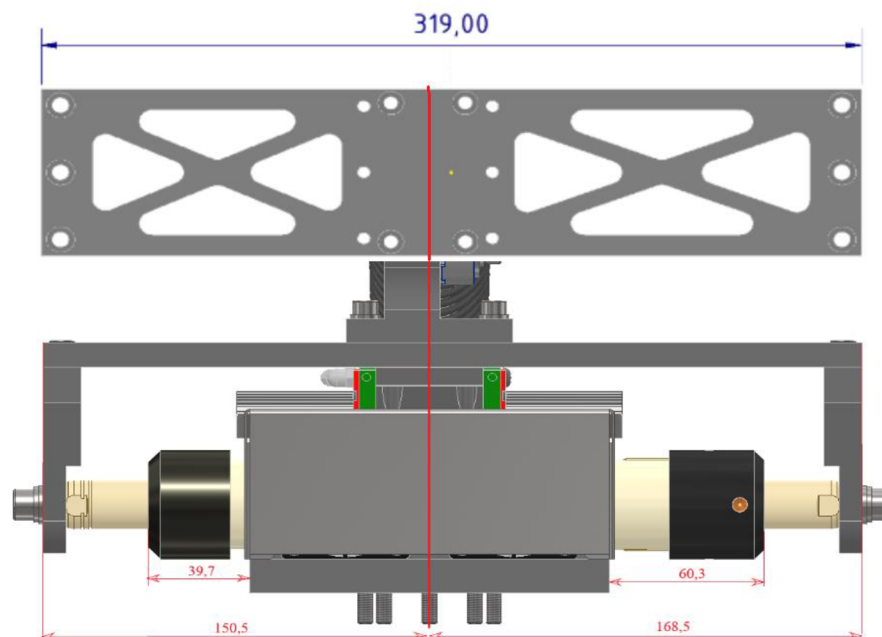
Jak je vidět na obr. 34, tento návrh řeší otázku sousostí hořáku s rotačním stolem vyvedením kolejnice s vozíkem nad sestavu lineárního motoru. Toto konstrukční řešení má za následek mnohem větší symetrii celé sestavy a obecně její kompaktnost. Délka je nyní dána pouze délkou slideru a k němu připojených bočnic. Problém s tuhostí sestavy byl v tomto návrhu vyřešen usazením sestavy lineárního motoru do motorové klece. Ta se skládá ze spodní desky, která slouží k upnutí k rotačnímu stolu a také k upnutí příruby lineárního motoru. Dále ze dvou bočnic, ke kterým jsou připevněny ventilátory (z každé strany dva) a krycí plechy ventilátorů. Poslední součástí motorové klece je deska pro uložení kolejnice lineárního vedení. Spojení klece je řešeno 12 šrouby DIN 912 M6 x 20 a 8 kalenými kolíky. Co se týče upnutí oscilující části sestavy ke slideru motoru, byl z výrobcem doporučených způsobů vybrán ten, který má nejmenší vliv na jeho zatížení. Z hlediska chlazení bylo u tohoto návrhu využito hned několika metod a konstrukčních prvků podporujících průtok vzduchu sestavou, zejména pak motorovou klecí. Prvním a hlavním prvkem chladičského systému je využití ventilátorů. Do aktivních prvků lze také zařadit konstrukci bočnic připojených ke slideru. Jak lze pozorovat na obr. 34, plocha stěn bočnic je poměrně výrazná. Bočnice tak byly navrženy částečně i z důvodu vytváření dodatečného průtoku vzduchu motorovou klecí při oscilačním pohybu. Do pasivních prvků chladičského systému řadíme žebrování příruby lineárního motoru a také žebrování všech okolních součástí, viz obr. 35.



Obr. 35 Systém pasivního chlazení motorové klece.

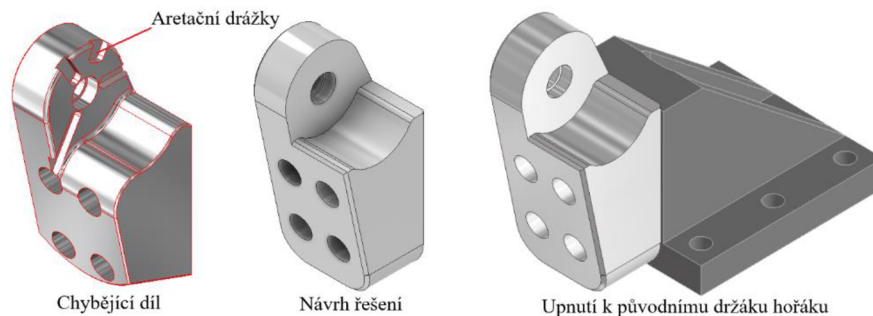
**Motorová klec** je tedy statická, nependující část sestavy, viz obr. 35. Z hlediska její konstrukce bylo třeba vyřešit nejen co největší tepelný odvod, kterého bylo dosaženo četnými chladicími otvory, ale také dostatečnou tuhost a přesnost ve smyslu souososti slideru lineárního motoru a kolejnice, resp. vozíku lineárního vedení. S ohledem na přesnost výroby byla otázka souososti řešena formou vůlí k taktických bodech sestavy. Motorová klec byla navržena tak, aby mezi přírubou lineárního motoru a bočnicemi klece byla malá vůle pro případ, že by došlo k mírnému vyosení. Další kompenzační prvky se týkají již jiných součástí zařízení. Stěny klece jsou mezi sebou skolíkovány pro zajištění vzájemné polohy součástí.

**Vrchní deska** a k ní připojené **bočnice** (2x) třemi šrouby DIN 912 M6 x 20 slouží pro přenos oscilačního pohybu slideru na vozík lineárního vedení, ke kterému je vrchní deska připojena čtyřmi šrouby DIN 912 M5 x 10. Přimo nad vozíkem pak k vrchní desce bude upevněn držák hořáku. Na obr. 33 je vidět, že vrchní deska disponuje také řadou otvorů. V tomto případě se však nejedná o otvory primárně pro odvod tepla, ale o křížové žebrování, které z hlediska tuhosti poskytuje lepší vlastnosti než obyčejné drážkové otvory. Vrchní deska je s ohledem na konstrukci lineárního motoru, jeho uložení a rozkmit navržena asymetricky, viz obr. 36.



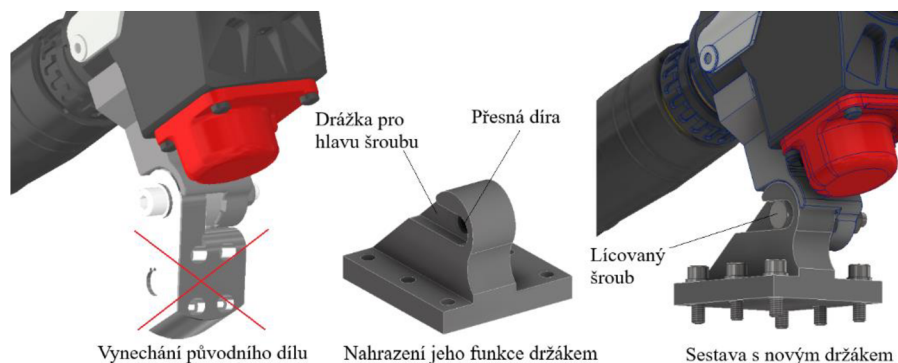
Obr. 36 Asymetrie vrchní desky.

**Držák hořáku** vznikl v několika verzích v důsledku nekompletních informací ohledně dostupných komponent ze sestavy hořáku. Dle výše zmíněného bylo nutné vyřešit problém chybějící součásti na připojení hořáku ke standardnímu robotu. První zvažovanou možností bylo danou komponentu vymodelovat dle předlohy originálu a použít s již navrženým držákem hořáku, viz obr. 37. Toto řešení s sebou však přináší řadu nevýhod a vad. První a nejdůležitější nevýhodou je, že by se de facto vyráběla součást navíc. Hořák se navíc ve spojení s originálním dílem může naklápět a uzamknout v aretačních drážkách jejichž výroba by byla komplikovaná s ohledem na protisoučást, v případě jejich zachování.



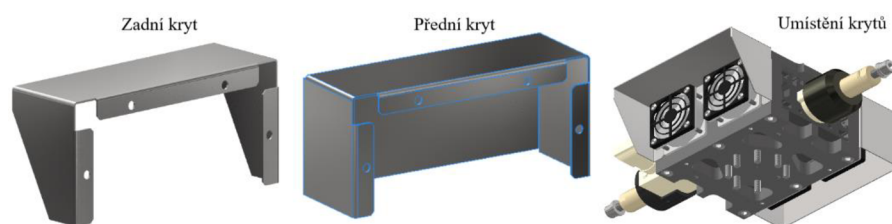
Obr. 37 První verze držáku.

Proto byla navržena druhá verze držáku, která by kombinovala výhody původního upnutí, a navíc vyřešila problém s výrobou součásti navíc. Toho bylo dosaženo vynecháním celého chybějícího dílu a nahrazením jeho funkce přímo držákem hořáku, viz obr. 38. V původní sestavě byla přesnost spojení vyřešena speciální vložkou a aretačními drážkami. Nový návrh řeší tento problém vystružením přesné díry a spojením lícovaným šroubem DIN 609 M8 x 45, jehož hlava je zafixovaná v předem vyfrézované drážce pro snadné upnutí v požadované poloze. Spojení s deskou vozíku je navrženo šesti šrouby DIN 912 M6 x 20 s pérovými podložkami DIN 127.



Obr. 38 Nová verze držáku.

Posledními vyráběnými komponentami jsou dva **krycí plechy**, viz obr. 39. První, přední krycí plech je navržen s uzavřenou konstrukcí shora, z boku a zepředu z důvodu blízkosti k navařované stěně a tím pádem zvýšené pravděpodobnosti výskytu nečistot, které by mohly nepříznivě ovlivnit chod ventilátorů. Zadní krycí plech již kryje ventilátory pouze shora a částečně z boku, neboť riziko výskytu nečistot z této strany je podstatně menší. Jedná se o součásti z povlakovaného ocelového plechu o tloušťce 1 mm se stejnou hodnotou poloměru ohybu. Spojení s klecí čtyřmi šrouby DIN 912 M5 x 10 s podložkou DIN 125.



Obr. 39 Způsob krytí ventilátorů.

### 3.4.2.1 Návrh materiálu a polotovarů vyráběných komponent

Tab. 13 Seznam součástí určených k výrobě.

Součást	Počet [ks ]	Materiál	Polotovar [mm]	Výrobní technologie
Deska spodní	1	CERTAL®	145 x 110 x 20	frézování
Bočnice	2	CERTAL®	145 x 55 x 15	frézování
Deska vrchní	1	CERTAL®	155 x 110 x 12	frézování
Deska vozíku	1	CERTAL®	320 x 75 x 12	frézování
Bočnice desky voz.	2	CERTAL®	80 x 75 x 20	frézování
Držák hořáku	1	CERTAL®	75 x 70 x 60	frézování
Krycí plech přední	1	Magnelis®	260 x 120 x 1	Ext. výroba
Krycí plech zadní	1	Magnelis®	260 x 60 x 1	Ext. výroba

Pozn. Krycí plechy byly s ohledem na vybavení dílny vyrobeny na externím pracovišti.

**CERTAL®** je obchodní označení pro speciální hliníkovou slitinu EN AW 7022, tedy hliníkovou slitinu na bázi zinku, hořčíku a mědi ( $AlZn_5Mg_3Cu$ ). Skupina Al-Zn-Mg-Cu slitin je nejpevnější mezi hliníkovými slitinami. Vyniká excelentními obráběcími vlastnostmi a velice dobrou leštitelností povrchu, nebo také snadnou aplikací povrchových úprav (eloxování, barvení). Jedná se o slitinu s vysokou pevností a běžně se používá ve strojírenství. Válcované desky z této slitiny jsou tvarově velice stabilní díky výrazně nižšímu úbytku pevnosti a tvrdosti od okrajů desky k jejich středu. Označení polotovarů T6 znamená žíhaný a vytvrzený stav materiálu. Mechanické a fyzikální vlastnosti jsou uvedené v tabulce. 14. [58]

Tab. 14 Mechanické a fyzikální vlastnosti slitiny EN AW 7022 (CERTAL®). [58]

<b>Smluvní mez kluzu <math>R_{p0,2}</math></b>	400–495 MPa
<b>Mez pevnosti <math>R_m</math></b>	490–555 MPa
<b>Modul pružnosti E</b>	72 GPa
<b>Tažnost <math>A_{50}</math></b>	6–9 %
<b>Tvrдость dle Brinella HBW</b>	165–170
<b>Hustota</b>	2760 kg·m <sup>-3</sup>



Ocelový plech s povlakem **Magnelis**<sup>®</sup>. Jde o obchodní označení pro metalický povlak na bázi Al + Zn + Mg s vynikajícími protikorozními vlastnostmi. Z estetického hlediska se jedná o tmavě šedý povlak bez zinkového květu. Předností je především jeho nízká hmotnost způsobená minimální tloušťka povlaku, která se pohybuje v rozmezí od 7 do 25  $\mu\text{m}$ . Povlak je velice dobře tvářitelný, díky čemu se hodí na použití ohýbaných plechů. [59]

#### 3.4.2.2 Zhodnocení druhého konstrukčního návrhu

Druhý návrh konstrukce pendlovací hlavy pro plošné navařování byl od začátku zaměřen na vyřešení požadavku souososti hořáku s osou rotace otočného stolu a také na tuhost a kompaktnost sestavy při současném udržení schopnosti odvodu tepla ze sestavy lineárního motoru. Toho bylo docíleno usazením lineárního motoru do motorové klece, která zajišťuje pevné, ale i upravitelné upnutí v rámci vřutí šroubového spojení. Přidanou hodnotou je i rovnoměrné (a tím pádem poloviční) vysunutí slideru ze statoru. Konstrukce navíc částečně funguje jako krytí náchylných součástí, jako je např. kolejnice lineárního vedení. Takové uzavření sestavy motoru by ale bez dalších úprav razantně ovlivnilo tepelné zatížení motoru. Proto byla motorová klec navržena jak s aktivními, tak i pasivními chladicími prvky. Oproti prvnímu návrhu, kde byl použit jeden ventilátor o průtoku  $80 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  se u tohoto návrhu počítá s větším účinkem díky čtveřici ventilátorů s celkovým maximálním průtokem  $134,4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Další výhodou je libovolná polohovatelnost hořáku v daném rozsahu, díky nové konstrukci držáku.

Na druhou stranu je tento návrh oproti prvnímu mnohem komplikovanější. Návrh počítá s poměrně velkým množstvím vyráběných součástí. To se negativně projeví nejen na ekonomické stránce tohoto návrhu ale také na jeho hmotnosti. Ta je stěžejní pro návrh pohonu a jeho zátěž. Druhý návrh má přibližně o 25 % větší hmotnost oscilující části sestavy než první. S tím se pojí důkladná optimalizace pracovních podmínek motoru a nastavení oscilačního pohybu.

Po zhodnocení obou variant, kontrole zatížení motoru a odborné konzultaci byl tento návrh zvolen k výrobě, kterou se bude zabývat následující kapitola.

## 4 REALIZACE ZVOLENÉHO KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ

V této kapitole bude věnována pozornost realizaci zvoleného konstrukčního řešení a s ní spjatých oblastí. Co se týče vyráběných součástí, je třeba si ujasnit postup výroby. Následně bude popsán proces sestavení zařízení s ohledem na jeho funkčnost. Na závěr bude provedeno kritické zhodnocení výrobního procesu a výsledného zařízení včetně návrhu řešení případných vzniklých potíží. Z podkapitoly 3.2.4.1 *Návrh materiálu a polotovaru vyráběných komponent* bylo pro výrobu určeno 10 součástí z toho 8 bude vyrobeno v prostředí dílny VUT ÚST. Výroba tudíž byla přizpůsobena možnostem a personálnímu zajištění této dílny. Byl stanoven následující postup:

1. volba výrobních technologií, strojů a zařízení,
2. volba nástrojů a řezných podmínek,
3. příprava NC programu,
4. obrábění, odjehlení,
5. montáž.

### 4.1 Použité technologie a stroje

Vzhledem k povaze součástí v tom smyslu, že se jedná až na výjimky o desky z hliníkové slitiny s tvarovými prvky ve formě kontur, kapes a drážek, byla zvolena jako technologie obrábění-frézování. Ze strojů dostupných na dílně bylo na výběr mezi 5 - ti osým obráběcím centrem a tříosou vertikální konzolovou frézku. Výhodou obráběcího centra je mimo jiné zásobník nástrojů a tím i možnost jejich automatické výměny, což by vedlo ke značné časové úspoře. Na druhou stranu by bylo složitější programování NC kódu a jeho postproces pro komunikaci se strojem. Proto byla pro obrábění zvolena tříosá vertikální frézka **FV 25 CNC A**, viz obr. 40, od výrobce OSO Olomouc s řídicím systémem **Heidenhain TNC 530**, ke kterému byl dostupný postprocessor na vygenerování NC kódu z programu vytvořeného v prostředí CAM softwaru–**Autodesk Inventor CAM 2021**. Technické údaje jsou uvedeny v tabulce 15.



Obr. 40 Frézka FV 25 CNC A.

Tab. 15 Technické údaje tříosé vertikální frézky FV 25 CNC A. [60]

<b>Rozměry frézky</b>	2750 x 2600 x 2030 mm
<b>Hmotnost frézky</b>	1500 kg
<b>Řídicí systém</b>	Heidenhain
<b>Upínací plocha stolu</b>	300 x 1300 mm
<b>Pohyb stolu v ose X/Y/Z</b>	750/355/152 mm
<b>Max. hmotnost obrobku</b>	200 kg
<b>Otáčky vřetena</b>	50–6000 min <sup>-1</sup>
<b>Kužel vřetena</b>	ISO 40
<b>Celkový příkon stroje</b>	7,5 kW

Některé konstrukční prvky (vrtání některých děr, řezání závitů, vystružování) byly dohotoveny ručně na jednovřetenové **stolní vrtačce V 20A** od výrobce TOS, viz obr 41. Údaje o stroji jsou uvedené v tab. 16.



Obr. 41 Stolní vrtačka TOS V 20A.

Tab. 16 Technické parametry stolní vrtačky V 20A. [61]

<b>Rozměry stroje</b>	510 x 970 x 1345 mm
<b>Hmotnost stroje</b>	400 kg
<b>Rozměry pracovního stolu</b>	280 x 355 mm
<b>Vrtací průměr/hloubka</b>	20/160 mm
<b>Kužel ve vřetenu</b>	Morse 3
<b>Otáčky vřetena</b>	71–2800 min <sup>-1</sup> (9 stupňů)
<b>Celkový příkon stroje</b>	1,5 kW

## 4.2 Volba nástrojů a řezných podmínek

Před samotným programováním byl zjištěn stav nástrojů na dílně a určeny řezné podmínky pro každý z těchto nástrojů s ohledem na možnosti stroje. Pro frézování byly použity válcové čelní monolitní frézy z rychlořezné oceli o průměrech 6, 8 a 16 mm, viz tab. 17. Pro vrtání děr pro šrouby, předvrtání děr pro závity a předvrtání přesných děr pro následné vystružení byly použity vrtáky uvedené v tabulce 18. Ostatní použité nástroje se již nevztahují k programování NC programu a budou uvedeny v následujících podkapitolách.

Tab. 17 Parametry použitých válcových čelních fréz.

Číslo nástroje	Průměr [mm]	Délka břitu [mm]	Počet břitů [-]	Otáčky vřetene [ $\text{min}^{-1}$ ]	Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	Posuv na zub [mm]	Pracovní posuv [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ]
1	8	20	4	5500	138,23	0,03	660
2	6	20	4	5500	103,67	0,03	660
3	16	32	4	5500	276,46	0,04	880
4	16	60	4	5500	276,46	0,04	880

Tab. 18 Parametry použitých vrtáků.

Číslo nástroje	Průměr [mm]	Délka břitu [mm]	Úhel špičky [°]	Otáčky vřetene [ $\text{min}^{-1}$ ]	Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	Posuv na otáčku [mm]
5	6,6	66	118	4410	91,43	0,165
6	5,5	55	118	5290	91,40	0,137
7	4,2	42	118	5800	76,53	0,126
8	5	50	118	5820	91,42	0,125
9	3,3	33	118	5820	60,33	0,125
10	9	90	118	3230	92,33	0,225
11	8,9	89	118	3270	92,43	0,223

Výběr nástrojů, především jejich velikostí proběhl na základě geometrie daných součástí. Výběr vrtáků je snazší, neboť u děr pro šrouby volíme průměr vrtáku stejný jako je průměr díry. U předvrtaných děr pro závity je volba také snadná, neboť průměr vrtáku je doporučen v závislosti na předepsaném stoupání závitu. U děr pro kolíky byl zvolen průměr

vrtáku o desetinu menší pro následné použití výstružníku. Co se týče volby průměru fréz, je třeba brát ohled na rádiusy vnitřních zaoblení. V případě příliš velkého úhlu opásání dochází z nadměrnému opotřebením nástroje a snížení kvality výsledného povrchu. Při volbě průměru frézy s ohledem na vnitřní rádius se řídíme vztahem 10.

$$R_{frézy} = \frac{4}{5} \cdot R_{zaoblení} ; R_{frézy} = \frac{2}{3} \cdot R_{zaoblení} ; R_{frézy} = \frac{1}{2} \cdot R_{zaoblení} \quad (10)$$

Nedoporučuje se

Adekvátní volba

Ideální volba

### 4.3 Příprava NC programů

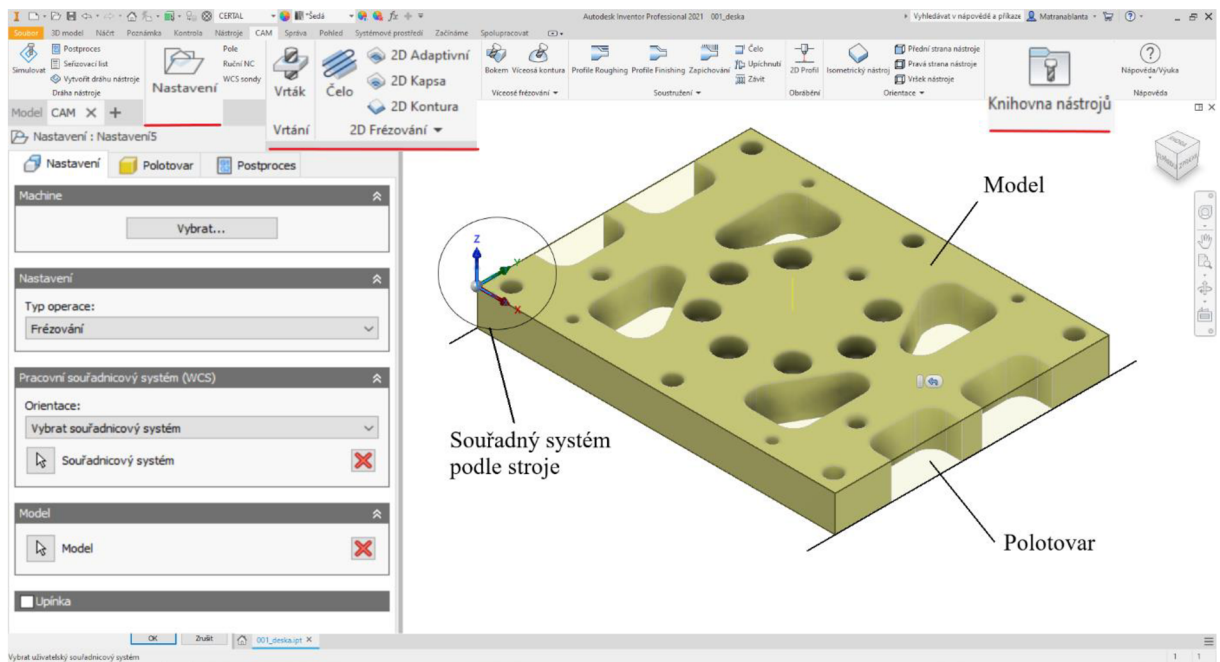
Po vyjasnění, které součásti se budou vyrábět, z jakého materiálu a na jakých strojích, je třeba připravit NC programy. Programování probíhalo v prostředí nástroje Autodesk Inventor CAM 2021. Jedná se o nástroj programu Autodesk Inventor, ve kterém lze naplánovat nejrůznější druhy obrábění od soustružení, přes vrtání a 2D frézování až po 3D frézování a víceosé obrábění. Velkou výhodou tohoto nástroje je možnost simulace procesu obrábění, včetně kontroly kolize, znázornění drah nástroje a úběru materiálu z polotovaru. Další výhodou je rozsáhlá knihovna nástrojů, které lze sjednocovat do vlastních složek a upravovat jejich parametry podle potřeby, nebo definovat nové podle nástrojů dostupných na dílně. Postup při vytváření NC programu tímto nástrojem je následující:

1. nastavení knihovny nástrojů dle individuálních možností,
2. definování globálního nastavení součásti, ve kterém lze vybrat druh obrábění, konkrétní stroj, definovat pracovní souřadnicový systém a určit co je model a co polotovar,
3. výběr samotné operace. V případě 2D frézování jsou dostupné operace frézování čela, 2D kapsy, 2D kontury, drážky, kruhového zahloubení, frézování závitu, 2D zkosení, nebo také gravírování,
4. zvolení nástroje a stanovení pracovních parametrů obrábění, které zahrnuje chlazení, otáčky a posuvy. Nastavení pracovních podmínek lze vynechat v případě správného zadefinování parametrů v knihovně nástrojů,
5. výběr geometrie k obrábění (dle modelu nebo individuálního náčrtu),
6. nastavení výšek–bezpečná výška, výška návratu, posuvu, vršku a spodku (modelu/polotovaru/odsazení),
7. nastavení záběrů, hloubek a stranových kroků, tolerancí a kompenzace
8. nastavení napojování, nájezdů, odjezdů nebo také rampování,
9. postproces naprogramovaných operací a vygenerování NC kódu.

Při programování obrábění je velice důležité volit správně sled jednotlivých operací v závislosti na použitých nástrojích a zvolených způsobech upnutí obrobku. Obzvláště pak při plánování výroba na stroji, kde není automatická výměna nástrojů. Vhodně zvolený sled operací a způsob upnutí může značně zkrátit výrobní časy jednotlivých součástí.

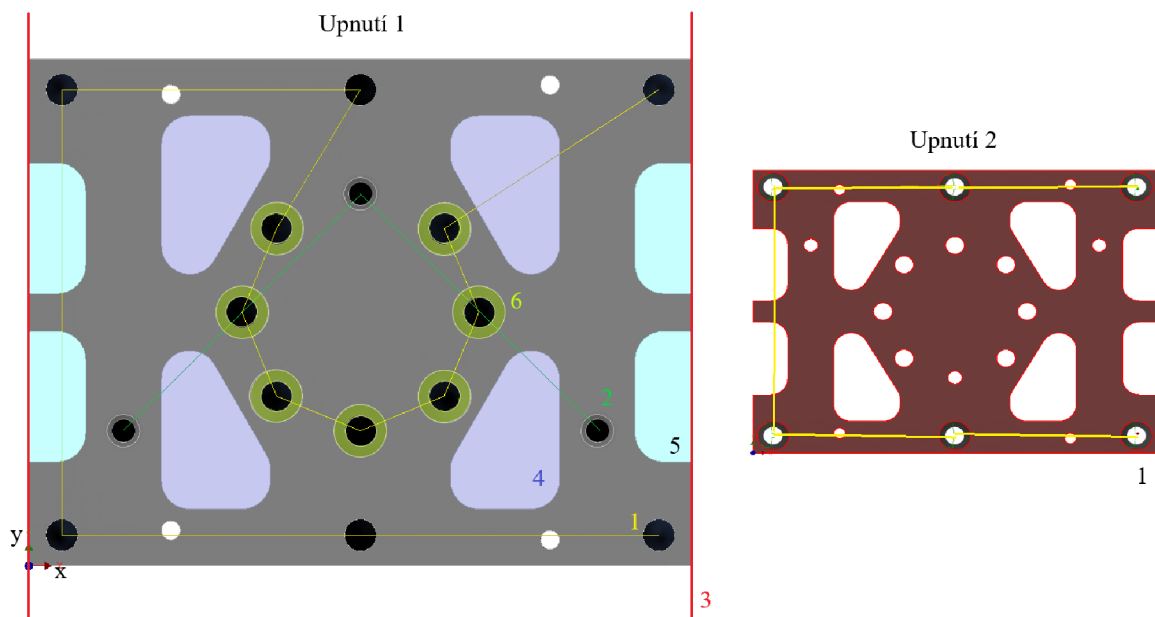
### 4.3.1 Programování v Inventor CAM 2021

První součást, pro kterou byl vytvořen NC program byla **spodní deska** motorové klece, viz obr. 35. Před samotným programováním jednotlivých operací bylo třeba stanovit rozměry polotovaru. V tabulce 13. je uveden rozměr polotovaru objednané desky. Pro usnadnění programování však byly všechny polotovary předem zúhlovány na maximální rozměry výsledné součásti. To znamená mnohem jednodušší programování jak z hlediska počtu operací, tak z hlediska určování souřadnicového systému součásti a pozice nulového bodu. Souřadný systém byl v modelu nastaven podle skutečného souřadného systému stroje. Výsledný počet operací se tak zúžil na celkový počet sedm. Z toho 6 na první upnutí a 1 na upnutí druhé. Co se týče upnutí součásti, v programování se počítalo se způsobem upnutí do svěráku, které je taktéž použitelné díky předchozímu zúhlování polotovaru. Nyní je možné se držet postupu, který je popsán v kapitole 4.1.4 *Příprava NC programů*. Jako první byla tedy založena složka, do které byly vloženy nástroje z tab. 17 a tab. 18, včetně uvedených parametrů dále bylo provedeno definování globálního nastavení, viz obr. 42.



Obr. 42 Definování základního nastavení.

Následuje volba typu a sledu operací. U této součásti byl zvolen postup, dle obr. 43. S ohledem na druhé upnutí, kde obrábíme pouze zahloubení pro hlavy šroubu frézou č.1, začneme při prvním upnutí operacemi vrtání děr pro šrouby na sestavení klece a připojení k otočnému stolu (dráha 1–žlutá), jako další krok je zvoleno vrtání děr pro závity na upnutí motoru (dráha 2–zelená). U obou operací bylo nastaveno zapnutí chlazení a zvolen typ vrtání „Lámání třísek–částečný návrat“ pro lepší odvod třísky z vrtané díry. Následuje frézování, které začíná frézováním kontury (dráha 3–červená) nástrojem č.1, hodnoty bezpečné výšky, výšek návratu a posuvu byly ponechány defaultní a výška vršku nastavena na vršek polotovaru. Výška spodku byla zvolena vybraná kontura s hodnotou odsazení -1 mm pro lepší kvalitu povrchu na spodní hraně. V záložce *Záběry* volíme typ kompenzace v řídicím systému, stranový krok 1 mm, hodnota  $a_p = 3$  mm a zvolíme rampování pod úhlem  $4^\circ$  s rampovacím krokem dolů 3 mm.



Obr. 43 Sled operací a upnutí spodní desky.

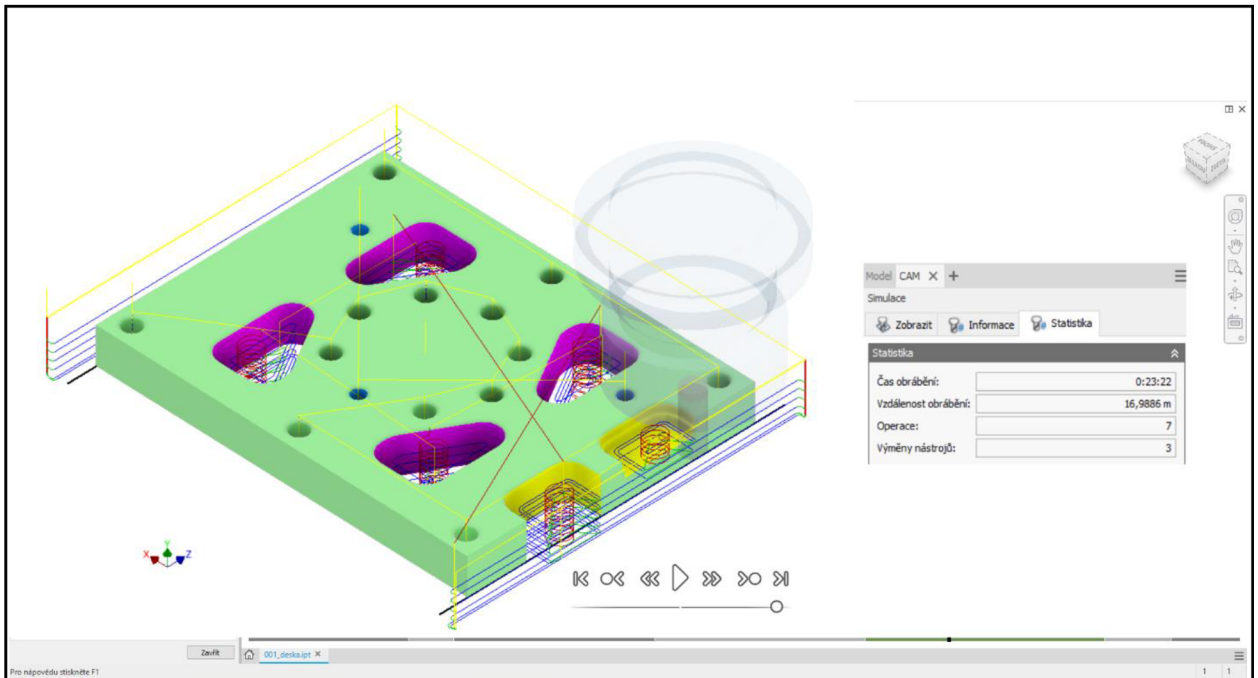
Další operací je vybrání 2D kapsy (plocha 4–modrá), stejným nástrojem, se stejnými posuvy a otáčkami a, v záložce *Výšky* je opět zvoleno odsazení spodku, aby nástroj projel 1 mm skrz (kolize nehrozí skrze způsob upnutí). V záložce *Záběry* byl nastaven typ kompenzace v řídicím systému (tento typ kompenzace je pro každou frézovací operaci stejný). V případě 2D kapsy lze nastavit ještě požadavek na počet a velikost stranového kroku dokončovacích záběrů a maximální stranový krok. Tyto parametry byly zvoleny na jeden dokončovací krok po 1 mm a max. stranový krok volíme dle vztahu 11 na 5,6 mm.

$$a_e = 0,7 \cdot d_f \quad (11)$$

Následně je nastaveno hrubování na záběr 3 mm, dokončovací krok dolů na 0,2 mm. Co se týče rampování, je třeba v případě 2D kapes nastavit kromě úhlu a max. kroku dolů ještě průměr rampy, který byl zvolen na 95 % průměru frézy. Pátou operací je vybrání 2D kapes (dráha 5–tyrkysová), stejný nástroj, stejné nastavení výšek i záběrů jako u předchozí 2D kapsy, včetně nastavení rampování. Poslední operací prvního upnutí je kruhové vybrání pro hlavy šroubů (dráha 6–limetková), kde se mění nastavení výšek ve smyslu nastavení výšku spodku na dno díry. V případě kruhového vybrání se v záložce *Záběry* nastavuje pouze typ kompenzace a maximální krok dolů (v řídicím systému, 2 mm). Rampování u tohoto typu operace nenastavujeme. Na druhé upnutí je opět třeba vyplnit globální nastavení a definovat souřadnicový systém. Poté opět obrábíme pouze kruhové vybrání pro hlavy šroubů (dráha 1–žlutá) a to se stejným nastavením jako v případě operace č.6.

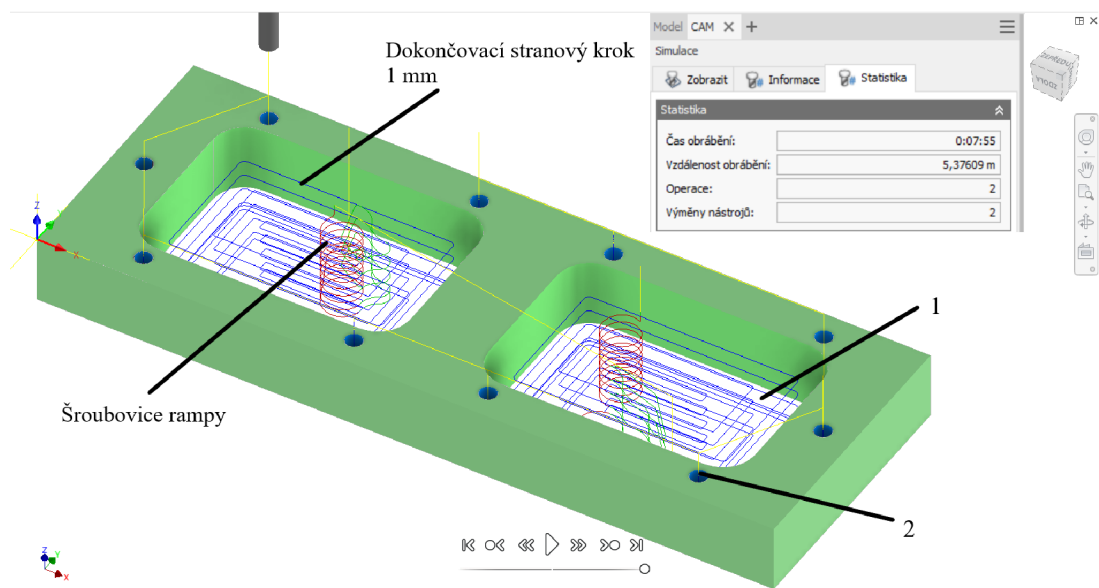
Po naprogramování jednotlivých operací zkontrolujeme proces obrábění v simulaci, kde jsou znázorněny dráhy, úběry materiálu, nebo také celkový čas obrábění, počet operací a výměn nástrojů. Celkový čas obrábění je dle simulace stanoven na 0:23:22. Tento čas však neodpovídá reálnému času skrz přípravu stroje a obrobku na obrábění. Ukázka simulace je vidět na obr. 44. Takto přichystaný program lze následně pomocí funkce *Postproces* exportovat do formátu čitelného pro stroj, resp. jeho řídicí systém.





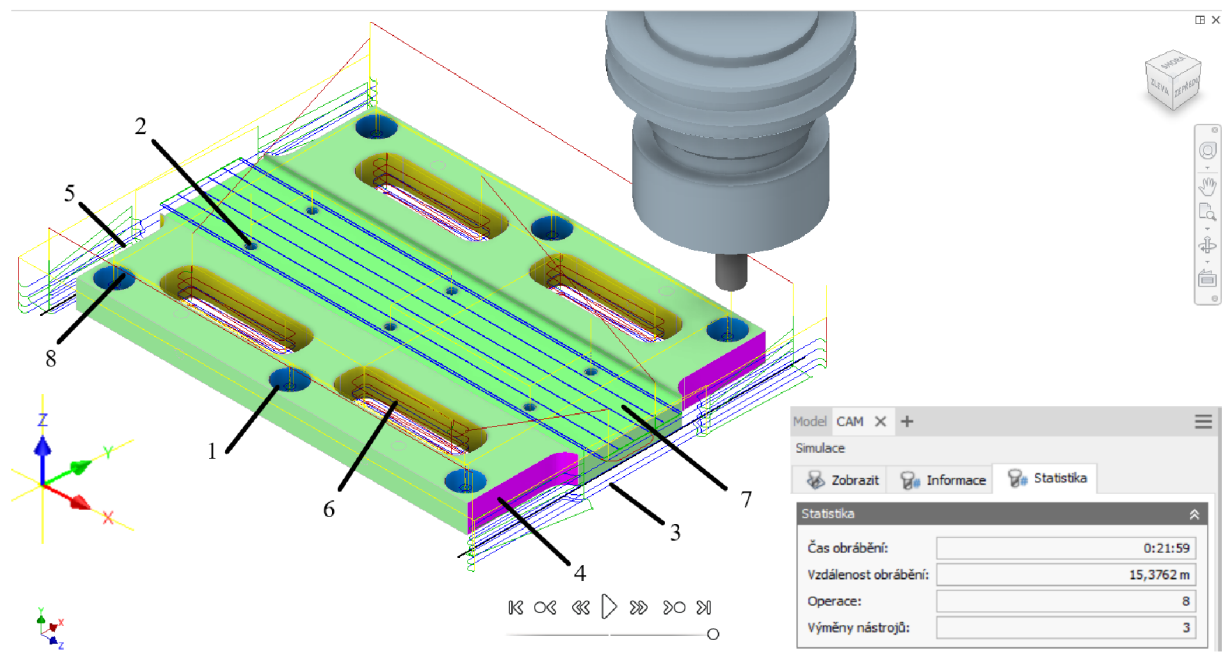
Obr. 44 Simulace obrábění spodní desky.

Program pro **bočnice** motorové klece, které budou vyráběny dva identické kusy. Z hlediska programování se jedná o velice jednoduchou součást, neboť se budou vybírat pouze dvě 2D kapsy a předvrtávat díry pro řezání závitů, viz obr. 45. Ostatní prvky se budou dodělavat ručně na stolní vrtačce, nebo naprogramovány dle výkresu přímo na ovládacím panelu stroje (stranové díry pro závity). Opět se počítá s tím, že je polotovar zúhlován na maximální rozměry součásti. Stejně jako u předchozí součásti je definován souřadnicový systém, stanoveno, co je polotovar a co model a zvolena první operace, kterou je vybrání dvou otvorů pro ventilátory funkcí 2D kapsa. Pro tu je zvolen nástroj č.1, nastavena výška spodku -1 mm, záběry jak stranové, tak do hloubky jsou ponechány stejné jako u předchozího dílu, včetně nastavení rampování. Poté je nastaveno vrtání nástrojem č.9, stejně jako v předchozím případě s postupným lámáním třísek.



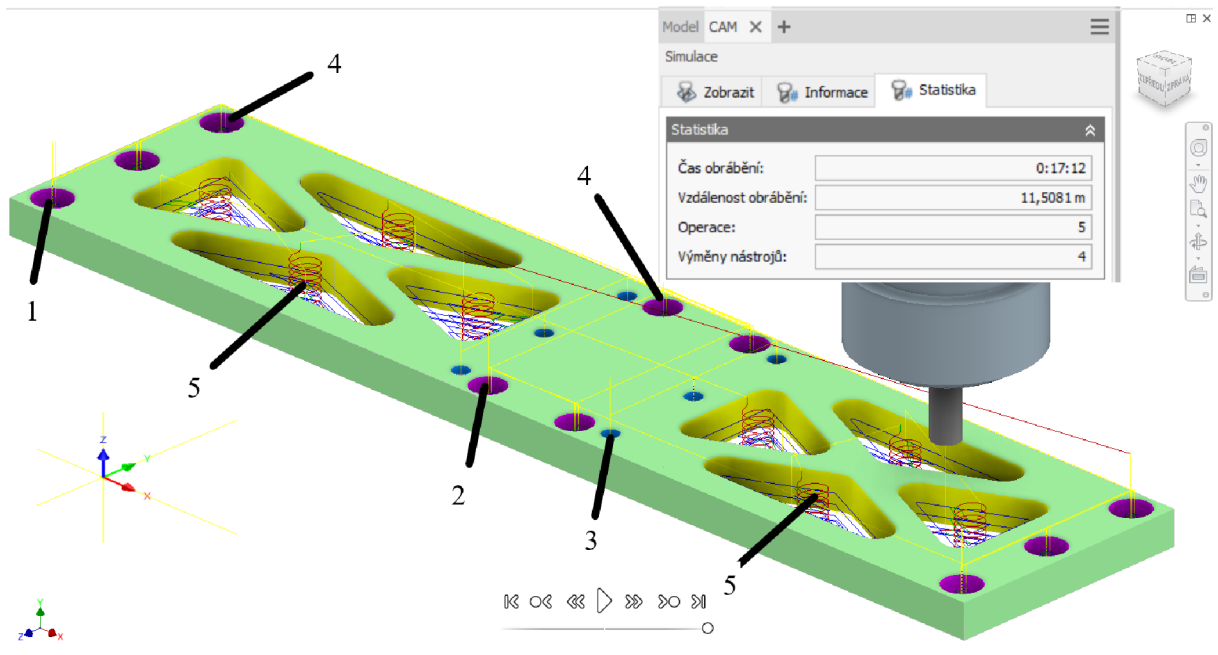
Obr. 45 Simulace obrábění bočnice.

Program pro **horní desku**. Ta je tvarově komplikovanější, ale všechny operace lze provést na jedno upnutí. Opět je důležité naplánovat sled operací s ohledem na ruční výměnu nástroje. Proto je nejdříve provedeno vrtání s ohledem na ruční výměnu nástroje. Proto je nejdříve provedeno vrtání a až poté frézování které probíhá celé jedním nástrojem. Nejdříve bylo nastaveno vrtání děr pro šrouby nástrojem č.5, poté nástrojem č.9 předvrtány díry pro řezání závitů. Následuje výměna nástroje na frézu č.1 a vytvoření programu pro boční kontury, které jsou ještě jednou zarovnány a následně vybrány. Jako další operace bylo naprogramováno obrobení drážek a poté kapsa pro kolejnici lineárního vedení. Jako poslední se frézovalo kruhové zahlabení pro hlavy šroubů. U všech frézovacích operací byl nastaven dokončovací stranový krok 1 mm. Operace a jejich sled je znázorněn na obr. 46, společně s dobou obrábění dle simulace.



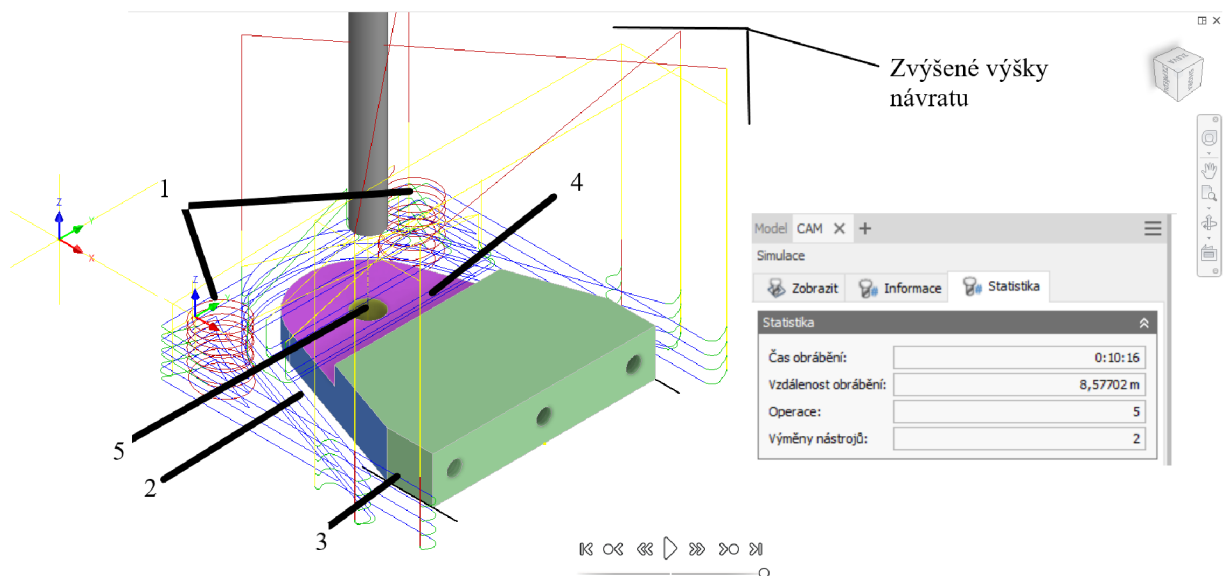
Obr. 46 Simulace horní desky.

Program pro **desku vozíku**. Přestože se jedná o největší součást s křížovým žebrováním, programování je díky funkcím nástroje Inventor CAM poměrně snadné. Opět je zvolen sled operací s ohledem na výměny nástrojů. Nejdříve je nastaveno vrtání šesti děr pro šrouby nástrojem č.5, poté vrtání děr pro řezání závitů nástrojem č.8 a nakonec vrtání čtyř děr pro upevnění k desky k vozíku nástrojem č.6. Vrtání bylo nastaveno s postupným lámáním třísek s parametry dle použitých nástrojů. Po vrtání bylo nastaveno frézování kruhového vybrání pro hlavy šroubů frézou č.1 dle postupu zmíněného výše. Jako poslední bylo nastaveno frézování křížového žebrování, dle postupu nastavení pro funkci 2D kapsy. Polotovár byl předem zúhlován a simulace byla nastavena pro jedno upnutí, viz obr. 47. Program je tedy celkem na pět operací a počítá se čtyřmi výměnami nástrojů. Čistý čas procesu obrábění bez doby výměny nástrojů, doby upnutí a manipulačních časů byl simulací vypočítán na 17 minut a 12 vteřin.



Obr. 47 Simulace obrábění desky vozíku.

Poslední součástí deskového typu je **bočnice desky vozíku**, které se budou vyrábět také dva identické kusy. Z hlediska programování je tato součást však poměrně odlišná od ostatních desek, viz obr. 48.

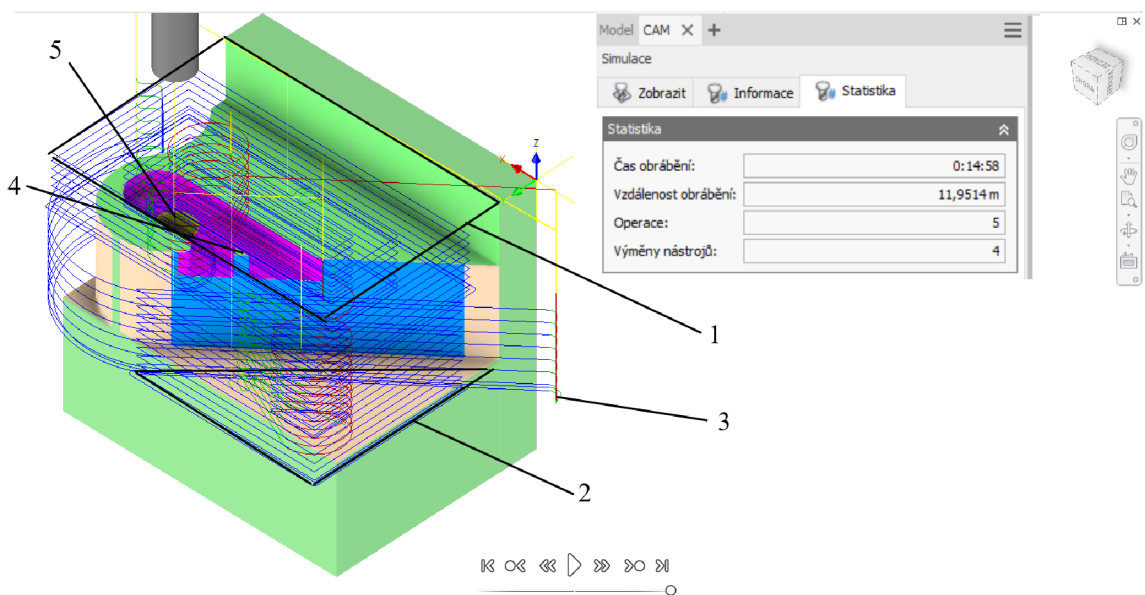


Obr. 48 Simulace obrábění bočnice desky vozíku.

Vzhledem ke geometrii součásti již nebylo možné polotovary upnout do svěráku, ale bylo třeba uvažovat způsob upnutí upínkou a podložit polotovary tak, aby fréza mohla zajet minimálně 0,5 mm pod spodní hranu, aby se nemuselo obrábět na 2 upnutí. S tímto předpokladem bylo naprogramováno pět operací a použity dva nástroje. Vzhledem k poměrně velkému množství odebíraného materiálu a k absenci vnitřních zaoblení byla

k obrábění zvolena fréza s průměrem 16 mm (nástroj č.3). První operací bylo hrubé definování tvaru pomocí funkce 2D kapsa. V nastavení výšek byla zvolena výška spodku s odsazením -1 mm. V záložce *Záběry* můžeme díky většímu nástroji předdefinovat hodnoty  $a_e$  dle vztahu 11 na 11,2 mm, dále byla předdefinována hloubka záběru na 4 mm a průměr šroubovice rampy byl zvýšen na 15,2 mm. Následně byla použita funkce 2D kontura pro dokončení tvaru z předchozí operace. Nástroj zůstává fréza č.3, ale vzhledem ke změně způsobu upnutí je v záložce *Výšky* potřeba předdefinovat výšku návratu, aby nedošlo ke kolizi nástroje s upínkou. Ta byla nastavena na z bezpečnostních důvodů nastavena na 60 mm nad obrobkem. Další operací 2D kontury bylo dosažení finálního tvaru součásti, u které platí stejná výška návratu jako u předchozí operace. Jako další byla funkcí 2D kapsa odfrézována dosedací plocha pro slider, kde byl pro lepší povrch zvolen záběr 2 mm a dokončovací krok 1 mm. Nakonec bylo nastaveno vrtání díry pro šroub po spojení se sliderem a to vrtákem č.10. Simulace byla vypočítána na 10 minut a 16 vteřin.

Program pro **držák hořáku**. Polotovarem je kostka, která byla předem zúhlovaná na maximální rozměry. Z geometrie součásti uvažujeme způsob upnutí ve svěráku a v NC programování bude obráběno na dvě upnutí. První upnutí je zobrazeno na obr. 49. V první operaci bylo funkcí 2D kapsa nastaveno odebrání kvádru nástrojem č.3 do hloubky 15 mm se záběrem 4 mm dokončovací krokem 1 mm, hodnota  $a_e$  je stejná jako u přechodného dílu, tedy 11,2 mm. Následuje operace pro odebrání dalšího většího objemu materiálu funkcí 2D kapsa. Vzhledem ke značné hloubce byl pro druhou operaci vyměněn nástroj za prodlouženou frézu (č.4). Po této operaci se mohlo přejít k programování frézování kontury držáku. Opět nástrojem č.4, ale úběry materiálu jsou již malé. Pro přesné obrobení kontury je třeba nastavit vhodné nájezdy a přejezdy nástroje. Jako další je nastaveno obrábění kapsy pro hlavu lízovaného šroubu. Vzhledem k rozměrům kapsy je třeba změnit nástroj na frézu č.2, pro kterou byl zvolen záběr 2,5 mm a stranový dokončovací krok 0,5 mm. Poslední operací prvního upnutí bylo předvrtání díry pro následné vystružení přesné díry.



Obr. 49 Simulace prvního upnutí držáku hořáku.

Na druhé upnutí držáku hořáku byl naprogramován úběr kvádrů podobně jako u první operace prvního upnutí za pomoci funkce 2D kapsa. Pro tuto operaci byl znovu nastaven souřadnicový systém a obecně upraveno globální nastavení. Nástroj byl zvolen č.3,  $a_p = 4$  mm,  $a_e$  zůstalo stejné a dokončovací krok zůstal také na 1 mm. Na obr. 50 je ukázka NC programu pro tuto poslední operaci. Čistý čas obrábění držáku hořáku je dle simulace 23 minut a 2 vteřiny. Časy ze simulací pro všechny součásti jsou uvedené v tabulce 19.

Tab. 19 Jednotlivé výrobní časy obrábění dle simulací.

Součást	Počet	Čas obrábění
Spodní deska	1	23 minut 22 vteřin
Bočnice	2	15 minut 50 vteřin
Horní deska	1	21 minut 59 vteřin
Deska vozíku	1	17 minut 12 vteřin
Bočnice desky vozíku	2	20 minut 32 vteřin
Držák hořáku	1	23 minut 2 vteřiny

Posledním krokem je **postprocessing** simulace pro vygenerování NC programu, který lze jednoduše zkopírovat/odeslat do řídicího systému na dílně, který je propojený se strojem. U stroje pak lze na ovládacím panelu jen vybrat daný NC program a po přichystání obrobku do uvažovaného smyslu upnutí a nastavení stroje program spustit. Ukázka jedné operace NC programu, viz obr. 50.

```

1252 1251 TOOL CALL 11 Z S3270
1253 1252 ; L Z+0 R0 FMAX M91
1254 1253 M126
1255 1254 M3
1256 1255 L X+57 Y+39 R0 FMAX
1257 1256 L Z+15 R0 FMAX
1258 1257 M8
1259 1258 CYCL DEF 32.0 TOLERANCE
1260 1259 CYCL DEF 32.1
1261 1260 CYCL DEF 203 UNIVERSALNI VRTANI ~
1262 Q200=+5 ;NASTAVENI BEZPECNE VZDALENOSTI ~
1263 Q201=-25.174 ;HLOUBKA ~
1264 Q206=728 ;POSUV PRO ZANORENI ~
1265 Q202=+2.225 ;HLOUBKA NAJETI ~
1266 Q210=0 ;PRODLEVA NA VRSKU ~
1267 Q203=-15 ;SOURADNICE PLOCHY ~
1268 Q204=+20 ;2. BEZPECNA VZDALENOST ~
1269 Q212=+0 ;SNIZENI ~
1270 Q213=10 ;PRERUSENI ~
1271 Q205=+2.225 ;MIN. HLOUBKA ZAVRTANI ~
1272 Q211=0 ;CASOVA PRODLEVA ~
1273 Q208=MAX ;POSUV NAVRATU ~
1274 Q256=+5 ;VZDAL. PRO PRERUSENI TRISKY
1275 1261 L FMAX M99
1276 1262 L Z+15 FMAX
1277 1263 M9
1278 1264 M5
1279 1265 ; L Z+0 R0 FMAX M91
1280 1266 M30
1281 1267 END PGM Drzak_hlavy_v3 MM

```

Projíždění rotačních os nejkratší cestou

START vřetena ve směru hodinových ručiček

Zapnutí přívodu procesní kapaliny

Vypnutí přívodu procesní kapaliny

STOP otáčení vřetena

Programový STOP a návrat do prvního bloku

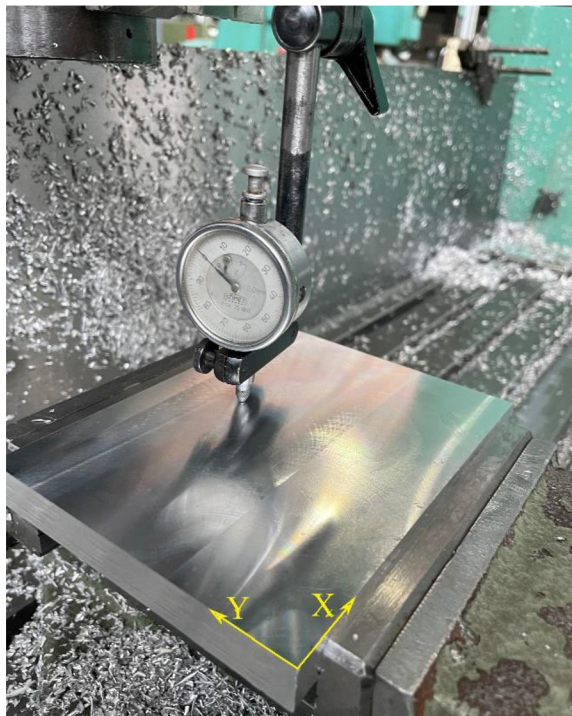
Obr. 50 Ukázka vygenerovaného NC kódu.

#### 4.4 Výroba součástí

Nyní je možné začít se samotnou výrobou. NC programy byly připraveny, polotovary zúhlovány, vymyšlen způsob upnutí do svěráku a pomocí upínky, seznam nástrojů připraven a ověřen na dílně. Jak již bylo zmíněno, pro výrobu byla zvolena 3 - osá CNC frézka FV 25, viz obr. 40 a na dokončení některých operací byla použita stolní vrtačka TOS V 20A.

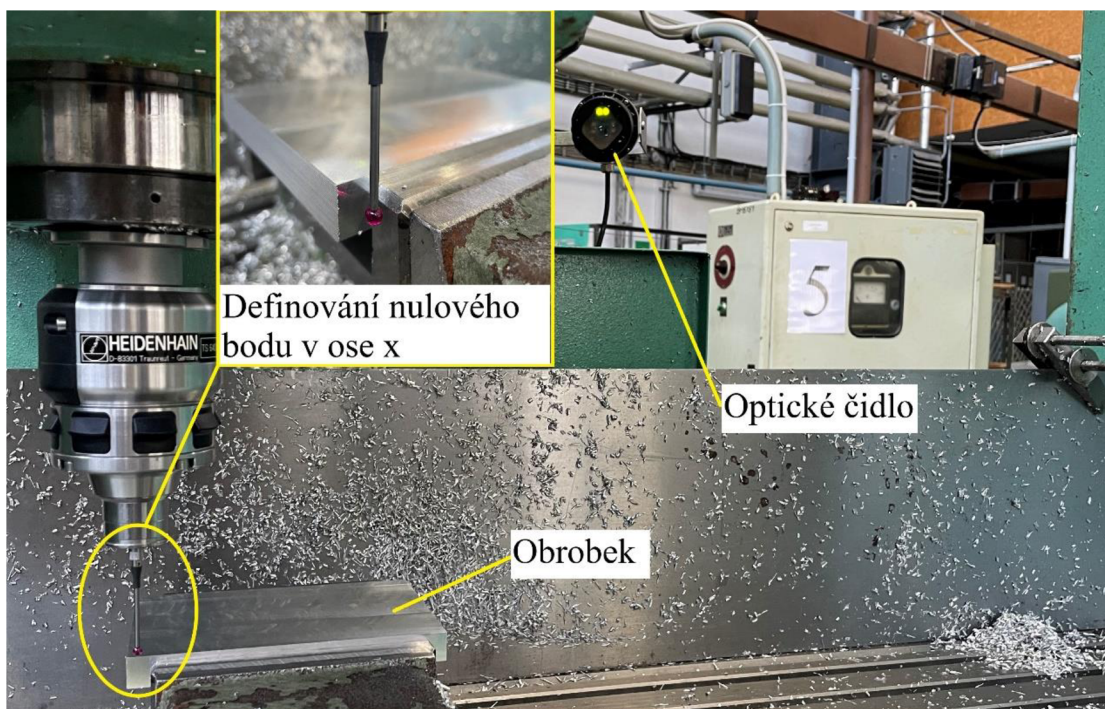
Jako procesní kapalina byl zvolen roztok s vodou mísitelným koncentrátem řezné kapaliny pro obrábění CIMSTAR<sup>®</sup> 597 od firmy CIMCOOL.

Postup při výrobě na dílně byl následující. Nejdříve se zúhlovaný polotovár upnul do svěráku za pomoci přesných kalených destiček zaručení pro rovinnosti. Upnutí obrobku, resp. jeho rovinnost byla následně zkontrolována pomocí úchylkoměru přejetím do kříže ve směru osy X a poté v ose Y, viz obr. 51. Po doladění polohy obrobku poklepáním byl stroji definovány nulové souřadnice v ose X a v ose Y.



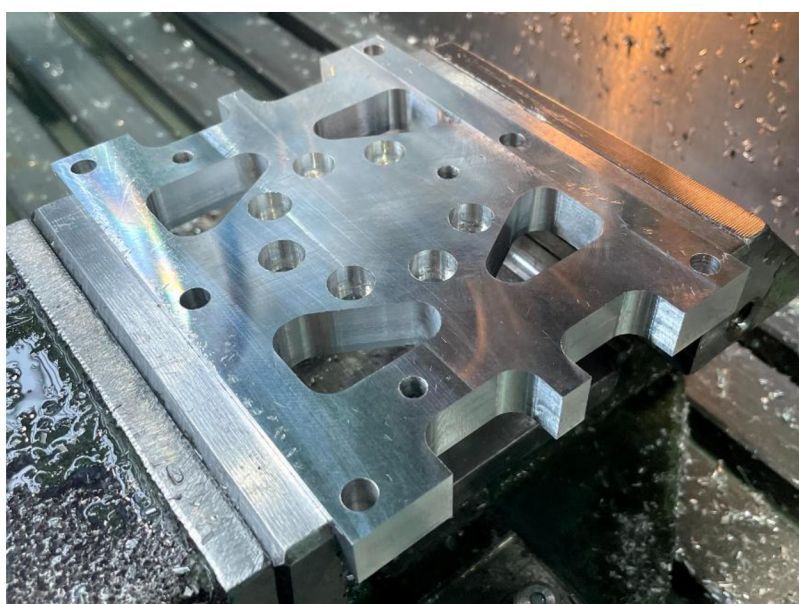
Obr. 51 Kontrola rovinnosti úchylkoměrem.

Definování nulových bodů proběhlo pomocí optické sondy Heidenhein, viz obr. 52. To bylo pro dosažení co nejvyšší přesnosti provedeno dvakrát pro každou osu. S takto nastaveným strojem lze přejít k upnutí nástroje do kleštinového upínače a jeho vložení do vřetena frézky. Pro kontrolu je NC program zkontrolován v řídicím systému stroje přímo na ovládacím panelu. Další možnou kontrolou předem vytvořeného programu je jeho spuštění tzv. na prázdno, tedy několik desítek milimetrů nad obrobkem. V případě, že je vše v pořádku lze přejít na další krok, kterým je definování nulového bodu v ose Z. V případě přítomnosti dostatečně velké plochy, o které víme, že bude obrobena můžeme sjet se zapnutými otáčkami nástrojem těsně nad obrobek a ručním ovládním s jemným posuvem posouvat nástrojem k obrobku, dokud se ostří nedotkne povrchu a v této pozici určit stroji nulový bod v ose Z. V opačném případě si lze pomoci např. vložení papíru mezi nástroj a obrobek. Tento úkon je nutné provést po každé výměně nástroje.



Obr. 52 Definování nulových bodů sondou Heidenhain.

Jako první byla obráběna **spodní deska**. V pořadí operací je první v programu vrtání děr pro šrouby, následuje výměna nástroje (a s ní spojené definování nulového bodu v ose Z) a vrtání děr pro budoucí řezání závitu. Výměna nástroje za frézu a vyfrézování postranních vybrání a kapes. Jakmile stroj dokončí program na první upnutí, je třeba obrobek upnout a znovu provést kontrolu rovinnosti a zadefinování nulových bodů pomocí sondy. Po kontrole programu lze zahájit obrábění. Vzhled desky po obrábění, viz obr. 53.



Obr. 53 Očištěná deska po obrábění na první upnutí.

Obdobným způsobem byla vyrobena i vrchní deska a deska vozíku. Podmínky obrábění byly dány programem a program vychytilán podle pracovních podmínek nástrojů a stroje. V případě součástí, kde byla uvažována výroba dvou kusů, byl přístup mírně odlišný. Po upnutí polotovaru, kontrole rovinnosti a zadefinování nulových bodů v osách X a Y byl vedle obrobku nainstalován systém dorazu, který v případě vložení druhého polotovaru zajistí stejnou polohu a není již nutné provádět proces sondování, čímž bylo dosaženo značné časové úspory. Jak již bylo řečeno, některé konstrukční prvky nebyly pro svou jednoduchost programovány předem, ale až přímo na ovládacím panelu stroje. To se týká i bočnic, u kterých byly tímto způsobem vyvrtány díry pro budoucí řezání závitů M6 pro spojení motorové klece, nebo také bočnic desky vozíku, kde byly vrtány stejné díry, viz obr. 54. S bočnicemi desky vozíku se dále váže již dříve zmiňovaný problém s upnutím.



Obr. 54 Systém dorazu a obrábění neprogramovaných prvků.

Jelikož se u těchto součástí obrábí značná část obvodu polotovaru (přibližně 66 %), není vhodné polotovary upínat do svěráku. Proto bylo upnutí polotovaru vyřešeno upínkou a plastovou podložkou, do které může fréza zajet bez rizika vzniku defektu, viz obr. 55.



Obr. 55 Způsob upnutí obrobku pomocí upínky a plastové podložky



V NC programech také nebylo programováno srážení hran. To bylo provedeno ručně, společně s odjehlováním a přípravou děr pro následné řezání závitů, popř. vystružení. Odjehlování a příprava děr byla zhotovena pomocí ručních kuželových záhlubníků (přímý/zalomený), sadou pilníků a dokončení smirkovým papírem a netkanou brusnou vlnou s hodnotou zrnitosti 400–600.

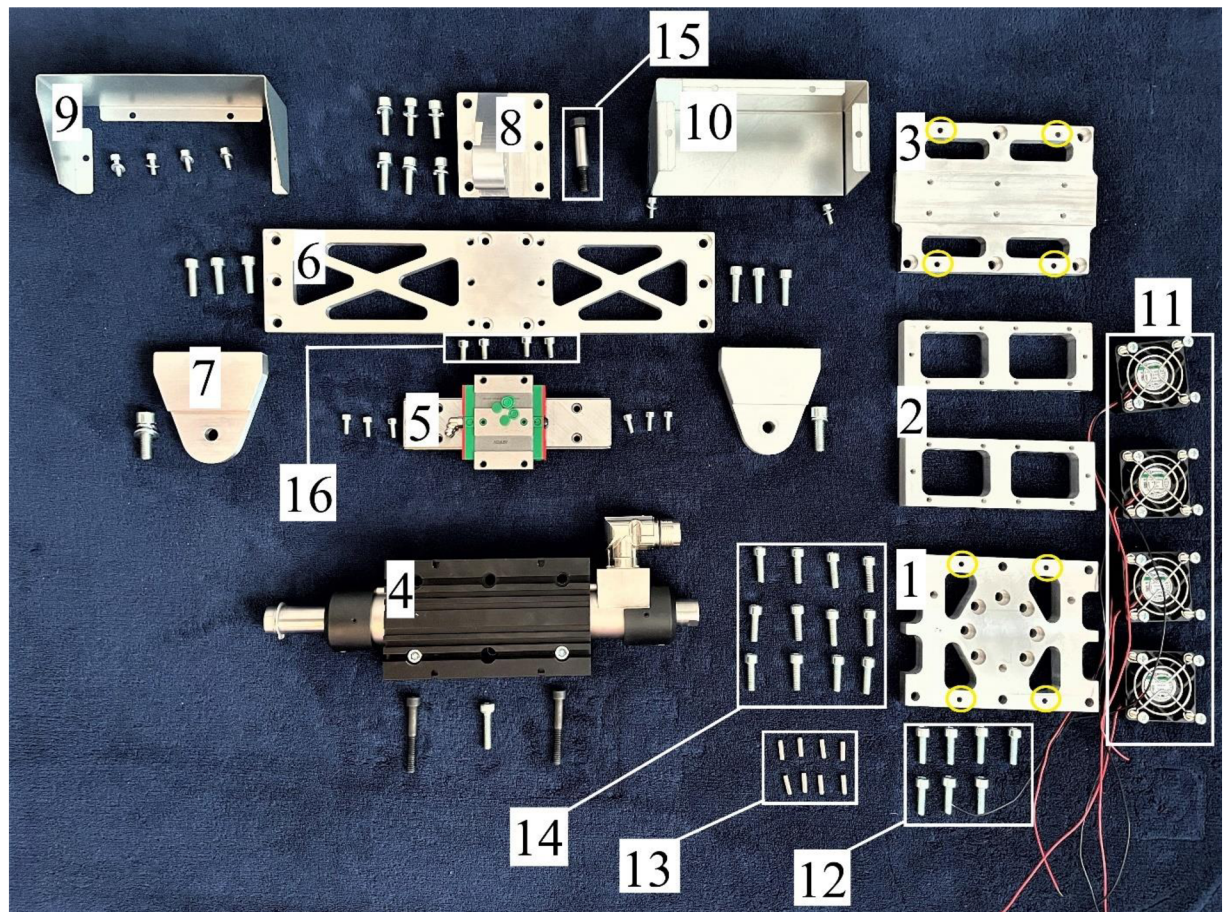
Takto připravené díly byly následně doobrobeny na stolní vrtčce TOS V 20A, kde byly řezány závity průběžných děr. Pro řezání závitů byla použita závitorezná hlava umožňující nástroji pohyb v axiálním směru, díky čemuž je dosaženo osově kompenzace rozdílu stoupání závitu a posuvu stroje. Byly použity závitníky DIN 371/B M6 6H HSSE a DIN 371/B M4 HSSE, tedy dokončovací závitníky se strojním lamačem. Proces probíhal při otáčkách  $280 \text{ min}^{-1}$  následujícím způsobem. Nejdříve se obrobek upnul do volného svěráku a nastavil co nejpřesněji do osy vřetene. Vzhledem k vůlím v závitorezné hlavě je systém díra–závitník samostředící. Následně byl se zapnutými otáčkami vřetene pomalým plynulým pohybem vyřezán závit za pravidelného přívodu řezné kapaliny. Pro vyjetí závitníku z vyřezaného závitu byly změnen směr otáček vřetene neprodleně po zhotovení požadované délky závitu. Závity slepých děr byly zhotoveny tak, že se pomocí výše zmíněného systému předřezalo jenom několik málo otáček závitu a následně byl závit dokončen ručně strojním závitníkem DIN 371 M6 RSP40, který disponuje drážkami pro odvod třísky. Všechny závity byly následně zkontrolovány závitovým kalibrem.



Obr. 56 Řezání závitů.

#### 4.5 Montáž zařízení

S takto připravenými součástmi lze přejít k samotné montáži. Co se týče spojení motorové klece, v konstrukčním návrhu se pro přesnost spojení a tuhost sestavy počítalo s kolíkovým spojením. S tím se pojí vytvoření přesně vystružených děr pro jejich uložení. Pro tuto operaci byl zvolen postup svrtání a skolíkování. To znamená, že se součásti nejdříve složí a jemně spojí šrouby, následně se pomocí rýsovací desky, přesného úhelníku, svěráku a úchylkoměru ustaví součásti do požadované polohy. Byla určena základní součást a strana, vůči které se budou ustavovat ostatní součásti. Po dosažení kolmosti/rovnoběžnosti požadovaných stěn byly šrouby pevně dotaženy. U takto zafixované součásti byly v předem definovaných místech důlkovačem vyraženy důlky pro předvrtání děr. Pro skolíkování byly zvoleny kalené kolíky DIN 6325 4 x 16. Proto byly na vrtačce TOS V 20A předvrtány díry vrtákem o průměru 3,9 mm a z otáčkové řady vrtačky (71, 112, 180, 710, 450, 1120, 1800 a 2800) zvoleny otáčky  $1800 \text{ min}^{-1}$  a následně vystruženy na požadovaný průměr. Takto přichystané díly už je možné sestavit do finální podoby zařízení. Všechny součásti kromě samotného hořáku připravené k sestavení jsou na obr. 57.



Obr. 57 Díly připravené k montáži. Číselné pozice odpovídají popisu v tabulce 20.

Tab. 20 Popis.

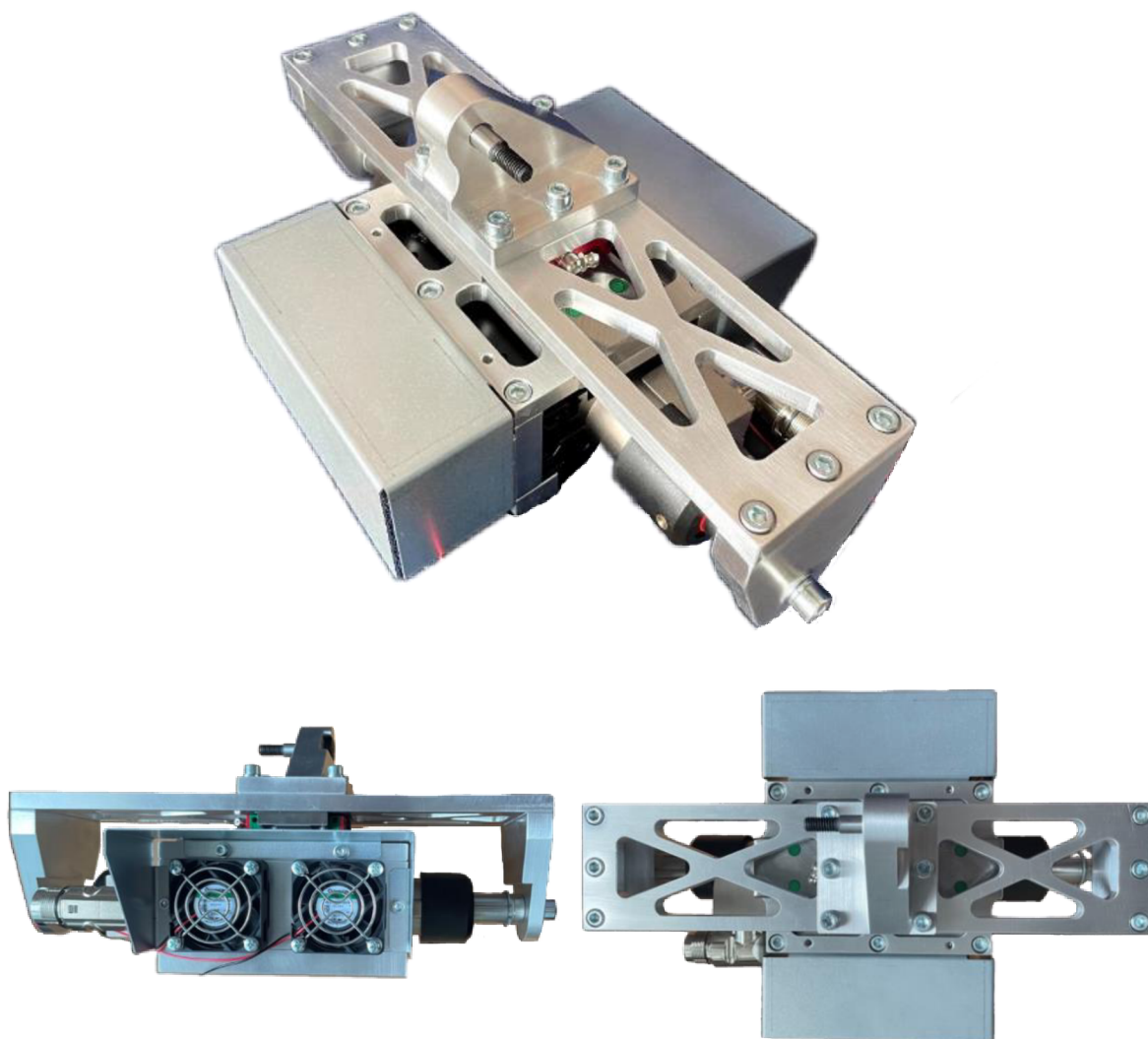
Číslo	Popis	Počet ks
1	Spodní deska	1
2	Bočnice motorové klece	2
3	Vrchní deska motorové klece	1
4	Sestava lineárního motoru + 2 x DIN 912 M6 x 45	1
5	Lineární vedení + 6 x DIN 912 M4 x 10	1
6	Deska vozíku + 6 x DIN 912 M6 x 20	1
7	Bočnice desky vozíku + DIN 912 M8 x 20 s DIN 127	2
8	Držák hořáku + 6 x DIN 912 M6 x 20 s DIN 127	1
9	Zadní kryt + 4 x DIN 912 M4 x 10 s DIN 125	1
10	Přední kryt + 2 x DIN 912 M4 x 10 s DIN 125	1
11	Ventilátory s mřížkou	4
12	DIN 912 M6 x 20 na upnutí desky k rotačnímu stolu	7
13	Kalené kolíky DIN 6325 4 x 14 k motorové kleci	8
14	DIN 912 M6 x 30 na spojení motorové klece	12
15	Lícovaný šroub DIN 609 M8 x 45	1
16	DIN 912 M5 x 10 pro spojení desky k vozíku	4

Pozn. Kompletní výkresová dokumentace, viz PŘÍLOHA 2.

Postup sestavení je následující:

1. upne se spodní deska k rotačnímu stolu, poté se usadí bočnice a definuje se jejich poloha kalenými kolíky a upevní šrouby,
2. vloží se sestava motoru a upevní šrouby,
3. vrchní deskou se uzavře motorová klec jejíž poloha se rovněž definuje kalenými kolíky a následně se upevní šrouby,
4. nyní lze usadit kolejnici lineárního vedení bez vozíku a postupně upevnit v poloze šrouby a otvory zaslepit vložkami,
5. k volnému vozíku se přišroubuje deska vozíku s ohledem na přívod maziva do vozíku a s ohledem na asymetrii desky na straně konektoru motoru,
6. ke slideru se přišroubuje na pevně jedna bočnice,
7. na druhou stranu se přiloží druhá a na rovné desce se srovná do roviny s první bočnicí a upevní v poloze dotažením šroubu,
8. slider se natočí bočnicemi do výchozí polohy a na kolejnici se nasune vozík s deskou,
9. na každé straně desky vozíku se jemně spojí prostřehy šrouby bočnice s deskou,
10. po kontrole usazení se vloží zbylé šrouby a dotáhnou na přibližně 70 %,
  11. přišroubuje se držák hořáku s vloženým lícovaným šroubem,
  12. přišroubují se ventilátory s mřížkami,
  13. přiloží se kryty ventilátorů a upevní šrouby.

Dle výše uvedeného postupu se zařízení sestaví přímo u stroje. Některé kroky lze pro urychlení sloučit. Na obr. 58 je znázorněno sestavení bez šroubů pro upnutí k rotačnímu stolu.



Obr. 58 Sestavené zařízení.

#### 4.6 Zhodnocení konstrukce a výroby

Přestože byl konstrukční návrh a výrobní postup pečlivě promyšlen a konzultován, vyskytlo se několik komplikací, které by v případě výroby následujících kusů zařízení bylo vhodné konstrukčně vyřešit.

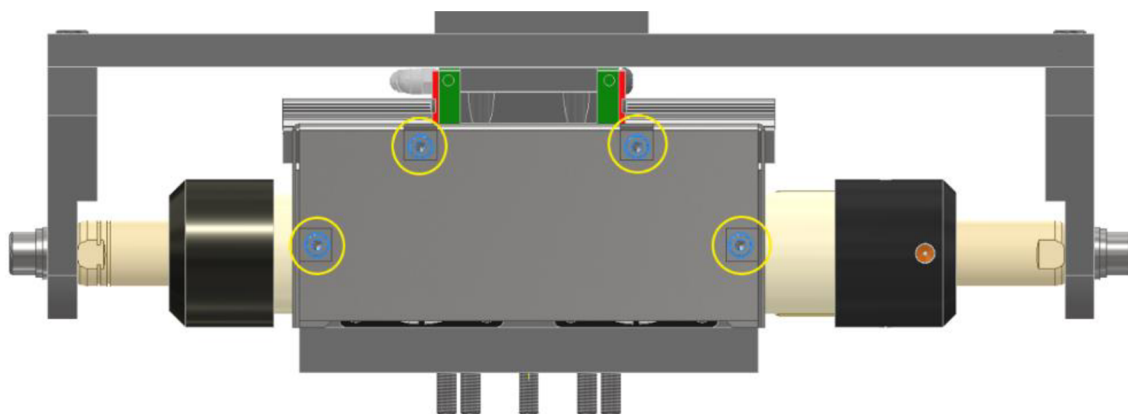
**První problém**–komplikovaný přístup k upnutí spodní desky k rotačnímu stolu. Současná konstrukce v místě upnutí uvažuje uložení sestavy lineárního motoru, viz obr. 36, resp. obr. 39 (vpravo).

**Druhý problém**–vyřešení upnutí, resp. změna konstrukce předního krycího plechu. Při současné konstrukci totiž není možné upevnit kryt šrouby ve všech čtyřech uvažovaných místech, neboť přístup k hlavám šroubů je zablokovaný. Navrhované řešení je vyříznutí čtyř

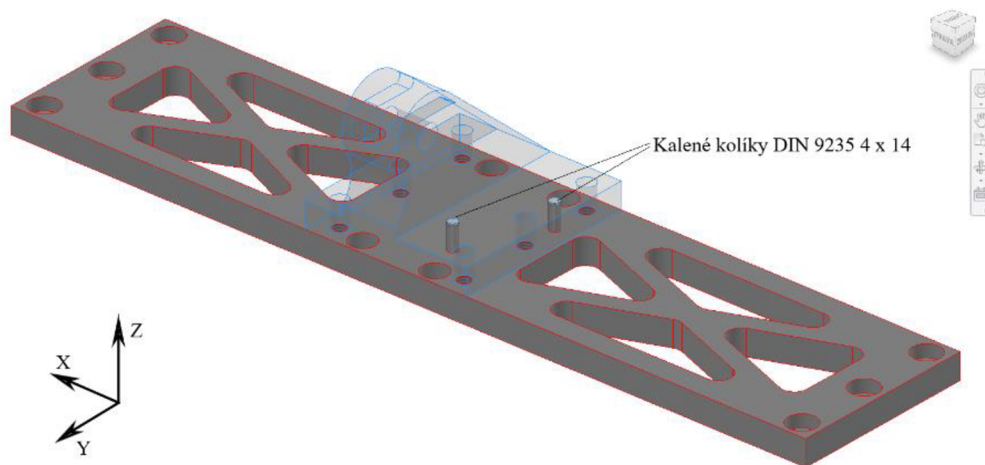
malých otvorů pro přístup k hlavám, viz obr. 59. Tím je ale částečně narušeno krytí ventilátorů. Proto se v tomto případě uvažuje použití prachových filtrů, které by se vložily mezi ventilátor a jeho mřížku.

**Třetí problém**—absence způsobu definování přesné polohy držáku hořáku vůči desce vozíku. Zde by bylo vhodné použít stejný systém jako u motorové klece, tedy definování polohy kaleným kolíkem. V praxi by to znamenalo přesně uložit držák na desce pomocí rýsovací desky, úhlooměru, případně svěráku, zkontrolovat úchylkoměrem a zafixovat v dané poloze šrouby. Následně by se do takto spojených dílů ze spodní strany desky vyvrtaly a vystružily jedna nebo dvě díry, čímž by vznikly přesné otvory pro kolíky, které by do budoucna definovaly polohu držáku. Navrhované řešení je znázorněno na obr. 60.

**Námět pro budoucí vylepšení** je kabelové vedení, neboť už kabely od samotných ventilátorů v tomto neuspořádaném řešení působí chaoticky. Řešením by mohlo být plechové/plastové kabelové vedení upevněné po obvodu spodní desky. Do budoucna by bylo vhodné vyřešit i vedení kabelu od lineárního motoru a navařovací hlavice.



Obr. 59 Návrh řešení přístupu k upevnění předního krytu.



Obr. 60 Návrh řešení přesného spojení držáku a desky.

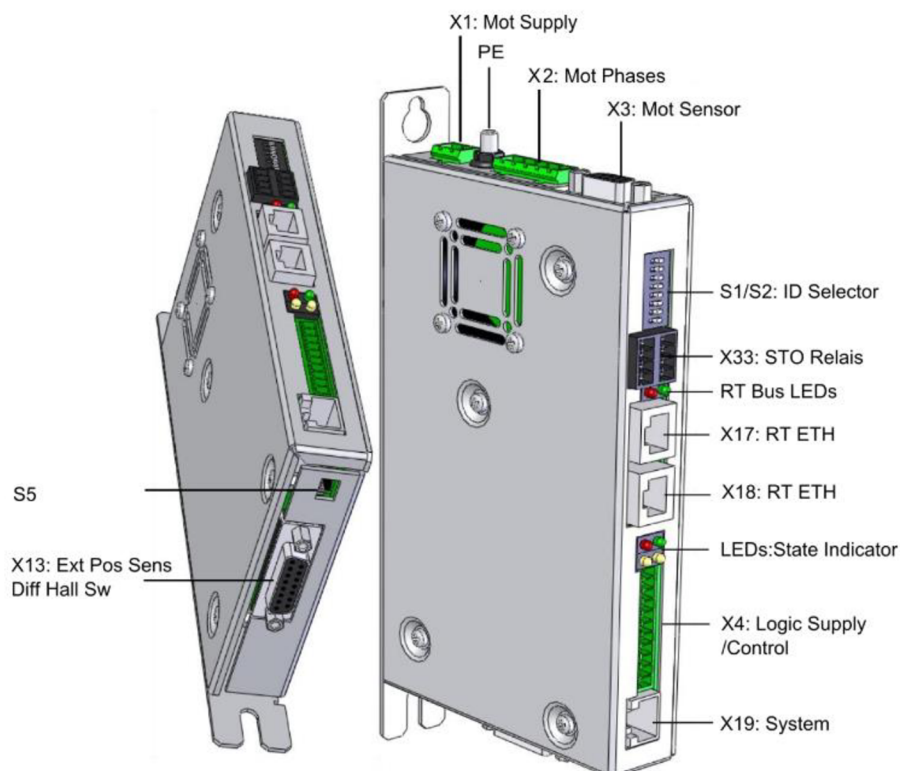
## 5 ŘÍZENÍ LINEÁRNÍHO MOTORU

Pro řízení použitého lineárního motoru (PS01-37x120F-HP-C) byl vybrán servokontroler LinMot C1250-CC-XC-0S-000. Jedná se o řídicí jednotku s příkazovým rozhraním CC-Link umožňující rychlé a jednoduché programování pohybových profilů a polohování v rámci zdvihu motoru. Jednotka je vybavena analogovými a digitálními vstupy a výstupy, které umožňují komunikaci s nadřazeným řídicím systémem skrze běžně užívané sběrnice, nebo Ethernet.

Z hlediska systémové integrace lze tímto kontrolerem řídit hned několik 1/2/3-fázových motorů, jako například rotační servomotory (ventilátory), jejichž řízení může být zakomponováno do jednoho řídicího návrhu. Mimo jiné lze řídicí jednotku rozšířit o různé periferní zařízení, jako například poziční sensory, spínače a mechanické brzdy.

Charakteristické vlastnosti servokontroleru C1250:

- absolutní a relativní pozicování,
- vnitřní databáze pohybových sekvencí pro maximálně 255 poloh,
- ukládání křivkových profilů,
- učicí režim polohování,
- rozhraní Master Encoder
- konfigurace v prostředí softwaru LinMot Talk 6.9



Obr. 61 Popis konektorového rozhraní servokontroleru C1250. [62]

## 5.1 Software LinMot Talk 6.9

V této podkapitole bude naznačen obecný postup při budoucím programování a optimalizaci oscilačního pohybu. Dále budou představeny dva demonstrativní základní způsoby, jak lze chod motoru nastavit.

Jak již bylo řečeno, konfiguraci řídicí jednotky lze uskutečnit v prostředí softwaru LinMot Talk 6.9. Jedná se o počítačový nástroj, ve kterém lze nastavit pohybové profily lineárního motoru, napodobovat programovatelný logický automat, sledovat proměnné a reagovat na zpětnou vazbu softwaru v podobě hlášení a chybových zpráv.

Konfigurace probíhá nastavením parametrů kontroleru, motoru, jeho pohybu a ostatních funkcí. Veškeré parametry konfigurace mají v tomto softwaru přiřazené identifikační číslo, tzv. *UPID*–z angl. *Unique Parameter ID*.

Důležitou funkcí softwaru LinMot Talk 6.9 je tzv. *Pnp*–*Plug and Play*. Jedná se o funkci, která v případě připojení motoru k řídicí jednotce automaticky vyplní veškeré parametry týkající se připojeného hardwaru. Jediné, co je třeba v tomto případě vyplnit jsou parametry požadovaného pohybu a uvažovaného břemene.

### 5.1.1 Konfigurace kontroleru pro oscilační pohyb navařovací hlavice

V programu je také možné provést konfiguraci v offline režimu. Postup konfigurace byl v případě programování oscilačního pohybu navařovací hlavice následující:

1. nejdříve byla zvolena možnost *Create offline* a z nabídky vybrán příslušný kontroler. V tomto případě byl zvolen kontroler C1250-CC-XC-0S-000 s rozhraním CCLinkIEFB,
2. v nástroji *Motor Wizard*, umístěném v horní nástrojové liště byl:
  - z nabídky vybrán použitý stator a slider, vyplněny vlastnosti břemene a ostatní silové účinky (hmotnost břemene = 3500 g, odpor koncových stěrek = 11 N).
  - zvolen způsob a parametry automatického určení nulového bodu slideru–posuv slideru v záporném směru rychlostí  $0,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  dokud nedojde k mechanickému zastavení slideru kontaktem se statorem,
  - byla definována výchozí poloha slideru, tak se v této poloze hořák naházel přesně v ose rotace otočného stolu,
  - definován souřadný systém zařízení a určeno maximální vysunutí slideru.

### 5.1.2 Programování oscilačního pohybu

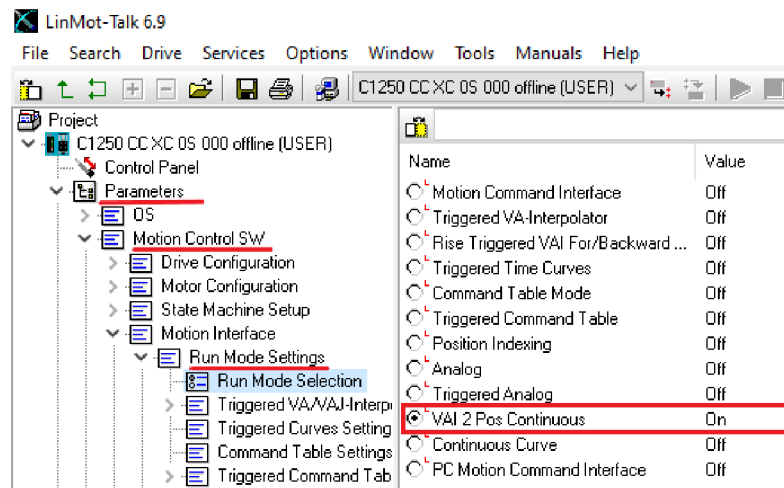
S takto nastaveným motorem a řídicí jednotkou je možné přejít k programování oscilačního pohybu. Jak bylo zmíněno v kapitole *1.3.1 Oscilační pohyb navařovací hlavice*, vzorů oscilačního pohybu je hned několik. V této podkapitole bude znázorněn postup programování kontinuálního pohybu z bodu do bodu, tedy tzv. *Point to point*, který bude s největší pravděpodobností použit ve finálním procesu. Program bude vytvořen dvěma

způsoby. První způsob bylo využití provozního režimu, nabízeného v záložce *Parameters/Motion control SW/Motion interface/Run mode selection*. Druhý způsob, který byl pro programování použit, bylo sepsání krátkého logického cyklu v prostředí příkazové tabulky–*Command Table*.

### 5.1.3 První metoda–*VAI 2 Positions Continuous*

Jedná se o funkci polohové interpolace maximální rychlosti a zrychlení. Motor se v tomto režimu pohybuje mezi pozicí A a B s trapézovým průběhem, tedy s fází konstantní rychlosti, které předchází fáze zrychlení a s fází zpomalení na konci pohybového profilu. Pohyb tam, resp. zpět je realizován na základě stavu spínače *true/false*, kde je pro každý z těchto stavů předem nastaven úkon, který má být zhotoven. Postup pro nastavení kontinuálního oscilačního pohybu touto funkcí byl následující:

1. ve stromě projektu byl zvolen požadovaný pohybový režim,



Obr. 63 Nastavení pohybového režimu.

2. konfigurace pozic, rychlosti, zrychlení a zpomalení pro pohyb tam a zpět pro hodnoty spínače *Trig Rise* (true) a *Trig fall* (false),

Name	Trig Rise Config	Value	Name	Trig Fall Config	Value
<input checked="" type="checkbox"/> SetPoint Generator		VAI	<input checked="" type="checkbox"/> SetPoint Generator		VAI
Position		10 mm	Position		0 mm
Max. Speed		0.075 m/s	Max. Speed		0.075 m/s
Acceleration		5 m/s <sup>2</sup>	Acceleration		5 m/s <sup>2</sup>
Deceleration		5 m/s <sup>2</sup>	Deceleration		5 m/s <sup>2</sup>

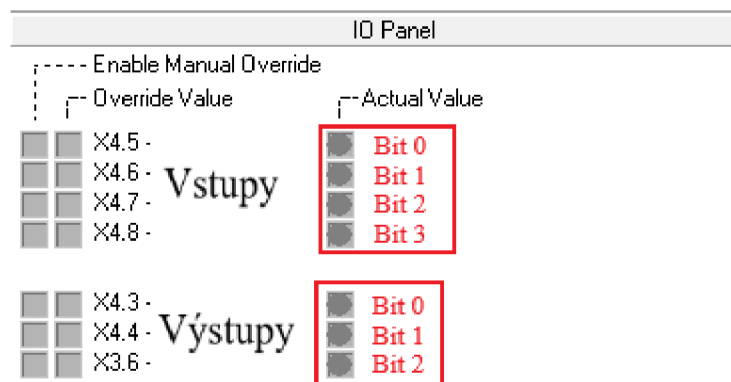
Obr. 64 Nastavení pozice, rychlosti, zrychlení a zpomalení.

3. nastavení funkce digitálního vstupu X4.6 na *Trigger* (Spínač) v záložce *Parameters/Motion Control SW/ Drive Config./ I/O Definitions/ Dig In X4.6*,
4. V případě online režimu lze takto nastavený pohybový režim manuálně spustit/zastavit v záložce *Control Panel*, případně exportovat do řídicí jednotky.



### 5.1.4 Druhá metoda–příkazová tabulka

Druhou metodou nastavení kontinuálního pohybu slideru z bodu A do bodu B je nastavení krátkého logického cyklu v prostředí příkazové tabulky, viz obr. 68. Výhodou této metody je, že sepnutím spínače do stavu *true* dojde k oscilaci slideru a v případě přepnutí spínače do stavu *false* dojde k zastavení pohybu. Pohyb je opět realizován pomocí VA polohové interpolace, s trapézovým profilem pohybu. Při použití cyklů a logických podmínek, je nutné systému určit, které vstupy má kontrolovat. Přehled vstupů a výstupů je znázorněn na obr. 65.



Obr. 65 Přehled vstupů, výstupů a příslušných bitů řídicích jednotek série C1X00.

Pro tuto akci je třeba nastavit bitovou masku–*bit mask*, která vybere potřebné bity z registru vstupů a výstupů. Hodnota bitové masky je dána vztahem 12. V podstatě je bitová maska logickou funkcí AND.

$$\text{hodnota bitové masky} = 2^{(\text{číslo bitu})} \quad (12)$$

Jelikož se jedná o kontinuální pohyb, je nutné nastavit způsob, jak cyklus zastavit. V cyklu bude mimo jiné zahrnuta možnost nastavení prodlevy v koncových bodech. Postup sepsání příkazů do jednotlivých řádků tabulky je následující:

1. první řádek–nastavení bitové masky a programové zastavení,

The screenshot shows the configuration for a condition entry. The 'Entry ID' is 1, and the 'Entry Name' is 'Podmínka'. The 'Motion Command Category' is 'Conditions' and the 'Motion Command Type' is 'IF Masked X4 Input Value Equals (262xh)'. Both the 'X4 Bit Mask' and 'X4 Compare Value' are set to '0002h'. The 'Table Command ID IF TRUE' is set to '3' and the 'Table Command ID IF FALSE' is set to '2'. Red boxes and arrows highlight these values with the following annotations:  
 - A red box around '0002h' is labeled 'HODNOTA BITOVÉ MASKY DLE VZTAHU 12'.  
 - A red box around '3' is labeled 'Řádek s příkazem při nesplnění podmínky'.  
 - A red box around '2' is labeled 'Řádek s příkazem při splnění podmínky'.  
 - A red box around the 'Apply' button is also visible.

Obr. 66 Nastavení počáteční podmínky.

2. druhý řádek–stanovení operace při nesplnění podmínky. Zde bylo nastaveno, aby nebyla vykonána žádná operace–*No operation*,
3. třetí řádek–nastavení pohybu z A do B pomocí funkce VA interpolace,

ID	Name	Type	Par 1	Par 2	Par 3	Par 4	Par 5	Par 6	Par 7	Par 8	Sequenced Entry
1	Podmínka	IF Masked X4 Input Value Equals (26...	X4 Mask: 0002h	X4 Bit Values: 0...	True Cmd I...	False Cmd ID: 2...					None
2	STOP	No Operation (000xh)									None
3											

Obr. 67 Nastavení pohybu z A do B.

4. čtvrtý řádek–podmínka vyčkání na konec předchozího pohybu pro následující krok,
5. pátý řádek–určení časové prodlevy na konci vykonaného pohybu. V případě nežádoucí prodlevy lze nastavit hodnotu na 0,
6. šestý řádek–pohyb z bodu B do A pomocí funkce VA interpolace. Stejně nastavení jako 3. řádek, ale pozice nastavená na–*Target position = 0 mm*,
7. sedmý řádek–stejný jako 4. řádek,
8. osmý řádek–nastavení volitelné prodlevy na konci pohybu z B do A. Zde se v kolonce pod automatickým spuštěním následujícího příkazu zvolí řádek č.1 a tím je cyklus uzavřen.

ID	Name	Type	Par 1	Par 2	Par 3	Par 4	Par 5	Par 6	Par 7	Par 8	Sequenced Entry
1	Podmínka	IF Masked X4 Input Value Equals (26...	X4 Mask: 0002h	X4 Bit Values: 0...	True Cmd ID: 3...	False Cmd ID: 2...					None
2	STOP	No Operation (000xh)									None
3	Pohyb TAM	VAI Go To Pos (010xh)	Pos: 10 mm	Vel: 0.075 m/s	Acc: 5 m/s^2	Dec: 5 m/s^2					4 (Pcdm. prodle...
4	Podm. prodlevy	Wait until Motion Finished (211xh)									5 (Prodleva)
5	Prodleva	Wait Time (210xh)	Time: 0 ms								6 (Pohyb ZPET)
6	Pohyb ZPET	VAI Go To Pos (010xh)	Pos: 0 mm	Vel: 0.075 m/s	Acc: 5 m/s^2	Dec: 5 m/s^2					7 (Pcdm. prodle...
7	Podm. prodlevy	Wait until Motion Finished (211xh)									8 (Prodleva)
8	Prodleva	Wait Time (210xh)	Time: 0 ms								1 (Podmínka)
9											

Obr. 68 Kompletní cyklus sepsaný v příkazové tabulce.

**ZHODNOCENÍ:** Z hlediska navařování bude prodleva pravděpodobně nežádoucí z důvodu nerovnoměrného tepelného zatížení navařované vrstvy po její šířce. Stejně tak se dá očekávat požadavek na vyšší hodnoty zrychlení a zpomalení, aby se hořák pohyboval co nejdelší dobu konstantní rychlostí pro homogenitu navařené vrstvy.

Spuštění naprogramovaného cyklu pak zahrnuje tyto kroky:

1. přenesení na kontrolér přes funkci *Download to Drive*,
2. v záložce *Control Panel* stisknutím zeleného trojúhelníku tento cyklus načíst,
3. následně se uvolní kontrolní funkce motoru, kde je třeba zvolit manuální ovládání v panelu *Control/0: Switch on* a zapnout automatické definování nulového bodu, resp. přednastavené výchozí pozice, viz kapitola 5.1.1 *Konfigurace kontroleru pro oscilační pohyb navařovací hlavičky*,
4. v panelu *Motion Command Interface* v kolonce *Command type* zvolit jako zdroj příkazovou tabulku a v tabulce nastavit *Command Table Entry ID* na hodnotu 1,
5. v panelu *Motion Command* pak stačí povolit manuální řízení a automatické přírůstkové načítání kroků.
6. V panelu *IO Panel* povolit ovládání pinu X4.6 a v panelu *Motion Command Interface* odeslat příkaz a tím spustit pohyb motoru.

The screenshot displays the control software interface with several panels:

- Control Panel:** Lists various control functions such as '0: Switch On', '1: Voltage Enable', etc., with their respective interfaces and parameter settings.
- Status Panel:** Shows operational status indicators like '0: Operation Enabled', '1: Switch On Active', etc., along with status words and error codes.
- Monitoring Panel:** Displays connection status (Offline), firmware status (xxx), motor status (xxx), and other monitoring data.
- IO Panel:** Shows the 'Enable Manual Override' section with a list of pins (X4.3 to X4.8) and their current states.
- Motion Command Interface:** Features a table for command parameters and a 'Send Command' button.

Name	Difs	Description	Scaled Value	Int. Value (Dec)	Int. Value (Hex)
Header	0	200kh: Start Command Ta...	8193	8193	2001h
1. Par	2	Command Table Entry ID	1	1	0001h

Obr. 69 Prostředí ovládacího panelu

## 5.2 Předpokládané zatížení motoru

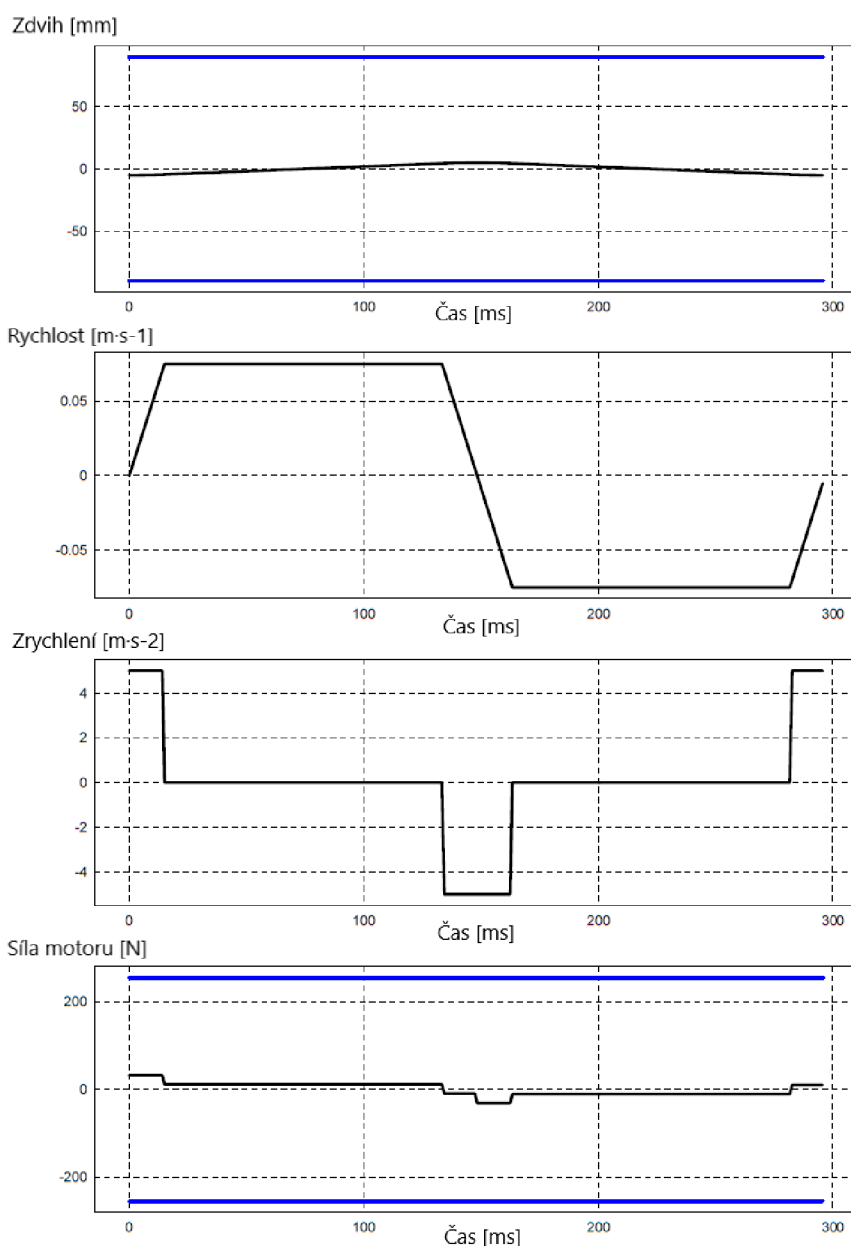
V kapitole 3.2.2 *Tubulární synchronní lineární motor s lineárním vedením* byl proveden kontrolní výpočet zátěže pohonu pro extrémní hodnoty vstupních parametrů. V této kapitole bude proveden výpočet zátěže lineárního motoru s reálnou hodnotou hmotnosti břemene a skutečné parametry oscilačního pohybu.

Tab. 21 Nastavení simulace.

<b>Stator</b>	PS01-37x120F-HP
<b>Varianta</b>	<i>High Performance</i>
<b>Slider</b>	PL01-20x300/240-HP
<b>Řídicí jednotka</b>	C1250-CC-XC-0S-000
<b>Vstupní napětí</b>	DC link 72 V
<b>Chlazení</b>	Aktivní i pasivní
<b>Maximální síla motoru</b>	255 N
<b>Maximální proud</b>	15 A
<b>Hmotnost slideru</b>	630 g
<b>Hmotnost břemene</b>	3500 g
<b>Třecí odpor (koncových stěrek)</b>	11 N
<b>Zdvih</b>	10 mm
<b>Rychlost</b>	0,075 m·s <sup>-1</sup>
<b>Zrychlení/zpomalení</b>	5/5 m·s <sup>-2</sup>

Tab. 22 Výsledky simulace.

<b>Celkový čas pohybu (pohyb tam a zpět)</b>	296,7 ms
<b>Střední hodnota síly/maximální síla</b>	14,3/31,6 N
<b>Nejvyšší krátkodobé přetížení</b>	0,62 %
<b>Nejvyšší teplotní zatížení</b>	2,61 %
<b>Průměrný/maximální příkon</b>	3,24/14,3 W



Obr. 70 Grafické znázornění zátěže a průběhu oscilačního pohybu.

### 5.2.1 Zhodnocení výsledků simulace

Z výsledků simulace je patrné, že je návrh z hlediska využití maximálního potenciálu značně naddimenzovaný pro dané použití. Je nutné si však uvědomit uvažované použití, které je charakteristické prašným prostředím, zvýšenou teplotou od navařované vrstvy a v neposlední řadě dlouhodobý kontinuální provoz zařízení. Z výsledků i grafických znázornění průběhu lze vyčíst, že dané zařízení zvládne s rezervou i dynamičtější pohyby, jak z hlediska silového zatížení a tepelného zatížení, tak i z hlediska maximálního zdvihu za současného splnění podmínky frekvence pohybu 2–3 Hz.

## 6 VÝPOČET VÝROBNÍCH NÁKLADŮ A PRODEJNÍ CENY

V této kapitole bude provedena kalkulace dle nejběžněji používaného všeobecného kalkulačního vzorce, který se skládá z následujících položek: [63]

1. přímý materiál (polotovary, nástroje a ostatní komponenty)
2. přímé mzdy (práce obsluhy obráběcích strojů, montáž),
3. ostatní přímé náklady (spotřeba energie, odpisy strojů),
4. výrobní režie–položky 1 až 4 + režijní náklady (stanovené koeficientem),
5. správní režie–položky 1 až 5 + správní náklady (stanovené koeficientem),
6. odbytové náklady–položky 1 až 6 + odbytové náklady (stanovené koeficientem),
7. zisk a stanovení ceny výrobku.

Dle výše zmíněného vzorce budou spočteny jednotlivé nákladové položky. Přesné vyčíslení režijních nákladů je v případě výroby pendlovací hlavice komplikované, proto jsou pro jednotlivé skupiny režijních nákladů stanovené tyto koeficienty: [63,64]

1. koeficient výrobní režie  $K_{vr} = 1,1$ . Zahrnuje náklady na nepřímý materiál dílny, nepřímé mzdy a opotřebením nástrojů,
2. koeficient správní režie  $K_{sr} = 1,1$ . Zahrnuje náklady na správu a řízení výrobního zařízení (podniku, dílny),
3. koeficient odbytové režie  $K_{or} = 0,02 \cdot Vr + 0,05 \cdot (\text{přímý materiál})$ . Zahrnuje náklady na skladování, propagaci, prodej a expedici.

**První krok**–určení nákladů na přímý materiál. Do přímého materiálu byly zařazeny náklady na polotovary, nástroje, spojovací materiál a ostatní komponenty zařízení. Podrobný rozpočet přímého materiálu je uveden v PŘÍLOZE 1. Cena přímého materiálu, viz tab. 23.

Tab 23. Náklady na přímý materiál pendlovací hlavice.

Položka	Cena bez DPH [kč]
<b>Polotovary</b>	635,9
<b>Nástroje</b>	3545,8
<b>Komponenty</b>	40323,66
<b>Spojovací materiál</b>	316
<b>CELKEM</b>	<b>44820,6</b>

**Druhý krok**–výpočet nákladů na mzdy a s tím spojené strojní časy pro obrábění na frézce a pro obrábění na vrtačce. Tabulky s konkrétními časy pro každý stroj, viz PŘÍLOHA 1. V tab. 24 je znázorněn celkový čas na výrobu zařízení a v tab. 25 jsou uvedeny náklady na mzdy.

Tab 24 Celkový čas na výrobu zařízení.

	Frézování	Vrtání	Montáž	Součet
<b>Čas v hodinách</b>	13,739	2,783	1,667	<b>18,189</b>

Tab. 25 Výpočet nákladů na mzdy operátora obráběcích strojů.

Pozice dle CZ-ISCO [65]	Hodinová mzda [65]	Počet hodin	Náklady na mzdy
<b>7223</b>	163 Kč	18,189	<b>2964,8 Kč</b>

**Třetí krok**–výpočet ostatních přímých nákladů, do kterých byla zařazena spotřeba energie a odpisy strojů. Pro výpočet byl použit maximální příkon strojů vynásobený koeficientem spotřeby energie s hodnotou 0,3. Ve výpočtu byla použita průměrná cena elektřiny za kWh. Ve výpočtu odpisů byly použity orientační nákupní ceny strojů. Hodnoty jsou uvedené v tab. 26.

Tab. 26 Výpočet ostatních přímých nákladů.

Spotřeba energie						
Stroj	Maximální příkon [kW]	Koeficient spotřeby*	Cena Kč/kWh	Provozní čas [h]	Spotřeba el. energie [kWh]	Náklady [kč]
<b>Frézka</b>	7,5	0,3	4,10	13,739	30,913	126,7
<b>Vrtačka</b>	1,5	0,3	4,10	2,783	1,252	5,1
Odpisy						
Stroj	Pořizovací cena [kč]	Sazba odpisů 1.rok	Odpisy [kč]	Podíl nákladu na výrobní čas [kč]	Součet ostatních přímých nákladů	
<b>Frézka</b>	1 000 000	11 %	110 000	213	<b>366,8 Kč</b>	
<b>Vrtačka</b>	105 000	11 %	11 550	22		

\*Koeficient spotřeby energie [66]

Celková hodnota přímých nákladů je rovna součtu nákladů na přímý materiál, na přímé mzdy a ostatních přímých nákladů, viz tab. 27.

Tab.27 Celkové přímé náklady.

Přímý materiál	Přímé mzdy	Ostatní přímé náklady	Součet
44820,6 Kč	2964,8 Kč	366,8 Kč	<b>48152,2 Kč</b>

**Čtvrtý krok**–režijní náklady. Výpočet režijních nákladů dle výše uvedených vztahů je uveden v tab. 28.

Tab. 28 Určení režijních nákladů.

Výrobní režie			
Základ	Přírůstek	Hodnota přírůstku	Hodnota režie
48152,2 Kč	10 %	4815,2 Kč	52967,4 Kč
Správní režie			
Základ	Přírůstek	Hodnota přírůstku	Hodnota režie
52967,4 Kč	10 %	5296,7 Kč	58264,1 Kč
Odbytová režie			
Základ 1/2	Přírůstek 1/2	Hodnota přírůstku 1/2	Hodnota režie
52967,4/48152,2 Kč	2/5 %	1059,3/2407,6 Kč	<b>61731 Kč</b>

Z tabulky 28 vyplývá, že úplné vlastní náklady na výrobu pendlovací hlavice pro plošné navařování jsou **61 731 Kč**. Pro stanovení prodejní ceny byl zvolen princip „náklady + zisk = cena“.

**Poslední krok**–určení marže a stanovení prodejní ceny, viz tab. 29.

Tab. 29 Stanovení prodejní ceny na základě marže.

Úplné vlastní náklady	Marže	Cena bez DPH	DPH	Cena s DPH
61 731 Kč	30 %	80 250,3 Kč	21 %	<b>97 103 Kč</b>



## 6.1 Vyhodnocení

Pro výpočet úplných vlastních nákladů na výrobu pendlovací hlavice pro plošné navařování byl použit všeobecný kalkulační vzorec, který je zároveň i vzorcem cenové kalkulace. Z výpočtu je zřejmé, že podstatnou část nákladů tvoří režijní náklady. Obecně platí, že režijní náklady jsou jedním z hlavních zdrojů ke snižování celkových nákladů, a to pomocí jejich řízení. Vzhledem k prostředí, ve kterém probíhala výroba a zároveň k prototypovému charakteru výrobku bylo prakticky nemožné přesně určit režijní náklady a tím pádem ani řídit jejich vliv na celkové náklady. Přibližná výše režijních nákladů byla vypočtená na základě koeficientů typických pro strojírenství.

Prostor pro snižování nákladů je tak limitován především na přímé náklady, které lze snížit například důkladnějším technologickým naplánováním výroby, které by snížilo výrobní časy, případně omezilo potřebu více strojů na výrobu. Z hlediska spotřeby přímého materiálu, jako jsou polotovary a nástroje však významný prostor ke snižování nákladů není.

V případě požadavku na snížení celkových nákladů by bylo nutné provést mnohem hlubší rozbor jednotlivých složek všeobecného kalkulačního vzorce, prostřednictvím rozpočtů a nákladových kalkulací.

## ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout a vyrobit zařízení, které by zajistilo oscilační pohyb navařovací hlavičky při plošném navařování ochranné vrstvy Inconel<sup>®</sup> 625 na membránové stěny ve spalovacích komorách energetických zařízení, kde čelí agresivním korozivním podmínkám, které způsobují omezení životnosti nechráněných stěn na dobu několika měsíců.

V rešeršní části projektu byly představeny typy membránových stěn, druhy jejich opotřebení, alternativní způsoby ochrany stěn a vysvětlena důležitost oscilačního pohybu navařovací hlavičky, která spočívá nejen ve zvýšení produktivity a kvality navařené vrstvy, ale i v samotné proveditelnosti procesu z hlediska synergie jednotlivých návarů. Z uvedených možností realizace oscilačního pohybu byly pro výsledné použití uvažovány dva typy pohonů, ze kterých byl do další fáze projektu zvolen tubulární lineární motor, který vyniká mimořádnými kinematickými a dynamickými vlastnostmi při zachování kompaktních rozměrů.

Ze dvou vzniklých návrhů byl pro následnou výrobu zvolen druhý návrh, ve kterém bylo efektivněji vyřešeno, jakým způsobem realizovat oscilační pohyb, jak zajistit dostatečnou volnost a rovnoměrnost pohybu vzhledem ke geometrii membránových stěn, jak zajistit chlazení systému a ochránit náchylné součásti před cizími částicemi nejen z navařovacího procesu. Pro zhotovení zařízení bylo nutné vyrobit deset součástí, ze kterých osm bylo vyrobeno v prostředí dílny VUT ÚST. Pro tyto součásti byl naplánován postup výroby, vytvořeny simulace obrábění, ze kterých byl vygenerován NC program, který byl následně použit při výrobě na frézce FV 25 CNC A. Operace řezání závitů a vystružování byly pro časovou úsporu zhotoveny na stolní vrtačce TOS V 20A. Z hlediska konstrukce bylo dodatečně zjištěno několik problémů, které byly společně s jejich řešením popsány v kapitole 4.6 *Zhodnocení konstrukce a výroby*.

Pro vyrobené zařízení byl vytvořen program oscilačního pohybu ve formě logického cyklu s volně nastavitelnými parametry v prostředí softwaru LinMot Talk 6.9. Takto přichystaný program umožňuje v budoucnu snadnou optimalizaci oscilačního pohybu v závislosti na navařovacím procesu.

Z technicko – ekonomického hlediska byly pro vyrobený prototyp všeobecného kalkulačního vzorce vypočteny výrobní náklady na základě kterých byla stanovena doporučená prodejní cena zařízení.

Výsledkem projektu je funkční zařízení, návrh řešení na jeho řízení a nákladová i cenová kalkulace. Tato pendlovací hlavička bude použita jako dílčí komponenta poloautomatického navařovacího zařízení, sloužícího k navařování ochranných vrstev na rozměrné membránové stěny za účelem několikanásobného prodloužení jejich životnosti. Takové prodloužení životnosti pro energetická zařízení znamená značné finanční úspory ve smyslu snížení spotřeby membránových stěn a eliminace potřeby přerušování provozu, které souvisí s jejich výměnou.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. VOESTALPINE BÖHLER WELDING. *Cladding solutions for the waste to energy industry* [online]. Düsseldorf, Německo, 2019, 12 s. [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.voestalpine.com/welding/Services/Downloads>
2. Protective coatings. SEFAKO S.A [online]. Sędziszów, Polsko, 2016, [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://sefako.pl/en/offer/powloki-ochronne>
3. SONGYA, Tian, Adnan SAIFAN, Gui PENGQIAN, Imran DAWY a Bassiouny SALEH. Development of an Automatic Welding System for the Boiler Tube Walls Weld Overlay. *Metals* [online]. 2020, roč. 10, č. 9, 16 s. 1241. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/9/1241/htm>
4. DEPARTMENT OF THE ARMY. *Central Boiler Plants*. Headquarters, 1989, 354 s. Dostupné také z: [https://www.wbdg.org/FFC/ARMYCOE/COETM/tm\\_5\\_650.pdf](https://www.wbdg.org/FFC/ARMYCOE/COETM/tm_5_650.pdf)
5. BUECKER, Brad. *Basics of Boiler and HRSG Design*. Tulsa, Oklahoma: PennWell Books, © 2002, 170 s. ISBN 0-87814-795-0. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=ita4n4LM-PQC&printsec=frontcover&hl=cs#v=onepage&q&f=false>
6. FLANAGAN, G. T. H. *1483105334: Marine engineering series*. 3rd edition. Oxford: Elsevier, 2013, 128 s. ISBN 0434906069. Dostupné také z: <https://drive.google.com/file/d/1-35Mn7YN5Ym4mii8T5U1Gj1GIWJjz4qZ/view>
7. *Pressure parts* [online]. Jilin, China, 2017 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <http://en.hengtao.cn/product/15.html>
8. *Bright Hub Engineering: Understanding the Boiler Furnace Wall Construction* [online]. 2020, 2020 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.brighthubengineering.com/marine-engines-machinery/44329-understanding-the-boiler-furnace-wall-construction/#tangent-tube>
9. SONGYA, Tian, Adnan SAIFAN, Gui PENGQIAN, Imran DAWY a Bassiouny SALEH. *Development of an Automatic Welding System for the Boiler Tube Walls Weld Overlay: Metals*. China, 2020. Dostupné také z: <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/9/1241/htm>
10. DLOUHÝ, Tomáš. *Stavba kotlů: Přednáška č.5*. Praha, 2019. Dostupné také z: <http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/StK-p5.pdf>. Přednáška. ČVUT.
11. NOVÁK, Pavel. *Koroze kovů*. Praha, 2016. Dostupné také z: <https://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Koroze%20kov%C5%AF.pdf?redirected> Elektronický studijní materiál. VŠCHT.
12. ČÍHAL, Vladimír. *Flue gas desulphurisation corrosion control*. Praha: SVÚOM, © 2010, 140 s. ISBN 978-80-87444-00-9. Dostupné také z: <https://ndk.cz/view/uuid:127d09b0-4146-11e7-a34b-005056827e51?page=uuid:1cbaa4a0-5d20-11e7-94b3-005056825209>

13. UNIFIED ALLOYS. *What is a pitting resistance equivalent number (PREN)?* [online]. 2021 [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <https://www.unifiedalloys.com/blog/pitting-resistance-pren/>
14. NOVÁK, P. *Druhy koroze kovů*. Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství VŠCHT Praha, 2005. Dostupné také z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_magistri/KPU/koroze%20druhy%20vscht.PDF](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KPU/koroze%20druhy%20vscht.PDF)
15. *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*. Second Edition. McGraw-Hill Education, ©2011. ISBN 9780071743006. Dostupné také z: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071743006/chapter/chapter24>
16. OPTIMIZA. *Optimiza: High temperature corrosion* [online]. 2020 [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <https://optimiza.es/en/high-temperature-corrosion/>
17. KASTNER, W., M. ERVE, N. HENZEL a B. STELLWAG. *Erosion corrosion in power plant piping systems*. Erlangen, Federal Republic of Germany: Siemens, 1990, 94 s. Dostupné také z: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/22/038/22038332.pdf>
18. DLOUHÝ, Tomáš. *Stavba kotlů: Přednáška č. 12*. Praha, 2019. Dostupné také z: <http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/StK-p12.pdf>
19. *ČSN 41 1418: Ocel 11 418*. Vítkovice, 1993, 12 s. Dostupné také z: <https://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/Vysledky.aspx>
20. *P235GH: nelegovaná teplotně odolná ocel pro tlakové nádoby a bezešvé trubky* [online]. 17.01.2014 [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://pdms-help.webnode.cz/news/p235gh-tepelne-odolna-ocel-pro-tlakove-nadoby/>
21. *ČSN EN 10028-2. Ploché výrobky z oceli pro tlakové účely – Část 2: Nelegované a legované oceli se stanovenými vlastnostmi pro vyšší teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. 36 s.
22. BÁR, Josef a Jozef MASARYK. *Zavedení výroby bezešvých trubek jakostního stupně 16Mo3*. Brno: ArcelorMittal Ostrava, 2011, 6 s. Dostupné také z: [http://konsys-t.tanger.cz/files/proceedings/metal\\_11/lists/papers/802.pdf](http://konsys-t.tanger.cz/files/proceedings/metal_11/lists/papers/802.pdf)
23. *TechMagazín: Nová ocel z Ostravy se uplatní zejména v energetice* [online]. 13.5.2015 [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/2138>
24. PENINSULAR STEEL TUBES. *P91\_T91*. Spain, 2014. Dostupné také z: <http://www.peninsulardevastagos.es/wp-content/uploads/P91-T91.pdf>
25. SALZGITTER FLACHSTAHL. *13CRMo4-5: Heat resistant pressure vessel steels*. Salzgitter, Německo, 2019. Dostupné také z: [https://www.salzgitter-flachstahl.de/fileadmin/footage/MEDIA/gesellschaften/szfg/informationen/materialproduktinformationen/warmgewalzte\\_produkte/eng/13crmo4\\_5.pdf](https://www.salzgitter-flachstahl.de/fileadmin/footage/MEDIA/gesellschaften/szfg/informationen/materialproduktinformationen/warmgewalzte_produkte/eng/13crmo4_5.pdf)
26. VOESTALPINE BÖHLER WELDING. *Thermal arc spraying with cored wires* [online]. Düsseldorf, Německo, 2019, 12 s. [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.voestalpine.com/welding/Services/Downloads>

27. LOSERTOVÁ, Monika. *Progresivní materiály: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, ©2012, 268 s. ISBN 978-80-248-2575-5. Dostupné také z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/PGM/Progresivni%20materialy.pdf>
28. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, ©2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3. Dostupné také z: <https://ndk.cz/view/uuid:b45814a0-b78a-11e6-a108-005056827e51?page=uuid:db2b0bd0-c655-11e6-bf97-005056825209>
29. GE POWER. *Amstar888®: Thermal Spray Cladding*. ©2017, 2 s. Dostupné také z: [https://www.ge.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en\\_US/documents/service/Boiler/amstar888-thermal-spray-cladding-fact-sheet.pdf](https://www.ge.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/service/Boiler/amstar888-thermal-spray-cladding-fact-sheet.pdf)
30. SPECIAL METALS CORPORATION. *INCONEL® Alloy 625: Datasheet*. USA, ©2013, 20 s. SMC-063. Dostupné také z: <https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-625.pdf>
31. LEE, Shang-Hsiu, Nickolas J. THEMELIS a Marco J. CASTALDI. *JOURNAL OF THERMAL SPRAY TECHNOLOGY. High-Temperature Corrosion in Waste-to-energy Boilers*. 16. USA, 2007, 7 s. DOI: 10.1007/s11666-006-9005-4. Dostupné také z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11666-006-9005-4.pdf>
32. SPECIAL METALS CORPORATION. *INCONEL® Alloy 686: Datasheet*. USA, ©2000, 15 s. SMC-024. Dostupné také z: <https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-686.pdf>
33. KUBÍČEK, Jaroslav. *Žárové nástřiky*. Brno, 2018, 123 s. Dostupné také z: <https://docplayer.cz/104232869-Zarove-nastriky-jaroslav-kubicek-vut-fsi-brno-2018.html>. Přednáška. VUT FSI.
34. *Plynové dynamické stříkání: Technologie dynamického stříkání studeným plynem*. Rusko. Dostupné také z: <https://knia.ru/cs/gazodinamicheskoe-napylenie-gazodinamicheskoe-napylenie-metalla-tehnologiya/>
35. JECH, D., P. KOMAROV, M. REMEŠOVÁ a I. ROČŇÁKOVÁ. *Technologie žárových nástřiků: Studený kinetický nástřik. EngineeringSK*. Brno: Ceitec, VUT. Dostupné také z: <https://www.engineering.sk/clanky2/stroje-a-technologie/3864-technologie-zarovych-nastriku>
36. Cold spray now can be used as a form of 3D printing for large components. *The Additive Report* [online]. 14.02.2020 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/additivereport/news/additive/cold-spray-now-can-be-used-as-a-form-of-3d-printing-for-large-components>
37. RUDYK, Martin. *Porovnání navařování svazkem elektronů a plazmou*. Brno 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 2008. 72 s., Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubíček.

38. DVOŘÁK, Milan a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie II: Svařování*. Brno: CERM, 2001, 238 s. ISBN 80-214-2032-4. Dostupné také z: <https://ndk.cz/view/uuid:a5f1c800-4f30-11e7-aac4-005056827e51?page=uuid:74306000-5d00-11e7-89ee-5ef3fc9ae867>
39. Svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách. *Https://eluc.kr-olomoucky.cz/* [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1807>
40. FRONIUS ČESKÁ REPUBLIKA S.R.O. *COLD METAL TRANSFER: Technologie*. 2. 2017, 16 s. Dostupné také z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/polozky-ke-stazeni>
41. *Technický týdeník: Nový standard ve svařovací technice: Proces CMT (Cold Metal Transfer)*. 2006. Dostupné také z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/novy-standard-ve-svarovaci-technice-proces-cmt-cold-metal-transfer\\_10667.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/novy-standard-ve-svarovaci-technice-proces-cmt-cold-metal-transfer_10667.html)
42. WEMAN, Klas a Gunar LINDÉN. *MIG welding guide*. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited, ©2006, 316 s. 1. ISBN 978-1-85573-947-5. Dostupné také z: <https://1lib.cz/book/1309856/855e25?id=1309856&secret=855e25>
43. KHOSHNAW, Fuad M. Hassen a Idrees A. HAMAKHAN. Automation capabilities for TIG and MIG welding processes. *Welding and Cutting*. 2006, (3). Dostupné také z: [https://www.researchgate.net/publication/291683643\\_Automation\\_capabilities\\_for\\_TIG\\_and\\_MIG\\_welding\\_processes](https://www.researchgate.net/publication/291683643_Automation_capabilities_for_TIG_and_MIG_welding_processes)
44. SNĚHOTA, M. Konstrukční návrh svařovacího stroje pro navařování tvrdokovu: diplomová práce. Ostrava: VŠB–Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra částí a mechanismů strojů, 2019, 64 s. Vedoucí práce: Pišťáček, D.
45. MADHUSUDHANA REDDY, G, C.V. SRINIVASA MURTHY, K. SRINIVASA RAO a K. PRASAD RAO. *Improvement of mechanical properties of Inconel 718 electron beam welds—influence of welding techniques and postweld heat treatment*. London: Springer-Verlag London Limited, ©2008, 10 s. Dostupné také z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00170-008-1751-7.pdf>
46. MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Třetí. MM publishing, ©2014, 684 s. ISBN 978-80-260-6780-1. Dostupné také z: <https://ndk.cz/view/uuid:3af97840-7e1c-11e5-ac67-005056827e51?page=uuid:b83d65b0-a418-11e5-b404-005056825209>
47. DRÁBEK, Michal. Životnost kuličkových šroubů při různém způsobu výroby a tepelného zpracování profilů valivých drah. Brno 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 60s., 3 přílohy. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.
48. Lineární osy 4Dyne s precizním kuličkovým šroubem. *EUFACTORY* [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://shop.eufactory.com/linearni-osy-4dyne/308-197-linearni-osy-4dyne-s-kulickovym-sroubem-rada-s.html>

49. Lineární motory. *ELUC - Elektronická učebnice* [online]. Olomouc, 2014 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/806>
50. *Technický týdeník: Průmyslové lineární motory LinMot*. 2006. Dostupné také z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/prumyslove-linearni-motory-linmot\\_16409.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/prumyslove-linearni-motory-linmot_16409.html)
51. NTI AG LINMOT & MAGSPRING. *LinMot: Linear Motors* [online]. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://linmot.com/products/linear-motors/>
52. Protective Coatings. *Sefako* [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://sefako.pl/en/offer/powloki-ochronne>
53. FRONIUS. *TPS/i Robotics Pull: manual*. 188 s. Dostupné také z: [https://manuals.fronius.com/html/4204260219/en.html#0\\_m\\_0000014769](https://manuals.fronius.com/html/4204260219/en.html#0_m_0000014769)
54. SMC EU. *Electric Actuator: Features Catalogue* [online]. 300 s. Dostupné také z: [https://static.smc.eu/pdf/LEF-F\\_EU.pdf](https://static.smc.eu/pdf/LEF-F_EU.pdf)
55. HIWIN. *Lineární vedení: Řada WE/QW*. 160 s. Dostupné také z: <https://www.hiwin.cz/cz/download>
56. LINMOT. *Motor Flanges: Catalogue*. 7 s. 0185-1029 (EN). Dostupné také z: <https://shop.linmot.com/E/linear-motors-accessories/fans/hv01-37-48.htm>
57. SUNON. *MF50151V2-1000U-A99: Specification for approval*. 14 s. Dostupné také z: <https://www.tme.eu/cz/details/mf50151v2-a99-a/ventilatory-dc-12v/sunon/mf50151v2-1000u-a99/>
58. GLEICH ALUMINIUM. *CERTAL®: Technický list*. 2016, 1 s. Dostupné také z: <https://gleich.de/cz/produkty/certal/>
59. ARCELOR MITTAL. *Magnelis®: Strategie myšlení*. 56 s. Dostupné také z: [https://www.evromat.cz/data/clanky/460/soubory/magnelis\\_1.pdf](https://www.evromat.cz/data/clanky/460/soubory/magnelis_1.pdf)
60. Frézka FV 25 CNC A. *Mkpouzitestroje.cz* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.mkpouzitestroje.cz/index.php?page=detail&id=1284>
61. PRŮMYSLVÝ KOMBINÁT DAČICE. *Technická dokumentace pro stroje V 20A, VS 20A, V20A/4, VS 32 A*. Dačice, 41 s. Dostupné také z: [http://www.kks.zcu.cz/dokumenty\\_ISO/KKS\\_manualy/Manual\\_vrtacky\\_V20\\_VS20\\_VS32.pdf](http://www.kks.zcu.cz/dokumenty_ISO/KKS_manualy/Manual_vrtacky_V20_VS20_VS32.pdf)
62. LINMOT. *C1250 Servo Drives: Installation Guide*. 2021, 32 s. Dostupné také z: <https://shop.linmot.com/E/ag7000.c12/servo-drives/drives-for-motors-p0x-&-pr0x/series-c1200/c1250-cc-xc-0s-000.htm>
63. SYNEK, Miloslav. *Manažerská ekonomika*. 5. Praha: Grada, 2011, 471 s. ISBN 978-80-247-3494-1. Dostupné také z: <https://ndk.cz/view/uuid:75c73690-f9ef-11e8-bc37-005056827e51?page=uuid:f404df60-5095-11e9-918e-5ef3fc9ae867>
64. BABIČKA, K. *Řízení nákladů v podniku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta podnikatelská, 2017. 63 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Alena Kocmanová, Ph.D. Dostupné také z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=171868](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=171868)

65. MINISTERSTVO PRÁCE A SOCIÁLNÍCH VĚCÍ. *Regionální statistika ceny práce: 7223 - Seřizovači a obsluha obráběcích strojů za rok 2020*. Dostupné také z: <https://data.mpsv.cz/web/data/vizualizace>
66. Skutečný příkon CNC. *Portál profesionálu strojírenství* [online]. 19.9.2013 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://forum.strojirenstvi.cz/viewtopic.php?t=12168>



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

<b>Zkratka</b>	<b>Popis</b>
<b>CMT</b>	Cold Metal Transfer
<b>PRE</b>	Pitting Resistance Equivalent
<b>MIG/MAG</b>	Metal Inert/Active Gas
<b>TIG</b>	Tungsten Inert Gas
<b>HVOF</b>	High Velocity Oxy–Fuel
<b>AC</b>	Alternating Current
<b>DC</b>	Direct Current
<b>SFI</b>	Spatter Free Ignition
<b>3D</b>	Prostorový
<b>2D</b>	Dvojměrný
<b>PG</b>	Svařovací pozice vertikální, směr dolů
<b>IP67</b>	Stupeň krytí před pevnými částicemi a vodou
<b>CAD</b>	Computer Aided Design
<b>CAM</b>	Computer Aided Manufacturing
<b>VUT ÚST</b>	Vysoké učení technické ústav strojírenské technologie
<b>CNC</b>	Computer Numerical Control
<b>TOS</b>	Továrny Obráběcích Strojů
<b>NC</b>	Numerical Control
<b>HSSE</b>	High Speed Steel (s příměsí kobaltu)
<b>UPID</b>	Unique Parameter Identification
<b>PNP</b>	Plug and play
<b>SW</b>	Software
<b>CC-Link</b>	Control and Communication link
<b>IEFB</b>	Industrial network with Ethernet Field Basic
<b>VAI</b>	Velocity Acceleration Interpolator
<b>HP</b>	High Performance
<b>DPH</b>	Daň z přidané hodnoty

<b>Symbol</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
<b>Re</b>	[MPa]	Mez kluzu
<b>Rm</b>	[MPa]	Mez pevnosti
<b>Rm<sub>r</sub></b>	[MPa]	Mez pevnosti při tečení
<b>Rp<sub>0,2</sub></b>	[MPa]	Smluvní mez kluzu
<b>E</b>	[GPa]	Modul pružnosti v tahu, Youngův modul
<b>A<sub>5</sub></b>	[%]	Celkové prodloužení
<b>Kv<sub>max</sub></b>	[-]	Maximální rychlost zesílení
<b>Kv</b>	[-]	Rychlost zesílení
<b>v</b>	[m·s <sup>-1</sup> ]	Rychlost oscilačního pohybu
<b>f</b>	[Hz]	Frekvence
<b>Xc</b>	[mm]	Souřadnice těžiště v ose X
<b>Yc</b>	[mm]	Souřadnice těžiště v ose Y
<b>Zc</b>	[mm]	Souřadnice těžiště v ose Z
<b>α</b>	[-]	Koeficient zatížení kuličkového šroubu
<b>T1 a T3</b>	[s]	Čas zrychlení a zpomalení
<b>T2</b>	[s]	Čas konstatní rychlost
<b>T4</b>	[s]	Čas ustavení do pozice
<b>Tc</b>	[s]	Celkový čas
<b>HBW</b>	[-]	Tvrдость dle Brinella
<b>ap</b>	[mm]	Záběr do hloubky
<b>ae</b>	[mm]	Šířka záběru
<b>Kvr</b>	[-]	Koeficient výrobní režie
<b>Ksr</b>	[-]	Koeficient správní režie
<b>Kor</b>	[-]	Koeficient odbytové režie
<b>Vr</b>	[-]	Výrobní režie

**SEZNAM PŘÍLOH**

**Příloha 1** Tabulky výpočtů přímého materiálu a výrobního času zařízení

**EXTERNÍ PŘÍLOHY**

**Příloha 2** Výkresová dokumentace pendlovací hlavice pro plošné navařování

## PŘÍLOHA 1

Tab. 1 Spotřeba času v minutách při obrábění na frézce.

Součást		Příprava polotovarů	Obrábění	Výměna nástrojů	Manipulační čas	Kontrola
Deska vrchní		40	21,983	15	10	10
Deska spodní		40	23,367	15	15	20
Bočnice klece		60	31,667	20	20	20
Deska vozíku		30	17,2	20	15	10
Bočnice desky v.		66	40,067	20	30	20
Držák hořáku		46	23,033	40	50	35
Deska vrchní		40	21,983	15	10	10
<b>CELKEM</b>	<b>824,317</b>	282	157,317	130	140	115

Tab. 2 Spotřeba času v minutách při obrábění na vrtačce.

Součást		Vrtání	Vystružování	Řezání závitů	Manipulační čas	Kontrola
Deska vrchní				6	5	5
Deska spodní				3	5	5
Bočnice klece				8	10	5
Deska vozíku				6	5	5
Bočnice desky v.				6	20	10
Držák hořáku			1		5	5
Sestava		16	16		10	10
<b>CELKEM</b>	<b>167</b>	16	17	29	60	45

Tab. 3 Spotřeba času v minutách na montáž.

Součást		Kontrola	Montáž
Sestava		60	40
<b>CELKEM</b>	<b>100</b>		

Tab. 4 Ceny polotovarů.

Polotovary		
Součást	Počet ks	Cena bez DPH [kč]
<b>Deska vrchní</b>	1	69
<b>Deska spodní</b>	1	107,6
<b>Bočnice klece</b>	1	95
<b>Deska vozíku</b>	1	122,2
<b>Bočnice desky v.</b>	1	107,6
<b>Držák hořáku</b>	1	134,5

Tab. 5 Ceny nakupovaných komponent.

Položka	Počet ks	Cena bez DPH [Kč]
<b>stator</b>	1	15612
<b>slider</b>	1	18110,33
<b>příruba</b>	1	1707,34
<b>přední těsnění</b>	1	514,95
<b>zadní těsnění</b>	1	525
<b>uložení slideru</b>	1	128,8
<b>lineární vedení</b>	1	2743,5
<b>ventilátory</b>	4	345,84

Tab. 6 Ceny použitých nástrojů.

Frézy	
Nástroj	Cena bez DPH [Kč]
DIN844L d8x20	261,8
DIN844L d6x20	248,2
DIN844L d16x32	469,2
DIN844L d16x60	609,5
DIN844L d8x20	261,8
Vrtáky	
DIN 338 d6,6	41,9
DIN 338 d5,5	34,7
DIN 338 d4,2	28,8
DIN 338 d5	30,6
DIN 338 d3,3	22,5
DIN 338 d9	64,8
DIN 338 d8,9	63
DIN 338 d3,9	20,7
Výstružníky	
DIN 212 4h8	172,1
DIN 212 9h7	358,1
Závitníky	
DIN 371/B M6	213,75
DIN 371/B M4	267,9